Ю.В. Матвиенко

ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА НАВИГАЦИИ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ

ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий им. М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Ю.В. Матвиенко

ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА НАВИГАЦИИ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ

технологии создания и применения

Владивосток 2024 ББК 32.875 УДК 681.883

Матвиенко Ю.В. Гидроакустические средства навигации подводных роботов. Технологии создания и применения. Владивосток : ИПМТ ДВО РАН, 2024, 320 с.

В монографии проанализирован опыт разработки и практического применения гидроакустических навигационных систем в составе подводных роботов, созданных ИПМТ ДВО РАН. Предложены новые технологии совершенствования систем с длинной базой для работы в широком диапазоне глубин и дальностей. Теоретически и экспериментально обоснованы методы значительного увеличения точности угловых измерений в системах с ультракороткой базой, основанные на применении многоэлементных антенн и статистических методов обработки сигналов. Рассмотрены вопросы сертификации навигационных средств и их рациональной организации в конкретных условиях применения. Книга насыщена материалами экспериментальных исследований и реальных работ с применением разработанных средств и содержит практические рекомендации по созданию навигационных приемников.

Будет полезна специалистам работающим в области подводной робототехники.

Ил. 135, табл. 22, библ. 152.

Рецензенты: член-корр. РАН, д.т.н А.Ф. Щербатюк, д.т.н. Ю.Н. Моргунов

Утверждено к изданию решением Ученого совета Института проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН

Работа подготовлена с использованием средств гранта Российского научного фонда № 23-61-10024, https://rscf.ru/project/23-61-10024/.

© Матвиенко Ю.В., 2024
© ИПМТ ДВО РАН, 2024
© ИП Мироманова И.В. Издательское оформление, 2024

ISBN 978-5-6052787-4-0

ПРЕДИСЛОВИЕ

Опыт ИПМТ ДВО РАН по созданию подводных роботов имеет уже более чем полувековую историю. За это время разработано несколько десятков образцов подводных робототехнических комплексов различного назначения, обладающих большой автономностью и дальностью действия, способных работать на всех глубинах Мирового океана. Залогом успешности этих работ стали исследования Института по широкому кругу проблем, относящихся к ключевым направлениям, определяющим эффективность новой техники. Важные результаты были получены при создании корпусных систем, систем управления, энергетики, движения, навигации. Широкое признание также получили исследования и практическая реализация методик выполнения обзорно-поисковых работ, выполняемых автономными подводными роботами в наиболее сложных и труднодоступных условиях на шельфе и в глубоком море.

Основные этапы исследований по этим направлениям, подтверждаемые постоянными реальными морскими работами, нашли отражение в ряде монографий Института (1981, 2000, 2005 гг.), подготовленных под руководством основателя отечественной подводной робототехники академика М.Д. Агеева Современные достижения в области создания многофункциональных подводных роботов и их систем были проанализированы в коллективной монографии «Подводные робототехнические комплексы. Системы, технологии, применение» (2018 г.). Важной особенностью этой работы стало развитие технологических аспектов применения подводных роботов, которое достигается интеллектуализацией систем бортового управления, повышением качества выполняемых работ за счет расширения состава измерительного оборудования и совершенствования навигационного обеспечения.

Вопросы навигационного обеспечения подводных роботов с использованием бортовых и внешних, прежде всего гидроакустических, средств также уже более полувека в центре внимания. В предлагаемой книге проанализирован опыт ИПМТ ДВО РАН по созданию и применению гидроакустических навигационных систем в составе комплексов АНПА.

В комплексе проблем, возникающих при разработке гидроакустических навигационных систем (ГАНС), можно выделить две наиболее важные. Первая, фундаментальная, – исследование законов распространения навигационных сигналов в сложной и неоднородной среде в глубоком и мелком море на больших дальностях с определением импульсных характеристик канала распространения и оценками эффективной скорости навигационных сигналов. Это одна из основных задач гидроакустики. Вторая, прикладная, - исследование технологий обработки навигационных сигналов для создания эффективных приемных систем, обеспечивающих измерение параметров сигналов с максимально возможной точностью, и решение навигационной задачи. Основное внимание в предлагаемой монографии уделено разработке технологий создания и применения гидроакустических средств навигации. Новые технические решения по навигационным системам с длинной и ультракороткой базой апробировались при выполнении экспериментальных работ в контролируемых условиях гидроакустического бассейна и морского полигона и подтверждались многочисленными реальными работами, обеспечивающими навигационно-информационную поддержку подводных аппаратов в мелком и глубоком море.

Среди наиболее значимых морских операций комплексов АНПА с применением разработанных гидроакустических средств навигации следует отметить уникальную работу в Арктике в условиях сплошного ледового покрытия с обеспечением задач навигации и управления на дальностях более 10 км. Не имеет аналогов и навигационное обеспечение работы АНПА по сплошному фотографированию участка морского дна площадью более 1 млн км².

Книга содержит 5 глав. Первая, вводная, в которой рассматриваются современные подходы к навигационному обеспечению подводных роботов и выделена особая роль гидроакустических средств как для прямого решения навигационной задачи, так и единственного средства для коррекции бортовой навигации в подводном положении. Во второй главе анализируются актуальные вопросы развития гидроакустических навигационных систем дальномерного типа, связанных, прежде всего, с оценками возможностей расширения их диапазона дальностей и увеличения точности за счет применения сложных сигналов. Эффективность предложенных технических решений, основанных на применении синхронных навигационных излучателей, размещенных у побережья мелководных или глубоководных районов в зоне действия подводных аппаратов, несущих на борту только приемник навигационных сигналов, подтверждалась многочисленными экспериментами. Материалы этой главы содержат результаты исследований, выполненных совместно с ТОИ ДВО РАН.

Третья глава посвящена разработке новых методов решения навигационной задачи угломерными системами с использованием ультракороткой измерительной базы. Создана математическая модель на основе применения малогабаритных антенн произвольной конфигурации, и показана перспектива достижения точности угловых измерений менее одной десятой градуса в системах с многоэлементными круговыми антеннами. Навигационная точность таких систем уже сравнима с точностью дальномерных систем.

В четвертой главе анализируются опыт создания реальных образцов аппаратуры ГАНС с длинной и ультракороткой базами, а также технологии оценки их характеристик в условиях специализированного полигона и при выполнении работ в мелком и глубоком море. В пятой предложены новые методы организации аппаратуры ГАНС для навигационно-информационной поддержки АНПА различного назначения и приведены примеры применения разработанных средств в составе комплексов различных АНПА при выполнении реальных морских работ.

Полвека назад первая ГАНС АНПА «Скат» для работы в условиях мелкого моря была разработана и испытана выпускниками Дальневосточного политехнического института В.Д. Плотским, Ю.В. Матвиенко и М.И. Серветниковым в ходе дипломного проектирования под руководством М.Д. Агеева и Б.А. Касаткина Далее, ключевой вклад в создание глубоководной системы внес В.В. Кобаидзе Создание современного комплекса ГАНС и его применение – результат творческой работы коллег из ИПМТ ДВО РАН – Ю.Г. Ларионова, А.В. Каморного, А.В. Ковалева, Р.Н. Рылова, Р.Ф. Нургалиева, А.В. Кузьмина, Ю.В. Ваулина, О.Ю. Львова и

др. Огромная заслуга успешного применения созданных образцов ГАНС в реальных работах принадлежала Н.И. Рылову.

При проведении экспериментов с использованием сложных сигналов большую поддержку оказали И.Н. Бурдинский со своими сотрудниками из Тихоокеанского государственного университета. Материалы для разработки предложений по созданию технических средств дальней навигации основаны на экспериментальных исследованиях лаборатории Ю.Н. Моргунова (ТОИ ДВО РАН).

Всем им автор выражает глубокую признательность.

Глава 1

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ СОЗДАНИЯ НАВИГАЦИОННЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПОДВОДНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ

Решение проблем навигационного обеспечения всегда являлось важным при создании АНПА, поскольку было очевидным, что без навигации невозможно выполнение даже самых простейших работ, тем более масштабных в условиях сложной подводной среды. Как отмечает журнал «Sea Technology», навигация – ключевой фактор эффективности подводных аппаратов [1]. Если неточно известны координаты точек, в которых с помощью АНПА выполнены работы или измерения, то такие данные теряют свою ценность или вовсе становятся бесполезными. В настоящее время в большинстве случаев требуется знание координат подводного робота с ошибкой не более 10 м, а в отдельных случаях с ошибкой менее 1 м. При этом продолжительность работы современного автономного подводного аппарата может составлять десятки и сотни часов, диапазон глубин от единиц метров до десятка километров, а дальность – до сотен километров.

1.1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ФОРМИРОВАНИЯ НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ

Методы подводной навигации по способу определения местоположения объекта можно разделить на три группы [2]:

1) методы счисления пути;

2) позиционные методы;

3) обзорно-сравнительные методы.

Методы счисления пути основаны на измерении составляющих вектора ускорения или скорости движения объекта и интегрирования во времени этих составляющих для получения координат местоположения относительно точки старта. Позиционные методы навигации основаны на измерении физических величин, дающих линию или поверхность положения. Для определения двух или трех координат местоположения объекта требуется иметь соответственно две или три взаимно пересекающиеся поверхности положения. В подводном положении эти методы реализуются гидроакустическими средствами.

Обзорно-сравнительные методы основаны на обзоре окружающей местности и сравнении ее изображения с картой или системой ориентиров, заложенных в памяти объекта навигации. К навигационным системам, использующим в своей работе обзорно-сравнительные методы, относятся также корреляционно-экстремальные навигационные системы (КЭНС).

На рис. 1.1 перечислены навигационные средства, применяемые на АНПА, и методы навигации, которые в них используются. Большой объем информации, получаемый таким комплексом навигационных средств, используется для решения задач подводной навигации, которые не сводятся только к определению текущего местоположения робота, но также обеспечивают его безопасное движение и контроль с борта обеспечивающего судна.



Для навигационного обеспечения средств подводной робототехники исторически первыми были разработаны гидроакустиче-

Рис. 1.1. Методы навигации АНПА

ские навигационные системы (ГАНС) различного типа [3–9], применение которых не зависит от наличия и характеристик бортовой навигации. Наряду с задачей позиционирования для первых ГАНС важнейшей задачей был контроль робота с борта обеспечивающего судна. ГАНС разделяют по принципу действия на системы с длинной базой (ГАНС ДБ) и системы с ультракороткой базой (ГАНС УКБ). Эти системы составляют основу навигационных комплексов подавляющего числа автономных и телеуправляемых аппаратов, созданных в разное время в различных странах. Кроме собственно навигационных задач, системы также обеспечивают работу гидроакустических систем телеуправления и телеметрии, дальнего и ближнего приведения [10].

В состав таких комплексов входят устройства на борту аппарата, оборудование судна, включающее выставляемый на кабеле подводный модуль со всем необходимым набором антенн и навигационных датчиков, комплект навигационных маяков-ответчиков.

Географическая привязка всего пространственно распределенного комплекса ГАНС обеспечивается с помощью средств спутниковой навигации (СНС).

Принципиально важными этапами развития навигационных устройств роботов стали достижения в области создания средств бортовой автономной навигации. В состав бортовой автономной навигационной системы (БАНС) современного подводного робота входят инерциальная навигационная система (ИНС), эхолокационная система (ЭЛС), навигационно-пилотажные датчики (глубиномер, магнитный и гироскопический компасы, датчики крена и дифферента), измерители относительной и абсолютной скорости – индукционный и доплеровский лаги (ИЛ, ДЛ), датчики угловых скоростей. В настоящее время созданные бортовые инерциальные системы и системы счисления, основанные на данных измерителей абсолютной скорости и курса, могут достаточно точно решать навигационную задачу в реальном времени на борту аппарата после привязки какой-либо (например, стартовой) точки траектории к географическим координатам. Избыточность навигационной информации и дублирование источников измерений в такой конфигурации БАНС позволяют добиться высокой точности

и надежности системы в целом, однако суммарная навигационная погрешность БАНС при отсутствии коррекции от внешних источников накапливается во времени и при длительной работе аппарата становится недопустимо большой.

Возможности БАНС для точного решения задачи коррекцией счисленных данных были расширены за счет средств информационного обмена по гидроакустическому каналу связи между автономным подводным роботом и обеспечивающим судном. Это привело к тому, что традиционную координатную задачу, решаемую гидроакустическими средствами, для подводного робота с развитой БАНС фактически следует рассматривать в большей степени как задачу информационного обмена робота с обеспечивающим судном и в меньшей – как задачу непрерывного определения координат объекта навигации. Судно оснащено новейшими и точными средствами спутниковой навигации и априорно участвует в поддержке миссии робота. Информация о текущих координатах робота, формируемая гидроакустическими средствами, фактически необходима для периодической коррекции бортовых систем счисления в подводном положении. При наличии канала информационного обмена наряду с текущими точными координатами судна, дальностью и угловым положением объекта навигации информационная основа навигационной задачи расширяется за счет непрерывного измерения вектора скорости объекта. Полученные данные гидроакустических, судовых и бортовых навигационных систем, работающих в системе единого времени, подвергают комплексной обработке для формирования взвешенной координатной оценки в реальном времени как на борту подводного аппарата, так и на борту обеспечивающего судна.

1.1.1. Конфигурация навигационного оборудования подводного робота

Каждая из используемых систем (бортовые автономные, гидроакустические и спутниковые), в свою очередь, представляет собой комплекс устройств, входящих в общий базовый состав систем АНПА и судового оборудования. В целом типовая структура навигационной системы в большинстве многоцелевых подводных аппаратов (на примере АНПА разработки ИПМТ ДВО РАН) имеет вид, представленный на рис. 1.2 [11, 12].



Рис. 1.2. Типовая структура навигационной системы АНПА

Навигационным комплексом решается задача выбора структуры комплексированной системы и методов интегральной обработки всей имеющейся информации о положении подводного робота в пространстве. При длительной автономной работе аппарата для достижения высокой точности навигации, при наличии случайных и систематических ошибок в поступлении навигационных данных в миссию аппарата включаются циклы коррекции координат для устранения накапливающихся ошибок счисления и сглаживания результатов траекторных измерений. Коррекция производится за счет данных от независимых внешних навигационных систем – надводных или подводных.

При наличии всего комплекса навигационного оборудования на борту робота можно сформировать ряд независимых координатных оценок (рис. 1.3):



12



• координат, счисленных по данным абсолютного лага, датчика курса и измерителя глубины;

• координат, рассчитанных на основе измеренных дальностей аппарата от сети донных маяков-ответчиков;

• координат, рассчитанных на основе измерения дальности и углового положения источника навигационных сигналов, размещенного в точках с известными координатами (при размещении углового пеленгатора на борту робота);

• координат робота, рассчитанных на борту судна с использованием штатных судовых средств и переданных на его борт по каналу связи.

Эффективная координатная оценка, формируемая на борту робота, является результатом совместной взвешенной обработки перечисленных данных.

Аналогично на борту судна (рис. 1.4) также можно сформировать ряд независимых координатных оценок:

 координат, рассчитанных на основе измеренных дальностей аппарата от сети донных маяков-ответчиков и полученных по запросам судовой навигационной антенны;

 координат, рассчитанных на основе измерения дальности и углового положения робота из точки размещения судовой навигационной антенны при размещении углового пеленгатора в составе этой антенны;

• координат робота, рассчитанных на его борту средствами БАНС и переданных на судно по каналу связи.

Полученные данные необходимы для решения задач навигационно-информационной поддержки подводного робота с борта обеспечивающего судна. После их комплексной обработки при наличии соответствующего методического и программного обеспечения на борту аппарата обеспечиваются:

• точное определение стартовой донной точки по данным спутниковой навигации;

• расчет текущих координат робота по счислению;

• коррекция счисленных координат по данным спутниковых навигационных систем (при всплытии);

• коррекция счисленных координат по данным измерителя дальности и углового положения судовой антенны;





14

• комплексирование автономных и гидроакустических средств навигации на борту робота;

• обмен навигационной информацией по двухсторонней гидроакустической линии связи робот-судно;

• формирование результирующих координат в реальном времени на борту робота.

1.1.2. Комплексирование навигационных данных

При длительной автономной работе аппарата определение координат с максимально возможной точностью обеспечивается комплексированием всей доступной навигационной информации. Задача комплексирования ГАНС и БАНС была сформулирована еще в [3] и получила развитие во многих работах, например [13–19]. В настоящее время используются все возможные варианты комплексирования и коррекции навигационной информации на борту АНПА:

• интегральная обработка информации БАНС и ГАНС;

• коррекция БАНС по данным ГАНС с измерением дистанций до подвижного буксируемого маяка;

• коррекция БАНС по гидроакустическому каналу связи и телеуправления с использованием данных ГАНС и СНС при условии, что координаты АНПА определяются на обеспечивающем судне и передаются на АНПА;

• использование для навигации различных корреляционно-экстремальных алгоритмов для определения координат по данным гидроакустической съемки местности.

Задача комплексирования и коррекции состоит в устранении накапливаемых ошибок счисления текущих координат. Приведем для примера порядок совместной обработки информации автономной и дальномерной гидроакустической систем. При работе аппарата в ограниченной области для навигационных оценок допустимо рассматривать лишь движение в горизонтальной плоскости относительно локальной системы координат, связанной с донными маяками-ответчиками. Задача БАНС сводится к получению по данным датчика курса и лага проекций скорости на координатные оси

Глава 1

и их интегрированию. Оценки координат аппарата X_c , Y_c определенные автономной системой, и оценки координат X_{μ} , Y_{μ} , полученные ГАНС, обрабатываются для формирования результирующих оценок координат X, Y Коррекция координат в КНС осуществляется циклически с интервалом обновления данных, равным периоду работы ГАНС. Счисление координат на борту АНПА производится следующим образом:

$$X = x_0 + \int_0^t v_x dt , \ Y = y_0 + \int_0^t v_y dt , \qquad (1.1)$$

где v_x, v_y – проекции скорости движения АНПА на горизонтальную плоскость неподвижной системы координат, x_0, y_0 – начальные координаты.

Оценка скорости движения АНПА осуществляется по данным доплеровского лага:

$$v_x = v_f \cos \varphi + v_r \sin \varphi$$
, $v_v = v_r \cos \varphi + v_f \sin \varphi$,

где v_{f} , v_{r} – продольная и поперечная составляющие абсолютной скорости движения, φ – измеренный курс. Период dt для организации цикла навигационных вычислений выбирается в зависимости от динамики АНПА и в соответствии с периодом работы системы управления.

Оценки дальностей r_i (i = 1...n) от аппарата до приемоответчиков с координатами (X_i, Y_i) и оценки координат аппарата (X_r, Y_r) , которые могут быть получены с помощью ГАНС, связаны уравнениями:

$$(X_{\rm r} - X_i)^2 + (Y_{\rm r} - Y_i)^2 = r_i^2.$$
(1.2)

Минимальное число уравнений и, следовательно, приемоответчиков, необходимое для решения задачи, – два. При этом требуется исключить неоднозначность, что обычно не вызывает особых затруднений. При трех и большем числе приемоответчиков система уравнений оказывается избыточной, что позволяет получить более точное решение.

На рис. 1.5 представлена структурно-функциональная схема вычислительной модели, в которой данные работы БАНС коррек-

тируются ГАНС. Алгоритм комплексной обработки данных содержит следующие программные блоки:

• счисление координат на основе данных БАНС;

• селекция откликов от гидроакустических маяков-ответчи-ков;

• вычисление координат средствами ГАНС на основе дальномерной информации;

• коррекция координат.

Входными параметрами системы счисления являются курс от гироскопического или магнитного компасов, дифферент, относительная или абсолютная скорости, предварительная оценка составляющих скорости течения (при использовании относительного лага). Выходными параметрами являются пройденный за цикл путь dx, dy и координаты X_c , Y_c . Процесс селекции сигналов от приемоответчиков ГАНС обеспечивает фильтрацию ложных сигналов, вызванных многолучевостью, и формирование дистанций r_{ik} для последующей процедуры вычисления координат X_c , Y_c .



Рис. 1.5. Схема коррекции координат

Селекция сигналов производится с учетом «предыстории», т. е. накопленной за предыдущие циклы дальномерной информации. Преимущество алгоритма селекции сигналов на борту АНПА, по сравнению с аналогичной процедурой на борту обеспечивающего судна, заключается в том, что на АНПА используется информация о текущих счисленных координатах аппарата, на основе которой вычисляются ожидаемые времена откликов t_{ik} , где k – это номер шага, а i – номер маяка. На основе измеренных дистанций r_{ik} вычисляются координаты X_r , Y_r . Для коррекции координат формируется итерационный цикл:

$$X_{k} = X_{ck} + A1(X_{ck} - X_{rk}), Y_{k} = Y_{ck} + A1(Y_{ck} - Y_{rk}),$$

$$v_{xk} = v_{xck} + A2(X_{ck} - X_{rk}) / dt, v_{yk} = v_{yck} + A2(Y_{ck} - Y_{rk}) / dt,$$

$$X_{k} \rightarrow X_{ck}, \quad Y_{k} \rightarrow Y_{ck},$$
(1.3)

где *А*1, *А*2 – параметры коррекции.

Описанный алгоритм коррекции работоспособен при наличии гидроакустической связи не менее чем с двумя приемоответчиками ГАНС. При работе с одним приемоответчиком требуются навигационные вычисления, которые включают элементы «интерактивного» характера, иначе говоря, система управления АНПА должна обеспечивать выполнение специально организованных траекторий по запросу навигационной системы.

Создание названных систем и их экспериментальная отработка, выполненные ИПМТ ДВО РАН за последние десятилетия, подтверждают высокие возможности такой организации навигационного обеспечения подводных роботов [12].

1.2. ОСОБЕННОСТИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ В СОСТАВЕ НАВИГАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ

В самой общей постановке разработка систем подводной навигации включает создание методов и средств, обеспечивающих решение ключевых задач миссии робота, к числу которых относятся: • определение текущих координат робота на его борту;

• обеспечение безопасного плавания и выполнения рабочих миссий вблизи дна и донных препятствий;

 определение и отображение на борту обеспечивающего судна текущего местоположения робота в реальном времени во всех режимах его работы в широком диапазоне дальностей;

• управление ходом миссии с борта судна;

• получение на борту судна информации о состоянии систем робота;

• приведение робота в заданную точку подводного пространства (например, для стыковки с носителем).

Задача создания комплекса гидроакустических навигационных средств автономных подводных аппаратов для работы в условиях мелкого или глубокого моря при дальности действия до 10-15 км была поставлена еще на этапе разработки первых образцов АНПА и насчитывает уже практически полувековую историю. Разработки гидроакустических средств точного координирования подводных роботов остаются актуальными и в настоящее время [12]. Прежде всего, это связано с необходимостью увеличения точности, улучшений условий эксплуатации, значительным расширением диапазона дальностей ГАНС, обусловленных расширением функциональных возможностей АНПА. Так, для АНПА большой автономности, совершающих длительные миссии в глубоком море, развиваются средства с дальностью сотни километров. Совершенствование технологического оснащения АНПА, выполнение контактных работ на объектах подводной инфраструктуры связаны с реализацией супервизорного управления и прецизионной навигации с дальностью действия в несколько сотен метров.

Физические основы формирования оценок координат объекта в ГАНС различны. Системы с длинной базой основаны на измерении дальности объекта от серии опорных точек с известными координатами. Для решения задачи необходимо определить набор взаимных дальностей сообщающихся абонентов навигационной сети (АНПА, опорных маяков и судовой обеспечивающей антенны), размещенных вблизи либо дна, либо поверхности. Измерение дальностей между точками подводного пространства при сложной и трудно учитываемой зависимости скорости звука от глубины по-прежнему остается одной из важнейших прикладных задач в гидроакустике. В системах с ультракороткой базой решение навигационной задачи состоит в определении из одной точки дальности азимута и угла места с использованием дальномерных и угломерных данных.

1.2.1. ГАНС ДБ

Общие принципы работы навигационных систем дальномерного типа достаточно подробно описаны в российской и зарубежной литературе. Длительное время эти системы были наиболее разработанными в методическом и теоретическом плане. Достаточно подробный обзор отечественных и зарубежных гидроакустических систем навигации на начальном этапе их создания приведен в работах [4, 5], анализ современных достижений в этой области дан в обзорной статье [9]. Уже один из первых российских подводных роботов, АНПА «Скат», имел ГАНС ДБ для работы в мелком море с маяками, выполненными на базе радиобуев [20]. Для глубокого моря в России одной из первых была разработана система, структура которой и методы обработки сигналов были обоснованы в монографиях [3, 7], а особенности распространения сигналов в среде, выбора значений эффективной скорости и собственно решения дальномерной задачи были изучены в работах [21–26].

В процессе многолетнего практического применения дальномерные навигационные системы претерпели многократные модернизации. Это было связано с необходимостью совмещения функций навигации и информационного обмена на основе общего комплекта аппаратуры, совершенствования их методического и программного обеспечения, использования различных конструкций навигационных сигналов. Введенные инновации были направлены на увеличение дальности и точности систем, определяемых в основном погрешностью задания эффективной скорости сигналов. Системы такого типа развивались, прежде всего, за счет достижений в области фундаментальной гидроакустики, позволяющей на основе более совершенных математических моделей обеспечить минимальную оценку ошибок измерения дальности.

Отметим некоторые особенности решения задач дальнометрии в условиях мелкого и глубокого моря. Методической основой гидроакустической дальнометрии применительно к задачам навигации служили детальные исследования особенностей распространения акустических сигналов при различных условиях взаимного размещения абонентов на акватории и гидрологических характеристик среды.

Дальность действия дальномерных навигационных систем в глубоком море ограничена в основном придонной рефракцией, а в мелком море – существенным ростом с дистанцией потерь на распространение, обусловленных той же рефракцией, многолучевостью и рассеянием на границах раздела. Погрешность определения координат объекта навигации также в значительной степени зависит от профиля скорости звука, его временной и пространственной изменчивости, а в мелком море еще и от многолучевости, связанной с волноводными свойствами морской среды как канала передачи навигационной информации, а суммарная структурная погрешность навигационной системы существенно превосходит инструментальную.

Техническая реализация дальномерных систем, особенно в случаях значительного увеличения дальности и неточного описания гидрофизических характеристик трассы распространения акустического сигнала, также становится серьезной проблемой как с точки зрения точного определения скорости, так и вследствие значительных энергетических потерь в рефрагирующем канале связи. Как правило, на объекте навигации находится источник навигационных сигналов, синхронизированный с аппаратурой, установленной на борту обеспечивающего судна. Этот источник должен быть достаточно малогабаритным и обеспечивать в установленном диапазоне частот заданный уровень излучения. Дальность действия зависит от рабочей частоты, гидрологии, глубин размещения антенн аппарата, маяков и обеспечивающего судна. Различают энергетическую дальность действия, которая определяется мощностью излучения, потерями на распространение сигнала, уровнем помехи и порогом обнаружения, и геометрическую дальность действия, которая определяется профилем скорости звука в районе работ и горизонтами излучения-приема [11]. Физически ограничение дальности действия гидроакустической навигационной системы объясняется формированием зон акустической освещенности и зон тени. Радиус действия дальномерной навигационной системы подводного аппарата, работающего вблизи дна, в глубоком море составляет реально 10÷15 км при высоте установки маяков-ответчиков над дном 200÷250 м и высоте работы робота 10–30 м. Для существенного увеличения дальности действия навигационной системы, с учетом придонного характера работы подводного аппарата, в любом случае и при любой гидрологии нужно увеличивать высоту маяка над дном.

Кроме того, за пределами первой зоны освещенности резко растут погрешности за счет ошибок при определении эффективной скорости звука. При учете всех факторов, определяющих особенности распространения сигналов в различных условиях, дальномерные средства остаются наиболее точными.

Как отмечалось, оценка точности навигационных систем фактически определяется точностью измерения дальности, которая, в свою очередь, определяется точностью задания эффективной скорости распространения звуковых сигналов. Оценка относительной погрешности определения скорости звука составляет в реальных системах до 0,1 %, но при учете всех факторов, определяющих структуру звуковых лучей в районе работ и при наличии соответствующего методического и программного обеспечения, может достигать 0,01 % [7]. По сути, эта величина является предельной оценкой погрешности определения дальности и, соответственно, предельной оценкой погрешности определения местоположения объекта для навигационных систем с длинной базой.

В мелком море при отсутствии адекватных расчетных моделей погрешность дальномерных измерений значительно выше, и практические результаты работающих систем позволяют дать оценку относительной погрешности величиной 2...5 · 10⁻³. При традиционном подходе к решению задачи дальномерными средствами с выходом на максимальные (до 10–15 км) дистанции это приводит к неприемлемым ошибкам навигации и требует поиска новых методов организации навигационной поддержки.

При решении навигационной задачи в дальномерных системах горизонтальные координаты объекта навигации определяются через расстояние до маяков-ответчиков [7], причем для однозначного определения координат нужно иметь не менее трех маяков, образующих в общем случае донную сеть маяков. Конфигурация сети по возможности должна обладать элементами симметрии, чтобы обеспечить равную вероятность приема сигнала в районе работ. Реализация высокоточных систем, естественно, требует существенно уменьшить погрешность определения координат навигационной измерительной базы, состоящей из набора донных маяков-ответчиков, т. е. погрешность ее собственной калибровки, и упростить методику эксплуатации самой навигационной системы.

К настоящему времени дальномерные системы являются хорошо освоенными и надежными навигационными средствами и, видимо еще долго будут обязательными в составе обеспечивающего оборудования подводных роботов [11]. Однако очевидно, что использование маяков-ответчиков и тем самым жесткая привязка к району работ оправданы только в тех случаях, когда необходимы многократные пуски аппаратов в одной точке или предъявляются повышенные требования к точности навигационного обеспечения.

В гидроакустических средствах навигации, имеющих дальность действия 10–15 км, длительное время применялись простые сигналы с частотно-временным разделением для кодирования информации и обозначения абонентов навигационной сети. Такие системы успешно использовались в различных условиях, в том числе и экстремальных, например при работе автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) «Клавесин» в ледовых условиях Арктики [18, 19].

В последнее время для целей гидроакустической навигации и связи широкое распространение получили разработки, связанные с применением сложных сигналов, например типа фазоманипулированных М-последовательностей [27–30]. Особенно важными такие системы могут стать при создании низкочастотных гидроакустических средств большой дальности. Проведенные исследования показывают, что применение сложных сигналов представляется особенно перспективным при реализации навигационных средств для работы с большим числом объектов навигации и совмещении навигационных средств с системами телеуправления.

Оценивая состояние работ по созданию современных дальномерных ГАНС, следует отметить перспективные направления их развития. К их числу относятся применение сложных сигналов и совмещение функций навигации и информационного обмена, совершенствование методик применения в различных условиях применения, расширение диапазона дальностей и увеличение точности. Ряд технических решений по этим проблемам рассмотрен в главах 2 и 4.

1.2.2. ГАНС УКБ

Следующим шагом развития гидроакустических навигационных систем стало создание средств навигации с ультракороткой измерительной базой [4, 5, 9, 31–35]. В таких системах, кроме дальности, определяется угловое положение объекта навигации на основе анализа фазовой или временной структуры навигационного сигнала на апертуре малогабаритной приемной антенны. Дальномерно-угломерные гидроакустические навигационные системы с ультракороткими базами были разработаны позднее дальномерных, однако в силу простоты и удобства в эксплуатации они приобрели достаточно высокую популярность. Эти системы дешевле дальномерных и требуют меньше времени на подготовку к работе.

Для угломерных систем названные выше проблемы сильной зависимости параметров сигналов от условий распространения дополнительно усугубляются искажениями фазовой структуры сигналов на ограниченной апертуре приемной антенны. Потенциальная геометрическая дальность действия таких систем составляет для подводного аппарата, работающего вблизи дна при типовой гидрологии глубокого моря, ориентировочно несколько глубин моря. Эта дальность соответствует размеру первой зоны акустической освещенности, в пределах которой возможен устойчивый акустический контакт между аппаратом и судовой приемной антенной. На практике реализуемая дальность существенно ниже, и это связано с особенностями приема сигналов как в мелком, так и в глубоком море.

В целом в высококачественных системах с ультракороткой базой оценки углового положения источника навигационных сигналов, дальность которого измеряется с погрешностью менее 0,1 %, должны быть получены с ошибками, не превышающими 0,1 град.

Обычно дальномерно-угломерные системы, кроме синхронизированного источника навигационного сигнала, устанавливаемого на борту объекта навигации, включают подводный модуль с малогабаритной приемной антенной, опускаемой на кабель-тросе с борта обеспечивающего судна, средства обработки и отображения на борту судна. Основное устройство системы – многоэлементная приемная антенна, габариты которой сравнимы с длиной волны навигационного сигнала. Антенна снабжается дополнительно датчиками ее угловой ориентации (курс, крен, дифферент), а навигационные параметры получают в результате совместной обработки всей совокупности данных. Далее, эта информация представляется в виде траектории объекта навигации с привязкой к географическим координатам, если координаты приемной антенны известны по данным средств спутниковой навигации.

К достоинствам УКБ систем следует отнести и то, что навигация может быть обеспечена в режиме движения обеспечивающего судна без привязки к району установки маяков с определением текущего местоположения робота, совершающего длительный переход [36].

В системах, основанных на измерениях дальности, приведенные выше оценки относительной погрешности фактически находятся на уровне, который был достигнут еще два десятилетия назад. Иначе дело обстоит с точностью ультракороткобазисных систем. Для первых разработок этих систем была характерна высокая погрешность угловых измерений, составляющая единицы градусов. Поэтому основные усилия ведущих разработчиков навигационных средств были направлены на увеличение точности. Все эти усилия связаны с разработкой новых приемных антенн и базируются на совершенной системе построения аппаратных средств и обработки данных. За последние десятилетия погрешность снижена от единиц до 0,1–0,05 град [37, 38].

Системы с ультракороткой базой давно и успешно разрабатываются рядом известных фирм. В настоящее время имеются известные разработки ГАНС УКБ от компаний IXBlue во Франции; LinkQuest в США и ААЕ, Nautronix и Sonardyne в Великобритании. Среди них Kongsberg (Норвегия) – одна из первых исследовательских компаний акустических систем позиционирования. Компания Kongsberg выпустила ГАНС УКБ первого поколения в 1996 г., а их новый HiPAP700 – одна из немногих систем позиционирования USBL дальнего действия, рабочая глубина которой может достигать 10 000 м.

Данные об известных системах сведены в табл. 1.1, причем выделены сведения о характеристиках приемных антенн и подводных аппаратах, в составе которых используются названные навигационные системы. Различные компании изготавливают ГАНС УКБ и оборудование для них. Эти системы в табл. 1.2 сравниваются по дальности, точности, рабочим частотам и глубине [34].

Таблица 1.1

Наименова-	Разработчик,	Характеристики	Характеристики	
ние	применение	приемной антенны	системы	
POSIDONIA USBL	MORS (Фран- ция), UV Victor	Две ортогональные пары гидрофонов с увеличен- ной базой	Дальность до 8000 м, погрешность 0,5 % от наклонной дальности	
ORE LXT System	ORE International (США), ROV, AUV	Диаметр антенны около 1 λ	Рабочая частота 22– 30 кГц, погрешность измерения азимута 5°, угловое разреше- ние 0,1°	
RATS	WHOI (CIIIA), AUV «REMUS»	Планарная антенна из 8 гидрофонов, разделен- ных на две группы по 4, для точного и грубого пе- ленгования. Общий кор- пус диаметром 200 мм	Дальность 3600 м, угловое разрешение $\pm 0,25^{\circ}$, угловая по- грешность $\pm 1,46^{\circ}$	

Основные характеристики известных навигационных систем с ультракороткой базой

Окончание табл. 1.1

Наименова-	Разработчик,	Характеристики	Характеристики	
ние	применение	приемной антенны	системы	
NS-031	SONATECH (США)	Гидрофоны антенны образуют ортогональные пары с размещением элементов на базе 3–5 λ. Неоднозначность устраняется применением широкополосных сигналов	Дальность 9000 м угловая погреш- ность менее 0,5° для широкополосно- го сигнала и 0,1° для тонального	
RS 910	NAUTRONIX (США)	Шестиэлементная антен- на, разделенная на две группы по 3, для точного и грубого пеленгования	Погрешность 0,25 % от наклонной даль- ности	
ATS-2000	NAUTRONIX (США)	Пятиэлементная антенна с общим корпусом диа- метром 208 мм. Диаметр сферического гидрофона 12,7 мм	Рабочая частота 15– 18 кГц, погрешность местоположения ме- нее 1,75 % от даль- ности	
NAVTRAK V/LR	EDO Western corp. (CIIIA)	Горизонтальная круговая база из 8 гидрофонов в общем корпусе диаме- тром около 2 λ.	Дальность 10000 м, погрешность из- мерения дальности 5 м, угловая погреш- ность 1°	
HiPAP SSBL	Kongsberg Simrad AUV "Hugin"	Сферическая база с 241 приемником	Погрешность опре- деления местополо- жения менее 0,5 % от дальности	

Таблица 1.2

Характеристики навигационных систем с ультракороткой базой (точностные параметры приведены для отношения «сигнал–шум» 20 дБ)

Разработчик	Наименование	Даль- ность, м	Точность	Точность	Рабочие
			угловая,	дально-	частоты,
			град	сти	кГц
KongsbergSimrad	HPR410	1500	2,86	5 %	20~32
KongsbergSimrad	HiPAP502	5000	0,12	< 20 cm	21~31
Nautronix	NasPOS USBL	4500	0,143	0,25 %	N/A
Nautronix	ATSII	2000	0,143	0,25 %	15~18
ORE	LXT	N/A	0,5	1 m	22~30

Глава	1
-------	---

Точность Точность Рабочие Даль-Разработчик Наименование угловая, лальночастоты, ность, м град сти кГц 0.5 % 0,1@50 ORE TrackPoint II N/A @50 4.5~30 dBSNR dBSNR 7000 0.1% Sonardyne Fusion 0.0572 18~36 LinkQuest 1500 0.25 31~43.2 1500HA 0.2 m LinkQuest 5000HA 5000 0,25 0,4 m 14,2~19,8 7,5~12,5 LinkQuest 10000HA 10^{4} 0.25 0.50 % IXSEA GAPS 4000 0,12 0,20 % 20~30 IXSEA 12~18 Posidonia 6000 0.171 0.30 % S2CR 0,1 18-34 Evologics 3500 0.01 m

Окончание табл. 1.2

Физические принципы, позволяющие получить заявленную высокую точность угловых измерений в представленных системах, как правило, не раскрываются производителями. Исключение составляет система HiPAP502, точность которой достигается за счет использования антенны с 241 приемником, и TrackPoint II, в которой для измерений необходимо иметь отношение «сигнал– шум» не ниже 50 дБ.

Оценивая состояние работ по созданию современных угломерных ГАНС, следует отметить перспективные направления их развития. К их числу относятся применение многоэлементных антенн достаточно сложной конфигурации, разработка новых технологий обработки сигналов, применение сложных сигналов, уменьшение систематических ошибок, обусловленных несовершенством малогабаритных антенн, совершенствование методик градуировки и применения в различных условиях. Ряд технических решений по этим проблемам рассмотрен в главах 3 и 4.

1.2.3. Организация и порядок применения оборудования ГАНС в комплексе АНПА

Решение навигационной задачи гидроакустическими средствами, как отмечалось, тесно связано с задачей информационного обмена подводного аппарата с обеспечивающим судном. Навигационный комплекс обеспечивает комплексную обработку данных и формирование взвешенной координатной оценки в реальном времени как на борту подводного аппарата, так и на борту обеспечивающего судна. При применении ГАНС ДБ и ГАНС УКБ важное значение приобретает организация комплекса, в том числе оценка необходимости и достаточности установки маяков; оборудования, функций и порядка использования судовой навигационной антенны; организации движения робота в режимах навигационной обсервации для получения данных, необходимых для коррекции счисленных координат. Оптимизация этих решений может существенно изменить подход к организации навигационно-информационной поддержки миссий робота в различных условиях.

Модели использования опорных маяков

Технология комплексной обработки навигационных данных от различных подводных устройств, разнесенных в пространстве и имеющих канал информационного взаимодействия, в настоящее время активно развивается. Как следует из литературы, для этой цели используются различные методы [17, 39, 40]. В каждом из них вначале определяют локальные координаты аппарата на его борту, счисленные по данным бортовых средств навигации. Далее, в подводном положении ошибка счисления корректируется путем периодического определения места объекта по измеряемым дальностям от маяков с известными координатами.

Сами маяки могут быть как стационарными, так и нестационарными [41]. В последнем случае они обладают дополнительными средствами для определения своих текущих координат, например, имея средства спутниковой навигации с размещением элементов маяков на поверхности моря. Причем координаты маяков не устанавливаются перед началом работ на борту подводного аппарата, а передаются от маяков по гидроакустическому каналу связи. Задача коррекции может быть решена также при наличии только одного опорного маяка с измерением дальности до маяка из ряда точек специальной траектории аппарата, которую он выполняет для решения навигационной задачи путем накопления траекторных дальномерных данных [42–45]. Эти маяки могут быть поверхностными [46, 47]. Для навигации аппаратов большой автономности и совершающих протяженные миссии (например, в режиме обследования подводного трубопровода или кабеля) сеть маяков устанавливается вдоль трассы работ. Каждый из этих маяков по очереди является опорным в своем районе. Большое распространение получают маяки, работающие в двух частотных диапазонах. Например, в низкочастотном диапазоне на большой дальности обеспечивается формирование оценки дальности для определения координат, а в высокочастотном при выходе АНПА к маяку может быть реализован ускоренный информационный обмен для передачи собранной информации и получения новых заданий на миссию [48].

Для проблемы навигационного обеспечения подводных объектов безусловный интерес представляют разработки подводного аналога современных спутниковых систем на основе сети автономных донных станций (NAS-NET), абсолютные координаты которых предварительно определяются с высокой степенью точности и в дальнейшем считаются известными. Каждая станция содержит в своем составе акустический излучатель, передающий свои текущие координаты. Все донные станции образуют навигационную сеть, обеспечивающую навигационных систем с длинной базой [49–51].

Расширение функций судовой навигационной антенны

Общая оценка работы навигационных систем показывает, что собственно гидроакустическими средствами позиционирования в различных условиях работ решаются две задачи. Первая призвана обеспечить максимально точную навигационную привязку, характерную для поисковых работ и детального обследования районов. Вторая необходима для контроля текущего положения аппарата, например, при выполнении перехода в район работ или проведения обзорных гидролокационных съемок.

Для достижения максимальной точности достаточно долго безальтернативными были дальномерные гидроакустические навигационные системы, причем их основной ресурс в части увеличения точности при учете всех факторов, влияющих на условия распространения сигнала и определение его эффективной скорости, заключается в увеличении числа одновременно наблюдаемых маяков.

Задача контроля местоположения АНПА с борта ОС может быть выполнена без установки маяков и предполагает обязательное использование навигационной антенны, выставляемой с борта носителя. Эта антенна может быть достаточно сложной и универсальной, обеспечивать при необходимости поддержку работы навигационных систем с длинной базой, содержать приемную антенну ГАНС УКБ с комплектом прецизионных датчиков контроля ее текущего положения в пространстве и систему связи. Причем очевидно, что применения ГАНС УКБ в каноническом виде для контроля недостаточно. Во-первых, из-за отсутствия рассчитанных координат на борту самого АНПА, во-вторых, из-за отсутствия возможности управления аппаратом с борта судна и, в-третьих, из-за меньшей, чем в ГАНС ДБ, навигационной точности. Для решения задачи следует расширить функции судовой навигационной антенны и обеспечить новые возможности:

• управление по гидроакустическому каналу ходом работ робота;

• информационный обмен между носителем и роботом, включая доставку географических координат на борт носителя робота;

• аварийный контроль текущей дальности;

• накопление дальномерных данных для коррекции при траекторной фильтрации дальности движущегося объекта;

• приведение робота к носителю;

• обеспечение оперативной коррекции счисления по дальности и угловому положению объекта.

Если обмен между АНПА и судовой антенной обеспечен применением сложных навигационных сигналов, в структуре которых передается навигационная информация, при наличии антенны с такими функциями возможности существующих навигационных комплексов расширяются за счет:

 дополнительного канала прямого измерения дальности, что приводит к увеличению надежности и достоверности расчетных навигационных данных; уменьшения числа или полного исключения постановок маяков при выполнении миссии аппарата;

• повышения точности координатной оценки, получаемой при работе углового пеленгатора;

• обеспечения навигационной поддержки минимальными аппаратными средствами без маяков и углового пеленгатора;

• значительного улучшения результатов траекторной обработки дальномерных данных при включении в систему фильтрации информации о текущей скорости, курсе и координатах ПА, переданных на борт ОС по информационному каналу.

Системы, входящие в состав гидроакустического комплекса навигации ГАНС ДБ, ГАНС УКБ, ТУ, ТМ, ГАСС, ДЛ (доплеровский лаг), приобретают различный вес. А необходимость их включения в состав комплекса определяется поставленной задачей.

Эта технология может быть применена в составе подводного робота, предназначенного для выполнения длительных дальних миссий с использованием движущегося сопровождающего судна, и обеспечивает быструю, точную и неограниченную по дальности работу с возможностью оперативного отображения в реальном времени траектории робота в географических координатах на его борту и на борту обеспечивающего судна [48].

Некоторые вопросы организации комплекса ГАНС для конкретных приложений рассмотрены в главах 2 и 5.

Глава 2

ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ ДАЛЬНОМЕРНЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

ля навигационных систем с длинной базой информационной основой являются текущие дальности подводного робота от ряда источников, установленных в точках с известными координатами и работающих в режимах излучения или приема-излучения гидроакустических навигационных сигналов. Дальность определяется через измеренные значения времени распространения сигналов и их эффективную скорость. Основной проблемой является оценка скорости. Процедуры определения скорости в условиях мелкого и глубокого моря различаются и, соответственно, различаются достижимые оценки точности дальномерных измерений и координатных оценок. Для создания точных систем в широком диапазоне дальностей ключевое значение имеет выбор структуры навигационных сигналов. Оценка достижимых характеристик ГАНС дальномерного типа путем разработки макетных образцов систем и их экспериментальных исследований рассмотрена ниже.

2.1. ОЦЕНКИ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАЛЬНОМЕРНОЙ ГАНС

2.1.1. Об эффективной скорости в задачах гидроакустической дальнометрии

Основным фактором, определяющим особенности распространения звука в море, является его неоднородность по всем параметрам, влияющим на скорость звука, причем в глубоком море основные особенности устанавливаются профилем вертикального распределения скорости звука C(z). Этот профиль характеризуется оценкой максимального разброса скорости $\frac{\Delta C_{max}}{C} = 3-5\%$ и типом вертикального распределения. Тип вертикального распределения C(z) определяет особенности рефракции звуковых лучей, формирование зон акустической освещенности и зон тени, эффекты канального распространения и др. Величина $\frac{\Delta C_{max}}{C}$ является оценкой относительной погрешности гидроакустической дальнометрии при применении самых простых алгоритмов вычисления расстояния, использующих некую эффективную скорость звука, но не учитывающих рефракцию звуковых лучей.

Законы рефракции составляют основу лучевой теории распространения звука в слоисто-неоднородной среде. Для расчета лучевой траектории нужно знать горизонты излучения и приема, профиль скорости звука и глубину моря, а также время распространения сигнала. Если все эти величины известны, то составляющая погрешности, связанная с изменчивостью скорости звука, может быть потенциально уменьшена до величины инструментальной погрешности измерителя скорости звука, имеющей оцен-

ку $\frac{\Delta C_{max}}{C} \sim 10^{-4}$.

Существенный выигрыш в точности делает очевидным использование более сложных и, соответственно, более точных алгоритмов определения дальности, основанных на законах рефракции. В начальном виде эти алгоритмы приведены еще в [4]. Согласно [4] при известных профиле скорости звука C(z), горизонтах излучения Z_1 и приема Z_2 сначала по известному времени распространения навигационного сигнала определяется угол скольжения в точке старта луча, а затем по найденному углу скольжения в точке приема определяется горизонтальное расстояние r_{12} между точками-корреспондентами. Однако этот алгоритм непригоден в случаях, когда траектория луча содержит точки отражения от дна или поверхности.

Даже при работе в глубоком море луч, соединяющий абонентов навигационной сети, не является единственным из-за наличия отражающих границ. В рамках лучевой теории можно построить семейство лучей, отличающихся числом отражений от дна и поверхности. Лучевой алгоритм вычисления дальности по измеренному времени распространения, обобщенный на все множество лучей, может использоваться для расчета любой лучевой траектории [3, 21, 22]. Суть его заключается в том, что любая траектория в плоскопараллельном слое с профилем скорости C(z) является циклической и состоит из трех повторяющихся основных элементов. При заданном профиле скорости звука и его кусочно-линейной аппроксимации, горизонтах излучения Z_1 и приема Z_2 , глубине моря H и измеренному времени t_e можно определить углы выхода лучей, соединяющих заданные горизонты и соответствующие горизонтальные расстояния r_{12} . В соответствии с правилом отбора, сформулированным в [3], первым в точку приема приходит сигнал, которому соответствует максимальное расстояние, что согласуется с известным принципом Ферма.

По найденным параметрам траектории можно определить и эффективную скорость распространения сигнала по наклонному лучу:

$$C_n = \frac{1}{t_e} \sqrt{r_{12}^2 + (Z_1 - Z_2)^2} .$$
 (2.1)

Технологии получения и обработки дальномерных данных в условиях глубокого моря, основанные на учете перечисленных особенностей, были реализованы уже при создании ГАНС ДБ для первых глубоководных АНПА. Основные шаги алгоритма такой обработки приведены ниже.

Алгоритм решения навигационной задачи

Схема работы ГАНС ДБ в составе комплекса АНПА, действующего при поддержке обеспечивающего судна, состоит в следующем. АНПА излучает навигационные импульсы с заданным периодом следования, заданной частоты и длительности. Прием навигационных сигналов ведется предварительно установленными в районе работ донными маяками-ответчиками и судовой приемопередающей антенной. Маяки ретранслируют навигационный сигнал с использованием индивидуального кода или собственной частоты. Борт судна и АНПА синхронизированы в момент старта АНПА. На борту судна определяются временные задержки навигационного сигнала, прошедшего по трассам «АНПА–судовая антенна» и «АНПА–маяк–судовая антенна». Далее, с использованием инамистиванием.
нием методов лучевой акустики рассчитывается скорость распространения акустических сигналов и определяются дальномерные данные, необходимые для решения навигационной задачи [7].

Дальность АНПА определяется путем измерения суммарного времени распространения навигационного импульса по трассе «АНПА–маяк–АНПА». При решении навигационной задачи горизонтальные координаты объекта навигации определяются через расстояние до маяков-ответчиков с использованием обычного двумерного сферического алгоритма, причем для однозначного определения координат нужно иметь не менее трех маяков.

Однако для оперативного отображения положения робота на борту судна решение навигационной задачи выполняется в два этапа. Сначала прямое измерение дальностей робота от маяков и определение текущих координат на его борту. Затем измерение дальностей робота от судна через ретрансляторы из установленных маяков и расчет его текущих координат на борту обеспечивающего судна.

Исходными данными для решения навигационной задачи в глубоком море являются:

C(z) – распределение скорости звука по глубине; H – глубина моря; X_i , Y_i , Z_i – координаты i маяка – ответчика, i = 1...3, Z_{sa} – глубина судовой антенны; Z_v – глубина АНПА; C_{sai} – среднегармоническая скорость распространения сигнала от судовой антенны до i маяка-ответчика; C_{sav} – среднегармоническая скорость распространения сигнала от судовой антенны до i маяка-ответчика; C_{sav} – среднегармоническая скорость распространения сигнала от судовой антенны до $AH\Pi A$; C_{vi} – среднегармоническая скорость распространения сигнала от АНПА до i – маяка-ответчика.

Среднегармоническая скорость распространения сигналов в вертикально-неоднородной среде определяется как

$$\overline{C} = \frac{Z_q - Z_j}{\int_{Z_j}^{Z_q} \frac{dz}{C(z)}}, \qquad \overline{C} = \frac{Z_q - Z_j}{T}, \qquad (2.2)$$

где Z_j – глубина точки излучения; Z_q – глубина точки приема; T – время распространения сигнала от точки излучения до точки приема.

Используя кусочно-линейную аппроксимацию профиля скорости звука C(z), время распространения сигнала в слоисто-неоднородной среде можно представить как $T = \sum_{i=j}^{q} t_i$, где j – номер горизонта, на котором находится точка излучения; q – номер горизонта, на котором находится точка приема; t_i – время распространения сигнала в слое, расположенном между i и i + 1-горизонтом;

$$t_i = \left| \frac{1}{g_i} ln \left(\frac{C_{i+1}}{C_i} \right) \right|,$$

где C_i , C_{i+1} – скорости звука на i и i + 1-горизонте соответственно; g_i – градиент скорости звука, определяемый как $g_i = \frac{C_{i+1} - C_i}{Z_{i+1} - Z_i}$.

Для расчета координат объекта необходимо определить его горизонтальные дальности от маяков-ответчиков, а для расчета координат АНПА в качестве дополнительного маяка можно использовать судовую антенну. В условиях глубокого моря расчет горизонтальных дистанций производят по наклонным дистанциям и по точному лучевому алгоритму, используя полученные времена, глубины объектов и маяков-ответчиков.

Горизонтальные дистанции от судовой антенны до маяковответчиков рассчитываются по формуле

$$R_{gi} = \sqrt{R_{ni}^2} - (Z_i - Z_{sa})^2, \qquad (2.3)$$

где R_{gi} и R_{ni} – горизонтальная и наклонная дистанции от судовой антенны до *i* маяка-ответчика.

Наклонные дистанции от судовой антенны до маяков-ответчиков рассчитываются по формуле $R_{ni} = T_{sai}C_{sai}$, где T_{sai} – время распространения импульса от судовой антенны до *i* маяка-ответчика. Горизонтальные дистанции от АНПА до маяков-ответчиков рассчитываются по формуле

$$D_{gi} = \sqrt{D_{ni}^2} - (Z_i - Z_v)^2, \qquad (2.4)$$

где D_{gi} и D_{ni} – горизонтальная и наклонная дистанции от АНПА до *i* маяка-ответчика. Наклонные дистанции от АНПА до маяков-от-

ветчиков рассчитываются по формуле: $D_{ni} = T_{vi}C_{vi}$, где T_{vi} – время распространения сигнала от АНПА до *i* маяка-ответчика.

Горизонтальная дистанция от АНПА до судовой антенны рассчитывается по формуле

$$R_{gsav} = \sqrt{R_{nsav}^2} - (Z_v - Z_{sa})^2,$$
(2.5)

где R_{gsav} и R_{nsav} – горизонтальная и наклонная дистанции от АНПА до судовой антенны.

Наклонные дистанции от АНПА до маяков-ответчиков рассчитываются по формуле $R_{nsav} = T_{sav}C_{sav}$, где T_{sav} – время распространения сигнала от АНПА до судовой антенны.

Лучевой алгоритм вычисления расстояний по измеренному времени распространения, обобщенный на все множество лучей, может использоваться для расчета любой лучевой траектории.

Перспективы развития ГАНС ДБ связаны с увеличением дальности действия ГАНС ДБ в условиях сильной рефракции сигналов в глубоком море, повышением точности определения координат в условиях многолучевости сигналов в мелком море, снижением стоимости и времени развертывания системы в районах проведения подводных работ, повышением точности путем оптимизации структуры системы (число маяков-ответчиков в ГАНС, их доступность, продолжительность активной работы) и разработки адаптивных методов обработки сигнальной информации.

В условиях мелкого моря при наличии большого количества отражений от границ происходит наложение принимаемых сигналов друг на друга, что ведет к уширению навигационного импульса и увеличению ошибки измерения времен прихода импульсов. Расчет горизонтальных дистанций при этом целесообразно проводить с использованием некоторой средней скорости распространения сигналов. Расчет координат объекта, находящегося в точке с координатами X_a , Y_a , при известных заранее глубинах маяков-ответчиков и объекта производится с использованием двумерного сферического алгоритма расчета координат, который требует наличия двух и более маяков-ответчиков и решает задачу пересечения двух или более сфер с центрами в точках расположения маяков-ответ-

чиков. Координаты искомой точки определяются из решения системы уравнений

$$(X_a - X_i)^2 + (Y_a - Y_i)^2 = R_i^2,$$
(2.6)

где *i* – номер приемоответчика , *i* = 1 ÷ *n*; *n* – число приемоответчиков; R_i – горизонтальное расстояние от *i* приемоответчика до искомой точки с координатами X_a , Y_a , X_i и Y_i – координаты *i*-го приемоответчика.

Если предварительно вычислить горизонтальные расстояния от объекта до маяков с использованием информации о глубинах установки маяков, то место объекта может быть определено как точка пересечения трех окружностей с центрами, соответствующими проекциям точек установки маяка на плоскость, в которой расположен объект, и с радиусами, равными горизонтальным расстояниям до маяков. Однако результаты измерений как наклонных расстояний, так и глубин, и, следовательно, горизонтальных расстояний содержат ошибки. В связи с этим три окружности, как правило, не пересекаются в одной точке; точки пересечения каждых двух окружностей образуют треугольник, называемый треугольником невязки. Считается, что объект расположен в центре этого треугольника.

Размер треугольника невязки Е рассчитывается по формуле

$$E = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\sum_{1}^{3} \left(\left(\left(X_{a} - X_{i} \right)^{2} + \left(Y_{a} - Y_{i} \right)^{2} \right)^{0.5} - R_{i} \right)^{2} \right)^{\frac{1}{2}}.$$
 (2.7)

Практические технологии определения эффективной скорости при работе в мелком море более подробно поясняются в п. 4.2.

2.1.2. Оценки погрешности определения координат в ГАНС ДБ

Погрешности в системах навигации могут быть разделены на два принципиально разных вида: погрешности в заданной геометрии размещения маяков и погрешности измерения дальностей. Последняя определяется выбранной скоростью распространения сигнала и точностью оценки времени прихода навигационного импульса. Неточное задание скорости сигналов проявится как смещение расстояний при вычислениях и ведет к ошибкам локализации АНПА. Неудачное расположение или недостаточное количество маяков делает ошибку зависимой от положения объекта навигации в развернутой навигационной сети.

Оценки погрешности измерения дальности [7]

Как правило, взаимное положение объекта, судовой антенны и маяков отображается в горизонтальной плоскости. Горизонтальное расстояние до маяка в локальной системе координат связано с измеряемыми величинами соотношением

$$r_i^2 = d_i^2 - (z_i - z_a)^2, \ d_i = Ct_i,$$
(2.8)

где d_i – наклонные дальности до маяков, r_i – горизонтальная дальность, t_i – время распространения сигнала.

Соответствующее уравнение погрешностей можно записать в виде

$$\sigma_r^2 = \frac{r^2}{C^2} \sigma_c^2 + \frac{C^2}{\cos^2 \alpha} \sigma_t^2 + \sigma_z^2 t g^2 \alpha , \qquad (2.9)$$

где $\sigma_z^2 = \sigma_{z1}^2 + \sigma_{z2}^2$, α – угол скольжения в треугольнике со сторонами: $(z_1 - z_a), r, d$; здесь $\sigma_r, \sigma_z, \sigma_t, \sigma_c$ – соответствующие погрешности. Основная составляющая из перечисленных погрешностей σ_c –

погрешность оценки скорости звука. Она определяется инструментальной погрешностью измерения скорости звука и в основном используемыми алгоритмами расчета эффективной скорости распространения сигнала. Если неоднородность морской среды по скорости звука учитывается введением некоторой средней скорости, то относительная погрешность ее задания имеет оценку $\sigma_c = 10^{-2}...10^{-4}$ в зависимости от того, насколько точно определена эта скорость для конкретных условий. При работе в районе с изменяющейся геометрией размещения абонентов навигационной сети эта ошибка может оказаться значительной. Если условия работы остаются неизменными и алгоритмы расчета эффективной скорости полностью учитывают рефракцию и многолучевость, погрешность потенциально может быть снижена до инструментальной. При работе АНПА в глубоком море у дна неоднородность морской среды по скорости звука можно учесть введением средней скорости и получить погрешность о, в виде

$$\sigma_c^2 = \sigma_{cg}^2 + \sigma_{cd}^2 \,. \tag{2.10}$$

Инструментальная погрешность σ_{cd} как правило, невелика. При использовании акустического измерителя скорости звука с погрешностью, например, 0,016 % она составляет $\sigma_{cd} = 0,25$ м/с. Для оценки σ_{cg} положим, что температура воды в районе работ изменяется на 0,1 °C на 1 м глубины, и АНПА движется в режиме ГБО съемки на высоте 40 м относительно маяков. Тогда $\sigma_{cg} = 5,5$ м/с, а общая погрешность измерения скорости звука при таких условиях составит $\sigma_c \approx \sigma_{cg}$.

Приближенную оценку погрешности измерения дистанции до маяка можно записать так:

$$\sigma_r^2 = \frac{r^2}{C^2} \sigma_c^2 + C^2 \sigma_t^2.$$
 (2.11)

Зная погрешность измерения дистанций, можно оценить погрешность измерения координат АНПА средствами ГАНС за счет геометрии навигационной сети.

Оценки погрешности определения координат за счет геометрии навигационной сети

Погрешность измерения координат в ГАНС с двумя маяками σ_{12} (рис. 2.1) зависит от точности измерения дистанций $d_{1,}$ d_{2} и расположения АНПА (точка А) относительно маяков (точки 1, 2).



В погрешность измерения d_1 , d_2 входит и погрешность измерения базового расстояния l.

Оценки погрешности измерения координат представим в виде [7]:

$$\sigma_{12}^2 = \frac{d_1^2 + d_1^2}{\sin^2 \alpha_{12}} \sigma_{oc}^2, \qquad (2.12)$$

где $\sigma_{oc} = \frac{\sigma_c}{C}$.

Если используются два маяка, то координаты объекта определяются с точностью до зеркального относительно оси отображения. На основе погрешности, полученной для системы из двух маяков, при трех маяках выполняется трехкратная измерительная процедура по парам выставленных маяков, определяющая три точки возможного нахождения объекта с их последующим осреднением.

Исходя из модели использования АНПА положим, что базовые расстояния 1 не будут превышать 5000 м. Маяки-ответчики будут располагаться вдоль зоны действия АНПА, и расстояния до ближайшей пары маяков не будут превышать 10000 м. В этом случае минимальное значение угла α_{12} будет 30°.

Таблица 2.1 Погрешность измерения координат средствами ГАНС

Дальность МО, км	Погрешность измерения дистанции, σ _r , м	Погрешность измерения координат (по паре МО), м	Погрешность измерения координат (по 3 MO), м		
10	38	108	51		
5	19	31	13		
2,5	9,7	15	6		

Далее, выполним расчеты поля ошибок измерений координат в зависимости от пространственного положения АНПА относительно маяков для различных значений погрешности измерения дистанций.

При расчете ошибок координаты АНПА вычислялись в квадратах со сторонами 5000 и 10000 м. Точки измерений располагались равномерно по всей площади квадратов с шагом 100 м. В исходных условиях вычислительного эксперимента полагалось, что координаты маяков-ответчиков известны точно. Число маяков составляло три и пять. Относительная погрешность измерения дистанций устанавливалась значениями 0,3–1 %.

По результатам эксперимента построены плоты с графическим представлением полей ошибок измерений координат в зависимости от пространственного положения АНПА относительно маяков для различных значений погрешности измерения дистанций (диапазоны погрешностей выделены цветом).

На рис. 2.2 показано распределение погрешностей измерения координат на квадрате со стороной 5000 м и ошибкой измерения дистанций 1 %.

Очевидно, что при ошибках измерения дистанций 1 % можно обеспечить точность, например, 15 м только вблизи маяков-ответчиков в треугольнике со стороной 3 км (поле желтого цвета).

На рис. 2.3 показано распределение погрешностей измерения координат на квадрате со стороной 10000 м и ошибкой измерения дистанций 1 %. Предполагается, что носитель находится в центре квадрата. Из рис. 2.3 видно, что при ошибке измерения дистанций до маяков, равной 1 %, область, в которой обеспечивается точность 15 м, ограничивается квадратом 3 х 3 км. На рис. 2.4, 2.5 показано



Рис. 2.2. Погрешность определения координат средствами ГАНС ДБ при ошибках измерения дистанций до маяков – 1 % – три маяка



Рис. 2.3. Погрешность определения координат средствами ГАНС ДБ при ошибках измерения дистанций до маяков – 1 % – пять маяков



Рис. 2.4. Погрешность определения координат средствами ГАНС ДБ при ошибках измерения дистанций до маяков – 0,5 % – пять маяков



Рис. 2.5. Погрешность определения координат средствами ГАНС ДБ при ошибках измерения дистанций до маяков – 0,3 % – пять маяков

распределение погрешностей измерения координат на квадрате со стороной 10000 м и ошибкой измерения дистанций 0,5 и 0,3 % соответственно. При погрешности измерений дистанций 0,3 % точность 15 м достигается в окружности радиусом 5 км. Отметим, что погрешности определения данных о местоположении АНПА при использовании ГАНС имеют прямую зависимость от дистанции до маяков.

Глава 2

2.1.3. Задача координатной привязки опорных точек ГАНС

Определение координат стартовой точки АНПА при начале работы бортовой навигационной системы и привязка маяков ГАНС ДБ к географическим координатам – важнейшие процедуры, предшествующие началу миссии робота. Для названных процедур разработаны специальные методики измерений, позволяющие получить эти координаты с высокой точностью. Классические методы описаны в монографии [3]. Более точный метод проходных характеристик, или траверзный метод, описан в работах [52, 53]. Дальнейшее развитие методы получили в технологиях, разработанных в [54–56]. Суть всех методов сводится к измерению прямой наклонной дальности между неподвижным источником сигналов и приемной буксируемой судовой антенной. Методы отличаются порядком оценки координат буксируемой антенны, находящейся в подводном положении, по данным текущих спутниковых координат обеспечивающего судна и порядком оценки эффективной скорости сигналов для определения наклонных расстояний. При этом большой объем информации и использование статистических методов обработки позволяют уменьшать погрешность определения координат

Обзор методов координирования

Измерение абсолютных координат маяков-ответчиков траверзным методом

Траверзный метод определения координат реализуется следующим образом: обеспечивающее судно с выносной приемопередающей антенной движется равномерно по прямолинейной траектории вблизи маяка-ответчика, через равные промежутки времени измеряются горизонтальные дистанции от маяка-ответчика до судовой антенны, а также координаты обеспечивающего судна. Траекторные данные, полученные с помощью спутниковых средств навигации, в соответствии с гипотезой о прямолинейном и равномерном движении судна аппроксимируются линейной функцией. Дальномерные данные ГАНС аппроксимируются полиномом первой степени. С помощью этих приближений определяются траверзное расстояние и координаты точки траверза на маяк-ответчик. Поскольку известны абсолютные координаты опорных точек (точек положения обеспечивающего судна), местоположение маяка-ответчика определяется в абсолютной системе координат.

Рекомендуемое число точек измерений на галсе должно быть несколько десятков, что позволяет уменьшить случайную погрешность измерений до нескольких метров. Также рекомендуется, чтобы точка траверза на маяк-ответчик находилась посередине галса.

Для проведения калибровки базы из трех маяков-ответчиков рекомендуется совершить как минимум три галса, проходящие перпендикулярно базисным линиям. При этом по данным одного галса измеряются координаты двух маяков. Такая схема калибровки позволяет дважды определить местоположение каждого маяка-ответчика. Измерения базовой дистанции для каждой пары маяков также позволяют уменьшить влияние ошибки измерения координат судовой антенны относительно координат судна (т. е. длину и ориентацию кабель-троса). Суммарная погрешность определения координат маяка-ответчика складывается из следующих составляющих: погрешности, обусловленной отклонениями движения судна от прямолинейной траектории, погрешности акустического дальномера, погрешности определения местоположения судовой антенны относительно судна (при прямолинейном равномерном движении на галсе она, как правило, постоянна). Погрешность акустического дальномера, в свою очередь, включает в себя погрешность измерения временных интервалов и погрешность задания скорости звука.

Погрешность определения координат маяка-ответчика в результате такой групповой обработки навигационных данных методом траекторных измерений определяется формулой

$$\sigma^{2} = \frac{\sigma_{0}^{2}}{N} + \frac{\sigma_{c}^{2}}{C^{2}} (t_{0}^{2}C^{2} - H^{2}), \qquad (2.13)$$

где σ_0 – погрешность определения координат судна, N – число точек на галсе, участвующих в измерениях, σ_c – погрешность измерения скорости звука на профиле вертикального распределения, C – эффективная скорость звука (среднегармоническая), t_0 – траверзное время распространения акустического сигнала до маяка-ответчика, H – глубина моря в месте постановки маяка-ответчика.

Координирование маяков-ответчиков при произвольном движении обеспечивающего судна

Примем, что судно движется по произвольной траектории. Через равные промежутки времени по данным ГАНС определяются наклонные дальности между маяком и судовой антенной R_i в точках G_i , $i = 1 \div N$, где i – номер измерения, N – число измерений. Дальности рассчитываются по времени прихода и задаваемой эф-

фективной скорости распространения сигналов. Для определения глубины маяка-ответчика необходимо проводить измерения R_i на разных глубинах судовой антенны. Координаты судна в географической системе определяются с помощью СНС и для удобства расчетов переводятся в относительную систему координат. Накапливаются данные измерений координат X_i , Y_i и наклонные дистанции между маяком-ответчиком и судовой антенной R_i , а также глубины судовой антенны Z_i .

Полученная навигационная информация подвергается статистической обработке, что позволяет обеспечивать необходимую точность в определении координат маяков-ответчиков. Координаты маяка-ответчика (X,Y,Z) определяются с использованием сферического алгоритма, суть которого заключается в том, что точка, в которой находится *i* маяк-ответчик, является точкой пересечения сфер с центрами в точках измерения наклонных расстояний R_i , проекции которых на плоскость *XOY* определяются известным образом:

$$(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2 + (Z - Z_i)^2 = R_i^2$$

Чтобы получить решения относительно (X,Y,Z), необходимо исключить члены, содержащие квадраты этих величин, путем объединения уравнений в пары и последующим вычитанием в паре одного уравнения из другого. Общее число уравнений, полученных после этих преобразований, $N_1 = N(N-1)$.

После преобразований получим следующую систему уравнений:

$$A_{kp}X + B_{kp}Y + C_{kp}Z = D_{kp}, \qquad (2.14)$$

где

$$\begin{aligned} A_{kp} &= 2 \left(X_k - X_p \right), \quad B_{kp} = 2 \left(Y_k - Y_p \right) \ , \ C_{kp} = 2 \left(Z_k - Z_p \right) \\ D_{kp} &= \left(R_k^2 - R_p^2 \right) - \left(X_k^2 - X_p^2 \right) - \left(Y_k^2 - Y_p^2 \right) - \left(Z_k^2 - Z_p^2 \right), \\ k &= 1 \div (N-1), \ p = 2 \div N, k \neq p \ . \end{aligned}$$

Решение системы уравнений осуществляется с помощью метода наименьших квадратов. Представим систему уравнений в виде

 $a_l X + b_l Y + c_l Z = d_l$, $a_l = A_{kp}$, $b_l = B_{kp}$, $c_l = C_{kp}$, $d_l = D_{kp}$, $l = 1 \div N_1$.

Для получения оценок *X*, *Y*, *Z* необходимо совместно решить уравнения:

$$\begin{split} X \sum_{l=1}^{N_1} a_l^2 + Y \sum_{l=1}^{N_1} a_l b_l + Z \sum_{l=1}^{N_1} a_l c_l &= \sum_{l=1}^{N_1} a_l d_l , \\ Y \sum_{l=1}^{N_1} b_l^2 + X \sum_{l=1}^{N_1} a_l b_l + Z \sum_{l=1}^{N_1} b_l c_l &= \sum_{l=1}^{N_1} b_l d_l , \\ Z \sum_{l=1}^{N_1} c_l^2 + Y \sum_{l=1}^{N_1} c_l b_l + X \sum_{l=1}^{N_1} a_l c_l &= \sum_{l=1}^{N_1} c_l d_l . \end{split}$$

При применении алгоритма также следует учесть существующую разницу в координатах судна и судовой антенны. Так как наклонные расстояния до маяка-ответчика измеряются относительно судовой антенны, а СНС выдает координаты судна, необходимо определить координаты судовой антенны X_i Y_i через судовые координаты X_{si} Y_{si} и величины смещений координат судовой антенны относительно судна ΔX_{si} Y_{si} : $X_i = X_{si} - \Delta X_{si}$, $Y_i = Y_{si} - \Delta Y_{si}$.

Координирование маяков-ответчиков при движении по окружности

В отличие от предыдущего метода, при координировании судно движется относительно маяка-ответчика по траектории, близкой к окружности. Накапливаются данные измерений координат X_i Y_i и соответствующих им временных отсчетов сигналов t_i . Необходимым условием выбора данных t_i из всего набранного массива является выполнение условия $t_i - \varepsilon < t_i < t_i + \varepsilon$, где ε – допустимое отклонение величины t_i от заданного значения.

На основании полученных выше соотношений и условий, что наклонные дистанции между маяком-ответчиком и судовой антенной $R_i = const$, судовая антенна находится на постоянной глубине $Z_i = const$, система уравнений (2.14) примет вид

$$A_{kp}X + B_{kp}Y = D_{kp}, \qquad (2.15)$$

$$k = 1 \div (N-1), p = 2 \div N, k \neq p$$
.

Окончательно для получения координат X, Y с помощью метода наименьших квадратов необходимо совместно решить уравнения:

$$\begin{split} X \sum_{l=1}^{N_1} a_l^2 + Y \sum_{l=1}^{N_1} a_l b_l &= \sum_{l=1}^{N_1} a_l d_l, \qquad Y \sum_{l=1}^{N_1} b_l^2 + X \sum_{l=1}^{N_1} a_l b_l = \sum_{l=1}^{N_1} b_l d_l, \\ a_l &= A_{kp}, \ b_l \quad B_{kp}, \ d_l = D_{kp}, \ l = 1 \div N_1. \end{split}$$

Координирование с использованием предварительно определенных эффективных скоростей распространения сигналов

Для описанных выше способов определения координат стационарных донных маяков в глубоком море важными условиями их применения являются необходимость выполнения жестко заданных галсов судна и необходимость точного измерения наклонной дистанции. Последнее включает необходимость точного измерения времени распространения навигационного сигнала и необходимость точного определения эффективной скорости распространения сигнала в районе работ, причем значение эффективной скорости в существенной степени определяется вертикальным распределением скорости звука и является различным для разных значений наклонной дальности. Это существенно усложняет и увеличивает продолжительность выполнения работы из-за необходимости измерения гидрологических характеристик района.

При проведении реальных работ процедуру определения наклонной дальности можно упростить за счет предварительного расчета эффективной скорости звука путем ее аппроксимации от времени распространения сигнала для заданных глубин установки судовой антенны и источника навигационных сигналов. Эффективная скорость аппроксимируется полиномом второй степени времени распространения *t* навигационного сигнала:

$$C_i = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 \,. \tag{2.16}$$

Коэффициенты полинома a_0, a_1, a_2 определяются существующими гидрологическими и геометрическими условиями работы. Это позволяет получать относительно точные значения наклонной дальности $D = C_e t$ в широком диапазоне изменений времени распространения при принятых гидрологических и геометрических условиях работы. Эффективная скорость распространения навигационного сигнала предварительно устанавливается как функция гидрологических характеристик района работ. Имеются специальные методические разработки для выполнения такого координирования [54].

Методика точной координатной привязки маяков-ответчиков без знания эффективной скорости звука

Однако при применении способа с предварительным расчетом эффективной скорости время координирования оказывается значительным за счет необходимости измерения гидрологии и необходимости определения эффективной скорости. Кроме того, имеет место недостаточная точность координирования за счет погрешности определения эффективной скорости из-за систематических погрешностей измерения времени распространения.

Представляет интерес оценка возможности определения горизонтальных координат неподвижного подводного источника навигационных сигналов в условиях неизвестной гидрологии [55].

Рассмотрим возможности решения задачи при следующем сценарии работы. После погружения на рабочую глубину маяк зафиксирован в некоторой точке и периодически излучает навигационные сигналы. Обеспечивающее судно буксирует судовую антенну в окрестности места установки маяка, измеряет время распространения гидроакустических навигационных сигналов в точках нахождения приемной антенны и фиксирует текущие координаты буксируемой антенны в момент приема навигационных сигналов (рис. 2.6).

Антенну перемещают произвольными галсами, охватывающими с различных направлений окрестность места установки маяка. Зафиксированные координаты приемной антенны, полученные на произвольных галсах, формируют в группы, равноудаленные от источника навигационных сигналов в соответствии с измеренными временами их распространения. Далее, определение горизонтальных координат источника навигационных сигналов решается



Рис. 2.6. Расчетная схема определения координат донного маякаответчика

как задача определения геометрического центра окружности, радиус которой – горизонтальная дальность приемной антенны от источника навигационных сигналов. Горизонтальная дальность приемной антенны в общем случае является функцией глубин излучающей и приемной антенн, эффективной скорости и времени распространения навигационного сигнала (см. п. 2.1.1). Затем для каждой группы равноудаленных координатных отсчетов, если их число не менее трех, оценивают горизонтальные координаты источника X_k , Y_k методами статистической обработки, например методом наименьших квадратов.

Далее, обозначим x_i , y_i — группа координатных отсчетов буксируемой антенны, равноудаленных от источника, сформированная для времени распространения навигационного сигнала t_k при установленной ширине временного окна Δt ; N — число координатных отсчетов, принятых при расчете в k-й зоне дальности; $i = 1 \div N$; $N = \frac{t_{max} - t_{min}}{\Delta t}$ — число зон дальности; $t_{max} \div t_{min}$ — временной интервал распространения навигационных сигналов, зафикси-

рованный при перемещении приемной гидроакустической антенны.

Для каждой выявленной тройки равноудаленных точек $(d_1 = d_2 = d_3)$ координаты донного маяка-ответчика определяются по координатам судовой антенны в этих точках при условии ее буксировки на одинаковой глубине $(Z_1 = Z_2 = Z_3 = const)$. Вычисленные координаты являются центром окружности, на которой лежат равноудаленные точки измерений (рис. 2.7).



Рис. 2.7. Схема способа координирования. На рисунке приняты следующие обозначения: t_k – равноудаленные зоны, x_i , y_i – координатные отсчеты, $i = 1 \div N$, N – число координатных отсчетов, принятых при расчете в *k*-й зоне дальности

Расчетные формулы по полученным данным в одной равноудаленной зоне после несложных преобразований приобретают вид

$$X_{k} = \frac{c_{2}b - c_{1}a}{db - a^{2}}, \quad Y_{k} = \frac{-c_{2}a + c_{1}d}{db - a^{2}}, \quad (2.17)$$

где $b = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^{N} y_{i} \right)^{2} - \sum_{i=1}^{N} y_{i}^{2}, \quad d = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^{N} x_{i} \right)^{2} - \sum_{i=1}^{N} x_{i}^{2}, \quad a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} y_{i} \sum_{i=1}^{N} x_{i} - \sum_{i=1}^{N} x_{i}y_{i}, \quad c_{1} = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^{N} y_{i} \sum_{i=1}^{N} \left(x_{i}^{2} + y_{i}^{2} \right) - \sum_{i=1}^{N} y_{i} \left(x_{i}^{2} + y_{i}^{2} \right), \quad c_{2} = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^{N} x_{i} \sum_{i=1}^{N} \left(x_{i}^{2} + y_{i}^{2} \right) - \sum_{i=1}^{N} x_{i} \left(x_{i}^{2} + y_{i}^{2} \right).$

Оценку координат источника навигационных сигналов получают после осреднения по всем равноудаленным зонам:

$$X = \frac{1}{K} \sum_{k} X_{k}, \quad Y = \frac{1}{K} \sum_{k} Y_{k}.$$

Как следует из (2.17), расчетные значения координат объекта оказываются зависимыми только от координат приемной антенны, фиксированных в равноудаленных зонах, и независимыми от значений эффективной скорости. Эти утверждения основаны на условии, что при равном времени распространения (что задается условиями расчета путем формирования равноудаленных зон) и заданных глубинах установки антенн источника и приемника скорость распространения сигналов в различных точках акватории (по различным горизонтальным направлениям) является одинаковой.

Для оценки достижимых точностных характеристик метода предположим, что буксируемая приемная антенна движется по окружности, в центре которой установлен источник навигационных сигналов. Условием такого движения является равенство времени распространения навигационного сигнала, принимаемого в каждой точке траектории. Точное значение времени не имеет значения. Наличие систематической погрешности измерения времени не влияет на результат координирования. Для приведенной выше Глава 2

модели расчета в этом случае погрешность определения координат неподвижного источника навигационных сигналов σ_M определяется только погрешностью измерения координат буксируемой антенны σ_A и связана с ней зависимостью

$$\sigma_M = \sigma_A \frac{3\sqrt{2}}{2\sqrt{N}}, \qquad (2.18)$$

где *N* – число отсчетов координат, взятых для выбранного значения времени распространения.

Погрешность определения координат буксируемой антенны определяется погрешностью систем спутниковой навигации и установленной шириной временного окна при формировании равноудаленных зон. Если принять ее равной 5–10 м, то погрешность определения координат источника может быть меньше 1 м при числе наблюдений несколько сотен. Такой объем данных для координирования легко достигается при движении судна по акватории различными галсами и формированием нескольких десятков равноудаленных зон. Например, при периоде следования навигационных сигналов 10 с за 1 ч координирования накапливаются 360 координатных отсчетов, и этих данных достаточно для определения координат с ошибкой менее 1 м.

2.2. РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИИ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ

2.2.1. Применение сложных сигналов для расширения функциональных возможностей существующих ГАНС ДБ

В навигационных системах с длинной базой, разработанных в ИПМТ ДВО РАН и имеющих дальность действия 10–15 км, используются простые сигналы с частотно-временным разделением для кодирования информации и обозначения абонентов навигационной сети [11]. В настоящее время для целей гидроакустической навигации и связи выполнено много разработок, связанных с применением навигационных фазоманипулированных сигналов типа М-последовательностей. Большой опыт таких работ, посвященных экспериментальным исследованиям распространения сигналов на большие дальности, имеет ТОИ ДВО РАН [27, 57, 58]. Проведенные в ИПМТ ДВО РАН исследования показывают, что применение таких сигналов представляется перспективным также и при реализации навигационных средств средней дальности действия (10–15 км) [30].

Применение сложных сигналов за счет их высокой энергетики позволяет увеличить дальность действия, обеспечивает увеличение точности измерения дальностей и создает основу нового поколения навигационных систем. Отметим еще два важных фактора целесообразности применения сложных сигналов в гидроакустической дальнометрии. Это определение эффективной скорости распространения сигналов с высокой точностью за счет повышенной помехоустойчивости и высокоточное инструментальное определение времени прихода навигационных сигналов, зависящее только от полосы пропускания антенной системы. Возможности таких систем также расширяются за счет работы с ансамблями ортогональных навигационных сигналов для управления и телеметрии. Кроме того, увеличение информационной емкости сигналов может быть использовано для увеличения числа маяков, и, соответственно, точности в выделенных мелководных районах с расширенной зоной дальности и навигационного сопровождения нескольких абонентов в развернутой навигационной сети.

Ниже представлены материалы исследований для создания ГАНС со сложными навигационными сигналами. В выполненной проработке рассмотрены вопросы и представлены технические решения применения шумоподобных сигналов в частотном диапазоне 10–14 кГц и с максимальным использованием известных аппаратных средств ГАНС, работающей с гармоническими сигналами. При технической реализации подобной системы антенные устройства, аналоговые устройства приема и излучения сигналов, источники питания, блоки цифрового сопряжения аппаратных модулей с компьютерами управления и обработки информации не потребовали существенных изменений. Эта аппаратура в модернизированной системе дополняется специальными цифровыми модулями обработки и формирования сигналов, основанными на применении устройств программируемой логики и соответствующего программного обеспечения. В представленных материалах даны технические характеристики разработанных модулей цифровой обработки, необходимые для модернизации существующих ГАНС, сведения о достижимых параметрах и приведены результаты натурных испытаний экспериментального образца системы.

Методы обработки широкополосных сигналов и оборудование для их реализации

Известными исследованиями показано, что в качестве навигационных целесообразно использовать сложные фазоманипулированные сигналы на основе М-последовательностей. Работа со сложными сигналами позволяет разделить во времени и идентифицировать акустические импульсы, прошедшие между корреспондирующими точками по различным лучевым траекториям, путем взаимной корреляционной обработки принятых и излученных сигналов. Полученные таким образом импульсные характеристики акватории могут использоваться для высокоточного измерения времени прохождения сигналов для решения задачи определения дистанции между источником и приемником. Кроме этого, применение М-последовательностей позволяет осуществлять когерентное суммирование акустической энергии, прошедшей по различным траекториям, что может существенно повысить их эффективность. Для этого необходимо периодически излучать синхронизирующие М-коды и использовать их для взаимной корреляционной обработки с информационной последовательностью для устранения влияния многолучевости в волноводе.

Наибольшее применение в практике нашли М-последовательности максимальной длины, для которых при достаточно больших M-функция периодической автокорреляции процесса аналогична δ функции для белого шума – она имеет максимум при нулевой задержке, равный 1, и малую постоянную величину, равную $\frac{1}{N}$ для всех остальных задержек, где ($N = 2^{M} - 1$) – число символов в последовательности.

Наряду со свойствами автокорреляции М-последовательностей для задач звукоподводной связи и дальнометрии большое значение имеют их взаимно-корреляционные характеристики. В таких системах применяются пары М-последовательностей с достаточно малыми уровнями взаимной корреляции. Такие пары получили название предпочтительных. С использованием предпочтительных пар М-последовательностей можно построить большое количество других псевдослучайных последовательностей, которые обладают достаточно малыми уровнями взаимной корреляции В. К классу таких последовательностей относятся последовательности Голда. Для каждой предпочтительной пары можно построить N+2 различных последовательностей Голда и использовать их для организации многоадресного доступа, поскольку ввиду малой коррелированности они создают небольшие взаимные помехи. Так, для M = 9 в результате выбора предпочтительной пары 511-символьных М-последовательностей можно получить число различных последовательностей Голда, равное 513, максимальный уровень их взаимной корреляции В равен ~0.061. Значения автокорреляционных функций для последовательностей Голда при сдвиге, не равном нулю, также равны В.

Основным методом обработки широкополосных сигналов при их обнаружении в зашумлённом канале связи является корреляционный. Решение об обнаружении и определении времени распространения навигационного сигнала между пунктами излучения и приема принимается по экстремальному значению корреляционной функции на рассматриваемом интервале и задержке этого экстремума относительно импульса синхронизации. Базовым элементом при реализации систем с использованием сложных сигналов является многоканальный корреляционный приемник.

При построении приемника анализировались различные методы обработки сигналов [59–61]. Наиболее предпочтительным оказался метод посимвольной корреляции с использованием фазового детектора. Посимвольная корреляция (использование фазового детектора)

Для посимвольного вычисления корреляционной функции фазоманипулированного сигнала, представленного бинарной последовательностью, необходимо выделить символы, составляющие кодовую посылку, т. е. превратить её в последовательность, состоящую из элементов, принимающих два значения: 1 и –1. Далее, рассчитать корреляцию для этой последовательности. В предложенном [60–61] методе определение значения символа производится фазовым детектором. Принимаемый сигнал представляется в виде

$$US_i = Sign(u_i) = \begin{cases} 1, \text{ при } u_i \leq 0\\ 0, \text{ при } u_i > 0, \end{cases}$$

где u_k – последовательность входных отсчетов (обрабатываемый сигнал), а затем вычисляются значения двух корреляционных функций для каждого символа

$$\begin{split} X_n &= \sum_{i=0}^{N_s-1} US_i \cdot Sign\left(\cos\left(2\pi \frac{f_s}{f_d}i\right)\right), \\ Y_n &= \sum_{i=0}^{N_s-1} US_i \cdot Sign\left(\sin\left(2\pi \frac{f_s}{f_d}i\right)\right), \end{split}$$

где f_s , f_d – частоты несущей и дискретизации соответственно. Далее, по значениям X_n и Y_n определяется фаза символа φ . (Для каждого значения фазы свое значение X_n и Y_n). Значение символа определяется как

$$s_{j} = \begin{cases} -1, & 0 \le \varphi < \frac{\pi}{2}u \quad \frac{3\pi}{2} \le \varphi \le 2\pi \\ 1, & \frac{\pi}{2} \le \varphi < \frac{3\pi}{2} \end{cases}$$

Функциональная схема обработки показана на рис. 2.8.

В памяти «signal» хранится обрабатываемый сигнал в виде массива знаков. Блоки «sin» и «cos» представляют собой массивы, в которых хранятся знаковые маски функций синуса и коси-



Рис. 2.8. Функциональная схема модуля обработки сигналов

нуса искомой частоты. При обработке сигнала выделяются его символы и происходит последовательное перемножение значений входного сигнала и значений маски символа. Затем выполняется суммирование полученных произведений. Определение бинарных символов происходит по знаку полученных сумм B_k . Если $B_k < 0$, то значение бинарного символа принимается как $u_k = -$. А если $B_k \ge 0$, то $u_k = 1$. Следующий шаг – свертка с бинарной маской псевдослучайной последовательности *PN*, также состоящей из значений –1 и 1, с выделенной бинарной последовательностью u_k :

$$R_i = \sum_{k=1}^{N_s} PN_k \cdot u_k,$$

где N_s – количество бинарных символов в ожидаемом сигнале, *PN*_{*i*} – *k*-й символ псевдослучайной последовательности *PN*, *i* – номер отсчета (периода частоты дискретизации). Далее, по заданному порогу $h(R_i > h)$ фиксируется обнаружение сигнала в канале. Описанный цикл вычислений выполняется каждый такт частоты дискретизации с поступлением новых данных, что позволяет детектировать сигнал в реальном времени. Обработка сигнала происходит по частям (для каждого символа), что позволяет определить процент потери сигнала, т. е. определять количество совпадений символов принятого сигнала и ожидаемого сигнала. Одно из преимуществ данного способа – это отсутствие необходимости хранить маску всего сигнала в памяти. В памяти хранится лишь цифровая копия символа. Вычисление корреляционной функции происходит для каждого отсчета дискретизации в реальном времени. При этом в буфер выходных данных поступают следующие параметры: номер отсчета дискретизации, значение бинарной корреляционной

функции и признак наличия сигнала в канале. Ниже на рис. 2.9 представлена схема корреляционного приемника, реализующего предложенный метод обработки [60].



Рис. 2.9. Структурная схема корреляционного приемника

Как следствие в системе обработки можно реализовать до N каналов, каждый из которых будет работать со своей последовательностью, что позволит одновременно обслуживать несколько объектов навигации или формировать команды управления. Количество каналов зависит в большей степени от логической емкости используемой элементной базы. На сегодняшний момент на одной микросхеме может быть реализовано до 30–50 каналов приемника для последовательностей со следующими параметрами: число символов $N_c = 127$; число периодов на символ $T_s = 8$; несущая частота $f_s = 12$ кГц; частота дискретизации $f_d = 48$ кГц.

Такой приемник может составить основу цифрового модуля приема-передачи сигналов в ГАНС со сложными сигналами. На рис. 2.10 представлена структурная схема цифрового модуля приемопередатчика информационного сообщения во взаимодействии с центральным блоком управления АНПА.

Представленная схема приемопередатчика информационных сообщений позволяет обеспечивать различные режимы работы



61

в составе систем навигации, телеметрии и управления. В общем случае информационное сообщение состоит из маркера начала информационного сообщения и функционального слова и/или группы функциональных слов (команды) или слов данных. Большое количество возможных для использования кодовых последовательностей (последовательностей Голда) позволяет использовать уникальные кодовые наборы для каждого объекта при условии их группового взаимодействия. Для экономии энергии при постоянной работе в общую схему включен энергосберегающий одноканальный приемник, который по приходу определенного сигнала инициирует на заданный интервал времени многоканальный приемник (при необходимости может быть инициирован режим непрерывной работы многоканального приемника). Поскольку любое информационное сообщение состоит минимум из двух кодовых слов, разнесенных по времени, маркер начала информационного сообщения, который выделяется одноканальным корреляционным приемником и непосредственно информационной частью сообщения, то энергосберегающий приемник работает постоянно. Для сбережения энергии при длительных перерывах в работе (что характерно для функционирования маяков) в структуру схемы может быть добавлен таймер, включающий и отключающий приемник в режиме энергосбережения. В режиме энергосбережения все приемники включаются с определенным периодом на небольшой интервал времени (например, включение на 2 мин каждые 30 мин).

Экспериментальные исследования элементов систем навигации и управления с использованием сложных сигналов

Разработанные предложения по модернизации ГАНС средней дальности за счет применения сложных сигналов проверялись в ряде экспериментов с использованием макетных образцов оборудования.

Расширение информационной емкости навигационных сигналов для ускоренного информационного обмена [62]

Как отмечалось, применение сложных сигналов в разработанных ГАНС расширяет возможности системы для телеуправле-

ния и телеметрии. Для этого в составе сигнала можно применить импульсы различной частоты с их четко ранжированным распределением на временной оси. Временная координата отдельного импульса может соответствовать значению передаваемого параметра. Для оценки этих возможностей были проведены натурные исследования модели системы. Использовалось оборудование ГАНС ДБ с основной частотой 12 кГц. При проведении эксперимента в мелководной бухте в пункте приема были размещены приемная штатная антенна, АЦП и цифровой накопитель данных. Пункт излучения состоял из штатной излучающей антенны, усилителя мощности и формирователя сигналов. Для передачи был использован ряд тестовых сигналов, включающих последовательности радиоимпульсов различной частоты, равномерно распределенных на интервале длительности посылки, аналогичные последовательности импульсов с фазовой модуляцией, баркеровские сигналы разной длины. Длительность посылки составляла 6 с. Информация передавалась на 11 несущих в диапазоне 10-14 кГц. Длительность элементарного сигнала составляла 10 мс, шаг несущих по частоте составлял 250 Гц. Имелась возможность дискретно изменять уровень излучаемого сигнала и контролировать в пункте приема отношение сигнал/шум и передаточную частотную характеристику канала связи.

Принятые сигналы обрабатывались с целью анализа условий точного выделения частот сигналов и времени их прихода. Были разработаны программы обработки, реализующие дискретное преобразование Фурье, преобразование Гильберта, многополосная квадратурная обработка. При определении параметров сигналов дискрета временного анализа составляла 1 мс, размер анализируемого временного окна – 10 мс. На рис. 2.11 приведена спектральная картина передаваемого сообщения.

Для принятия решения об обнаружении сигнала на каждой частоте формировались адаптивные пороги, вычисляемые как за счет усреднения текущих уровней на всех частотных каналах, так и усреднения на временной оси в выделенном частотном канале. В эксперименте задавался уровень излучаемого сигнала ступенями 0, 14 и 26 дБ.





Рис. 2. 11. Спектральные характеристики навигационных импульсов

Таблица 2.2

Частота, кГц	10,5		10,75		11			11,25				
<i>А_e</i> , дБ	0	14	26	0	14	26	0	14	26	0	14	26
<i>А_r</i> , дБ	46	48	47	50	58	50	54	62	52	61	67	54
P,%	20	100	100	60	100	100	60	100	100	100	100	100
σ_t , mc	1,5	3,0	0,6	2,0	0,5	0	2,0	0,5	1,5	0,5	0,3	0,2
Частота		11,5			11,75			12			12,25	
<i>А_e</i> , дБ	0	14	26	0	14	26	0	14	26	0	14	26
<i>А</i> _r , дБ	46	69	53	61	67	51	57	64	53	43	51	48
P,%	100	100	100	80	100	100	70	100	100	50	100	100
σ_t , mc	0,5	0,4	0,4	0	0	0	3,0	0,5	0,5	8,0	0	1,2
Частота	12,5		12,75		13							
<i>А_e</i> , дБ	0	14	26	0	14	26	0	14	26			
<i>А_r</i> , дБ	45	54	46	43	49	46	40	52	45			
P,%	60	100	100	30	100	100	60	100	100			
σ_t , MC	0,8	0	1,2	7,0	0,1	1,0	2,0	0,1	1,0			

П р и м е ч а н и е . A_e , дБ – уровень излучаемого сигнала, A_r , дБ – уровень принятого сигнала, P, % – вероятность правильного приема, σ_i , мс – среднее значение ошибки времени обнаружения.

Результаты обработки принятых данных приведены в табл. 2.2. Представленные результаты показывают, что предложенная схема навигационно-информационного обмена, в неблагоприятных условиях мелкого моря при значительной неравномерности частотной характеристики канала связи и незначительном уровне излучаемого сигнала обеспечивает достаточно точную передачу установленных данных, при этом вероятность правильного обнаружения близка к 1, а средняя ошибка времени обнаружения отдельных частотных дискрет (мера точности значения передаваемого параметра) – около 1 мс.

Проверка основных характеристик корреляционного приемника [63]

При отработке приемника сначала ставились задачи проверки работы при значительном уменьшении уровня излучаемого сигнала с увеличением его сложности за счет увеличения полосы и длительности и оценки точности измерения времени распространения сигналов. В ГАНС, элементы которой использовались при проведении экспериментов, применяются простые навигационные сигналы, а уровень излучения, приведенный к расстоянию 1 м, составляет от 4 до 7 КПа. При длительности сигнала 20 мс на частоте 12 кГц и уровне шумов моря 0,001 Па в полосе 1 Гц достигается дальность действия системы в условиях глубокого моря до 15-20 км. Основным параметром обнаружения является отношение сигнал/шум в точке приема, вычисляемое как отношение энергии сигнала к спектральной плотности шумов. Для сохранения параметра обнаружения можно существенно увеличить длительность сигнала при соответствующем уменьшении уровня спектральных компонент.

В ходе эксперимента тракт излучения сигналов обеспечивал излучение фазоманипулированного сигнала типа М-последовательности в виде 511 символов длительностью 8 периодов каждый с несущей 12 кГц. В пункте приема обеспечивалась запись принятых сигналов для последующей обработки с использованием существующих программ обработки сигналов. Пункты излучения и приема были синхронизированы, а их местоположение точно определено с использованием средств спутниковой навигации. Положение пункта излучения было зафиксировано, а приемная аппаратура устанавливалась в различных точках акватории. Материалы, полученные при проведении экспериментов, сведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Дистанция между пунктами излучение-прием по данным СНС, м	324,2	1257,0	2070.7	3868,7	5731,5
Время распространения, с	0,215	0,836	1,368	2,565	3,791
Эффективная скорость, м/с	1507,5	1507,5	1507,5	1507,5	1507,5
Расчетная дистанция, м	324,1	1260,3	2062,3	3866,7	5714,9
Относительная погрешность измерения дистанции, %	0,03	0,26	0,40	0,05	0,29

ъ				
Результаты	первои	серии	экспе	риментов

Эксперимент выполнялся в мелкой бухте в сентябре. Суммарная длительность навигационного сигнала составляла 320 мс. Ошибка измерения времени прихода сигнала не превышала 0,6 мс. Мощность излучаемого сигнала была уменьшена на 20 дБ по сравнению с мощностью, излучаемой при работе с тональными сигналами. Перед выполнением работ была выполнена градуировка акватории для определения эффективной скорости распространения сигналов. Для этого в бухте в фиксированных точках были установлены три маяка-ответчика и судовая антенна ГАНС. Координаты точек установки были определены с использованием специального геодезического оборудования с погрешностью не более 0,1 м. Измерялись времена распространения навигационных сигналов от антенны до каждого маяка. По полученным данным решалась задача определения координат антенны в плоскости по трем дальностям с минимизацией величины треугольника невязки за счет выбора наиболее подходящей скорости распространения. Была установлена эффективная скорость 1507,5 м/с, при этом расчетные координаты судовой антенны определялись с ошибкой около 0.2 м.

Средняя ошибка измерения дальности для выполненных экспериментов при задаваемой скорости распространения сигналов 1507,5 м/с, как следует из таблицы, не превосходит 0,4 %, что является очень хорошим показателем для условий мелкого моря.

Во второй серии экспериментов определялись характеристики многоканального корреляционного приемника, реализованного программно-аппаратными средствами, обеспечивающими его работу в составе автономного устройства в реальном времени. Кроме навигационного сигнала обеспечивалось излучение ансамбля ортогональных сигналов для проверки возможности передачи и приема различных комбинаций сигналов М-последовательностей для их применения в качестве сигналов в системе управления. При проведении работ пункт приема был установлен на пирсе, антенна вывешена с пирса в воду на глубину 2,5–3,0 м. Пункт излучения сигналов был размещен на борту судна, которое перемещалось по акватории бухты.

Перед началом испытаний была осуществлена синхронизация приемника на пирсе и излучателя на судне. После перехода судна от пирса и вывешивания излучающей антенны на глубину 2,5-3,0 м с периодом 10 с производилось излучение ансамбля сигналов m1 и m2, представляющих собой две фазоманипулированные М-последовательности ($N_s = 127$; $T_s = 8$ периодов, $f_s = 12$ кГц), сдвинутых на 0,5 с. Принятые в пункте приема сигналы обрабатывались четырехканальным корреляционным приемником. В первом канале производилась свертка принятых данных с математической маской m1. Во втором канале производилась свертка принятых данных с реальной маской r1, записанной в контролируемых условиях М-последовательности при удалении излучателя от приемной антенны на расстояние 1 м. В третьем канале происходила посимвольная свертка принятых данных с маской m1, представленной в двоичном коде. Свертка принятых данных с математической маской m2 выполнялась в четвертом канале.

Результаты измерений и расчетов представлены в табл. 2.4. Во второй колонке дана дистанция между пунктами приема и излучения, полученная по СНС, в третьей колонке – результаты оценки отношения сигнал/шум для выбранной дистанции. С четвертой по шестую колонках даны результаты расчета дистанции, полученные для 1, 2 и 3 каналов соответственно, в седьмой – расчет макГлава 2

симальной относительной ошибки δl_{max} измерения дистанции. В последней колонке таблицы представлены измеренные временные задержки сдвинутого на 0,5 с сигнала m2 относительно сигнала m1.

		-		_		
СНС, м	SNR, дБ	К1, м	К2, м	КЗ, м	$\delta l_{\scriptscriptstyle max}$, %	К4-К1, с
145,10	-3,5	145,464	145,462	145,459	0,27	0,500302
501,92	-5,0	499,992	502,997	503,105	0,38	0,500546
1112,24	-17,5	1139,077	1112,940	1112,240	2,42	0,500125
1504,26	-18,0	1504,269	1504,270	1504,263	0,25	0,500333
1496,87	-11,2	1499,890	1499,230	1496,879	0,20	0,500157

-				
Результаты	второй	серии	экспе	риментов

Таблица 2.4

Примечание. Уровень излучения был увеличен на 12 дБ.

Далее, был сделан расчет ожидаемой потенциальной точности определения момента прихода сигнала при различном соотношении сигнал/шум в канале. В качестве критерия оценки точности была введена безразмерная величина *e*, определенная следующим образом:

 $e = \frac{N_s - \Delta N}{N_s}$, если $\Delta N < N_s$, для всех остальных случаев e = 0; где N_s – число отсчетов в символе сигнала, ΔN – максимальная ошибка определения момента прихода сигнала в отсчетах f_d . Таким образом, если максимальная ошибка определения момента прихода сигнала Δt не превышает по длительности один период частоты дискретизации $\frac{1}{f_d}$, тогда e = 1; если Δt превышает длительность одного символа М-последовательности, тогда e = 0 и если Δt равна по длительности половине символа, тогда e = 0,5.

На рис. 2.12 приведены графики зависимости e = f(SNR). Ошибка в отсчетах частоты дискретизации определялась вычислением разницы между моментами прихода сигналов в каналах K1 и K4. Таким образом, исключив влияние скорости звука, многолучевой структуры распространения сигнала, погрешности СНС и т.д., нашли «инструментальную» ошибку определения момента прихода сигнала для разработанных алгоритмов и средств.

Натурные испытания разработанного аппаратно-программного комплекса показали, что для сигналов с параметрами $C_s = 127$, $f_s = 12$ кГц, $T_s = 8$, S = 1 при SNR > -18 дБ максимальная ошибка определения момента прихода сигнала не превышает половины длительности одного символа, а при SNR > -10 дБ максимальная ошибка не превышает длительности одного периода частоты дискретизации.



Рис. 2.12. График е = f(SNR) для корреляционной обработки реального и идеального сигнала, а) для «идеального» сигнала (результаты моделирования); б) результаты обработки реального сигнала разработанным корреляционным приемником в реальном времени; в) результаты обработки реального сигнала на модели.

Экспериментальные исследования характеристик системы

В последующих экспериментах проводились исследования по оценке различных алгоритмов кодирования и передачи информационных сообщений, направленных на повышение скорости и/ или достоверности передачи информации. Анализировались условия детектирования сложных сигналов в зависимости от мощности излучения и отношения сигнал/шум на входе приемника. На рис. 2.13 представлена общая схема организации эксперимента, проведенного в мелководной бухте с размещением пункта приема на подвижном носителе, а пункта излучения – на пирсе.

Порядок проведения работ включал следующие операции. Излучатель находится на пирсе, излучающая антенна вывешивается в воду на глубину 2 м. Приемник находится на лодке, которая перемещается по бухте, приемная антенна вывешивается в воду на глубину до 10 м в зависимости от глубины моря. Производится начальная синхронизация приемника и передатчика.



Рис. 2.13. Общая схема организации эксперимента: С – команды, D – данные, РС – компьютер, ГАх – гидроакустическая антенна, Упих – усилители излучаемого сигнала, Уппх – усилители принимаемого сигнала с фильтром, ПИх – пункты излучения, ППх – пункты приема

Излучатель каждые 10 с в момент времени, равный нулю, излучает информационное сообщение: Data=[M1,G1, G2, G3, G4, G5, G6, G7, G8, G9, M2, G1, G2, G3, G4, G5, G6, G7, G8, G9, M3, G1, G2, G3, G4, G5, G6, G7, G8, G9, M4, G1, G2, G3, G4, G5, G6, G7, G8, G9, M5, G1, G2, G3, G4, G5, G6, G7, G8, G9], где M(G)k - M-последовательность или последовательность Голда, количество символов N = 127, Число отсчетов частоты дискретизации для несущего сигнала на символ Cs = 32; k – номер последовательности из набора.

Несущая частота для М-последовательностей и последовательностей Голда была равной F = 11700 Гц, длительность

t = 84 мс. Между последовательностями был добавлен интервал, равный длительности последовательности, – 84 мс (скважность излучения 2).

Приемник производит обработку принимаемого сигнала тремя методами (простая корреляция, посимвольная и фазовый детектор) для каждой М-последовательности. Таким образом, приемник представляет собой 15-канальный коррелятор. Для каждого периода 10 с регистрировались следующие данные:

 максимум корреляционной функции для каждого метода и каждой последовательности;

- момент времени, соответствующий максимуму;

- вычисленная наклонная дальность;

– расстояние между приемником и излучателем, определенное по СНС;

– скорость движения по СНС.

Прием данных осуществлялся на следующих расстояниях:

в движении возле пирса антенна вывешивалась в воду на глубину 2 м, расстояние от приемника до излучателя 13–25 м, работает штатная навигационная антенна (ПИ1); в движении от пирса до точки 1 с эллипсом вокруг буев пирса антенна вывешивалась в воду на глубину 2 м, расстояние от приемника до излучателя 30– 260 м, работает только ПИ1.

Точка 1, расстояние от приемника до излучателя – 253 м, по наклонной дальности – 253 м, глубина – 6 м, антенна вывешивалась в воду на глубину 7 м, работает только ПИ1.

Точка 1, расстояние от приемника до излучателя – 253 м, по наклонной дальности – 253 м, глубина – 6 м, антенна вывешивалась в воду на глубину 7 м, работают ПИ1 и ПИ2, производилось изменение мощности излучения при напряжении на антенне от 60 до 10 В.

При движении от точки 1 до точки 2 антенна вывешивалась в воду на глубину 3,5 м, расстояние от приемника до излучателя – 250–110 м, работает только ПИ1, производилось изменение мощности излучения при напряжении на антенне от 3 до 5 В.

Точка 2, расстояние от приемника до излучателя – 114 м, по наклонной дальности – 115 м, глубина – 8 м, антенна вывешивалась
в воду на глубину от 4,5 до 6 м; работает только ПИ1; напряжение на антенне 3 В.

В движении от точки 2 до пирса с эллипсом вокруг буев пирса антенна вывешивалась в воду на глубину 2 м, расстояние от приемника до излучателя от 130 до 8 м, работает только ПИ1.

Обработка данных эксперимента

Точность определения момента прихода сигнала (дальность) оценивалась по данным СНС и расчетной скорости распространения сигнала 1482 м/с. Вероятность обнаружения рассчитывалась исходя из частоты обнаружения искомых сигналов от общего количества излученных сигналов в соответствии с заданным порогом (рис. 2.14–2.16).

В качестве значений отношения сигнал/шум представлены минимально зарегистрированные величины, при которых происходило обнаружение. Полученные экспериментальные данные подтвердили возможность кодового разделения в системах управления, связи и навигации, что позволит существенно расширить функциональные возможности использования АПНА. В проведенных экспери-



Рис. 2.14. Вероятность обнаружения сложных сигналов в зависимости от типов сигналов при проведении эксперимента



Рис. 2.15. Вероятность детектирования Рис. 2.16. Вероятность детектирования сложных сигналов в зависимости от от- сложных сигналов в зависимости от ношения сигнал/шум (SNR), дБ



среднего отношения сигнал/шум (SNR) для каждого принятого информационного сообщения

ментах для кодового разделения в частотном диапазоне 10-14 кГц использовались сигналы на базе М-последовательностей длиной 127 бит, что позволяет сформировать порядка 270 ортогональных последовательностей (коды Голда). Это, в свою очередь, дает возможность навигационного сопровождения нескольких абонентов в развернутой навигационной сети. Расчеты показали, что для обслуживания группировки АНПА из 5 шт. в зоне действия 30 донных маяков потребуется порядка 200 кодовых последовательностей.

Экспериментальные результаты по увеличению информационной емкости навигационных сигналов для ускоренного обмена между АНПА и постом управления показали, что при использовании 127-битных М-последовательностей для передачи данных достижимая скорость информационного обмена составляет $v \approx 300$ бит/с при коэффициенте частотной эффективности k_{эф} = 0,6 бит/Гц.

2.2.2. Системы навигационного обеспечения обширных мелководных районов

Можно назвать ряд задач, когда группировка АНПА должна выполнять задачи назначения (например, мониторинг донного пространства) на обширной мелководной акватории в различных гидрологических условиях, в том числе при наличии ледового покрытия. Очевидно, что наряду с необходимостью применения высокоточных средств бортовой навигации возникает серьезная проблема формирования сети источников внешней навигации, необходимых для коррекции текущих координат объектов, счисленных по данным бортовой аппаратуры. Применяемые ранее средства ГАНС с рабочей частотой 12 кГц не смогут, в силу ограничений по дальности действия на мелководной акватории, решать эту задачу.

Представляет значительный интерес возможность создания аппаратуры навигационного обеспечения подводных аппаратов в мелководном районе на основе сети синхронизированных стационарных низкочастотных излучателей. Исследования особенностей дальнометрии в мелком море проводились в течение многих лет ТОИ ДВО РАН [28, 29, 64]. На основе этих исследований были сформулированы принципы создания региональной системы подводной навигации [65]. Основная идея проекта – реализация низкочастотного дальномера, дальность действия которого обеспечивает уверенный прием навигационных сигналов излучателей в каждой точке акватории каждым аппаратом группировки. При понижении рабочих частот до 1.5-2.5 кГц по акватории площадью несколько сотен квадратных километров устанавливаются только 3-4 стационарных излучателя с дальностью действия до 30 км. Период обсервации синхронных излучателей может устанавливаться в зависимости от емкости автономного энергоисточника. Между обсервациями расчет координат объектов выполняется их бортовыми системами счисления.

Ниже рассмотрены результаты натурных экспериментов, выполненных с использованием ранее разработанных макетов оборудования такой системы. Характеристики сигналов, особенности оборудования для приема и обработки сигналов были изложены в п. 2.2.1.

Определение эффективной скорости распространения сигналов в мелком море

Результаты проведения натурных экспериментов с применением одного излучателя (работы выполнял ТОИ ДВО РАН)

Основные погрешности измерения дистанции в различных гидролого-акустических условиях определяются неточным заданием скорости звука для расчета дистанций, которая в общем случае является переменной величиной во времени и пространстве, и ошибками определения времени распространения прямого луча в условиях многолучевости. При проведении экспериментов делались оценка возможности градуировки акватории по эффективной скорости распространения навигационных сигналов и оценка затухания звука при распространении в мелководной акватории для обоснования характеристик излучателей навигационной сети.

Исследования проводились в летний сезон в зал. Посьета Японского моря. Методика исследований заключалась в следующем. Широкополосный источник звука (объект ТОИ ДВО РАН), расположенный в 400 м от берега на глубине 40 м, ежеминутно излучал М-последовательности с центральными частотами 400, 600, 1200 и 2500 Гц с количеством символов от 15 до 511 и количеством периодов на символ 2, 4, 8 и 16.

В качестве макета подводного объекта использовался радиогидроакустический буй, приемный гидрофон которого мог быть установлен на необходимой глубине. Принятые навигационные сигналы и информация о координатах по данным СНС, установленной на буе, по радиоканалу передавались на маломерное судно, которое дрейфовало в пределах радиовидимости. Измерения проводились на удалении около 23 км в районе с глубиной моря 110 м. Гидрофон заглублялся на 105 м. Разрез поля скорости звука по трассе распространения сигналов представлен на рис. 2.17.

Гидрологические условия в этот период характеризуются небольшим отрицательным градиентом от поверхности до дна и началом захода холодных вод на шельф. Это наиболее сложное время для идентификации лучевых приходов, так как импульсная характеристика представляет собой ансамбль лучевых приходов, приблизительно равных по амплитуде и длительностью около 0,1 с (рис. 2.18 и рис. 2.19).

Как видно из приведенных зависимостей, максимальный импульс может быть зафиксирован в разных точках ансамбля. Например, если за максимальный импульс будет принят последний



Рис. 2.17. Разрез поля скорости звука и рельеф дна

прошедший в придонных слоях с малой скоростью звука, а скорость для расчетов выбрана по средней в волноводе для первого импульса, то ошибка в дистанции составит величину около 140 м. В то же время анализ рассчитанных скоростей звука по временам приходов первого и последнего импульса показал, что средняя скорость первого импульса в течение 2 ч составляла 1474,8 м/с с максимальным отклонением 1,5 м/с, а средняя скорость последнего 1468 м/с с таким же отклонением.

Таким образом, при правильной идентификации прямого луча, прошедшего по всему слою (первый импульс) или вблизи дна (последний импульс) ошибка измерения дистанции составит от единиц до 20 м. Следовательно, алгоритм обработки сигналов и принятия решения о выборе времени для расчетов должен учитывать или передний, или задний экстремумы импульсной характеристики. Соответственно, и эффективные скорости должны вводиться в программу расчета после калибровки района работ.



Рис. 2.18. Импульсные характеристики: a) f 0 =1200 Гц: (верхняя панель) на один символ М-последовательности приходят 16 периодов несущей частоты; (средняя панель) на один символ М-последовательности приходят 8 периодов несущей частоты; (нижняя панель) на один символ М-последовательности приходят 4 периода несущей частоты – первая посылка; б) f 0 = 1200 Гц – то же – вторая посылка





Рис. 2.19. Импульсные характеристики: а) f 0 =2500 Гц: (верхняя панель) на один символ М-последовательности приходят 16 периодов несущей частоты; (средняя панель) на один символ М-последовательности приходят 8 периодов несущей частоты; (нижняя панель) на один символ М-последовательности приходят 4 периода несущей частоты – первая посылка; б) f 0 =2500 Гц – то же – вторая посылка

Анализ импульсных характеристик показал, что наиболее подходящими параметрами навигационных сигналов для эффективного определения времен распространения импульсов являются несущая частота 1200 Гц, количество символов 255 и количество периодов на символ 4.

Эксперимент в июле проводился на той же трассе по аналогичной методике для выявления особенностей формирования импульсной характеристики при изменении гидрологической обстановки и ее влияния на точность измерения расстояния. На рис. 2.20 приведены гидрологический разрез и рельеф дна на трассе. Как видим, холодные воды проникли на шельф на значительное расстояние и сформировался прогретый слой от поверхности до 40 м со скоростью звука около 1500 м/с, далее промежуточный слой теплой воды от 40 до 60 м и холодный придонный слой со скоростью звука 1459 м/с. Импульсная характеристика волновода состоит из трех основных приходов акустической энергии (рис. 2.21).



Рис. 2.20. Разрез поля скорости звука и рельеф дна



Рис. 2.21. Импульсные характеристики

Первая группа лучей со средней скоростью 1483,5 м/с прошла путь через все слои. Две последующие группы лучей с максимальными и приблизительно равными амплитудами и средними скоростями 1475,7 м/с и 1471,4 м/с сформированы лучами, траектории которых проходят через промежуточный и придонный слои. Неправильная идентификация этих импульсов может привести к ошибке измерения расстояния до 70 м. В данном случае можно рекомендовать измерять время прихода последнего импульса для расчета дистанции.

Макетирование работы навигационной системы

Эксперимент проводился в августе. Работы проводились на акватории зал. Посьета Японского моря. Общая площадь залива составляет около 400 км². На акватории залива вдоль побережья были размещены три разнесенных синхронных стационарных излучателя. В ходе экспериментальных работ синхронизированная приемная система была размещена на маломерном судне. Судно выходило в ряд назначенных точек и ложилось в дрейф. Далее в течение 30 мин шел прием навигационных сигналов от установленных излучателей. В ходе этих работ были проведены испытания и сделаны предварительные оценки реализации приемной системы, которая должна быть установлена как на борту АНПА. Задачами работ были:

 – отработка методики уменьшения ошибок в определении эффективной скорости звука в условиях временного затягивания импульсного отклика водной среды из-за многолучевости;

 – определение оптимальных характеристик и параметров сигналов типа М-последовательностей в заданных гидролого-акустических условиях;

– разработка методики определения координат АНПА в условиях переменной скорости звука во времени и пространстве.

Проверялась также информационная емкость канала при формировании идентичных кодовых комбинаций на различных несущих и различных кодовых комбинаций на одной несущей. Координаты излучателей и приемной системы устанавливались по данным спутниковой навигации.

Общий состав оборудования при проведении этих экспериментов приведен ниже.

Основу приемника составляет многоканальный коррелятор, обеспечивающий обработку и обнаружение ансамблей сигналов типа М-последовательностей в режиме реального времени. Каждый канал корреляционного приемника был настроен на прием индивидуальной кодовой комбинации, излучаемой соответствующим синхронным излучателем. Приемник проводил обработку принимаемого сигнала тремя методами (простая корреляция, посимвольная, «фазовый детектор») и представлял собой 9-канальный коррелятор (по три канала на каждую последовательность М1, М2, М3). Особенности одного из методов обработки корреляционного приемника описаны в п. 2.2.1. В принятом сигнале определялся максимум корреляционной функции на каждом интервале Т = 30 с и соответствующий ему момент на временной оси в отсчетах частоты дискретизации. Синхронизация работы приемника проводилась для каждого интервала времени в 30 с (нулевая и тридцатая секунда). Определение максимума корреляционной



Рис. 2.22. Общая схема эксперимента

функции происходило каждый отсчет частоты дискретизации. Одно измерение проводилось в течение 10 мин.

Излучение проводилось на двух несущих частотах. В момент времени 0 (30) излучался сигнал на частоте 2526 Гц, в момент времени 30 (0) излучался сигнал на частоте 1777 Гц. Интервал между излучением на первой и второй несущей частотах для каждого излучателя составлял 30 с. Порядок излучения М-последовательностей поясняется на рис. 2.23.

Реализация многоканального навигационного приемника позволила оценить точность создаваемой навигационной сети и возможность градуировки акватории для определения эффективной скорости навигационных сигналов.

Схема размещения развернутой навигационной сети показана на рис. 2.24. Стационарные излучатели размещались вдоль побережья зал. Посьета в точках с известными координатами (условно





Рис. 2.23. Последовательность излучения навигационных сигналов в пунктах излучения



Рис. 2.24. Схема маневрирования приемной системы при проведении работ в акватории зал. Посьета. 1–8 – номер точки дрейфа. — стационарные излучатели

далее названные «Фуругельм», «Слычкова», «Керамика»). При работе также определялись текущие координаты приемной антенны по данным систем спутниковой навигации.

Гидрологическая обстановка и рельеф дна на трассах, соединяющих источники с приемной системой, существенно различались. Ниже приводится рис. 2.25, иллюстрирующий разрезы скорости звука и рельефы дна на характерных трассах, по которым можно представить всю сложность условий распространения сигналов на данной акватории. Можно отметить, что холодная вода не достигает глубин менее 40 м. Следовательно, сигналы от излучателей, расположенных вблизи о-ва Фуругельма и м. Слычкова, распространяются на начальных отрезках акустических трасс с большей скоростью, чем от излучателя «Керамика», расположенного у м. Шульца. Это и было зафиксировано при проведении экспериментов по определению координат приемной системы в точке № 6.

На рис. 2.26 приведены импульсные характеристики, полученные на приемной системе, заглубленной на 55 м, при зондировании тремя источниками сигналов в один из получасовых сеансов.

Следует отметить, что скорости звука, рассчитанные по временам приходов импульсов в течение всего сеанса стабильны с максимальным разбросом значений 1–1,5 м/с. Как видно из рисунка, импульсная характеристика состоит в основном из одного или двух близкорасположенных импульсов. Это связано с тем, что в августе в этом районе отмечается максимальный отрицательный градиент скорости звука, что приводит к формированию придонного звукового канала. Это было отмечено также при попытках приема этих сигналов на глубинах 20 и 30 м, когда сигнал был очень мал и нестабилен.

Значения скоростей, рассчитанных по временам приходов, составили: для трассы от м. Шульца – 1454 м/с; от м. Слычкова – 1463,8 м/с; от о-ва Фуругельма – 1463,5 м/с. Таким образом, в этом эксперименте показано, что ошибка в расчете дистанции по данным одного излучателя не превышает 20 м в течение сеанса, но для получения координат по данным трех излучателей требуется учитывать разные эффективные скорости.







Слычкова – приемная система



Рис. 2.25. Разрез поля скорости звука и рельеф дна





Рис. 2.26. Импульсные характеристики

Это подтвердили измерения и в точке № 5, в которой были приняты только сигналы от м. Шульца с эффективной скоростью 1455,5 м/с и от о-ва Фуругельма – 1471,4 м/с. Разброс значений скорости звука на обеих трассах в этом случае не превышал 1 м/с в течение сеанса.

При проведении эксперимента также рассчитывались координаты приемной системы по ее дальностям от стационарных излучателей. Для каждой стартовой точки (схема маневрирования приемной системы на акватории залива показана на рис. 2.24) начала дрейфа (1–8) определялись эффективные скорости распространения сигналов. Параллельно определялись текущие координаты приемной антенны по данным систем спутниковой навигации. Данные спутниковой навигации и расчетные данные гидроакустической системы сравнивались. Некоторые результаты этих работ приведены на рис. 2.27.



Гидроакустические дальномерные навигационные системы







Рис. 2.27. Сравнительные данные спутниковой и гидроакустической систем навигации: ч – траектория дрейфа приемной антенны. п, □, □ – расчет координат приемной антенны различными методами

Как следует из приведенных иллюстративных материалов, в ходе проведенных экспериментов подтверждена возможность реализации стационарной навигационной системы и получен опыт разработки гидроакустической системы для навигации и управления АНПА на мелководных акваториях площадью сотни квадратных километров. Следует отметить, что глубина акватории в зал. Посьета на трассах распространения навигационных сигналов не превышала 60 м, была проверена работа макетных образцов навигационного оборудования при максимальной дальности более 20 км и при минимальной дальности 4 м.

Для излучающих комплексов зафиксированы следующие характеристики: развиваемое акустическое давление 2000–3000 Па/м; несущая частота М-последовательностей 2500 Гц; оптимальные параметры М-последовательностей: 511 символов и 4 периода на символ.

Кроме того, анализ импульсных характеристик волноводов в различные сезоны показал, что расчет расстояния между излучателем и приемной системой по временам, соответствующим максимальным значениям корреляционной функции, может приводить к значительным ошибкам. Экспериментально показано, что при выполнении АНПА миссии вблизи дна необходимо рассчитывать расстояние по времени прохождения последнего импульса, прошедшего по кратчайшему пути вблизи дна, так как в этот период года в прибрежных зонах северо-западной части Тихого океана и прилегающих морей формируется придонный звуковой канал, скорость звука в котором стабильна в течение длительного времени и может быть точно измерена. При нахождении приемной системы вблизи поверхности необходимо использовать для расчета время прихода первого импульса, прошедшего по кратчайшему расстоянию во всем слое воды. С большой долей уверенности можно предположить, что в зимний период года также необходимо измерять время прохождения первого импульса.

Расчет координат приемной системы по измерению времен прохождения сигналов от трех излучателей показал, что скорости звука на разных трассах отличаются и это необходимо учитывать. Следует отметить, что выбор места установки источников навигационных сигналов играет существенную роль. Предпочтительным является выбор таких мест установки, чтобы условия распространения были более похожи на всех трассах, и тогда можно было использовать для расчетов одну эффективную скорость звука.

2.2.3. Гидроакустические дальномерные системы большой дальности

Освоение глубоководных районов Мирового океана требует развития новых подходов и технологий для создания и совершенствования подводных технических средств и систем. К наиболее перспективным устройствам относятся автономные необитаемые подводные аппараты с автономностью более года и радиусом действия в сотни и тысячи километров. Создание технических средств для передачи команд управления и сигналов навигационных маяков на такие аппараты с дистанциями сотни километров требует глубоких комплексных исследований гидроакустического канала распространения сигналов по сложным трассам, включая шельф и глубокое море. Эти исследования в течение многих лет выполнялись в ТОИ ДВО РАН. Были изучены научные и технические аспекты проблемы, сформулированы предложения и практические рекомендации по созданию систем навигации и передаче команд управления на глубоководные автономные аппараты дальнего радиуса действия по гидроакустическому каналу с использованием сложных сигналов типа М-последовательностей [66-72]. Представляется целесообразным оценить предложенные решения для создания навигационных систем большой дальности.

Прежде всего, приведем некоторые фрагменты и результаты исследований ТОИ ДВО РАН, связанных с методологией оценки эффективной скорости распространения сигналов на большие дальности.

Оценки точности измерений больших дальностей

Исследования особенностей распространения низкочастотных фазоманипулированных сигналов, связанные с оценкой точности измерения дальности на больших дистанциях, проводились ТОИ

ДВО РАН в Японском море в различных сезонных условиях. На рис. 2.28 приведена схема одного из экспериментов, проведенного в летнее время. Излучение М-последовательностей (511 символов, 4 периода несущей частоты на символ) с центральной частотой 600 Гц по командам с приемного судна осуществлялось каждые пять минут. В качестве приемного судна использовалась яхта, с которой в заданных точках на исследуемой трассе осуществлялась постановка радиогидроакустического буя с гидрофоном. Гидрофон заглублялся приблизительно до оси подводного звукового канала (ПЗК), местоположение которой определялось при измерении вертикального распределения скорости звука. Прием сигналов осуществлялся в течение нескольких часов (см. табл. 2.5) в шести точках на трассе при удалении от излучателя от 55 до 368 км. Буй с гидрофоном после постановки в заданной точке дрейфовал. На яхте производились измерения координат с помощью приемника спутниковой навигационной системы при прохождении вблизи буя, запись сигнальной информации и меток времени системы единого времени. Обработка принятого сигнала заключалась в вы-



Рис. 2.28. Схема эксперимента. точка № 1 – 56 км, точка № 2 – 113 км, точка № 3 – 169 км, точка № 4 – 224 км, точка № 5 – 280 км, точка № 6 – 368 км

числении взаимной корреляционной функции с маской излученного сигнала. На полученных таким образом импульсных характеристиках фиксировалось в основном два прихода акустической энергии, прошедших по различным лучевым траекториям вблизи оси ПЗК с разницей во времени 15–30 мс.

На рис. 2.29 приведены характерные примеры импульсных характеристик, полученных за сеансы измерений в точках 1–6. Самый поздний и максимальный по амплитуде импульс идентифицировался как прошедший вблизи оси ПЗК, так как он распространялся с минимальной скоростью звука. Изменчивость импульсных характеристик в течение 55 и 40 мин в точках 2 и 6 иллюстрирует рис. 2.30.

Очень важным оказалось, что результаты расчетов дистанций во всех точках при умножении времен поздних приходов на скорость звука на оси ПЗК довольно точно совпадают с измеренными данными СНС. Погрешности этих расчетов приведены в скобках в последнем столбце табл. 2.6. Таким образом, эксперимент показал, что скорость распространения импульса с максимальной амплиту-



Рис. 2.29. Импульсные характеристики волновода на различных удалениях от излучателя





Рис. 2.30. Импульсные характеристики волновода, полученные при дрейфе приемной системы: а) точка 2; б) точка 6

дой и максимальным временем практически равна скорости звука на оси ПЗК. Особенностью диагностируемой трассы являлось наличие 16-километрового отрезка шельфовой зоны с глубинами от 40 до 100 м с более теплой водой, чем в глубоком море. Скорость звука, измеренная у дна в точке расположения излучателя, составляла 1465 м/с, а на расстоянии 16 км – 1457 м/с. Корректировка интегральной скорости звука на квазистационарных трассах с учетом средней скорости звука на шельфе позволила уменьшить ошибку измерения дистанций в первых трех точках (см. последний столбец табл. 2.5).

Этот пример – один из результатов многолетних исследований специалистов ТОИ ДВО РАН в области акустической дальнометрии. В проведенных исследованиях были выявлены специфические особенности распространения низкочастотных импульсных сигналов в различных гидролого-акустических условиях и обоснованы алгоритмы расчета эффективной скорости распространения сигналов. Приведенные результаты показывают, что при корректном учете основных факторов, определяющих скорость распро-

ости измерения далвности	Ошибка, по GPS, м	31 57	24 101	115 63	38 96	46 84	44 146
	Ошибка по ПЗК, м	91 117	59 136	214 163	51 10	44 13	111 81
	Дистан- ция по GPS, км	56.236 56.146	112.760 113.392	168.760 169.621	224.110 223.774	279.583 279.592	368.539 363.046
	Дистанция, с учетом скорости звука на шельфе, км	56.205 56.089	112.736 113.291	168.645 169.558	224.148 223.846	279.627 279.676	368.495 363.192
	Дистанция, по скорости звука на оси ПЗК, км	56.145 56.029	112.701 113.256	168.546 169.458	224.059 223.784	279.539 279.579	368.428 363.127
	Скорость звука с уче- том шельфа, м/с	1456.61	1456.11	1454.96	1456.02	1455.86	1457.02
	Скорость звука на оси ПЗК, м/с	1455.052	1455.655	1454.097	1455.451	1455.402	1456.758
	Время распростра- нения, с	38.5868 38.5068	77.4231 77.8042	115.9113 116.5387	153.9449 153.7557	192.0703 192.1048	252.9095 249.2713
	Время записи	21:35 23:07	04:25 05:25	10:30 12:09	17:35 19:40	02:15 03:59	20:03 05:30

Таблица 2.5

Опенки точности измеления дальности

странения сигнала по сложным трассам от береговой черты через шельф в глубокое море, возможно измерение дистанций с относительными погрешностями в сотые доли процента. Этот фундаментальный вывод ТОИ ДВО РАН открывает возможности создания гидроакустических систем прецизионной дальней навигации объектов, выполняющих миссии в глубоком море. Модель реализации состоит в размещении у береговой черты комплекта синхронных излучателей навигационных сигналов в точках с известными координатами, формирующих навигационное пространство в заданном обширном районе, и приеме этих сигналов бортовыми средствами объекта навигации. На основе этих результатов были разработаны новые методы организации систем навигационной поддержки подводных объектов в глубоком море.

В настоящее время это одно из ключевых направлений развития средств прецизионной гидроакустической навигации в широком диапазоне дальностей и глубин.

Энергетические оценки ГАНС БД в глубоком море

При создании навигационных систем большой дальности на основе излучателей, стационарно размещенных в прибрежной полосе на значительном удалении от района нахождения объекта навигации, важнейшее значение приобретают выбор структуры навигационных сигналов и связанные с ним оценки энергетических характеристик системы [73]. Эти оценки можно получить на основе анализа классического уравнения дальности в гидроакустике расчетами отношения сигнал/шум при приеме различных сложных сигналов. Решение уравнения определяет уровни излучения, обеспечивающие уверенный прием сигналов на заданной дальности в глубоком море при излучении из мелководной части, позволяет сделать оценки инструментальной ошибки определения времени прихода навигационного сигнала и обосновать выбор наиболее предпочтительных с энергетической точки зрения М-последовательностей.

Энергетическая оценка навигационных сигналов в ГАНС БД

При применении систем синхронного излучения мощных низкочастотных сигналов типа М-последовательностей крайне важной представляется оценка их энергетических характеристик. Не вдаваясь в особенности искажений навигационных сигналов, обусловленных условиями распространения, оценим уровни сигналов и отношений сигнал/шум в точке приема на основе классического уравнения дальности гидроакустики [74].

Задачами исследования являются:

 – определение уровня излучения для уверенного приема сигналов на заданной дальности в глубоком море при излучении из мелководной части,

– оценка инструментальной ошибки определения времени прихода навигационного сигнала,

 – оценка энергии для излучения одного навигационного импульса, выбор наиболее предпочтительных с энергетической точки зрения М-последовательностей с учетом особенностей практической реализации систем их обработки.

Параметрами сигналов являются: уровень излучения P, частота несущей F, число символов M, используемых для кодировки, и число периодов несущей частоты на передаваемый символ k. При этом длительность импульсного сигнала может варьироваться как за счёт использования последовательностей с большим или меньшим числом символов M, так и за счет увеличения числа периодов несущей частоты на передаваемый символ. Далее, в качестве навигационного сигнала будем использовать M-последовательность фазоманипулированных сигналов, символы одинаковой длины, имеют фазы 0 и 180 град, число символов последовательности от 1 до 1023, общая длина сигнала фиксирована.

Для определения отношения сигнал/шум в точке приема будем рассматривать энергетические характеристики. Известно [75], что на выходе оптимального приемника отношение сигнал /шум определяется выражением

Для одиночного символа М-последовательности его можно переписать с учетом уравнения дальности, которое определяет уровень сигнала в точке приема, в виде

$$SNR = 20lgP + 10lgT_{OM} - \Pi P - (10lg\Delta F + M\Pi).$$

$$(2.19)$$

Входящие в состав этого выражения величины, кроме уровня излучения P, зависят от потерь распространения ПР, длительности символа T_{OM} , полосы приемника ΔF и УП-уровня помех (шума). В дальнейшем расчет уровня излучения в дБ осуществляется относительно базового давления, равного 1 мкПа.

При установленной мощности источника и спектральной плотности помех, заданной на частоте несущей, для М-последовательностей равной длительности (фактически равной излучаемой энергии), но с разным числом символов рассчитаем, следуя (2.19), отношение сигнал/шум на входе корреляционного приемника. Понятно, что усложнение сигнала и увеличение его информационной емкости при увеличении числа М сопровождаются пропорциональными энергетическими потерями.

Заметные потери в энергетике для сложного сигнала компенсируются корреляционной обработкой по всей длине последовательности, причем порядок обработки следует пояснить. Можно рассматривать два варианта возможной корреляционной обработки.

а. Корреляция, при которой определяются характеристики сигнала с использованием опоры на несущей частоте на интервале длительности символа, и далее выполняется корреляционное декодирование с использованием опорного кодового слова, заданного структурой М-последовательности на интервале длительности последовательности, –назовем этот вариант символьной обработкой.

б. Корреляционная обработка на интервале длительности последовательности с использованием опоры на несущей частоте, сформированной опорным кодовым словом, заданным структурой М-последовательности, – назовем этот вариант обработкой по несущей, или классической корреляцией.

Рассмотрим результат формирования сигнала в точке приема на различных примерах реализации М-последовательностей.

Символьная обработка предполагает определение фрагментов сигнала по каждому символу и при принятии решения об обнаружении осреднение их по числу символов – фактически это классический вариант некогерентного накопления. Выигрыш при такой обработке пропорционален корню из числа символов, из которых состоит М-последовательность.

Обработка по несущей заключается в том, что принятый сигнал с заданным числом символов и заданной длительности сворачивается с опорой такой же длительности, что фактически обеспечивает когерентное накопление данных при обработке отдельных символов последовательности. Выигрыш при такой обработке пропорционален числу символов.

Необходимо также отметить, что при работе с цифровыми массивами данных и относительно низкой частоте дискретизации возникают проблемы расчета корреляции по несущей, связанные с точным учетом начальной фазы входного сигнала. Как известно, на практике, особенно в случае применения фазоманипулированных сигналов со значениями фаз 0 и 180 град, в реализации очень эффективны модульные корреляторы [61]. При этом обработка данных ведется по двум квадратурным каналам, в которых опора записана со сдвигом на четверть периода несущей, с выбором в качестве решения максимального значения или модуля. Однако вследствие неопределенности начальной фазы (максимальная фазовая ошибка зависит от частоты дискретизации и будет составлять половину четверти периода) значение функции корреляции уменьшается на величину, равную значению синуса угла фазовой неопределенности (угол в нашем случае составляет 45 град), равной 3 дБ.

Выигрыши в отношении сигнал/шум, обусловленные оптимальной обработкой с выбором оптимальных значений полосы приемника, представлены в табл. 2.6. При этом величина SNR нормирована значением при M = 1023.

Нижняя строка табл. 2.6 фактически является основной энергетической оценкой, на основании которой необходимо выбирать структуру навигационного сигнала. Итоговый результат имеет ясный физический смысл. Энергия М-последовательности заданной длительности не зависит от числа М, шум в точке приема растет с увеличением полосы приемника, т. е. с увеличением М, и именно этот фактор определяет выигрыш при суммарной обработке данных.

Глава 2

Таблица 2.6

М	1023	511	255	127	63	31	15	7	1
Т _{ом} , с	0,01	0,02	0,04	0,08	0,16	0,32	0,64	1,28	10,0
ΔF, Гц	200	100	50	25	12,5	6,25	3,125	1,56	0,1
SNR	1	4	16	64	256	1024	4096	16384	106
SNR, дБ	0	6	12	18	24	30	36	42	60
КУнес, дБ	30	27	24	21	18	15	12	9	0
КУсим, дБ	15	13.5	12	10.5	9	7.5	6	4.5	0
КУмод, дБ	27	24	21	18	15	12	9	6	-3
Сумма, дБ	30	33	36	39	42	45	48	51	60

Примечание. КУсим– коэффициент усиления (выигрыш) при выполнении корреляции с символьной обработкой, КУнес – коэффициент усиления (выигрыш) при выполнении корреляции с обработкой по несущей, КУмод – коэффициент усиления (выигрыш) при выполнении корреляции с модульной обработкой.

Далее, используем полученные оценки для анализа конкретной системы. Примем, что дальность действия ГАНС БД должна составлять 500 км, несущая частота 400 Гц, а спектральная плотность шумов моря на этой частоте равна 60 дБ. В качестве навигационного сигнала будем использовать М-последовательность фазоманипулированных сигналов, символы одинаковой длины имеют фазы 0 и 180 град, число символов последовательности от 7 до 1023, общая длина сигнала фиксирована и составляет 4096, периода несущей – чуть более 10 с.

Наиболее важной характеристикой предлагаемой навигационной системы является оценка уровня излучения для уверенного приема сигналов на дальности до 500 км в глубоком море при их излучении из мелководной части. Уровень принимаемого сигнала, кроме того, будет определять инструментальную ошибку времени прихода навигационного сигнала. Предполагаем, что при распространении сигнала по мелководной части потери распространения определяются сферическим законом, а в глубоком море – при затягивании сигнала на ось подводного звукового – цилиндрическим.

Кроме того, пусть мелководный участок имеет длину 10 км, тогда потери на распространение составят 80 дБ, а при распро-

странении по трассе от 10 до 500 км добавляются потери примерно 17 дБ. Потери на поглощение на частоте 400 Гц составляют примерно 3–5 дБ, поэтому будем оценивать общие потери в глубоководной части для упрощения величиной 20 дБ.

Сначала оценим энергетику источника, излучающего длинный тональный сигнал. Пусть излучатель излучает тональный сигнал с уровнем излучения 100 Па и длительностью 1 с. Тогда на дистанции 10 км при приеме сигнала в полосе 1 Гц получим, исходя из (2.19), в точке приема значение SNR = 20 дБ, принимая, что уровень шума УП = 60 дБ и потери распространения ПР = 80 дБ. Если длительность тонального сигнала составляет 10 с, уровень излучения 100 Па, полоса приема 0,2 Гц, то уравнение дальности изменится и для дистанции 10 км получим, исходя из (2.19), в точке приема 317 дБ. Рост SNR происходит за счет увеличения времени приема относительно 1 с, что соответствует росту на 10 дБ и за счет уменьшения полосы приема относительно 1 Гц, что соответствует росту на 7 дБ.

Соответственно на дальности 500 км будем иметь SNR = 37 – 20 = 17 дБ. Это означает, что длинный тональный сигнал можно использовать для навигации на дальности 500 км при уровне излучения 100 Па (около 100 мВт мощности). При этом разрешение (ошибка измерения времени прихода будет около 1 с) и по дальности соответственно около 1,5 км.

Далее, рассчитаем отношение сигнал/шум для ряда сигналов М-последовательностей при различной мощности источника. Посмотрим, что формируется в точке приема на различных примерах реализации М-последовательностей. Пусть сигнал М-последовательность с числом M = 1023, каждый символ состоит из 4 периодов несущей. Излучаем 100 Па, длительность символа 10 мс, полоса приема 200 Гц. Тогда значение отношения сигнал/шум для одиночного символа при дистанции10 км составит SNR = -23 дБ. Падение SNR происходит за счет уменьшения длительности символа относительно 1 с, что соответствует потере на 20 дБ, и за счет увеличения полосы приема относительно 1 Гц, что соответствует потере на 23 дБ. Соответственно, для дистанции 500 км значение отношения сигнал/шум для одиночного символа составит SNR = -43 дБ. Отношение сигнал/шум в точке приема на дальности 500 км на выходе схемы символьной обработки (которая дает выигрыш 15 дБ) составит SNR = -28 дБ. Отношение сигнал/шум на выходе обработки по несущей составит соответственно -13 дБ. Естественный способ увеличения отношения сигнал/шум – это увеличение мощности источника.

Аналогично формируются оценки для М-последовательностей при М = 127, каждый символ которой состоит из 32 периодов несущей, при М = 63 каждый символ состоит из 64 периодов несущей и при М = 8 каждый символ состоит из 512 периодов несущей.

Полученные результаты приведены в табл. 2.7. Отметим также еще две характеристики: энергию, отбираемую от источника при излучении каждого сигнала, значение которой составит $E = P^2 \cdot T \cdot 10^{-5}$, и инструментальное разрешение времени прихода dT = T / SNR.

Сигналы – число символов, М	1023	127	63	8	1
Длительность символа, с	0,01	0,08	0,16	1,25	10
Полоса приема, Гц	200	25	12.5	2	0,2
Уровень излучения, Па	5000	1000	1000	300	100
Энергия от источника, Дж	2500	100	100	10	1
Отношение SNR в точке приема, дБ:					
один символ	-9	-5	1	9	17
символьная корреляция	6	5.5	10	13.5	17
корреляция по несущей	21	16	19	18	17
модульная обработка	18	13	16	15	14
Ошибка измерения времени, мс:					
один символ	-	-	160	420	1200
символьная корреляция	5	40	50	250	1200
корреляция по несущей	1	10	20	130	1200
модульная обработка	1.4	14	28	182	1680

Таблица 2.7

Как следует из приведенных расчетов, для достижения высокой точности измерения времени прихода навигационных сигналов

необходимо уменьшать длительность элементарных символов и увеличивать мощность излучения. Если задаться величиной относительной ошибки измерения дальности, например 10^{-4} (30–40 мс), формируемой за счет инструментальной ошибки измерения времени, то высокую точность (50 м на дальности 500 км) можно получить уже при M = 127, длительности символа 80 мс, реализации более простой символьной корреляции и уровне излучения 1000 Па (180 дБ, 10 Вт акустической мощности). При корреляции по несущей с использованием модульной обработки при M = 127, длительности символа 80 мс и уровне излучения 1000 Па получим при приеме отношение сигнал/шум 13 дБ и инструментальную ошибку измерения дальности около 20 м.

Энергетические оценки в экспериментальных данных

Был обработан ряд данных, полученных в ходе экспериментальных работ, направленных на создание ГАНС БД. Сигналы излучались из прибрежной полосы. Прием велся в глубоком море на удалении 100, 200 и 330 км. Уровень излучения был постоянным, частота несущей составляла 400 Гц. Приемник имел рабочую полосу 200 Гц для оптимального приема М-последовательности с числом символов 1023 при длительности символа 0,01 с. Оценивалось отношение сигнал/шум в точке приема при излучении различных последовательностей с числом М, равным 1023, 127 и 63 символа. Расчет отношения SNR выполнялся на выходе коррелятора классическим (по несущей) методом как отношение максимума корреляционной функции в интервале приема сигнала к значению этой функции на интервале 10 с в отсутствие сигнала.

На рис. 2.31–2.33 приведены рассчитанные зависимости SNR в дБ для последовательности из 45-минутных интервалов N, в каждом из которых излучались сигналы с M = 1023, M = 127 и M = 63 длительностью порядка 10 с.

Таким образом, можно отметить, что при сравнении отношения сигнал/шум в точке приема ряда излучаемых М-последовательностей на различных дальностях графики SNR, приведенные на рис. 2.31–2.33, для всех М на всех дистанциях идентичны и близки по величине, при этом уровень для M = 1023 ниже на 3–5 дБ уровня





Рис. 2.31. Дальность 100 км. Синий график — М = 1023, красный — М = 127, желтый — М = 63



Рис. 2.32. Дальность 200 км. Синий график – М = 1023, красный – М = 127, желтый – М = 63



Puc 2.33. Дальность 330 км. Синий график – М = 1023, красный – М = 127, желтый – М = 63

для M = 127 и M = 63. Это соответствует приведенным выше оценкам, поскольку для последовательностей разной длины потери энергии при уменьшении длительности символа компенсируются когерентной обработкой всех символов. Отметим также, что в проведенных экспериментах не была выполнена частотная фильтрация для оптимального приема символов различной длительности, за счет которой энергетически сигналы с меньшим значением M предпочтительны. Меньший уровень SNR для M = 1023 объясняется недостаточным согласованием тракта излучения (излучателя с устройством согласования и усилителем мощности) с частотной полосой коротких символов этой последовательности.

На рис. 2.34–2.36 приведены полученные при проведении тех же экспериментов оценки отношения SNR для различных М-последовательностей в зависимости от дальности.

При сравнении SNR каждой М-последовательности на различных дальностях (рис. 2.34–2.36) можно оценить потери энергии при распространении в глубоководном участке моря. При изменении дальности от 10 до 330 км в случае сферического закона имеем





Рис. 2.34. Последовательность М = 1023. Синий график – 100 км, красный – 200 км, желтый – 330 км



Рис. 2.35. Последовательность М = 127. Синий график – 100 км, красный – 200 км, желтый – 330 км



Рис. 2.36. Последовательность М = 63. Синий график – 100 км, красный – 200 км, желтый – 330 км

потери около 10 дБ, а в случае цилиндрического – около 3 дБ. В экспериментах наблюдаем 1–4 дБ, что согласуется с введенными ранее допущениями.

Приведенные оценки и выполненный анализ могут быть полезны разработчикам гидроакустических навигационно-информационных систем большой дальности, основанных на использовании сложных сигналов.

2.2.4. Навигационный приемник для абонентов ГАНС БД

Метод реализации ГАНС большой дальности

Рассмотрим модель навигации АНПА с большой автономностью и дальностью действия при выполнении миссий в глубоком море. Как показали исследования ТОИ ДВО РАН, для создания навигационной системы большой дальности с использованием системы синхронных излучателей предлагается размещение источников сигналов у дна на шельфе, вблизи береговой черты. Такая конфигурация позволяет сформировать в глубоком море, вблизи оси ПЗК, сплошную зону освещенности и стабильную импульсную характеристику, с двумя основными приходами акустической энергии, с вертикальными углами, близкими к нулевым, на расстояниях в сотни километров. Это достигается оптимальным согласованием местоположения источника звука и параметров излучаемых сигналов с гидролого-акустическими характеристиками морской среды на трассе, для эффективного возбуждения и распространения низкочастотных сигналов.

Кроме того, в выполненных исследованиях показано, что скорость распространения самого позднего импульса равна практически в пределах ошибки измерений скорости звука на оси ПЗК в точке расположения приемной системы. Это позволило с точностью до сотых процента измерять дистанцию до приемной системы на трассах протяженностью сотни километров. Дополнительным достоинством такой системы является возможность передачи навигационных сигналов и команд управления на подводные объекты, аппаратура которых работает только в режиме приема. При этом на борту АНПА достаточным является размещение только малогабаритного приемника навигационных сигналов.

В ГАНС БД каждый опорный навигационный источник излучает индивидуальный сигнал в системе единого времени с объектом навигации. Для этого используют кодоимпульсные фазоманипулированные сигналы типа М-последовательностей большой длительности, состоящих из М элементарных символов равной длины, фазы несущих частот которых 0 или 180 град меняются по законам, задаваемым индивидуальными кодовыми комбинациями.

Копии излучаемых сигналов и координаты источников хранятся в памяти бортового вычислителя координат на объекте. Бортовым навигационным приемником определяются времена распространения сигналов от каждого источника и рассчитываются результирующее значение текущей дальности на основе измерений времени распространения и скорости распространения сигналов. Для выделения полезного сигнала, пришедшего от излучателя в точку приема, используют взаимно корреляционную обработку излученного и принятого полезного сигнала. Результатом этой обработки является импульсная характеристика канала распространения сигнала, которая представляет собой амплитудно-временную зависимость, отражающую последовательность прихода в точку приема энергии излученного маяком акустического сигнала, прошедшей по различным траекториям в среде. Принятый акустический сигнал может быть «свернут» в короткий импульс, обеспечивающий высокое временное разрешение и отношение сигнал/ шум в приемном тракте, необходимые для эффективной борьбы с многолучевым характером распространения сигналов в условиях шельфа, а также возможность идентификации одновременно работающих излучателей при одном и том же типе сигнала.

ТОИ ДВО РАН разработан способ навигации, который имеет следующие особенности [76]. В морской среде за пределами прибойной зоны на глубинах, превышающих в 5–10 раз длину волны излучаемого гидроакустического сигнала, устанавливают как минимум два стационарных излучателя, синхронизированных системой единого времени между собой и с акустическим приемником на борту объекта навигации. Сигналы принимаются подводным объектом, и вычисляется время их распространения путем взаимно корреляционной обработки с электронной копией излученного сигнала, при этом для глубокого моря выбирают последний по времени приход полезного сигнала. Далее, вычисляются координаты объекта на основе известных координат источников и рассчитанных от них дальностей объекта навигации с использованием данных об эффективной скорости сигналов.

Предложенный метод решения навигационной задачи привлекает большое внимание. и существуют различные варианты его реализации, направленные на увеличение точности. Варианты отличаются технологиями определения эффективной скорости сигналов по трассе распространения и порядком работы самого подводного объекта в режиме навигационной обсервации.

Так, известен способ позиционирования, который включает установку в морской среде, на дне базовой станции, оборудованной не менее чем двумя синхронизированными друг с другом и АНПА гидроакустическими излучателями. Излучатели образуют
антенну с известными координатами и ориентацией в пространстве. На борту подводного объекта выполняются прием навигационного сигнала, расчет дистанции до базовых станций и направления на них по разности времен приходов и разности фаз принятых сигналов [77].

Для повышения точности позиционирования ведут контроль скорости звука на акватории в реальном времени. Для этого в районе работ дополнительно выставляют радиогидроакустический буй с приемником СНС и гидрофоном, погруженным на предполагаемую глубину работы объекта навигации. Выставленный буй передает по радиоканалу в пункт управления принятые акустические сигналы совместно со своими текущими координатами для вычисления скорости звука на трассах «источник сигналов–буй». По данным об изменении скорости звука в пункте управления формируют командный сигнал корректировки вычисляемых дистанций, передают его через канал связи на излучатель, при этом среди излучаемых сложных гидроакустических сигналов этот сигнал автоматически выделяется бортовой аппаратурой объекта навигации, и затем его устройством вычисления координат выполняется корректировка позиционирования [78].

Вышеописанные решения построения ГАНС БД целесообразно дополнить с учетом возможностей самого объекта навигации. Точное определение координат объекта по данным ГАНС БД можно обеспечить при его периодических выходах на ось ПЗК для приема навигационных сигналов и использовать результат для обеспечения коррекции бортовых систем счисления аппаратов большой автономности [79].

Кратко такой модифицированный метод заключается в следующем. Для глубокого моря, в котором планируется активное применение автономных подводных объектов (подводных лодок, обитаемых и необитаемых аппаратов), вдоль побережья устанавливается сеть стационарных навигационных излучателей долговременного применения. Далее, выполняют градуировку районов их установки с целью определения границ шельфовой зоны, от которой акустическая энергия распространяется по оси ПЗК, и эффективной скорости распространения сигналов на шельфовом участке. Результаты градуировки в виде размера зоны и эффективной скорости необходимо внести в устройство вычисления координат на подводном объекте.

Автономный подводный объект, выполняющий миссию в глубоком море, побережье которого оборудовано навигационной сетью излучателей, оснащается абонентским приемником ГАНС БД. В памяти приемника хранятся точные координаты излучателей, электронные копии излучаемых сигналов, а также данные о размерах шельфового участка и скорости распространения сигналов на этих участках с учетом их сезонно-суточной изменчивости. На борту подводного объекта должен быть установлен измеритель скорости звука. Как правило, подводные объекты при выполнении работ в глубоком море выполняют оценку текущего местоположения по данным средств собственной БАНС, ошибка которой растет с увеличением времени. Например, для больших автономных необитаемых подводных аппаратов величина ошибки достигает нескольких сотен метров за час, и, соответственно, за 10 ч работы эта ошибка достигает нескольких километров, что на практике неприемлемо. Сброс накопленной ошибки (коррекция БАНС) выполняется сравнением счисленных данных с данными внешней навигационной системы, в качестве которых выступают координаты, определенные по дальностям от навигационных излучателей. Для коррекции БАНС подводный объект выполняет перемещение по глубине, измеряет вертикальный профиль скорости звука, определяет минимум скорости С_о и глубину нахождения оси подводного звукового канала и выходит на ось ПЗК. Далее, ведет прием навигационных сигналов, выполняет их корреляционную обработку с хранящимися копиями и определяет время распространения навигационного сигнала до соответствующего излучателя t.

Затем с использованием хранящихся в памяти бортового устройства вычисления координат значений размера шельфового участка в районе установки соответствующего стационарного излучателя D_{1i} и эффективной скорости звука на шельфовом участке в районе его установки C_{1i} бортовым устройством вычисления координат определяется текущая дальность каждого излучателя по формуле

$$D_{i} = t_{i}C_{0} + D_{1i}\left(1 - \frac{C_{0}}{C_{1i}}\right).$$
(2.20)

Предварительная градуировка шельфовых районов установки излучателей и предложенный алгоритм расчета дальности позволяют резко повысить точность измерения дистанций. Так, например, пусть от излучателя с номером 1 время распространения составляет t₁= 200 с, а результаты предварительной градуировки шельфового участка $C_{1i} = 1500$ м/с, $\hat{D}_{1i} = 30$ км (что соответствует, например, работе АНПА в Японском море на удалении около 300 км от побережья, на котором установлены навигационные излучатели). АНПА определил скорость на оси ПЗК = 1450 м/с, тогда расчетная дальность излучателя без учета особенностей распространения на шельфе составит $D_{1i} = 290$ км, а с учетом этих особенностей – $D_{1i} = 291$ км. Как показали проведенные экспериментальные исследования, ошибка расчета последней дальности не превосходит нескольких десятков метров. Неучет поправок дает ошибку позиционирования около 1 км. Введение поправки за счет учета особенностей шельфовой зоны уменьшает ошибку более чем в 10 раз.

Способ позиционирования может применяться для позиционирования подводных объектов при их нахождении в подводном положении в глубоком море на больших дальностях от береговой черты, когда необходимо провести корректировку автономной бортовой навигации АНПА и сбросить накопленную ошибку счисления, позволяет осуществлять одновременное позиционирование нескольких АНПА на больших дистанциях, в любых метеоусловиях, в условиях скрытности.

Особенности реализации приемника сигналов ГАНС БД на борту АНПА

Для приема сигналов синхронных излучателей в глубоком море подводный объект с абонентским приемником ГАНС БД должен выходить на ось ПЗК. Режим движения АНПА при этом существенно влияет на работу приемника. Как показали соответствующие оценки, уровень собственной шумовой помехи в диапазоне частот навигационного сигнала даже для АНПА среднего класса оказывается значительным. Это устанавливает необходимость реализации режимов навигационной обсервации при выходе АНПА на ось ПЗК в условиях свободного планирования [80].

Приемник такой системы позиционирования содержит электронные блоки приема, синхронизации, первичной обработки, декодирования принятых сигналов маяков, а также устройство вычисления координат по измеренным дальностям до маяков. Устройство вычисления координат при приеме излученных сигналов выполняет взаимно корреляционную обработку входного сигнала с их электронными копиями. Подробно приемник сигналов типа М-последовательностей описан в п. 2.2.1. Однако при практической реализации бортовых приемников АНПА возникает ряд проблем:

– фазовая структура излученного фазоманипулированного сигнала большой длительности и с большим числом символов при движении подводного объекта быстро разрушается за счет доплеровского смещения несущей частоты, что резко снижает уровень корреляции между принимаемым сигналом и его электронной излученной копией и ведет к значительному уменьшению отношения сигнал/шум в точке приема и, соответственно, уменьшению дальности действия систем;

– прямой расчет характеристик местоположения объекта навигации по максимуму взаимно корреляционной функции принимаемого сигнала и электронной копии излученного при реализации приемников с использованием сигналов большой длительности и с большим числом частотных каналов для учета доплеровского смещения частоты несущей оказывается неэффективным, поскольку требует большого объема вычислений и, следовательно, приводит к росту габаритов, энергопотребления и стоимости оборудования приемников, что также ограничивает их применение, например, в составе автономных необитаемых подводных аппаратов.

В качестве абонентского приемника навигационной системы большой дальности предложен приемник, свободный от перечисленных недостатков [81, 82]. Предлагаемый приемник является универсальным, и при его установке на борт произвольного подводного объекта обеспечивается получение навигационных или информационных сообщений в развернутой навигационной сети, которая при дальности действия до 500 км может охватывать значительную часть морской акватории, например, Японского моря. При этом одновременно в акватории может действовать и получать навигационную информацию любое количество подводных объектов, например, группировка АНПА.

Модель обработки в приемнике реализуется на устройствах программируемой логики, имеет малое энергопотребление и массогабаритные характеристики, что позволяет применять приемник на борту подводных объектов навигации различного водоизмещения. Для обсервации в навигационной сети объект навигации – АНПА, в дополнение к штатным системам (среди них бортовая система управления, система единого времени, средства измерения собственной скорости движения), должен иметь измеритель скорости звука. Высокая точность позиционирования достигается при выходе объекта на ось подводного звукового канала и предварительных мерах по градуировке канала распространения сигналов по эффективной скорости звука на всей трассе и её шельфовом участке.

Устройство вычисления координат связано функционально с бортовой системой управления объекта навигации, от которой получает данные об измеренной в точке приема величине скорости звука, уведомление о выходе объекта на ось подводного звукового канала и рассчитывает дальности объекта от маяков по выделенным временам прихода сигналов маяков и величине эффективной скорости звука по всей акустической трассе. Эффективная скорость звука определяется через величины скорости звука, измеренной объектом в точке приема глубоководного участка трассы, и скорости звука шельфового участка трассы, назначенной и хранящейся в памяти устройства или содержащейся в принятом информационном сообщении.

Абонентский приемник работает следующим образом. В системе единого времени вырабатываются синхроимпульсы (СИ_i), синхронизирующие поток данных и результаты их обработки с излучаемыми маяками сигналами. В блоке памяти содержатся

предварительно записанные сведения о координатах стационарных маяков-излучателей (К,,) и опорных кодовых комбинациях М-последовательностей (КК), соответствующих излучаемым навигационным или информационным сообщениям. Кроме того, в блоке записаны данные об используемой М-последовательности: длительности (T), количестве элементарных символов (М) и частоте несущей (F). В блоке памяти также хранятся значения назначенной скорости звука шельфового участка акустической трассы С₁, по трассам от каждого из установленных маяков и размеры шельфовых участков D₁. В приемнике ведется непрерывный прием низкочастотных фазоманипулированных сигналов М-последовательностей и их аналого-цифровое преобразование. На выходе приемника с шагом по времени, равным интервалу дискретизации входного сигнала, формируется поток цифровых данных, синхронизированных по времени с сигналами маяков. Информационный поток цифровых данных поступает на накопитель входного сигнала, где формируется запись данных продолжительностью, равной длительности М-последовательности. При этом величина емкости накопителя 4 составляет L цифровых отсчетов $L = F_{c}T$, где F_{c} – частота дискретизации входного сигнала аналого-цифровым преобразователем, Т – длительность М-последовательности.

Текущая запись входных данных накопителя 4 обрабатывается N-канальным квадратурным приемником, требуемое число формируемых каналов которого определяется условием $N = 2dF_m/dF$, $dF_m = FV_c/C_2$, где dF_m – максимально возможное смещение частоты несущей М-последовательностей из-за эффекта Доплера при движении объекта навигации со скоростью V_c , F – частота несущей М-последовательностей, dF – шаг по частоте формирования каналов относительно частоты несущей, C_2 – скорость звука в точке нахождения объекта навигации, измеренная бортовым измерителем.

Шаг по частоте dF формируемых каналов относительно частоты несущей при различных скоростях движения объекта навигации определяется условием сохранения заданной величины фазового набега частоты несущей М-последовательностей в течение их длительности. Приемлемой величиной фазового набега, не влияющей существенно на результат дальнейшего вычисления корреляционных функций, является 0,1 π . Например, при длительности М-последовательностей T = 10 с, несущей частоте F = 400 Гц, скорости звука $C_2 = 1500$ м/с и скорости движения объекта $V_c = 1,5$ м/с фазовый набег, равный 0,1 π , за время приема М-последовательности получается, если несущая частота изменится на dF = 0,005 Гц (из равенства 0,1 $\pi = 2 \pi dF T$). При этом максимально возможное смещение частоты несущей определяется условием $dF_m = FV_c/C_2 = 0,4$ Гц. Частотный диапазон наблюдения за доплеровским сдвигом частоты несущей принятых сигналов тогда составит от 399,6 до 400,4 Гц, а необходимое число частотных каналов квадратурного приемника N = 160.

Для уменьшения объема вычислений путем минимизации числа частотных каналов, формируемых для обработки данных, в квадратурный приемник от бортовой системы управления поступают сведения о реальной текущей скорости объекта навигации V_c . В *N*-канальном квадратурном приемнике данные текущей записи накопителя входного сигнала на интервале длительности М-последовательностей последовательно на интервалах длительности элементарного символа обрабатываются синфазными и квадратурными опорными сигналами во всех сформированных частотных каналах, и по полученным квадратурам вычисляются амплитуды и фазы каждого принятого элементарного символа.

Далее, в пороговом обнаружителе в каждом сформированном частотном канале N определяются суммы вычисленных амплитуд принятых элементарных символов M, затем среднее по частотным каналам значение сумм и их дисперсия. В формирователе текущей входной кодовой комбинации для сформированных частотных каналов N, в которых сумма амплитуд, полученных в пороговом обнаружителе, превышает среднее значение сумм амплитуд по каналам с учетом дисперсии, фиксируются расчетные значения фаз для элементарных символов принятого сигнала, выполняется их аппроксимация значениями 0 или 180 градусов и формируется текущая входная кодовая комбинация на интервале длительности M-последовательности. Сформированная текущая входная кодовая комбинация поступает на вход блока взаимно корреляционной обработки, где определяются текущие значения функций взаимной корреляции, сформированной входной кодовой комбинации с каждой из опорных кодовых комбинаций (КК_i), хранящихся в блоке памяти устройства вычисления координат.

Описанный процесс повторяется для следующей входной кодовой комбинации, сформированной по данным состояния накопителя входного сигнала, обновленного на временной интервал, равный шагу дискретизации. Далее, в блоке взаимно корреляционной обработки ведется накопление текущих значений функций взаимной корреляции по каждой из опорных кодовых комбинаций, фиксируются момент формирования максимума этих функций и опорная кодовая комбинация, для которой получен максимум. Затем с учетом данных системы единого времени определяется время распространения сигнала.

В блоке расчета дальностей объекта навигации от маяков и выделения информационных сообщений по выделенным опорным кодовым комбинациям принятых сигналов М-последовательностей идентифицируются номера передающих сигналы маяков или содержание передаваемых маяками информационных сообщений. Содержания сообщений передаются в бортовую систему управления объекта навигации. Затем рассчитываются его дальности от маяков по временным интервалам между моментами излучения и приема сигналов М-последовательностей t, величине скорости звука глубоководного участка трассы С2, измеренной объектом навигации в точке приема, скорости звука шельфового участка трассы С₁₁ и размеру шельфового участка D₁₁, назначенных и хранящихся в блоке памяти или содержащихся в принятом от маяков информационном сообщении. Где D_{1i} – размер шельфового участка по трассе маяк-граница шельфовой зоны в районе установки і-го стационарного маяка.

Далее вычисляют географические координаты объекта (K_{он}), рассчитанные по его дальностям от маяков и координатам маяков (K_{мі}) из блока памяти. Бортовая система управления объектом для увеличения точности приема навигационных сигналов направляет в блок расчета текущих координат объекта сообщение о выходе объекта на ось подводного звукового канала, в блок расчета дальностей объекта навигации от маяков и выделения информационных сообщений направляет величину измеренной на его оси скорости звука (C_0), а также принимает от блока расчета текущих координат объекта географические координаты объекта (K_{ou}).

Расчет дальности объекта навигации от i-го маяка D_i выполняется по формуле (2.16). На рис. 2.37 приведена функциональная схема разработанного абонентского приемника.



Рис. 2.37. Функциональная схема предлагаемого абонентского приемника I – гидроакустический приемник: 1 – приемная акустическая антенна; 2 – приемно-усилительный аналоговый тракт; 3 – аналого-цифровой преобразователь. ІІ – устройство обнаружения: 4 – накопитель входного сигнала; 5 – *N*-канальный квадратурный приемник; 6 – пороговый обнаружитель; 7 – формирователь текущей входной кодовой комбинации. ІІІ – устройство вычисления координат: 9 – блок памяти; 11 – блок взаимно корреляционной обработки; 12 – блок расчета дальностей объекта навигации от маяков и выделения информационных сообщений; 13 – блок расчета текущих координат объекта навигации. Кроме того, на борту объекта навигации размещаются: 8 – система единого времени объекта навигации; 10 – бортовая система управления объекта навигации

Глава З

НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ С УЛЬТРАКОРОТКОЙ БАЗОЙ

3.1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ НАВИГАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ СИСТЕМАМИ С УЛЬТРАКОРОТКОЙ БАЗОЙ

Всистемах с длинной базой для решения навигационной задачи необходимо определить набор взаимных дальностей сообщающихся абонентов навигационной сети (объекта навигации, опорных маяков и судовой обеспечивающей антенны), размещенных либо вблизи дна (маяки и АНПА), либо вблизи поверхности (судовая антенна). Дальность определяется через соответствующее время распространения сигнала и эффективную скорость звука. В условиях глубокого моря, когда работа подводного робота контролируется с борта обеспечивающего судна, условия распространения сигналов по измеряемым трассам оказываются различными, что, в свою очередь, приводит к необходимости значительного усложнения расчетных моделей, которые должны определять эффективные скорости сигналов при их распространении в придонном слое, а также по наклонным трассам дно–поверхность.

В системах с ультракороткой базой пространственная конфигурация системы проще, в расчетных моделях устанавливаются условия распространения только по трассе: объект навигации–судовая многоканальная приемная антенна. При приеме навигационного сигнала необходимо определить единственную прямую дальность и по структуре сигнала, принятого на апертуре антенны, оценить угловое положение источника [5]. При этом увеличивается число измеряемых параметров сигнала и, кроме времени распространения, определяются амплитуда, фаза сигнала, характеристики шума в канале. Потребительские характеристики такой системы фактически устанавливаются точностью угловых измерений. Амплитудно-фазовое распределение навигационного сигнала на апертуре приемной дискретной антенны содержит необходимую информацию для определения углового положения источника. Однако ключевое значение имеет оценка точности угловых измерений. Определение азимута и угла места объекта навигации относительно приемной антенны содержит много расчетных и измерительных процедур, каждая из которых вносит вклад в формирование суммарной погрешности.

Для определения источников ошибок пространственную конфигурацию системы с ультракороткой базой представим в виде схемы, изображенной на рис. 3.1.



ультракороткой базой

Объект навигации 1 излучает навигационный сигнал. В пункте приема плоская акустическая волна принимается дискретной антенной 2, вывешенной с борта обеспечивающего судна 3. На выходе антенны формируется многоканальный электрический сигнал, компоненты которого зависят от принятого акустического давления и чувствительности соответствующих элементов антенны. В результате обработки находят значения азимута β , угла места γ_0 наклонной D и горизонтальной R дальностей при известных гидрологии и глубинах излучателя H_u и приемника H_a .

На каждом этапе преобразований возникают погрешности, искажающие истинное положение объекта. Рассмотрим их по порядку.

Приемная антенна

В точке размещения приемной антенны принимается плоская звуковая волна. Антенна и элементы ее конструкции соизмеримы с длиной волны навигационной частоты и представляют собой некий рассеиватель, искажающий амплитудно-фазовую структуру плоской волны. Обычно для устранения этого источника погрешностей принимаются все возможные меры, но создать акустически прозрачную приемную антенну не удается [83]. Наличие искажений обусловлено дифракцией, и это приводит к появлению довольно значительных систематических ошибок. Практическим шагом для учета дифракционных искажений является предварительная градуировка антенны – экспериментальное определение функции, связывающей фазовое распределение сигнала на элементах антенны с известными угловыми координатами источника. Эта процедура оказывается очень громоздкой и требует совершенного технологического измерительного оборудования [84]. Вопросы разработки антенн и их метрологической аттестации представляют основную трудность реализации прецизионных навигационных средств с ультракороткой измерительной базой. Некоторые аспекты решения этой проблемы более детально рассмотрены в главе 4.

Конфигурация антенны и обработка данных

Задача основного этапа разработки навигационной системы с ультракороткой базой – оптимизация конфигурации антенны, обеспечивающей однозначное, достоверное и точное определение азимута и угла места при минимальном числе каналов обработки [35, 85]. При обработке информации определяются также дисперсии формируемых оценок угловых величин, которые необходимы для дальнейшей траекторной обработки накапливаемых навигационных данных. Фактически выбор конфигурации приемной антенны определяет алгоритм работы системы с ультракороткой базой, ее потенциальную точность, архитектуру устройств и т. д. Эти вопросы и выбор наиболее эффективных подходов к решению навигационной задачи рассмотрены ниже.

Таким образом, исследование точности гидроакустической навигации с использованием ультракороткобазисных антенн должно включать перечисленные этапы [86]. Кроме того, одной из важных составляющих является оценка влияния точности датчиков углового положения осей антенны в момент приема навигационного сигнала. Данные датчиков курса, крена и дифферента должны быть обработаны совместно с данными амплитудно-фазового распределения акустического сигнала на антенне.

3.1.1. Амплитудные методы определения угломерной информации малогабаритными антеннами

На вход дискретной антенны, размеры которой соизмеримы с длиной волны, поступает навигационный сигнал. Сигнал содержит информацию о векторе навигационных параметров, составляющие которого – суть дальность, азимут и угол места. Какую необходимо получить информацию из сигнала и как ее обработать – основные вопросы анализа. Начнем с оценок амплитудных методов, в которых для определения углового положения источника навигационных сигналов используются свойства амплитудной направленности антенн.

Для оценки характеристик амплитудных пеленгаторов обычно вводится пеленгационная чувствительность, определяемая как свойство схемы обработки отслеживать изменение суммарного выходного сигнала при изменении положения пеленгуемого источника относительно оси антенны. Тогда для задаваемого минимального уровня изменений выходного сигнала, который может быть зафиксирован приемным устройством в условиях шумовых помех, пеленгационная чувствительность будет фактически задавать точность пеленгатора [87]. Для амплитудных пеленгаторов используются системы с суммарной и разностной обработкой сигналов, принятых элементами антенны. Как известно [88], системы с разностной обработкой данных обладают значительно более высокой пеленгационной чувствительностью в сравнении с системами, использующими суммирование данных. Несомненным достоинством амплитудных пеленгаторов является то, что вся процедура обработки данных в таких одноканальных системах сводится к невзвешенному суммированию сигнала элементами антенны и оценке его уровня. Поэтому амплитудные пеленгаторы находят широкое применение в простейших устройствах углового определения источника сигнала.

Рассмотрим линейные и круговые антенны при пеленговании источника, который находится в плоскости антенны [88]. Выполним оценки точности амплитудных пеленгаторов различной конфигурации при суммарной и разностной обработке данных.

Линейная эквидистантная антенна с четным числом элементов

Сигнал на входе каждого элемента антенны можно записать в виде [89]

$$p_n = A_n exp\left[-ikb(n-1)sin\beta\right]$$
, где A_n – амплитуда, $kb = \frac{2\pi b}{\lambda}$,
b – расстояние между элементами линейной антенны, λ – длина
волны, β – измеряемый пеленг, $n = 1 \div N$ – номер элемента антен-
ны, N – число элементов в антенне.

При суммировании отклика линейной антенны в случае равных уровней сигналов на каждом элементе $A_n = A_0$ получим выражение для определения направленности в виде

$$D_s = 2A_0 \sum_{n=1}^{N/2} \cos\left(\frac{nkb}{2}\sin\beta\right).$$
(3.1)

Пеленгационную чувствительность σ_D устройства, использующего при обработке суммирование сигнала, можно получить, продифференцировав (3.1) по углу. Затем, вводя параметр $q^2 = \frac{A_0^2}{\sigma_D^2}$, получим оценку погрешности пеленгования: $\sigma_{\beta s} = \left[qkbcos\beta \sum_{n=1}^{N/2} nsin\left(\frac{nkb}{2}sin\beta\right) \right]^{-1}$. (3.2) Параметр q задает оценку пеленга по угловому сектору, в

котором изменение выходного отклика антенны составляет $\frac{A_0}{q}$ в секторе максимального значения амплитуды при суммарной обработке или ее минимального значения – при разностной обработке.

Разностную характеристику направленности можно получить, разделив антенну на две идентичные линейки с фазовым центром в середине антенны и сложив их в противофазе. Для принятой модели сигнала выражение после преобразований принимает вид

$$D_{d} = 2A_{0} \sum_{n=1}^{N/2} sin\left(\frac{nkb}{2}sin\beta\right).$$
 (3.3)

Соответственно, оценка погрешности:

$$\sigma_{\beta d} = \left[qkbcos\beta \sum_{n=1}^{N/2} ncos\left(\frac{nkb}{2}sin\beta\right) \right]^{-1}.$$
 (3.4)

Круговая эквидистантная антенна с четным числом элементов

При пеленговании в круговом секторе естественно использовать антенну с круговой базой. Если на круговой базе диаметром 2kb равномерно размещены N элементов, то сигнал, принимаемый каждым элементом антенны, можно записать в виде

$$p_n = A_n exp \left[-ikb \cos\left(\frac{1}{N}(2n-1)\right) - \right],$$

где β – пеленг, отсчитываемый от диаметральной линии, проходящей через первый элемент антенны.

Отклик антенны при суммировании сигналов в случае, если $A_n = A_0$, с учетом вводимого обозначения $\beta_n = \beta - \left(\frac{\pi}{N}(2n-1)\right)$ преобразуется к виду

$$D_{s} = 2A_{0} \sum_{n=1}^{N/2} \cos(kb \cos\beta_{n}), \qquad (3.5)$$

а оценка погрешности о_в при суммарной обработке:

$$\sigma_{\beta s} = \left[qkb \sum_{n=1}^{N/2} sin(kb \cos \beta_n) sin \beta_n \right]^{-1}.$$
 (3.6)

Аналогично получим характеристику направленности для антенны с разностной обработкой:

$$D_{d} = 2A_{0} \sum_{n=1}^{N/2} sin(kb \cos\beta_{n})$$
(3.7)

и оценку погрешности:

$$\sigma_{\beta d} = \left[qkb \sum_{n=1}^{N/2} \cos\left(kb\cos\beta_n\right) \sin\beta_n \right]^{-1}.$$
 (3.8)

В оценках погрешностей, задаваемых выражениями (3.2, 3.4, 3.6, 3.8), дисперсия σ_D^2 уровня выходного сигнала схем обработки связана с дисперсией уровня сигнала в каждом канале σ_n^2 соотношением $\sigma_D^2 = \sum_{n=1}^{N} \sigma_n^2 = N \sigma_0^2$ как для суммарной, так и для разностной обработки. Поэтому, если ввести параметр $q_0^2 = \frac{A_0^2}{\sigma_0^2}$, который имеет смысл отношения сигнал/шум в канале, выражения (3.2, 3.4, 3.6, 3.8) после замены $q^2 = \frac{q_0^2}{N}$

дают связь погрешности пеленгования с уровнем шума в канале.

Потенциальная точность амплитудных пеленгаторов

Полученные соотношения можно применить для оценки потенциальной точности амплитудных пеленгаторов различной конфигурации.

Сначала рассмотрим характеристики линейных антенн. На рис. 3.2 приведены суммарные и разностные амплитудные характеристики направленности восьмиэлементной антенны для различного размера измерительной базы kb ($\pi/4$, $\pi/2$, π , 2π).

Величина погрешности при разностной обработке в зависимости от числа элементов и волнового размера базы при q = 10 на оси линейной антенны приведена на рис. 3.3. При суммарной обработке, как следует из (3.2), погрешность на оси не определена, а для малых углов значительно выше разностной. Погрешность при разностной обработке оказывается почти сравнимой с погрешностью пеленгования, получаемой при фазовой обработке данных. Так, погрешность измерения пеленга линейной антенной на оси с использованием фазовых данных дается выражением [90]:

$$\sigma_{\beta} = \left(kbq_0 \left(N^2 - 1 \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{-1}, \qquad (3.9)$$

где q_0 – отношение сигнал/шум в измерительном канале и составляет около 0,5° для N = 4, $kb = \pi$ и $q_0 = 10$.





Рис. 3.3. Погрешности пеленгования линейной антенны с различным числом элементов при разностной обработке

Для круговых антенн прямая зависимость точности пеленгования от размера базы, которая имеет место для линейных антенн, нарушается. Такой характер погрешности связан с тем, что разностная характеристика направленности круговой антенны с увеличением размера базы становится многолепестковой и максимальная крутизна характеристики не совпадает с осью антенны.

Общий вид разностных XH восьмиэлементной антенны для антенн с радиусом $kb = \frac{\pi}{2}$ и $kb = \pi$ показан на рис. 3.4. Там же приведена соответствующая зависимость погрешности пеленгования.



Рис. 3.4. Характеристики круговых антенн при разностной обработке

a)
$$kb = \frac{\pi}{2}$$
 6) $kb = \pi$

Приведенные оценки могут быть полезны при выборе волнового размера измерительной базы в навигационных системах с ультракороткой базой и, кроме того, могут быть использованы при разработке пеленгаторов простейшего типа, основанных на разностной обработке данных.

3.1.2. Многоканальные системы фазового пеленгования

Амплитудные (фактически одноканальные) системы, рассмотренные в п. 3.1.1, значительно уступают многоканальным системам, в которых решение пеленгационных задач выполняется при обработке фазовой информации в антеннах простой конфигурации. При наличии фазовой информации в каналах дискретной антенны искомые угломерные величины можно выразить в явном виде.

Двухэлементный приемник

Начнем анализ с оценки характеристик простого двухэлементного приемника. Будем считать, что объект навигации излучает тональный сигнал, длина волны которого λ , расстояние между элементами приемной антенны b, а пеленг на источник β отсчитывается от нормали антенны (рис. 3.5).



Рис. 3.5. Двухэлементный пеленгатор

Тогда разность фаз φ в каналах приемника связана с пеленгом аналитическим соотношением

$$\varphi = 2kbsin\beta, \qquad (3.10)$$

где $kb = \frac{2\pi b}{\lambda}$ – волновое число. Из этого следует, что погрешность измерения пеленга σ_{β} имеет вид

$$\sigma_{\beta} = \frac{\sigma_{\varphi}}{2kbcos\beta},\tag{3.11}$$

где σ_{o} – погрешность измерения фазы.

Для точного определения пеленга необходимо, чтобы размер измерительной базы 2*b* не превышал половины длины волны. Действительно, если $2 kb = \pi$, $2 b = \frac{\lambda}{2}$, то $\varphi = \pi sin\beta$ и при любом значении пеленга фаза определяется однозначно, поскольку не выходит из интервала $[-\pi, \pi]$. В противном случае выражение (3.10) не дает однозначной связи между измеряемой фазой и искомым пеленгом. Если $2kb > \pi$, $2b > \frac{\lambda}{2}$, то диапазон изменения полной фазы сигнала становится шире интервала $[-\pi, \pi]$ и наблюдаемая фазовая разность будет соответствовать нескольким значениям искомого пеленга.

Полагая далее $2b = \frac{\lambda}{2}$ и учитывая, что потенциальная точность измерения фазы сигнала определяется отношением сигнал/ шум *q* в измерительном канале [75], получим, что (3.11) приобретает вид

$$\sigma_{\beta} = \frac{1}{q\pi \cos\beta},\tag{3.12}$$

откуда следует, что погрешность велика даже при высоком уровне принимаемого сигнала. Например, при q = 10 дБ погрешность измерения пеленга составит около 6° и, кроме того, имеет угловую зависимость.

Четырехэлементный приемник

Для исключения угловой зависимости погрешности при пеленговании источника, находящегося в плоскости антенны, естественным выглядит применение четырехэлементного приемника, состоящего их двух идентичных ортогональных пар. Если размер измерительной базы $2b = \frac{\lambda}{2}$, то пеленг можно определить через разности фаз различных пар элементов антенны:

$$\varphi_{13} = \varphi_1 - \varphi_3 = kb\cos\beta , \ \varphi_{42} = \varphi_4 - \varphi_2 = kb\sin\beta ,$$

$$\varphi_{43} = \varphi_4 - \varphi_3 = \frac{kb}{\sqrt{2}}\cos\left(\frac{\pi}{4} - \beta\right), \ \varphi_{23} = \varphi_2 - \varphi_3 = \frac{kb}{\sqrt{2}}\sin\left(\frac{\pi}{4} - \beta\right).$$

Избыточность информации позволяет получить различные оценки пеленга и соответствующей погрешности и использовать их для уменьшения погрешности:

$$\beta_1 = \arccos \frac{\varphi_{13}}{kb}, \quad \beta_2 = \arcsin \frac{\varphi_{42}}{kb},$$
$$\beta_3 = \frac{\pi}{4} - \arccos \frac{\varphi_{43}\sqrt{2}}{kb} \quad \beta_4 = \frac{\pi}{4} - \arcsin \frac{\varphi_{23}\sqrt{2}}{kb}.$$

Объединяя полученные данные, найдем средневзвешенную оценку пеленга:

$$\beta = \frac{2}{3} (\beta_1 \sin^2 \beta_1 + \beta_2 \cos^2 \beta_2 + \frac{1}{2} \beta_3 \sin^2 (\frac{\pi}{4} - \beta_3) + \frac{1}{2} \beta_4 \cos^2 (\frac{\pi}{4} - \beta_4)).$$

При такой попарной обработке данных исключается зависимость погрешности измерения пеленга от угла пеленгования. Взвешенная оценка погрешности принимает вид

$$\sigma_{\beta} = \frac{\sigma_{\varphi}}{kb} \sqrt{\frac{2}{3}} \,. \tag{3.13}$$

Для $kb = \pi$ получим (при q = 10 дБ) $\sigma_{\beta} = 0.082$ рад $= 4.7^{\circ}$. Эти оценки согласуются с большим объемом экспериментальных данных [90].

Шестиканальный фазовый пеленгатор

Для пеленгования источника, расположенного в пространстве, необходимо дополнить приемную антенну пеленгатора третьей парой ортогональных элементов. Такая конфигурация уже может быть использована для практического применения. Алгоритм обработки фазовых данных запишем с учетом изменения пространственной ориентации осей антенны, которые задаются датчиками крена и дифферента.

Рассмотрим систему, которая содержит три ортогональные пары гидрофонов, разнесенных на базовые расстояния 2 b, причем две пары расположены в горизонтальной плоскости и используются для определения пеленга, а третья пара, вертикальная, используется для определения угла места источника звука (или угла скольжения, отсчитываемого от горизонтальной плоскости). При наличии качки горизонтальный и вертикальный каналы пеленгования оказываются взаимосвязанными, а полная фазовая информация должна подвергаться совместной обработке.

Пусть три пары гидрофонов ориентированы вдоль ортогональных осей координат X, Y, Z, жестко связанных с самой антенной. В качестве неподвижной системы отсчета выберем ортогональную систему координат X, Y, Z, горизонтальные оси которой приведены к осям датчиков углов крена-дифферента, а ось Z совпадает с вертикалью. Направление на источник звука зададим локальным углом пеленга β , отсчитываемым от оси X неподвижной системы координат, и углом скольжения γ относительно горизонтальной плоскости XOY.

В поле падающей звуковой волны сигналы, регистрируемые приемными гидрофонами, будут сдвинуты по фазе, причем измеренные разности фаз φ_x , φ_y , φ_z каждой парой гидрофонов, ориентированных вдоль осей 'X, 'Y, 'Z соответственно, пропорциональны составляющим волнового вектора $\overline{k}(k_x, k_y, k_z)$ вдоль этих координат. Составляющие волнового вектора в неподвижной системе координат $\overline{k}(k_x, k_y, k_z)$ при произвольных углах крена-дифферента θ , θ_y связаны с составляющими (' k_x , ' k_y , ' k_z) преобразованием [91]:

$$k_{x} = k_{x}\cos\theta_{y} + \left(-k_{y}\sin\theta_{y} + k_{z}\cos\theta_{y}\right)\sin\theta_{x}; \quad k_{y} = \left(k_{y}\cos\theta_{y} + k_{z}\sin\theta_{y}\right);$$
$$k_{z} = -k_{x}\sin\theta_{y} + \left(-k_{y}\sin\theta_{y} + k_{z}\cos\theta_{y}\right)\cos\theta_{x}.$$
(3.14)

Выражая в (3.14) составляющие (' k_x , ' k_y , ' k_z) через измеряемые разности фаз φ_x , φ_y , φ_z с учетом равенства расстояний между парами гидрофонов *b* и очевидных соотношений $k_x = Kcos\gamma cos\beta$, $k_y = Kcos\gamma sin\beta$, $k_z = Ksin\gamma$, где $K = \frac{\omega}{C}$, *C* – скорость звука, получаем формулы для определения пеленга:

$$\beta_{1} = \arcsin F_{1} , \ \beta_{2} = \arccos F_{2} ,$$

$$F_{1} = \frac{B}{2Kbcos\gamma}, \ F_{2} = \frac{A}{2Kbcos\gamma},$$
(3.15)

где введены следующие обозначения:

$$A = \varphi_x \cos\theta_x + \left(-\varphi_y \sin\theta_y + \varphi_z \cos\theta_y\right) \sin\theta_x , B = \varphi_y \cos\theta_y + \varphi_z \sin\theta_y ,$$

В предельном случае малых углов крена-дифферента $\theta_x = \theta_y = 0$ формулы (3.15) упрощаются:

$$\beta_1 = \arcsin\frac{\varphi_y}{2K_1b}, \ \beta_2 = \arccos\frac{\varphi_y}{2K_1b}, \ K_1 = K\cos\gamma,$$
 (3.16)

а некоторая избыточность формулы определения пеленга позволяет записать средневзвешенный алгоритм с учетом погрешности определения разности фаз:

$$\sigma_{\beta 1} = \frac{\sigma_{\varphi y}}{2K_1 b \cos \beta_1}, \ \sigma_{\beta 2} \quad \frac{\sigma_{\varphi x}}{2K_1 b \sin \beta_2},$$
$$\beta = \frac{\beta_1 \sigma_{\varphi x}^2 \cos^2 \beta_1 + \beta_2 \sigma_{\varphi y}^2 \sin^2 \beta_2}{\sigma_{\varphi x}^2 \cos^2 \beta_1 + \sigma_{\varphi y}^2 \sin^2 \beta_2},$$
(3.17)

где $\sigma_{\varphi x}$, $\sigma_{\varphi y}$ – погрешности определения разности фаз, $\sigma_{\beta 1}$, $\sigma_{\beta 2}$ – погрешности определения пеленгов.

Физический смысл алгоритма усреднения (3.17) заключается в том, что из двух оценок искомого пеленга (β_1 , β_2) всегда выбирается та, которой соответствует минимальная погрешность измерения. В общем случае $\theta_x \neq 0, \theta_y \neq 0$, среднеквадратичная оценка измерений (β_1 , β_2), минимизирующая погрешность, имеет вид

$$\beta = \frac{\beta_1 D_1 \cos^2 \beta_1 + \beta_2 D_2 \sin^2 \beta_2}{D_1 \sin^2 \beta_1 + D_2 \cos^2 \beta_2},$$
(3.18)
rge $D_1 = \sigma_{\varphi x}^2 + \sigma_{\theta}^2 G^2,$
 $D_2 = \sigma_{\varphi y}^2 + \sigma_{\theta}^2 \left(\left(-\varphi_x \sin \theta_x + G \cos \theta_x \right)^2 + B \sin \theta_x^2 \right)^2,$
 $G = -\varphi_y \sin \theta_y + \varphi_z \cos \theta_y,$

 σ_{θ} – погрешность измерения углов крена-дифферента. Тогда погрешность определения пеленга определяется выражением

$$\sigma_{\beta}^{2} = \frac{D_{1}D_{2}}{\left(D_{1}sin^{2}\beta + D_{2}cos^{2}\beta\right)\left(2K_{1}b\right)^{2}}.$$
(3.19)

Поскольку подобная измерительная система является минимально избыточной, то оценки (3.19) являются предельно достижимыми и никакими резервами повышения точности антенна пеленгатора с тремя парами ортогонально расположенных гидрофонов не обладает.

3.1.3. Пеленгование источника навигационных сигналов с использованием круговых антенн

Поскольку потенциальная точность пеленгаторов, составленных из двух-трех ортогональных пар с размером измерительной базы, равным половине длины волны, оказывается низкой, естественным представляется оценить возможности многоэлементных пеленгаторов. При вполне умеренных требованиях по массогабаритным и энергетическим характеристикам к разрабатываемым устройствам можно существенно усложнить приемную антенну, выполнив ее, например, многоэлементной на круговой базе или многошкальной, обеспечив увеличение точности за счет обработки избыточной информации. Если первичное преобразование данных выполнено в подводном модуле, а основная часть обработки проводится на борту судна без ограничений на использование самых совершенных методов, то, очевидно, все это позволит рассчитывать на значительное увеличение точности системы.

Конфигурация антенн выбирается из условия однозначного пеленгования. Для работы в секторе углов 0–360° такой антенной может быть антенна с размещением приемных гидрофонов на круговой базе [92, 93].

Модель расчета и оценка погрешности пеленгатора с круговой базой

Рассмотрим потенциальные возможности пеленгатора, измерительные гидрофоны которого образуют ориентированную в горизонтальной плоскости круговую базу из N элементов, эквидистантно распределенных по окружности с угловым шагом

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{N-1}.$$



Рис. 3.6. Антенна пеленгатора с круговой базой

Схема приемной антенны поясняется рис. 3.6.

Пусть пеленг на источник задан углом β , тогда угловое распределение фазы акустического сигнала на гидрофонах базы, измеренной относительно фазы первого гидрофона, описывается выражением:

$$\theta_n = K_1 b \left(\cos\beta - \cos\left(\varphi_n + \beta\right) \right) =$$

= $2K_1 b \sin\frac{\varphi_n}{2} \sin\left(\frac{\varphi_n}{2} + \beta\right),$ (3.20)

где K_1 — проекция на плоскость пеленгатора волнового числа, b — радиус базы, $n = 1 \div N$.

Для грубого определения пеленга достаточно измерить максимальное и минимальное значения фазы: $\varphi = \pi - \beta$, $\theta_n = \theta_{max} = 2K_1 b \cos^2 \frac{\beta}{2}$; $\varphi = -\beta$,

$$\theta_n = \theta_{\min} = -2K_1 b \sin^2 \frac{\beta}{2},$$

$$\cos\beta = \frac{\theta_{max} + \theta_{min}}{\theta_{max} - \theta_{min}}.$$
(3.21)

Для точного определения пеленга нужно использовать весь массив N экспериментально измеренных значений \mathcal{G}_n фазы на приемниках базы ($\mathcal{G}_1 = 0$), для которого описание (3.20) является двухпараметровой аппроксимирующей кривой с неизвестными параметрами $B = 2K_1b$ и β . Параметр B имеет смысл волнового размера базы, который искажен дифракцией, а потому подлежит определению в предположении, что он не имеет угловой зависимости от угла пеленга β в силу угловой симметрии круговой базы. Параметр β является искомым пеленгом.

Минимизируя обычным образом погрешность аппроксимации условиями:

$$S = \sum \left(\theta_n - \theta_n\right)^2 = \min \ , \ \frac{\partial S}{\partial B} = 0 \ , \ \frac{\partial S}{\partial \beta} = 0 \ ,$$

получаем для определения искомых параметров B, β :

$$B = \frac{\sum \vartheta_n \sin \frac{\varphi_n}{2} \sin \left(\beta + \frac{\varphi_n}{2}\right)}{\sum \sin^2 \frac{\varphi_n}{2} \sin^2 \left(\beta + \frac{\varphi_n}{2}\right)} \quad \mathbf{M}$$
$$F = (B_1 B_2 - A_1 B_3) \cos \beta + (-A_1 B_2 + A_3 B_1) \sin \beta = 0$$

где
$$A_1 = \frac{1}{2} \sum \theta_n sin \varphi_n$$
, $B_1 = \frac{1}{2} \sum \theta_n sin^2 \frac{\varphi_n}{2}$, $B_2 = \frac{1}{2} \sum sin^2 \frac{\varphi_n}{2} sin \varphi_n$,

 $A_3 = \frac{1}{4} \sum \sin^2 \varphi_n$, $B_3 = \sum \sin^4 \frac{\varphi}{2}$, а также уравнение для

соответствующих погрешностей:

$$\frac{\partial F}{\partial \beta} \Delta \beta + \sum \frac{\partial F}{\partial \mathcal{G}_n} \Delta \mathcal{G}_n = 0,$$

где $\Delta\beta$, $\Delta\theta_n = \Delta\theta$ – погрешности определения пеленга и фазы.

Окончательные формулы для определения пеленга и среднеквадратической погрешности σ_{β} имеют вид

$$tg\beta = -\frac{B_1B_2 - A_1B_3}{-A_1B_2 + A_3B_1}, \ G_2 = B_1B_2 - A_1B_3, \ G_1 = -A_1B_2 + A_3B_1, \ (3.22)$$

$$\sigma_{\beta}^{2} = \sigma_{\vartheta}^{2} \sum \frac{\left(G_{2}G_{1n} - G_{1}G_{2n}\right)^{2}}{\left(G_{2}G_{2} + G_{1}G_{1}\right)^{2}}, \quad G_{1n} = \frac{\partial G_{1}}{\partial \vartheta_{n}}, \quad G_{2n} = \frac{\partial G_{2}}{\partial \vartheta_{n}},$$

где σ_{g}^{2} – дисперсия измерения фазы (инструментальная погрешность).

Оценим погрешность измерения пеленга σ_{β} в приближении $\beta << 1$, которое всегда выполнимо, если совместить ось отсчета углов \mathcal{G}_n с направлением пеленгования, определенным грубо формулой (3.21).

В этом приближении

$$B_0 = 2K_1 b$$
, $G_2 = 0$, $\varphi_n \approx B_0 sin^2 \frac{\varphi_n}{2}$,

Глава З

$$G_{1} = \frac{B_{0}}{4} \left[\sum \sin^{4} \frac{\varphi_{n}}{2} \sum \sin^{2} \varphi_{n} - \left(\sin^{2} \frac{\varphi_{n}}{2} \sin \varphi_{n} \right)^{2} \right],$$

$$G_{2n} = \frac{1}{2} \left[\sum \sin^{2} \frac{\varphi_{n}}{2} \sum \sin^{2} \frac{\varphi_{n}}{2} \sin^{2} \varphi_{n} - \sin \varphi_{n} \sum \sin^{4} \frac{\varphi_{n}}{2} \right],$$

$$\sigma_{\beta}^{2} = \sigma_{\theta}^{2} \sum \frac{G_{2n}^{2}}{G_{1}^{2}} = \frac{4\sigma_{\theta}^{2}}{B_{0}^{2} \sum \sin^{2} \varphi_{n}} = \frac{8\sigma_{\theta}^{2}}{B_{0}^{2} N}, \quad \sigma_{\beta} = \frac{2\sqrt{2}\sigma_{\theta}}{B_{0}\sqrt{N}}.$$
(3.23)

Формула (3.23) выражает конечный результат анализа, в соответствии с которым погрешность измерения пеленга круговой антенной убывает обратно пропорционально величине волнового размера базы B_0 и параметру избыточности \sqrt{N} .

При выборе волнового размера базы нужно учесть, что однозначность фазовых измерений будет обеспечена, если расстояние d между соседними гидрофонами базы не превышает половину длины волны λ . С учетом этого можно записать в предельном случае $d = \frac{\lambda}{2}$: $B_0 = 2K_1 b = N - 1$: $\sigma_\beta = \frac{\sigma_\beta}{(N-1)\sqrt{N}}$. (3.24)

Столь резкое уменьшение погрешности пеленгования с ростом числа элементов базы при постоянстве расстояния между ее элементами позволяет реализовать точность пеленгатора, вполне соизмеримую с точностью дальномерных навигационных систем. Так, например, для рабочей частоты $f_0 = 12$ кГц, $d = 0.5 \lambda$ ($\lambda = 12$ см) и N = 36 геометрический размер базы составит 2 b = 0.8 м, а при исходной погрешности измерения фазы $= 16^{\circ}$ погрешность пеленгования и погрешность дальнометрии составят соответственно $\sigma_{\beta} = 0.17^{\circ}$ и $\sigma_r \approx 3 \cdot 10^{-3}$.

3.2. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ С МНОГОЭЛЕМЕНТНЫМИ АНТЕННАМИ

Алгоритмы обработки данных, приведенные в 3.1, являются детерминированными и основаны на обработке фазового распре-

деления принимаемого навигационного сигнала на апертуре дискретной антенны, которое явным образом связано с искомыми параметрами углового положения объекта навигации достаточно простыми аналитическими соотношениями. Расчетные значения погрешности, соответствующие получаемым значениям углового положения объекта, определяются конфигурацией антенны и погрешностью измерения фазы в каждом канале. Очевидно, такая схема решения задачи неполна, поскольку не содержит всей информации о структуре принимаемого сигнала. Полная информация должна включать как оценки параметров сигнала, так и параметры помеховой составляющей (дисперсию или отношение сигнал/шум). В этом случае для многоэлементных антенн более эффективной становится статистическая обработка всего объема принимаемой информации. При выборе реалистической модели шума и его характеристик можно говорить о некой оптимизации всей обработки данных. При этом открываются возможности по оптимальному конфигурированию антенны. Критерием оптимальности может стать величина случайной составляющей погрешности определения пеленга и угла места, полученная при заданном числе каналов обработки (элементов антенны) [35, 31].

3.2.1. Решение задачи пеленгования методом максимального правдоподобия

Предполагается, что объект навигации периодически излучает детерминированные навигационные сигналы, а пункты излучения и приема синхронизированы. Решение навигационной задачи состоит в определении векторного параметра \overline{a} , составляющие которого a_i суть пеленг, угол места и дальность. Проблема заключается в возможно более точном оценивании параметра \overline{a} по принятой реализации \overline{y} и нахождении дисперсий σ_i^2 измерения этих параметров. Такое описание составляет основу накопления данных, позволяет реализовать совместную обработку с использованием различных многоэлементных антенн, прогнозирование, учет характеристик движения объекта навигации.

Принятая реализация \overline{y} – многомерная величина, зависящая от числа элементов в антенне, времени накопления данных и ча-

стоты дискретизации. Наличие помех и флюктуации сигнала приводят к отличию принимаемой оценки параметра \overline{a} от истинного значения \hat{a} . Если принятая реализация \overline{y} и оцениваемый параметр — суть взаимосвязанные случайные многомерные величины, то в основе анализа лежит вычисление отношения правдоподобия l, которое связывает плотность вероятности реализации \overline{y} при наличии полезного сигнала с параметром \overline{a} и помех и плотность вероятности принятой реализации при наличии только помех.

Оптимальная оценка параметра \overline{a}_0 сводится к оценкам максимума функций $l(\overline{y}/\overline{a})$ или $lnl(\overline{y}/\overline{a})$. Эти оценки называют оценками максимального правдоподобия и их определение приводит к решению системы уравнений:

$$\frac{\partial \left(lnl\left(\overline{y} / \overline{a} \right) \right)}{\partial a_{i}} = 0 \quad \text{при } \overline{a} = \overline{a}_{0} \,. \tag{3.25}$$

Функцию $lnl(\overline{y}/\overline{a})$ можно представить в виде ряда Тейлора из которого, предполагая процесс нормальным (гауссовским), получают для принятой реализации \overline{y} послеопытное распределение параметра, которое определяет корреляционную матрицу ошибок $\overline{c_v}^{-1}$ в виде:

$$\overline{c}_{y}^{-1} = c_{ij} = -\frac{\partial^{2} ln l \left(\overline{y} / \overline{a}\right)}{\partial a_{i} \partial a_{j}}$$
(3.26)

Дисперсии погрешностей измерения составляющих векторного параметра \overline{a} – суть диагональные элементы матрицы \overline{c}_{y}^{-1} . Выражения (3.25) и (3.26) являются основными при расчете оптимальных значений измеряемого параметра.

Эти исходные теоретические положения хорошо известны в технике обработки радиолокационной информации [75].

Рассмотрим возможность получения аналогичных решений для задач пеленгования в навигационных гидроакустических системах с ультракороткой базой.

Основу всех алгоритмов обработки представляет нахождение отношения правдоподобия для текущей принимаемой реализации сигнала, искаженного шумом. В случае приема сигнала с известной структурой логарифм отношения правдоподобия имеет вид [75]:

$$lnl = \overline{y}^T \overline{P}^{-1} \overline{x} - \frac{1}{2} \overline{x}^T \overline{P}^{-1} \overline{x} = Z - \frac{q^2}{2}$$
(3.27)

где $\overline{y} = \{y_1, y_2, ..., y_n\}^T$ – принимаемый сигнал, $\overline{x} = \{x_1, x_2, ..., x_n\}^T$ – ожидаемый (опорный) сигнал, T – знак транспонирования, \overline{P}^{-1} – корреляционная матрица помехи. Компоненты вектора \overline{y} – сигналы, принимаемые каждым каналом антенны, компоненты вектора \overline{x} – опорные сигналы для обработки каждого канала антенны. В выражении (3.27) также введены обозначения: $Z = \overline{y}^T \overline{P}^{-1} \overline{x}$ – корреляционная весовая сумма, формируемая при обработке сигналов всех элементов антенны; $q^2 = \overline{x}^T \overline{P}^{-1} \overline{x}$ – параметр, определяющий энергию сигнала.

Матрица помех \overline{P}^{-1} , для случая некоррелированных помех в каналах, имеет только диагональные элементы σ_n^{-2} , где σ_n^2 – дисперсия шума в *n*-ом канале, *n* – пространственный индекс, *N* – число элементов в антенне.

При обработке информации опорный (ожидаемый) сигнал представим в виде:

$$\overline{x} = x_0 \overline{x}(\overline{a}) , \qquad (3.28)$$

выделив временную зависимость x_0 и векторную функцию $\overline{x}(\overline{a})$, которая зависит только от измеряемого параметра. Тогда корреляционная весовая сумма при обработке всех каналов антенны приобретает вид:

$$Z = \sum_{n=1}^{N} \frac{y_n x_0 x_n(\overline{a})}{\sigma_n^2}$$
(3.29)

Временную составляющую опорного сигнала x_0 необходимо представить в комплексной форме, в виде суммы квадратурных составляющих $x_0 = x_{0c} + jx_{0s}$, причем удобно взять $|x_0| = 1$. Тогда, представляя временную зависимость в дискретном виде, для каждого канала антенны определим функцию:

$$z_n = y_n x_0 = \sum_{n=1}^{N} [y_n x_{0c} + j y_n x_{0s}]$$
(3.30)

где $y_n[m]$ – временная выборка сигнала принимаемого *n*-ым каналом антенны, $x_{0s}[m]x_{0c}[m]$ – выборки квадратурных состав-

ляющих опорного сигнала, m = 1..M – временной индекс, M – число отсчетов сигнала в *n*-ом канале при обработке во временной области.

Для сигналов известной частоты с неизвестной начальной фазой и амплитудой оптимальная обработка для определения навигационного параметра должна обеспечивать определение максимального значения логарифма отношения правдоподобия пропорционального модулю корреляционной весовой суммы:

$$lnl \approx Z = \sum_{n=1}^{N} \frac{z_n x_n(\overline{a})}{\sigma_n^2}$$
(3.31)

В дальнейшем перейдем от векторного к скалярному параметру, рассматривая задачу измерения направления прихода сигнала β в горизонтальной плоскости. Для систем с ультракороткой базой точность определения пеленга является наиболее важным параметром, поскольку точность определения дистанции между двумя синхронизированными объектами детально исследована для длиннобазисных навигационных систем, а решение задачи определения угла места практически не отличается от рассматриваемой.

Из (3.30) следует, что первым этапом обработки данных в каждом канале является квадратурная обработка принимаемой реализации с определением комплексной огибающей z_n в каноническом виде $z_n = z_n exp(j\varphi_n)$, где

$$z_{n}^{2} = \left(\sum_{m=1}^{M} y_{n}[m] x_{0c}[m]\right)^{2} + \left(\sum_{m=1}^{M} y_{n}[m] x_{0s}[m]\right)^{2},$$

$$\varphi_{n} = atan\left\{\left(\sum_{m=1}^{M} y_{n}[m] x_{0c}[m]\right), \left(\sum_{m=1}^{M} y_{n}[m] x_{0s}[m]\right)\right\} \quad (3.32)$$

Очевидно, что φ_n – это распределение фазы принимаемого навигационного сигнала на элементах антенны, z_n – модуль корреляционной весовой функции, пропорциональный квадрату амплитуды сигнала, принимаемого в каждом канале.

Далее следует определить структуру и порядок формирования параметра $\overline{x}(\overline{a})$, который определяет опорный сигнал как функцию геометрического размещения элементов антенны и значений измеряемых угловых параметров. Фактически $\overline{x}(\overline{a})$ – основная

характеристика антенны, используемая при решении задачи. Она может быть задана в аналитическом виде или определена экспериментально. Если вести речь об измерении пеленга и угла места, то $\overline{x}(\beta,\gamma)$ дает распределение фазы плоской звуковой волны на всех элементах антенны как функцию от нормали к плоскости принимаемой акустической волны.

Вектор фазовых задержек, компоненты которого определяются конфигурацией приемной антенны, может быть представлен в виде:

$$\overline{x}^{T}(\beta) = \left\{ \exp\left(-j\theta_{n}(\beta,\gamma)\right) \right\} , \qquad (3.33)$$

где $\theta_n(\beta, \gamma)$ – компоненты функции антенны, определяющей задержки фазы опорного сигнала относительно точки приведения.

Функцию $\theta(\beta,\gamma) = (\theta_n(\beta,\gamma))$ далее будем называть фазовой функцией антенны.

Далее введем обозначение $q_n^2 = z_n \sigma_n^{-2}$. Этот параметр имеет смысл отношения сигнал/шум в *n*-ом канале.

С учетом введенных обозначений получим, что корреляционная весовая сумма представляется в виде:

$$Z = \sum_{n=1}^{N} q_n^2 \exp(j(\varphi_n + \theta_n(\beta, \gamma)))$$
(3.34)

Фактически (3.34) имеет ясный физический смысл и означает, что для решения навигационной задачи в каждом приемном канале многоканальной системы пеленгования обязательным является нахождение фазы сигнала и отношения сигнал/шум. Кроме того, для решения задачи необходимо располагать информацией о фазовой функции антенны. Наличие взвешивающего коэффициента q_n^2 для описания качества фазовой информации в каждом приемном канале и использование при обработке данных результатов градуировки антенны $\theta_n(\beta, \gamma)$ коренным образом отличают предлагаемую модель обработки от алгоритмов, ранее описанных в 3.1.

Уравнение пеленга

При суммарной обработке всех каналов получим:

$$|Z|^{2} = \sum_{n=1}^{N} q_{n}^{4} + 2 \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{k=2}^{N} q_{n}^{2} q_{k}^{2} cos(\varepsilon_{nk}) , \qquad (3.35)$$

где $\varepsilon_{nk} = \varphi_{nk} + \theta_{nk} (\beta, \gamma)$, $\varphi_{nk} = \varphi_n - \varphi_k$, $\theta_{nk} = \theta_n - \theta_k$. Оптимальную оценку искомого пеленга в соответствии с

(3.25) найдем из уравнения $\frac{\partial}{\partial \beta} |Z|^2 = 0$, которое с учетом (3.35), преобразуется к виду:

$$\sum_{n=1}^{N-1} \sum_{k=2}^{N} q_n^2 q_k^2 \sin\left(\varepsilon_{nk}\right) \frac{\partial \theta_{nk}}{\partial \beta} = 0.$$
(3.36)

Таким образом, для гауссовой модели шумов в каналах независимо от конфигурации приемной антенны оптимальная обработка данных, целью которой является определение углового положения объекта навигации, сводится к решению уравнения (3.36) относительно искомого параметра. Решению уравнения должны предшествовать определение уровня шумов, амплитуды и фазы сигнала в каждом канале и градуировка антенны с целью определения ее фазовой функции. Физический смысл уравнения (3.36) состоит в том, что искомый пеленг получают как результат взвешенного усреднения пеленгов, получаемых при обработке данных каждой парой элементов антенны с учетом геометрического и энергетического весовых коэффициентов. Геометрические весовые коэффициенты отражают крутизну фазовой характеристики соответствующей пары элементов в окрестности ожидаемого значения угла, а энергетические – при обработке данных увеличивают значимость каналов с большим отношением сигнал/шум.

Погрешность определения пеленга

Для полного описания обрабатываемых данных получим также расчетные соотношения для определения дисперсии пеленга, которая является параметром точности текущего измерения.

Как следует из (3.25), при $\beta = \beta_0$, где β_0 – оценка искомого пеленга, уравнение $\sigma_{\beta}^{-2} = \frac{\partial^2 |Z|}{\partial \beta^2}$ с учетом того, что $\frac{\partial |Z|}{\partial \beta} = 0$, преобразуется к виду:

$$\sigma_{\beta}^{-2} = \frac{\partial^2 \left| Z \right|^2}{\partial \beta^2} \frac{1}{2 \left| Z \right|}$$
(3.37)

и, поскольку $|Z| = \sum_{n=1}^{N} q_n^2$, то окончательно с учетом (3.35) получим оценку дисперсии:

$$\sigma_{\beta}^{-2} = \frac{1}{\sum_{n=1}^{N} q_n^2} \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{k=2}^{N} q_n^2 q_k^2 \cos\left(\varepsilon_{nk}\right) \left(\frac{\partial \theta_{nk}}{\partial \beta}\right)^2 .$$
(3.38)

В (3.38) выражение $\frac{\partial \theta_{nk}}{\partial \beta}$ пропорционально волновому размеру измерительной базы, образованной соответствующей парой приемных элементов антенны, поэтому дисперсия погрешности измерения пеленга обратно пропорциональна энергетическому отношению сигнал/шум и квадрату размера измерительной базы.

3.2.2. Уравнения пеленгования для многоэлементных антенн различной конфигурации

Чтобы воспользоваться формулами (3.36, 3.38) для определения пеленга и его дисперсии, необходимо задать фазовую функцию антенны и определить ожидаемые фазовые задержки для конкретной конфигурации приемной антенны.

Линейная многоэлементная антенна

Пусть имеется линейная эквидистантная приемная антенна с периодом kb, а β – угол, отсчитываемый от нормали антенны (рис. 3.7).

Компоненты фазовой функции такой антенны запишутся в простой аналитической форме:

$$\theta_n = -kb(N-n)\sin\beta \quad (3.39)$$

Тогда необходимые для анализа величины можно записать в виде:





$$\theta_{nk} = -kb(k-n)sin\beta$$
, $\frac{\partial\theta_{nk}}{\partial\beta} = -kb(k-n)cos\beta$

После подстановки в (3.36) получим оптимальную оценку пеленга из решения уравнения:

$$\sum_{n=1}^{N-1} \sum_{k=2}^{N} q_n^2 q_k^2 \sin(\varphi_{nk} - kb(k-n)\sin\beta)(k-n)\cos\beta = 0 \quad (3.40)$$

Если начальное приближение близко к оптимальной оценке, то (3.40) упрощается:

$$\sum_{n=1}^{N-1} \sum_{k=2}^{N} q_n^2 q_k^2 (\varphi_{nk} - kb(k-n)sin\beta)(k-n) = 0 ,$$

откуда следует:

$$\sin\beta = \frac{\sum_{n=1}^{N-1} \sum_{k=2}^{N} q_n^2 q_k^2 \left(\varphi_{nk} \left(k-n\right)\right)}{kb \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{k=2}^{N} q_n^2 q_k^2 \left(k-n\right)^2}.$$
(3.41)

В случае идентичных каналов $q_n^2 = q_0^2$ получим:

$$sin\beta = \frac{\sum_{n=1}^{N-1} \sum_{k=2}^{N} \varphi_{nk} (k-n)}{kbN(N^2 - 1)}$$

Соответствующая оценка погрешности единичного измерения найдется из:

$$\sigma_{\beta}^{-2} = \frac{(kbcos\beta)^2}{\sum_{n=1}^{N} q_n^2} \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{k=2}^{N} q_n^2 q_k^2 \cos(\varphi_{nk} - kb(k-n)sin\beta)(k-n)^2.$$

При $q_n^2 = q_0^2$ это уравнение приводится к известному виду [90]:

$$\sigma_{\beta}^{-2} = (kbcos\beta)^2 q_0^2 (N^2 - 1), \qquad (3.42)$$

определяющему потенциальную точность измерения пеленга линейной антенной. Следует отметить, что при обработке данных в уравнениях (3.40–3.41) надо знать полную фазу измеряемого сигнала, т.е. ограничить размер измерительной базы величиной $kb < \pi$. Это ограничивает точность системы при небольшом числе приемных каналов.

Антенна с произвольным числом элементов на круговой базе

Как отмечалось, для увеличения точности пеленгационных систем целесообразно применение антенн с большим числом элементов, размещенных на круговой базе, причем для однозначного определения пеленга элементы должны быть размещены с шагом равным половине длины волны. При большом числе элементов (приемных каналов) точность угловых измерений в системе достигает десятых долей градуса. Эта конфигурация наиболее перспективна и рассмотрим подробнее ее характеристики. Цель анализа – оценить возможность достижения высокой точности при использовании минимального числа каналов обработки.

Рассмотрим круговую антенну диаметром 2kb с равномерно распределенными по окружности N точечными элементами, изображенную на рис. 3.6.

Пеленг определим относительно линии, связывающей центр антенны и приемный элемент с номером 1. Компоненты фазовой функции, задающие распределение фазы по окружности антенны относительно центра антенны, будут иметь вид:

$$\theta_n = -kbcos\left[\frac{2\pi(n-1)}{N} - \beta\right], \qquad (3.43)$$

а необходимые для анализа выражения:

$$\theta_{nk} = -2kb\sin\frac{\pi(k-n)}{N}\sin\left[\frac{\pi(n+k-2)}{N} - \beta\right],$$
$$\frac{\partial}{\partial\beta}\theta_{nk} = 2kb\sin\frac{\pi(k-n)}{N}\cos\left[\frac{\pi(n+k-2)}{N} - \beta\right].$$

Введем обозначения $B = \frac{\pi (n + k - 2)}{N}$, $A = \sin \frac{\pi (k - n)}{N}$, тогда получим уравнения для определения пеленга и дисперсии соответственно:

$$\sum_{n=1}^{N-1} \sum_{k=2}^{N} q_n^2 q_k^2 \sin\left\{ \left(\varphi_{nk} - 2kbA\sin[B - \beta] \right) \right\} A\cos[B - \beta] = 0. \quad (3.44)$$
$$\sigma_{\beta}^{-2} = \frac{\left(kb\right)^{2}}{\sum_{n=1}^{N} q_{n}^{2}} \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{k=2}^{N} q_{n}^{2} q_{k}^{2} \cos\left(\varphi_{nk} - 2kbAsin(B-\beta) \times \left\{1 - \cos\left(2A\right)\right\} \left\{1 + \cos\left(2B - \beta\right)\right\}.$$
(3.45)

Полагая $q_n^2 = q_0^2$, после упрощений получим потенциальную оценку точности из:

$$\sigma_{\beta}^{-2}=(kb)^2 q_0^2 N.$$

Как следует из этого выражения, погрешность не зависит от направления прихода сигнала и ориентации антенны. Кроме того, при неизменном размере базы потенциальная точность увеличивается пропорционально квадратному корню из числа элементов антенны.

Четырехэлементная антенна

Если для пеленгования в горизонтальной плоскости используются четыре элемента, равномерно размещенные на окружности, то фазовая функция антенны примет вид: $x_n(\beta) = exp(j\theta_n)$, $n = 1 \div 4$,

$$x(\beta) = \{-kbsin\beta, kbcos\beta, kbsin\beta - kbcos\beta\}$$

После подстановки этого выражения в (3.36) и необходимых преобразований получим уравнение пеленга:

$$\cos\left(\beta + \frac{\pi}{4}\right) \left(q_{12}\sin\varepsilon_{12} + q_{34}\sin\varepsilon_{34}\right) - \\ -\sin\left(\beta + \frac{\pi}{4}\right) \left(q_{14}\sin\varepsilon_{14} + q_{23}\sin\varepsilon_{23}\right) - \\ -\sqrt{2}\cos\beta q_{13}\sin\varepsilon_{13} - \sqrt{2}\sin\beta q_{24}\sin\varepsilon_{24} = 0, \qquad (3.46)$$

где введены следующие обозначения: $q_{nk} = q_n^2 q_k^2$,

$$\varepsilon_{12} = -\varphi_{12} + \sqrt{2}kbsin\left(\beta + \frac{\pi}{4}\right), \ \varepsilon_{14} = \varphi_{14} + \sqrt{2}kbos\left(\beta + \frac{\pi}{4}\right),$$

$$\varepsilon_{34} = \varphi_{34} + \sqrt{2}kbsin\left(\beta + \frac{\pi}{4}\right), \ \varepsilon_{23} = \varphi_{23} + \sqrt{2}kbcos\left(\beta + \frac{\pi}{4}\right),$$
$$\varepsilon_{13} = \varphi_{13} - 2kbsin(\beta), \ \varepsilon_{24} = \varphi_{24} + 2kbcos(\beta).$$

Для вычисления погрешности необходимо определить:

$$\sigma_{\beta}^{-2} = \frac{(kb)^{2}}{\sum_{n=1}^{4} q_{n}^{2}} \begin{cases} 2\cos^{2}\left(\beta + \frac{\pi}{4}\right) (q_{12}\cos\varepsilon_{12} + q_{34}\cos\varepsilon_{34}) + \\ +2\sin^{2}\left(\beta + \frac{\pi}{4}\right) (q_{14}\cos\varepsilon_{14} + q_{23}\cos\varepsilon_{23}) + \\ +4\cos^{2}\left(\beta\right) q_{13}\cos\varepsilon_{13} + 4\sin^{2}\left(\beta\right) q_{24}\cos\varepsilon_{24} \end{cases}$$
(3.47)

Таким образом, из (3.46) можно получить текущее значение пеленга, а из (3.47) – вычислить дисперсию погрешности выполненных измерений, тем самым полностью описав случайную величину β . Это описание может быть использовано в дальнейшей обработке при накоплении результатов, прогнозировании и слежении за объектом навигации.

Круговая антенна с дополнительным элементом в центре

Приведем также расчетные соотношения для 5-ти элементной антенны, которая отличается от описанной ранее наличием элемента, размещенного в центре антенны (рис. 3.8).

Фазовая функция такой антенны примет вид:

$$x_n(\beta) = \exp(j\theta_n), n = 1 \div 5,$$

$$x(\beta) = \{-kbsin\beta, kbcos\beta, kbsin\beta, -kbcos\beta, 0\}.$$
 (3.48)

Подставим это выражение в (3.36) и после преобразований получим уравнение пеленга:

$$(\cos\beta - \sin\beta)(q_{34}\varphi_{34} - q_{12}\varphi_{12}) + +\cos\beta(-2q_{13}\varphi_{13} - q_{15}\varphi_{15} + q_{35}\varphi_{35}) + +(\cos\beta + \sin\beta)(-q_{14}\varphi_{14} - q_{23}\varphi_{23}) +$$

$$+\sin\beta \left(-2q_{24}\varphi_{24} - q_{25}\varphi_{25} + q_{45}\varphi_{45}\right) + + \left(\cos^{2}\beta - \sin^{2}\beta\right) \left(q_{12} + q_{34} - q_{14} - q_{23}\right) + + \sin\beta\cos\beta \left(4q_{13} - 4q_{24} + q_{15} - q_{25} + q_{35} - q_{45}\right).$$
(3.49)

После соответствующих преобразований получим для дисперсии:

$$\sigma_{\beta}^{-2} = \frac{(kb)^{2}}{\sum_{n=1}^{5} q_{n}^{2}} \begin{cases} \left(\cos^{2}\beta - \sin^{2}\beta\right) \left(q_{14} + q_{23}\right) + \\ + \left(\cos^{2}\beta\right) \left(4q_{13} + q_{15} + q_{35}\right) + \\ + \left(\sin^{2}\beta\right) \left(4q_{24} + q_{25} + q_{45}\right) + \\ + \left(\cos\beta + \sin\beta\right)^{2} \left(q_{12} + q_{34}\right) \end{cases} \end{cases}$$

Если каналы идентичны, то $q_n^2 = q_0^2$ и дисперсия погрешности определения пеленга такой антенной имеет вил: $\sigma_{\beta}^{-2} = 2(kb)^2 q_0^2$

Двухшкальная антенна

На основании общих выражений для определения пеленга и дисперсии можно получить расчетные выражения для описания любой достаточно сложной антенны. Так, уже отмечалось, что одним из методов увеличения точности УКБ-систем является применение приемных антенн с двухшкальной

(3.50)

измерительной базой. По такому принципу построены антенны в известных системах [32,94]. Малая база обеспечивает грубое однозначное пеленгование, большая – уточняет полученное решение. Пусть шестиэлементная антенна конфигурирована в виде 4-х элементной круговой базы, радиусом $b = \frac{\lambda}{4}$, и пары дополни-



Рис. 3.8. Пятиэлементная антенна

тельных элементов, разнесенных по ортогональным направлениям от центра антенны на расстояние 2 λ (рис. 3.9). Фазовая функция такой антенны имеет вид: $x_n(\beta) = exp(j\theta_n), n = 1 \div 6, a$ dasoвые задержки относительно центра круговой базы определяются в соответствии с принятой геометрией антенны выражениями:



измерительной базой

 $\theta_1 = -kb\cos\beta$, $\theta_2 = kb\sin\beta$, $\theta_3 = -\theta_1$, $\theta_4 = -\theta_2$, $\theta_5 = -8\theta_1$, $\theta_6 = 8\theta_2$.

Учтем также, что
$$\frac{\partial \theta_1}{\partial \beta} = \theta_2$$
, $\frac{\partial \theta_2}{\partial \beta} = -\theta_1$. Тогда:
 $\varepsilon_{12} = \varphi_{12} - \theta_1 + \theta_2, \varepsilon_{14} = \varphi_{14} + \theta_1 + \theta_2, \varepsilon_{16} = \varphi_{16} + \theta_1 - 8\theta_2,$
 $\varepsilon_{23} = \varphi_{23} - \theta_1 - \theta_2, \quad \varepsilon_{25} = \varphi_{25} + 8\theta_1 - \theta_2, \quad \varepsilon_{34} = \varphi_3 + \theta_1 - \theta_2,$
 $\varepsilon_{36} = \varphi_{36} - \theta_1 - 8\theta_2, \quad \varepsilon_{45} = \varphi_{45} + 8\theta_1 + \theta_2, \quad \varepsilon_{56} = \varphi_{56} - 8\theta_1 + 8\theta_2,$
 $\varepsilon_{13} = \varphi_{13} - 2\theta_1 \quad \varepsilon_{15} = \varphi_{15} + 7\theta_1 \quad \varepsilon_{24} = \varphi_{24} + 2\theta_2 \quad \varepsilon_{26} = \varphi_{26} - 7\theta_2$
 $\varepsilon_{35} = \varphi_{35} + 9\theta_1 \quad \varepsilon_{46} = \varphi_{46} - 9\theta_2.$

И окончательно уравнение для определения пеленга примет вид:

$$\begin{aligned} q_{12} \left(-\theta_{1}-\theta_{2}\right) \sin \varepsilon_{12}+q_{13} \left(-2\theta_{2}\right) \sin \varepsilon_{13}+q_{14} \left(-\theta_{1}+\theta_{2}\right) \sin \varepsilon_{14}+\\ +q_{15} \left(7\theta_{2}\right) \sin \varepsilon_{15}+q_{16} \left(8\theta_{1}+\theta_{2}\right) \sin \varepsilon_{16}+q_{23} \left(\theta_{1}-\theta_{2}\right) \sin \varepsilon_{23}+\\ +q_{24} \left(-2\theta_{1}\right) \sin \varepsilon_{24}+q_{25} \left(\theta_{1}+8\theta_{2}\right) \sin \varepsilon_{25}+q_{26} \left(7\theta_{1}\right) \sin \varepsilon_{26}+\\ +q_{34} \left(\theta_{1}+\theta_{2}\right) \sin \varepsilon_{34}+q_{35} \left(9\theta_{2}\right) \sin \varepsilon_{35}+q_{36} \left(8\theta_{1}-\theta_{2}\right) \sin \varepsilon_{36}+\\ +q_{45} \left(-\theta_{1}+8\theta_{2}\right) \sin \varepsilon_{45}+q_{46} \left(9\theta_{1}\right) \sin \varepsilon_{46}+q_{56} \left(-8\theta_{1}-8\theta_{2}\right) \sin \varepsilon_{56}=0. \end{aligned}$$

$$(3.51)$$

Дисперсия оценки пеленга, получаемая из общего выражения приобретет вид:

$$\sigma_{\beta}^{-2} = \frac{\left(kb\right)^{2}}{\sum_{n=1}^{6} q_{n}^{2}} = \frac{\left(kb\right)^{2}}{\sum_{n=1}^{6} q_{n}^{2}} \left\{ \begin{array}{l} q_{12} \left(-\theta_{1} - \theta_{2}\right)^{2} \cos \varepsilon_{12} + q_{13} \left(-2\theta_{2}\right)^{2} \cos \varepsilon_{13} + q_{14} \left(-\theta_{1} + \theta_{2}\right)^{2} \cos \varepsilon_{14} + q_{15} \left(7\theta_{2}\right)^{2} \cos \varepsilon_{15} + q_{16} \left(8\theta_{1} + \theta_{2}\right)^{2} \cos \varepsilon_{16} + q_{23} \left(\theta_{1} - \theta_{2}\right)^{2} \cos \varepsilon_{23} + q_{24} \left(-2\theta_{1}\right)^{2} \cos \varepsilon_{24} + q_{25} \left(\theta_{1} + 8\theta_{2}\right)^{2} \cos \varepsilon_{25} + q_{26} \left(7\theta_{1}\right)^{2} \cos \varepsilon_{26} + q_{34} \left(\theta_{1} + \theta_{2}\right)^{2} \cos \varepsilon_{34} + q_{35} \left(9\theta_{2}\right)^{2} \cos \varepsilon_{35} + q_{36} \left(8\theta_{1} - \theta_{2}\right)^{2} \cos \varepsilon_{36} + q_{45} \left(-\theta_{1} + 8\theta_{2}\right)^{2} \cos \varepsilon_{45} + q_{46} \left(9\theta_{1}\right)^{2} \cos \varepsilon_{46} + q_{56} \left(-8\theta_{1} - 8\theta_{2}\right)^{2} \cos \varepsilon_{56} \end{array} \right\}$$

Если каналы идентичны, $q_n^2 = q_0^2$ и $\varepsilon_{nk} \approx 0$ (полное совпадение текущего принятого фазового распределения на апертуре антенны и компонент ее фазовой функции), после подстановки этих данных в приведенное выражение, получим оценку потенциальной точности системы при использовании предлагаемой антенны $\sigma_{\beta}^{-2} = 55,3(kb)^2 q_0^2$ и $\sigma_{\beta} = \frac{0,134}{a,kb}$.

$$q_{12} \left(-\theta_{1}-\theta_{2}\right) sin\varepsilon_{12} + q_{13} \left(-2\theta_{2}\right) sin\varepsilon_{13} + q_{14} \left(-\theta_{1}+\theta_{2}\right) sin\varepsilon_{14} + q_{23} \left(\theta_{1}-\theta_{2}\right) sin\varepsilon_{23} + q_{24} \left(-2\theta_{1}\right) sin\varepsilon_{24} + q_{34} \left(\theta_{1}+\theta_{2}\right) sin\varepsilon_{34} = 0.$$
(3.52)

Причем дисперсия этой оценки для идентичных каналов и $\varepsilon_{nk} \approx 0$ составит: $\sigma_{\beta 0}^{-2} = 2(kb)^2 q_0^2$, а погрешность, соответственно: $\sigma_{\beta 0} = \frac{0,707}{q_0 kb}$.

Навигационные системы с ультракороткой базой

Таким образом, за счет введения двух дополнительных элементов для приема навигационных данных точность системы увеличена более чем в пять раз. При $q_0 = 20$ дБ и $kb = \frac{\pi}{2}$ (при таком радиусе обеспечивается однозначное грубое пеленгование круговой базой) получим оценку потенциальной точности системы с такой антенной $\sigma_{\beta} < 0.5^{\circ}$.

Обобщение результатов статистического анализа решения навигационной задачи

На основании расчетных формул, приведенных в этом разделе, можно сделать сравнительный анализ детерминированных и статистических методов обработки. Для детерминированных методов характерно определение пеленга по любой возможной комбинации пар элементов с усреднением результатов на основе геометрического взвешивания [95]. Для работы алгоритма необходимо знать распределение полной фазы сигнала на антенне и геометрию антенны. При статистических методах необходимо определить полную информацию в каждом канале получения данных - модуль, фазу и статистические характеристики шума. Оценка искомого параметра при этом получается в виде некой оптимальной процедуры, при которой измеренное фазовое распределение с минимальной среднеквадратичной ошибкой аппроксимируется фазовой функцией антенны. Причем, при решении соответствующего уравнения, пеленг определяется путем совместной обработки всех пар каналов, взятых с различными весами. Весовые коэффициенты содержат как геометрическую составляющую, равную производной фазовой функции по измеряемому параметру, так и энергетическую, равную действующему в канале отношению сигнал/ шум по энергии.

Особое место в обработке данных принимает знание фазовой функции антенны. В приведенных формулах при определении фазовой функции мы исходили из того, что антенна состоит из идеальных дискретных точечных элементов. Это позволяло записать фазовую функцию в простом аналитическом виде. На практике за счет дифракции звука на антенне, это описание становится неточным и его необходимо уточнять экспериментально при градуировке антенны. Влияние неточного описания антенны более подробно рассмотрено ниже.

Следует также сказать несколько слов о связи разработанных алгоритмов статистической обработки с известными методами высокого разрешения параметров [96-97]. Как известно, эти методы увеличивают пространственное (частотное) разрешение при заданных ограниченных по пространству (времени) реализациях сигнала. Достигаемое разрешение оказывается значительно выше известного релеевского критерия, при котором угловое разрешение определяется отношением длины волны к апертуре антенны. Суть методов высокого разрешения состоит в дополнительном учете характеристик шумов, что позволяет создать реалистическую модель входного процесса. Параметры этой модели определяются по результатам наблюдения сигнала (ограниченного в пространстве или времени и с учетом шумов) и вероятностных характеристик шумов. Далее, методами Фурье-анализа, выполняется пространственное (спектральное) оценивание искомых параметров сигнала с необходимым разрешением, которое уже будет определяться размерами реализации модельного сигнала. Численное моделирование методов высокого разрешения демонстрирует возможности улучшения разрешения на один-два порядка в сравнении с релеевским критерием. Однако в ряде работ отмечается, что практическая реализация методов затруднена, прежде всего, необходимостью точного определения характеристик отклика приемной антенны (manifold array) [83], а проблема высокого углового разрешения – проблема прецизионной градуировки антенны. Метод максимального правдоподобия, основанный на оценке вероятностных характеристик шума и смеси сигнала с шумом и учете реальных характеристик антенны, по своей физической сути – тот же метод высокого разрешения. Действительно, если установлено значение отношения сигнал/шум, то погрешность расчета пеленга уже для антенны диаметром 2 λ составит при N = 6, q = 20 dB, $\sigma_{\beta} = 0,2^{\circ}$, при релеевском критерии $\sigma_{\beta} = 28^{\circ}$.

3.2.3. Приемник навигационных сигналов ГАНС УКБ

Об алгоритме определения пеленга разреженной антенной

Достаточно высокая потенциальная точность, как было отмечено ранее, может быть достигнута при минимальном числе каналов на круговой базе большого волнового размера, который выбран из условия достижения заданной точности, при этом расстояние между элементами превышает половину длины волны, но необходимо устранить фазовую неоднозначность, характерную для таких антенн. В этом случае для устранения фазовой неоднозначности требуется выбрать сектор углов, в котором определяется пеленг. Для этого процедура обработки информации может быть дополнена, например предварительным фазированием приемной антенны на источник сигнала. Фактически при фазировании должна решаться задача однозначного и грубого определения пеленга за счет направленных свойств антенны. При этом конфигурация антенны должна исключать в ее характеристике направленности дополнительные максимумы равные основному.

Выбор сектора обзора на основе фазирования антенны

Рассмотренные в 3.1 амплитудные методы пеленгования могут быть эффективно использованы для предварительной обработки данных.

Покажем это на примере обработки данных круговой разреженной антенной из семи элементов. В системе с разреженной антенной определение пеленга может выполняться в два этапа. На первом устанавливается сектор обзора. Антенна в этом случае работает как обычный амплитудный пеленгатор, скомпенсированный в направлении источника сигналов. Разрешающая способность такого пеленгатора определяется остротой максимума характеристики направленности круговой дискретной антенны. На втором этапе целесообразно уточнять значение пеленга на основе статистических технологий обработки. При формировании оценки направления на источник навигационного сигнала выполняется обработка, суть которой состоит в поиске оценки пеленга β_0 , для которой суммарная характеристика направленности антенны, ком-

пенсируемая в направлении β_0 , имеет максимальное значение:

$$F(\beta_0) = \sum_{n=1}^{N} A_n exp(j(\varphi_n - \theta_n)), \qquad (3.53)$$

где
$$\theta_n = -kbcos\left[\frac{2\pi(n-1)}{N} - \beta_0\right]$$
. Для анализа удобнее исполь-

зовать нормированное значение F, которое не превышает единицы: $F_0 = F(\beta_0) / \sum_n^N A_n$. Поиск проводится в диапазоне углов 0–360 градусов. Значения функции F_0 для принятого набора данных амплитуд A_n и фаз φ_n максимально при когерентном сложении сигналов. Однозначное определение направления при компенсации характеристики направленности на источник сигнала обеспечивается, если характеристика направленности приемной антенны имеет один главный максимум, со значительным подавлением боковых лепестков.

Для антенны с круговой базой с эквидистантно размещенными на ней N приемными элементами, вид характеристики направленности в плоскости антенны определяется числом элементов, волновым расстоянием между ними и зависит от угла компенсации. Оценку направленности такой антенны можно получить, представив ее в виде эквивалентной линейной дискретной решетки с неэквидистантным расположением элементов и амплитудно-фазовым распределением, зависящим от угла компенсации. Как известно, неэквидистантное расположение элементов позволяет формировать характеристики направленности, не имеющие добавочных максимумов, равных основному даже при значительном разрежении антенны. Условием правильного определения направления при фазировании является превышение уровня основного лепестка характеристики направленности над боковыми.

На рис. 3.10–3.11 приведен ряд расчетных XH для круговых антенн с числом элементов 6 и 7 соответственно. Волновой радиус каждой антенны одинаков $kb = 2\pi$. Параметр кривых – угол компенсации, дискретно меняющийся от 0 град. (когда угол компенсации характеристики направленности проходит через ось антенны и первый гидрофон) до направления, проходящего через ось и вто-

рой гидрофон. Для антенн с четным числом элементов (6, 8) характерно наличие высокого уровня боковых лепестков (до 1,0 при N = 6 и 0,91 при N = 8). При N = 7 расчетный уровень лепестков не превышает 0,67.



 $\beta = 20$ $\beta = 30$

Рис. 3.10. Фазирование шестиэлементной антенны с волновым размером $kb = 2\pi$ при различных углах компенсации

На рис. 3.12 даны характеристики направленности семиэлементной антенны при различном размере измерительной базы с нулевым углом компенсации. Для определенности в дальнейшем будем рассматривать антенну с минимальным числом приемных элементов, размещенных с большим шагом на круговой базе.



Рис. 3.11. Фазирование семиэлементной антенны с волновым размером $kb = 2\pi$ при различных углах компенсации



Поиск начального приближения

Расчету пеленга для многоэлементных разреженных антенн предшествует процедура поиска начального приближения с использованием фазирования антенны на источник сигнала. При фазировании ведется поиск угла, при котором алгебраическая сумма принимаемых сигналов, сдвинутых по фазе на величину соответствующих значений компонент фазовой функции, оказывается максимальной. Если принимаемое фазовое распределение на антенне можно реконструировать, выделив полные фазы, то эффективным

алгоритмом формирования начального приближения для решения точного уравнения является оценка минимума дисперсии полных фаз и значений компонент фазовой функции. На рис. 3.13 приведено графическое изображение поиска решений фиксированного для значения пеленга с использованием фазирования по формуле (3.53), точного решения уравнения пеленга (3.43) и определения минимума дисперсии в соответствии с решением уравнения:



Рис. 3.13. Графическое изображение процедур поиска решения уравнения пеленга

$$\sum_{n=1}^{6} \sum_{k=2}^{7} \left(\varphi_{kn} - \theta_{kn} \right)^2 = min$$
 (3.54)

Фазирование позволяет не преобразовывать первичные фазовые данные, но имеется риск появления ложных решений, когда уровень бокового лепестка сравним с основным. При поиске минимума дисперсии сектор обзора задается однозначно, однако решение должно быть дополнено громоздкой процедурой выделения полных фаз в первичных данных.

Предложения по технической реализации пеленгатора в ГАНС УКБ

На основе проведенных исследований были разработаны предложения и реализована ГАНС УКБ средней дальности действия [98–99]. Ее характеристики в целом соответствуют известным

зарубежным образцам [33, 34, 37, 100–103]. Необходимо подчеркнуть особенности технических решений создания такого пеленгатора гармонических навигационных сигналов. Блок обработки (рис. 3.14) включает измеритель параметров сигнала с числом каналов равным числу элементов антенны и вычислитель пеленга. В антенне на круговой базе эквидистантно размещаются семь приемных элементов, расстояние между которыми выбирается из диапазона от 0,5 до 3 длин волн навигационной частоты. В блоке обработке дополнительно к семиканальному измерителю фазы введены семиканальный измеритель амплитуды, семиканальный измеритель отношения сигнал-шум. Кроме того, при вычислении пеленга производится взвешенная обработка данных каждого канала на основе дополнительных измерений отношения сигнал – шум для получения более точной оценки пеленга при обработке зашумленного сигнала.

Первым этапом обработки данных является определение амплитуды A_n и фаз φ_n сигнала каждом канале. Затем производится вычисление отношения сигнал/шум q_n в каждом канале с использованием аппроксимации принятых данных выделенной гармонической зависимостью:

$$q_n^2 = 2A_n^2 / \left\{ \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M} \left[y_{nm} - A_n \sin\left(\frac{2\pi m}{T_0 f_d} + \varphi_n\right) \right]^2 \right\}, \quad (3.55)$$

где m – временной индекс дисретизированного сигнала, M – объем временной выборки y_{nm} – цифровой отсчет сигнала в m-й момент времени, T_0 – период навигационной частоты, f_d – частота дискретизации сигнала. Далее выполняется фазирование антенны на источник навигационного сигнала. При фазировании формируется оценка направления на источник навигационного сигнала, обеспечивающая устранение неоднозначности нахождения пеленга, характерной для антенн, апертура которых может достигать нескольких длин волн. Фазирование по своей сути обеспечивает результат, который получают при обработке данных малой базы в системах с разделенной антенной. Далее начальное приближение β_0 и измеренные параметры сигнала поступают в блок вычисле-



Рис. 3.14. Структурно-функциональная схема обработки данных

ния пеленга, в котором получают оценку пеленга методом максимального правдоподобия.

В итоге пеленг β определяется из решения уравнения (3.43). Таким образом, пеленгатор обладает большей точностью при небольшом числе элементов приемной антенны и обеспечивает вычисление пеленга при различном уровне шумов в каналах. Предложенное решение реализовано в аппаратуре ГАНС УКБ, более детально описанной в р. 4.1.

3.3. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ В УГЛОМЕРНЫХ СИСТЕМАХ С УЛЬТРАКОРОТКОЙ БАЗОЙ

3.3.1. Структура системы

В ГАНС УКБ объект навигации обычно излучает навигационный импульсный сигнал заданной частоты и длительности, а для определения пеленга необходимо получить амплитудно-фазовое распределение этого сигнала на апертуре приемной антенны и решить соответствующее уравнение пеленга (3.2). Повышение точности таких систем основано на увеличении размера измерительной базы антенны. При ограниченном числе элементов антенны и каналов обработки возникают проблемы, связанные с неоднозначностью фазовых измерений на антенне, где расстояние между элементами превышает $\lambda/2$ (λ – длина волны навигационной частоты). Для устранения неоднозначности обычно используется дополнительная информация о секторе обзора с использованием двухшкальных измерительных баз или формирования характеристики направленности антенны, скомпенсированной в направлении объекта.

В известных исследованиях, направленных на повышение точности навигационных систем с ультракороткой базой, основное внимание уделяется обоснованию структуры приемных антенн и методов обработки сигналов. Анализ этих публикаций сделан, например, в работе [35].

В приемнике гармонического сигнала и обработкой данных круговой антенной с небольшим числом элементов (см. п. 3.2.5) нельзя увеличить точность за счет увеличения расстояния между элементами, потому что модель обработки с использованием фазирования становится неработоспособной для выбора начального углового сектора за счет появления дополнительных лепестков характеристики направленности антенны, равных главному, при увеличении расстояния между элементами более нескольких длин волн. Так для семиэлементной круговой антенны с расстоянием между элементами, равным три длины волны навигационной частоты 12 кГц, и отношением сигнал /шум 10 дБ оценка достижимой точности составляет 0,3°. При этом диаметр антенны увеличивается до 6 длин волн [86].

Кроме того, при использовании одночастотного сигнала увеличение энергии сигнала за счет мощности его излучения всегда ограничено технологическими проблемами, что также не позволяет увеличить точность угловых измерений за счет возможности увеличения отношения сигнал/шум в точке приема.

Очевидно, задача увеличения точности за счет увеличения измерительной базы антенны при сохранении небольшого числа элементов по-прежнему остается актуальной. Как известно [104], решение можно получить, если оценку углового положения объекта навигации формировать по временным задержкам сигнала на апертуре круговой многоэлементной приемной антенны с использованием в качестве навигационных сложных широкополосных сигналов. Временные задержки сложного сигнала однозначно определяются на антенне любой конфигурации, но точное их измерение на ультракороткой измерительной базе (когда максимальная временная задержка сигнала соизмерима с периодом средней частоты навигационного сигнала) становится достаточно проблемным. В таких системах, например, при размещении объекта навигации в плоскости приемной антенны погрешность измерений пеленга σ_{β} определяется погрешностью определения временных задержек σ_t и уменьшается с увеличением размера измерительной базы и ростом числа элементов. Например, для круговых антенн при условии, что момент прихода сигнала в каждом канале определяется с одинаковой погрешностью σ_t , эта погрешность имеет

вид $\sigma_{\beta} = \frac{\sigma_t}{t_0 \sqrt{N}}$, где $2t_0 = 2\frac{b}{C}$ – максимальное время распространения сигнала между элементами антенны, – число элементов в антенне, b – радиус антенны, C – скорость звука.

При применении широкополосного сигнала и прямом изменении времени достижение высокой точности возможно при зна-

чительном увеличении габаритов антенны (например, если максимальное время измеряемой задержки будет составлять несколько десятков периодов средней частоты навигационного сигнала, то на рабочей частоте 12 кГц размер антенны в несколько десятков длин волн будет составлять несколько метров, и это резко ограничивает ее применение, например, с борта обеспечивающего судна).

Другая возможность увеличения точности связана с уменьшением погрешности измерения временных задержек сигнала на апертуре антенны при значительном увеличении полосы сигнала ΔF и отношения сигнал/шум q, поскольку потенциальная точность измерения времени для широкополосного сигнала определяется условием $t^{-1} = q\Delta F$ [75]. Однако известно, что гидроакустические антенны, излучающие навигационные сигналы, эффективно работают только в окрестности своей резонансной частоты, и полоса рабочих частот обычно не превышает 20-30 % от резонансной. Например, на частоте 12 кГц полоса может составлять $\Delta F = 3-4$ кГц. Соответственно, при q = 10 и $\Delta F = 4$ кГц точность измерений временных задержек составляет $\sigma_t = 25$ мкс. При такой точности измерений времени в каналах антенны, например, для семиэлементной антенны со средней частотой навигационного сигнала 12 кГц оценка погрешности вычисления пеленга будет около 2°. В то же время для гармонического одночастотного сигнала при таком отношении сигнал/шум погрешность измерения фазы составляет менее 6°. Этого достаточно для точного пеленгования при использовании многоэлементных антенн с увеличенной апертурой [86].

Рассмотрим возможности применения многочастотных сигналов в ГАНС УКБ с оценкой потенциальной точности системы. В предлагаемой системе вместо обычных прямых измерений времени используется процедура расчета полных фаз многочастотного сигнала с расчетом временных задержек на каждой частоте и усреднением времени по всем частотам широкополосного сигнала. Такая система имеет малогабаритную приемную антенну с небольшим числом элементов, но при этом обеспечивает высокую точность измерений углового положения объекта навигации [105]. Состав системы поясняется рис. 3.15, где изображена ее структурная схема.



Рис. 3.15. Приемник широкополосного навигационного сигнала

Система состоит из оборудования на борту объекта навигации и оборудования в точке приема. На борту объекта установлены излучающая антенна 1, формирователь многочастотных навигационных сигналов 2 и система единого времени 3.

В состав приемного оборудования входят -канальная круговая приемная антенна 4, N-канальный блок аналоговой обработки 5, N-канальный аналого-цифровой преобразователь 6, блок памяти 7, система единого времени 8, компьютер 9, вычислитель времени прихода навигационного сигнала 10, вычислитель углового положения 11, N * I – канальный измеритель фазы 12, блок определения временных задержек навигационного сигнала относительно центра антенны 13, блок данных о характеристиках приемной антенны 14, блок решения уравнения углового положения 15, блок расчета координат 16.

ГАНС УКБ работает следующим образом. Антенна на объекте навигации излучает широкополосный навигационный сигнал дли-

тельностью Δt с числом частотных составляющих, равным I, в моменты времени, жестко задаваемые системой единого времени, которая также синхронизирована с аналогичной в пункте приема. (Длительность сигнала и число частотных составляющих выбираются с учетом максимального заполнения рабочей полосы частот излучающей антенны. Так, например, для средней частоты 12 кГц и полосы 5 кГц при $\Delta t = 10$ мс число частотных составляющих может быть I = 25). Сигнал принимается N элементами антенны и после обычной предварительной аналоговой обработки и аналого-цифрового преобразования поступает в блок памяти. Далее, программными средствами реализуется вычисление дальности, углового положения и координат объекта навигации.

Для вычисления дальности определяется время распространения навигационного импульса по трассе «объект навигации– приемник» и используется задаваемая скорость сигнала. Ошибка измерения времени для широкополосного сигнала с полосой ΔF существенно меньше в сравнении с гармоническим сигналом (например, на частоте 12 кГц при q = 20 дБ и $\Delta F = 5$ кГц ошибка измерений времени распространения составляет $\sigma_t = 20$ мкс, а при использовании гармонического сигнала длительностью 10 мс и q = 20 дБ ошибка почти на два порядка больше – $\sigma_t = 1$ мс). Для вычисления углового положения сначала определяется

Для вычисления углового положения сначала определяется дробная фаза φ_{ni} каждой частоты навигационного сигнала в каждом канале антенны с использованием программно реализованных квадратурных приемников. Далее, выполняется определение временных задержек навигационного сигнала относительно центра антенны. Для этого в каждом канале антенны выполняется операция восстановления полной фазы каждой частоты навигационного сигнала суммированием дробной фазы с целым числом периодов этой частоты. Число целых периодов подлежит определению. Эта операция включает формирование для каждой частоты рядов возможных значений полной фазы сигнала в канале антенны с учетом ограничений, определяемым размером антенны, нормирование полученных значений на соответствующую частоту и получение рядов возможных временных задержек по каждой частоте, сравнение этих рядов на всех частотах и выбор искомой временной задержки в каждом канале антенны из условия равенства ожидаемых временных задержек на всех частотах.

3.3.2. Основные расчетные соотношения

Приемник содержит N-элементную круговую антенну. В качестве гидроакустического навигационного сигнала используется широкополосный многочастотный сигнал с числом частотных составляющих, равным I, сосредоточенным в рабочей полосе пропускания антенны источника. Рассматривается задача пеленгования для случая, когда источник и приемник находятся в одной плоскости. Такая ситуация характерна для работы системы в условиях мелкого моря при размещении источника на борту объекта навигации, а приемника на борту обеспечивающего судна. Если радиус измерительной базы антенны равен b, скорость звука в среде C, то для плоской круговой антенны с равномерно размещенными по окружности приемными элементами временные задержки фронта плоской волны на элементах антенны относительно ее центра должны соответствовать соотношению

$$\tau_n(\beta) = -t_0 cos \left[\frac{2\pi}{N} (n-1) - \beta \right].$$
(3.56)

Уравнение пеленга можно получить статистической обработкой избыточных данных по минимуму дисперсии измеренных временных задержек t_n на апертуре антенны и характеристик антенны, связывающих распределение ожидаемых временных задержек $\tau_n(\beta)$ как функции углового положения объекта:

$$\sum_{n=1}^{N-1} \sum_{k=2}^{N} \left(t_{nk}^2 - \tau_{nk}^2 \right) = \min.$$
(3.57)

Ожидаемые временные задержки $\tau_n(\beta)$ могут быть определены при градуировке антенны и заданы аналитически в виде (3.56) путем аппроксимации результатов градуировки.

Выражение (3.57) приводится к виду

$$\sum_{n=1}^{N-1} \sum_{k=2}^{N} \frac{1}{t_0} (t_{nk} - \tau_{nk}) \sin\left[\frac{2\pi}{N} (n-1) - \beta\right] = 0, \qquad (3.58)$$

где $t_{nk} = t_n - t_k$, $\tau_{nk} = \tau_n - \tau_k$, t_n – измеренная временная задержка прихода сигнала на *n*-й элемент антенны относительно ее центра.

Уравнение (3.58) далее перепишем через измеряемые полные фазовые сдвиги $\varphi_n(i)$ для каждой *i*-й частоты широкополосного сигнала:

$$\sum_{n=1}^{N-1} \sum_{k=2}^{N} \left[\varphi_{nk}(i) - \theta_{nk}(i) \right] sin \left[\frac{2\pi}{N} (n-1) - \beta \right] = 0, \qquad (3.59)$$

где $\varphi_{nk}(i) = \varphi_n(i) - \varphi_k(i)$, $\theta_{nk}(i) = \theta_n(i) - \theta_k(i)$, $\varphi_n(i)$ – полная фаза сигнала на *n*-м элементе круговой антенны относительно ее центра, измеренная на частоте *i*. В уравнении (3.58) $\theta_{nk}(i)$ – это характеристика антенны, устанавливающая зависимость разности полных фаз между элементами антенны, определяемая при градуировке антенны и представленная в дальнейшем аналитической аппроксимацией.

Для применения уравнения (3.59) необходимо определить полную фазу в каждом из *N*-каналов антенны на каждой частотной составляющей навигационного сигнала. Ее можно записать в виде [106]:

$$\varphi_n(i) = \frac{2\pi}{T_i} t_n = \mathcal{P}_n(i) \pm m_i \times 2\pi , \qquad (3.60)$$

где $\mathscr{G}_n(i)$ – дробная (измеряемая) часть фазы *i*-й частоты в *n*-м канале антенны, T_i – период *i*-й частоты, $m_i = 0, 1, 2...m_{i,max}$ – число неизвестных полных периодов *i*-й частоты, добавляемых ко времени, измеренному по значению дробной фазы, $m_{i,max} \leq \frac{b}{CT_i}$ – максимальное число периодов *i*-й частоты на апертуре антенны.

Временную задержку t_n сигнала в n-м канале антенны далее представим в виде суммы времени, соответствующего значению дробной фазы и целого числа периодов соответствующей частоты:

$$t_n = \frac{\vartheta_n(i)}{2\pi} T_i \pm m_i T_i \,. \tag{3.61}$$

Число целых периодов на каждой частоте подлежит определению. Эта операция включает формирование для каждой часто-

ты ряда возможных значений полной фазы сигнала в канале антенны с учетом ограничений, определяемым размером антенны, нормирование полученных значений на соответствующую частоту и получение рядов возможных временных задержек по каждой частоте, сравнение этих рядов на всех частотах и выбор искомой временной задержки в каждом канале антенны из условия равенства ожидаемых временных задержек на всех частотах. Максимальное значение плотности распределения временных задержек по сформированным частотным рядам соответствует искомым и однозначно определяемым временным задержкам навигационного сигнала на апертуре антенны. В результате этой операции для каждой частоты образуется ряд из $2m_{i,max} + 1$ временных задержек

вида $\left\{ \frac{\mathcal{G}_n(i)}{2\pi} T_i \pm m_i T_i \right\}$ для $m_i < m_{i,max}$, состоящий из всех возмож-

ных временных задержек сигнала в пределах апертуры антенны. Далее, сравниваются ряды на всех частотах. Поскольку на всех частотах измеряется одно и то же время, то из этих рядов выбирают по одному значению, которые составляют новый ряд с минимальной дисперсией. По этому ряду устанавливаются значения m_i . Далее, из (3.60) определяются полные фазы и, соответственно, из (3.61) – искомое время задержки t_n . Такой алгоритм обеспечивает обработку многочастотной фазовой информации для определения полных фаз в элементах антенны и после нормирования на соответствующую частоту измерения временных задержек сигнала с минимальной погрешностью, равной погрешности измерения дробной фазы.

Выражением (3.59) задается I уравнений для определения пеленга. Следует отметить важные особенности этого алгоритма. Применение сигнала с числом частотных составляющих, равным I, сосредоточенным в рабочей полосе пропускания антенны источника, обеспечивает увеличение энергии сигнала, пропорциональное числу частотных составляющих, и, соответственно, при обработке данных является источником увеличения точности угловых измерений. Расчет дробной фазы $\mathcal{G}_n(i)$, определяющей полную фазу с точностью до целого числа длин волн, на каждой частотной составляющей навигационного сигнала в каждом из N-каналов

расширяет объем данных, используемых при определении угловых характеристик, и фактически устанавливает точность определения временных задержек на апертуре антенны. При исключении прямых измерений времени на апертуре антенн временные задержки определяются по данным фазовых измерений с минимальной погрешностью, равной погрешности измерения дробной фазы.

В изложенной модели определение пеленга является результатом взвешенного усреднения пеленгов по временным задержкам, определенным по всем возможным парам элементов антенны с учетом геометрических весовых коэффициентов. Геометрические весовые коэффициенты отражают крутизну характеристики ожидаемых времен прихода сигнала на соответствующей паре элементов в окрестности ожидаемого значения угла, определяемые при градуировке антенны.

Оценка погрешности пеленгования $\sigma_{\beta t}$ по измеряемым временным задержкам при условии, что момент прихода сигнала в каждом канале определяется с одинаковой погрешностью σ_t , уменьшается с увеличением размера измерительной базы и ростом числа элементов и имеет вид $\sigma_{\beta t} = \frac{\sigma_t}{t_0 \sqrt{N}} = \frac{1}{t_0 q \Delta F \sqrt{N}}$. Соответственно, оценка ошибки пеленгования $\sigma_{\beta \omega}$ с использованием полных фаз сигнала на каждой частоте при условии, что фаза сигнала в каждом канале определяется с одинаковой погрешностью $\sigma_{\varphi} = \frac{1}{q}$, для многочастотного сигнала при независимой обработке отдельных частотных дискрет уменьшается и может быть представлена в виде $\sigma_{\beta \omega} \approx \frac{\lambda_0}{2\pi b q \sqrt{NI}}$, где λ_0 – длина волны на средней частоте.

Таким образом, в предложенной системе обеспечивается высокая точность углового положения применением антенны с минимальным числом приемных элементов, размещенных с большим шагом на круговой базе, с использованием данных о распределении временных задержек сигнала на апертуре антенны. Так, например, для семиэлементной антенны с диаметром четыре длины волны на средней частоте 12 кГц (около 50 см) и полосой 4 кГц при длительности навигационного сигнала 10 мс, числе частотных составляющих I=20, отношении сигнал/шум на каждой частоте 10 дБ потенциальная погрешность измерения пеленга будет составлять менее 0,05°.

3.3.3. Экспериментальные оценки точности

Проверка возможности реализации изложенного алгоритма выполнялась на макетном образце системы. Эксперимент проводился в условиях гидроакустического бассейна. Для приема сигналов использовалась плоская круговая антенна с равномерным размещением восьми элементов. Диаметр измерительной базы составлял 75 мм. Источник сигнала был зафиксирован, а приемная антенна устанавливалась на прецизионной поворотной платформе в плоскости источника. Трактом излучения формировался импульс длительностью 2 мс. Импульс содержал 10 частот равной амплитуды и случайной начальной фазы в диапазоне частот 20–25 кГц с шагом 0,5 кГц.

Антенна была предварительно отградуирована по фазовым характеристикам на этих частотах, затем по набору экспериментальных данных (сплошные линии с точками) установлены аппроксимирующие фазовые характеристики (штриховые линии). На рис. 3.16 дан пример этих характеристик для пар элементов 1–5 и 3–7 на частоте 22 кГц.

После приема сигнала всеми элементами антенны выполнялась десятиполосная квадратурная обработка данных с определением комплексной огибающей на каждой частоте. Пример данных, сформированных приемником, приведен в табл. 3.1. Таблица содержит значения дробных фаз на каждой частоте принятого сигнала каждым элементом антенны для одного установленного пеленга.

Следующий шаг – определение времени задержки для пар элементов антенны. В табл. 3.2 приведены расчеты возможной задержки в соответствии с (3.61) для двух пар ортогональных диагональных элементов антенны 1–5 и 3–7. На первом этапе определяются временные фрагменты, соответствующие измеренным значениям дробной фазы (столбцы с $m_i = 0$). Далее, к этим значениям добавля-





Рис. 3.16. Фазовые характеристики антенны на частоте 22 кГц

ются с разными знаками временные фрагменты, равные периодам соответствующих частот. Затем по минимальной дисперсии данных в рядах определяются истинная временная задержка (среднее значение по расчетам на всех частотах) и полные фазы сигнала на каждой частоте (столбцы выделены цветом). Как следует из приведенных данных, погрешность измерения времени в проведенном эксперименте составляла около 2 мкс.

Таблица З.1

Частота, кГц	.9 ₁ , град		. 9 ₃ , град	.9 ₄ , град	.9 ₅ , град	.9 ₆ , град	.9 ₇ , град	<i>9</i> ₈ , град
20	-73	-45	-1	-32	-8	15	-144	7
20,5	164	123	-60	-115	-117	-177	155	-118
21	51	-17	-178	137	125	50	27	123
21,5	79	-22	167	99	120	9	5	114
22	120	23	-153	146	155	54	54	160
22,5	114	5	-128	145	137	55	44	163
23	-19	-145	85	11	-1	-74	-113	25
23,5	-151	80	-82	-155	-141	117	130	-129
24	-53	-180	18	-60	-43	-149	-132	-20
24,5	-47	138	-5	-93	-77	175	-164	-22

Измеренные фазы на элементах антенны

Таблица 3.2

Временные задержки сигнала между элементами антенны

Для пары элементов 1–5

Частота, кГц	$\theta_1 - \theta_5$,	$t_1 - t_5$	$t_1 - t_5$	$t_1 - t_5$	$\varphi_1 - \varphi_5$
,	трад	$m_i = 0$ MKC	$m_i = 1$ MKC	$m_i = 1$ MKC	ті =-1 Трад
20	66	9,1	-40,9	59,1	-294
20,5	79	10,7	-38,1	59,5	-281
21	74	9,8	-37,8	57,4	-286
21,5	41	5,3	-41,2	51,8	-319
22	35	4,5	-41,0	49,9	-325
22,5	23	2,9	-41,6	47,3	-337
23	18	2,1	-41,3	45,6	-342
23,5	10	1,2	-41,4	43,7	-350
24	10	1,2	-40,5	42,8	-350
24,5	-30	-3,4	-44,2	37,4	-390
Среднее значение, мкс			-40,8		
Погрешность, мкс		4,5	1,8	7,5	

Для пары элементов 7-3

Частота,	$\theta_7 - \theta_3$,	$t_7 - t_3$	$t_7 - t_3$	$t_7 - t_3$	$\varphi_3 - \varphi_7$
кГц	град	$m_i = -1$ MKC	$m_i = 1$ MKC	$m_i = 0$ MKC	<i>m</i> _i =0 град
20	143	-30,2	69,8	19,8	143
20,5	145	-29,1	68,5	19,7	145
21	156	-27,0	68,3	20,6	156
21,5	162	-25,6	67,4	20,9	162
22	153	-26,1	64,8	19,4	153
22,5	188	-21,3	67,6	23,2	188
23	197	-19,6	67,3	23,9	197
23,5	148	-25,0	60,1	17,5	148
24	150	-24,3	59,0	17,4	150
24,5	158	-22,9	58,8	17,9	158
Среднее значение, мкс				20,0	
Погрешность, мкс		3,3	4,3	2,2	

Для подтверждения работоспособности предложенного алгоритма выполнялась оценка угловой чувствительности антенны при обработке многочастотного сигнала. С этой целью определялись расчетные значения пеленгов при фиксированном положении источника сигналов. Приемная антенна поворачивалась в горизонтальной плоскости от начального положения на небольшой угол. Определялись полные фазы сигналов, решались уравнения пеленгов (3.59) на каждой частоте и полученные результаты сравнивались с заданными углами поворота. Угол поворота приемной антенны задавался равным 0,5 и 0,25°. Результаты расчета пеленгов по всем частотным дискретам от 20 до 24,5 кГц с шагом 0,5 кГц, и средние значения изменений пеленга по серии измерений для угла поворота 0,5° приведены на рис. 3.17, для угла поворота 0,25° – на рис. 3.18.



Рис. 3.17. Оценка угловой чувствительности антенны при $\Delta\beta = 0,5^{\circ}, 1-10$ – номера частотных дискрет, 11 – средние значения

В заключение отметим, что в разделе описана ГАНС УКБ [16], имеющая ряд особенностей. Во-первых, вместо гармонических одночастотных сигналов используются широкополосные многочастотные сигналы со значительно большей энергией, и вместо обычных прямых измерений времени используется процедура расчета полных фаз многочастотного сигнала с расчетом временных задержек на каждой частоте и усреднением времени по всем часто-



Рис. 3.18. Оценка угловой чувствительности антенны при $\Delta\beta = 0,25^{\circ}, 1-10$ – номера частотных дискрет, 11 – средние значения

там широкополосного сигнала. Во-вторых, определение пеленга основано на статистической обработке разницы текущего измеряемого времени на всех элементах антенны и ожидаемых временных задержек на этих элементах, определяемых при градуировке антенны. В итоге система имеет малогабаритную приемную антенну с небольшим числом элементов, при этом обеспечивает высокую точность измерений углового положения объекта навигации. Кроме того, поскольку увеличение точности системы достигнуто за счет роста суммарной излучаемой энергии, следует отметить, что излучатель навигационных сигналов целесообразнее устанавливать на борту обеспечивающего судна, а приемник – на объекте навигации.

3.4. ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫМИ КРУГОВЫМИ АНТЕННАМИ

3.4.1. Конфигурация антенны и оценка потенциальной точности

Проведем сравнительный анализ потенциальной точности ультракороткобазисных систем, оснащенных различными много-

элементными антеннами. Для этого воспользуемся соотношениями для расчета погрешностей пеленгования, приведенными для соответствующих антенн в этой главе. При выводе общих формул для расчета пеленга и случайной составляющей погрешности антенны представлялись в виде геометрических фигур правильной формы, составленных из дискретных точек-гидрофонов. Такая идеализация описания антенны позволяет сделать ряд важных оценок, определяющих структуру и параметры всей навигационной системы: проанализировать влияние конфигурации антенны, установить необходимос число каналов обработки, размещение элементов и необходимость устранения фазовой неоднозначности при работе с простыми сигналами. Общим итогом этого этапа анализа является оценка потенциальной точности системы, которая для выбранной конфигурации антенны будет определяться только отношением сигнал/шум в каналах приемника.

Антенны с полуволновым расстоянием между элементами

В табл. 3.3 приведены оценки случайной составляющей погрешности для ряда описанных выше антенн. Отношение сигнал/ шум q = 10dB выбрано равным для всех каналов. Расстояние между элементами выбрано из условия однозначного определения пеленга.

Таблица З.З

Вид антенны	Макси- мальный размер, λ	Число каналов обработки	Оценка погрешности, град
Двухэлементный приемник	1 / 2	2	5,7
Четыре элемента на круговой базе	0,707	4	3,9
Четыре элемента на круговой базе и пятый элемент в центре	1	5	2,6
Шесть элементов на круговой базе	1	6	2,4
Восемь элементов на круговой базе	1,31	8	1,6
Тридцать шесть элементов на круговой базе	5,74	36	0,16

Оценки случайной составляющей погрешности ряда антенн для q = 10dB

Разреженные антенны

Более перспективным представляется применение разреженных антенн, т. е. антенн, имеющих небольшое число элементов, но размещенных на базе большого волнового размера. Причем размер базы выбирается из условий обеспечения требуемой точности, а число элементов – из условия некоего оптимального объема возможных аппаратных средств. Однако если расстояние между элементами превышает $\lambda/2$, то в таких системах возникают проблемы неоднозначного определения фазы и, соответственно, пеленга. Действительно, если для двухэлементного приемника измерительная база велика, например $kb = 3 \lambda$, то $\varphi = 6\pi sin\beta$. Тогда, при изменении пеленга в диапазоне $\beta = 0...360$ диапазон изменения полной фазы составит $\varphi = (-6\pi, 6\pi)$, в то время как измерения фазы обеспечиваются только в диапазоне $\varphi = (-\pi, \pi)$. Это приводит к шести равнозначным оценкам пеленга. В табл. 3.4 приведены оценки потенциальной точности для ряда разреженных антенн при отношении сигнал/шум в каждом канале q = 10 dB. Максимальный размер базы (три длины волны) задан одинаковым для всех антенн.

Таблица 3.4

	Число	Число	Оценка
Вид антенны	ложных	каналов	погрешности,
	пеленгов	обработки	град
Двухэлементный приемник	5	2	0,96
Четыре элемента на круговой базе	4	4	0,72
Четыре элемента на круговой базе и пятый элемент в центре	2	5	0,43
Шесть элементов на круговой базе	2	6	0,40
Восемь элементов на круговой базе	2	8	0,34

0							
	потанния пі най	TOUROCTU D	т па т	ng ng i	ทควา	VI IIIIO/I/OC	OUTOIL
ОЦСПКИ	потспциальной	IU INUCIN A	ւյլոլ	лда	pas	латины	апіспі

Как следует из приведенных оценок, для разреженных антенн удовлетворительная точность может быть достигнута при небольшом числе каналов, если иметь механизм устранения неоднозначности при определении пеленга. Рассмотрим подробнее возможности круговых антенн (табл. 3.5).

Таблица 3.5

Вид приемной системы	1	2	3	4
Расстояние между элементами, λ	0,5	0,5	0,5	3,0
Максимальный размер, λ	0,5	0,5	5,7	6,9
Число каналов	2	4	36	7
Потенциальная точность, град	5,7	3,9	0,15	0,10
Фазовая неоднозначность	Нет	Нет	Нет	Есть

Оценки потенциальной точности для ряда круговых антенн q = 10dB

П р и м е ч а н и е . Виды приемной системы: 1 – двухэлементный приемник, 2 – четырехэлементный приемник, состоящий из двух ортогональных пар, 3 – плоская круговая база с большим числом равномерно размещенных по окружности приемников, 4 – плоская круговая база с малым числом равномерно размещенных по окружности приемников (разреженная антенна).

Рост объема избыточной информации, который присущ многоканальным системам, с одновременным увеличением общего размера измерительной базы ведет к повышению потенциальной точности системы. Так, для круговой антенны с числом элементов N = 36 оценка точности составляет $\sigma_{\beta} \approx 0,16^{\circ}$ и сравнима с точностью дальномерных навигационных систем. Этот экстенсивный метод увеличения точности для практических целей затруднен, прежде всего, из-за значительного роста объема аппаратуры.

Высокая точность может быть достигнута и при применении разреженных антенн, т. е. имеющих небольшое число элементов, размещенных на круговой базе большого волнового размера [5]. Чтобы устранить фазовую неоднозначность, требуется выбрать сектор углов, в котором определяется пеленг.

Очевидно, что при применении многоэлементных антенн для достижения высокой точности угловых измерений наиболее перспективны статистические методы обработки сигналов. Оценка искомого параметра при этом производится в виде некой оптимальной процедуры, при которой измеренное фазовое распределение на апертуре антенны аппроксимируется ее фазовой функцией. В реальных конструкциях аналитическое описание фазовой функции становится неточным и его необходимо уточнять экспериментально при градуировке антенны. В связи с этим можно заключить, что для получения высокого углового разрешения необходима прецизионная градуировка антенны [86].

3.4.2. Источники систематической составляющей погрешности угловых измерений

Как уже отмечалось, точность угловых измерений в ГАНС УКБ определяется в основном характеристиками антенны. С одной стороны, антенна выполняет пространственную обработку, связывая структуру принимаемого навигационного сигнала на апертуре с угловым положением источника. Очевидно, конфигурация антенны определяет погрешность вычисления пеленга при обработке всего объема информации. Эта погрешность может быть минимизирована при выборе оптимальной конфигурации антенн – числе ее элементов, их пространственном размещении, межэлементном расстоянии. Конфигурация должна также выбираться так, чтобы обеспечить однозначное и точное пеленгование объекта при ожидаемом уровне точности измерения фазы (временной задержки) в отдельном канале. Кроме того, при работе навигационной системы с тональными сигналами проблема точного определения пеленга сопровождается проблемой разрешения неоднозначности фазовых измерений при большом волновом размере измерительной базы и ограниченном числе элементов.

Количественные оценки погрешностей, обусловленные действием шумовых помех, могут быть получены из анализа приведенных ранее математических моделей. Дисперсию пеленга, заданную выражением (3.38) или аналогичным аналитическим соотношением, получают для сложных многоканальных систем в виде зависимости от размеров базы и числа каналов. Эта оценка по сути определяет случайную составляющую ошибки и служит для определения потенциальной точности навигационной системы при заданном отношении сигнал/шум.

С другой стороны, антенна является основным звеном в аппаратуре измерения параметров принимаемого акустического сигнала. Каждый гидрофон приемной антенны выполняет акустоэлектрическое преобразование сигнала. Погрешность измерения фазы акустического сигнала в каждом электрическом приемном канале зависит от степени идентичности фазочастотных характеристик гидрофонов, которая достигается тщательной градуировкой электрических каналов, но определяется, как показывает практика, дифракционными искажениями сигнала на конструкции конкретной антенны. Последняя погрешность, по существу, является технологической, но может значительно превышать погрешности, обусловленные действием шумовой помехи в канале. При этом предполагается, что за счет выбора частотного диапазона и жесткого предварительного отбора антенна укомплектована идентичными гидрофонами.

Суммарная погрешность системы также зависит от ряда других факторов, которые трудно учесть в рамках расчетных моделей.

Во-первых, фронт падающей на антенну акустической волны должен быть плоским и флуктуации фазы на апертуре антенны, обусловленные случайным рассеянием фронта в неоднородной среде, должны быть значительно меньше ожидаемых погрешностей.

Во-вторых, конструкция антенны, размер приемных элементов и их акустический импеданс не должны вносить искажений в структуру принимаемой акустической волны.

В-третьих, навигационные угловые параметры, измеренные относительно осей приемной антенны, далее следует привести к истинным значениям, т. е. определить угол места относительно плоскости горизонта, а азимут – относительно севера. Для этого в структуру навигационного оборудования вводятся датчики угловой ориентации антенны (курс, крен, дифферент). Точность этих датчиков также существенно влияет на суммарную точность решения навигационной задачи.

Первое условие для ультракороткобазисных антенн выполняется, как правило, почти всегда. Дифракционные же искажения практически неизбежны [84]. Они должны быть определены при градуировке антенны и учтены в виде табулированных систематических погрешностей. Эта часть разработки навигационной системы, как показывает опыт, является наименее прогнозируемой и требует значительных усилий, но определяет итоговую суммарную погрешность системы.

Фазовая функция несовершенной многоэлементной приемной антенны

При обработке навигационных данных, целью которой является определение углового положения источника детерминированных сигналов, опорный сигнал разделяется на временную и пространственную составляющие (3.28). Пространственная характеристика антенны была названа фазовой функцией антенны. Компоненты этой функции – фазы плоской волны на соответствующих элементах антенны относительно ее фазового центра. Фазовая функция устанавливает однозначную связь фазового распределения на апертуре антенны в зависимости от нормали к волновому фронту плоской волны. В математических моделях компоненты фазовой функции для антенны достаточно сложной конфигурации описываются точными аналитическими соотношениями. Однако такое аналитическое описание голится только для оценки потенциальных возможностей системы и оценки случайной составляющей погрешности. Принципиальной является оценка влияния реальной конструкции антенны на характер ошибок и учет дополнительных источников погрешностей, оценить которые в рамках принятых молелей невозможно.

Применение аналитических соотношений для формирования значений фазовой функции реальной антенны приводит к появлению систематической погрешности. При разработке навигационной системы с ультракороткой базой определение фазовой функции становится одним из важнейших этапов, суть которого состоит в необходимости определения всех возможных искажений фазовой структуры плоской звуковой волны, которые могут возникнуть на реальной конструкции антенны.

Поясним это, рассматривая простейшую двухэлементную антенну. Если обратиться к общему уравнению пеленга (3.36), то для двухэлементного приемника это уравнение после преобразований приобретет вид

$$\varphi_{12} - \theta_{12}(\beta) = 0, \qquad (3.62)$$

где φ_{12} – разность фаз, измеренная в каналах реальной приемной антенны, $\theta_{12}(\beta) = \theta_1(\beta) - \theta_2(\beta)$, $\theta_{12}(\beta) = \theta_1(\beta) - \theta_2(\beta)$, а $\theta_1(\beta)$,

 $\theta_2(\beta)$ – компоненты фазовой функции антенны, устанавливающие ожидаемую фазовую информацию в зависимости от искомого пеленга.

Если предположить, что принимаемая плоская волна не деформируется на конструкции антенны, то связь искомого пеленга и фазового распределения однозначна, а компоненты фазовой функции выражаются известными аналитическими соотношениями: $\theta_1(\beta) = kbsin\beta$, $\theta_2(\beta) = -kbsin\beta$, $\theta_{12}(\beta) = 2kbsin\beta$. Соответственно, пеленг определяется из уравнения (3.62), которое принимает привычный вид:

$$\varphi_{12}(\beta) = 2kbsin\beta. \qquad (3.63)$$

В этом случае погрешность определения пеленга содержит только случайную составляющую $\sigma_{\beta} = \frac{\sigma_{\varphi}}{2kbcos\beta}$, минимальное значение которой устанавливается погрешностью измерения фазы σ_{φ} размером измерительной базы и выражается через отношение сигнал/шум: $\sigma_{\beta} = \frac{1}{2qkb}$.

В реальных конструкциях ситуация значительно хуже. Обратимся к двухэлементному приемнику. Для определения компонент фазовой функции антенны необходимо точно знать частоту f, базовое расстояние b и скорость звука C в точке размещения антенны. Если эти величины определены с погрешностями σ_f , σ_b , σ_c соответственно, то компоненты фазовой функции для выбранного значения пеленга также определяются с дисперсией:

$$\sigma_{\varphi}^{2} = \sin^{2}\beta \left\{ \sigma_{f}^{2} \frac{4\pi^{2}b^{2}}{C^{2}} + \sigma_{b}^{2} \frac{\omega^{2}}{C^{2}} + \sigma_{C}^{2} \frac{\omega^{2}b^{2}}{C^{4}} \right\}.$$
 (3.64)

Рассмотрим вклад каждой составляющей. Для определенности положим, что заданы ошибки определения частоты $\sigma_f = 10$ Гц, скорости звука $\sigma_c = 10$ м/с, установки гидрофонов на измерительной базе $\sigma_b = 10^{-3}$ м. Заданы также C = 1500 м/с, f = 12500 Гц, b = 0,1 м. Тогда получим $\sigma_{\varphi}(f) = \frac{2\pi b}{C} \sigma_f = 0,24^{\circ}$, $\sigma_{\varphi}(b) = \frac{2\pi f}{C} \sigma_b = 3^{\circ}$, $\sigma_{\varphi}(C) = \frac{2\pi f b}{C^2} \sigma_f = 0,20^{\circ}$. Очевидно, самый

значимый вклад вносит погрешность установки измерительной базы, но при разработке прецизионных систем также необходимы точное знание скорости звука и учет смещения частоты при движении объекта навигации.

В этом примере не оценивались другие источники погрешности, влияние которых может быть велико. Это дифракция на приемных элементах, размеры которых не могут считаться бесконечно малыми, и влияние конструктивных элементов антенны. В самой антенне на величину и угловую зависимость погрешности влияют обтекатель, точность установки, размер и акустический импеданс приемных элементов, паразитные акустические связи по элементам конструкции.

Таким образом, при обработке данных для решения уравнения пеленга и оценки его погрешности необходимо определить фазовую функцию конкретной антенны, а точность задания фазовой функции антенны является главным условием точного определения пеленга. Для определения фазовой функции возможны два варианта. Первый – изготовить антенну так, чтобы ее фазовые характеристики можно было описать строгими аналитическими соотношениями, связывающими задаваемый пеленг и распределение фаз в каналах антенны. Второй – выполнить предварительную градуировку антенны и получить фазовые характеристики антенны экспериментально. Фактическим результатом градуировки становится определение систематической составляющей погрешности всей навигационной системы. Эта погрешность определяется как разница между задаваемым пеленгом и расчетным, полученным при обработке данных системой с использованием фазовой функции, определенной при градуировке антенны. Причем при большом числе элементов антенны фазовую функцию антенны целесообразно представлять как аналитическую функцию, аппроксимирующую фазовые данные, получаемые при градуировке антенны. Массив погрешностей, получаемых в этом случае, оказывается достаточно маломерным и достаточно достоверным, поскольку наряду с погрешностями, вносимыми антенной, при табуляции систематической погрешности уже будут учтены все источники ошибок. К последним относятся погрешность аналого-цифрового
преобразования сигналов, погрешности преобразования осей координат при наличии крена и дифферента осей антенны, фиксируемого соответствующими датчиками, ограниченности времени обращения к сигналу и т. д. Измерения выполняются при высоком (*q* > 20 дБ) отношении сигнал/шум, чтобы можно было пренебречь случайной составляющей погрешности.

3.4.3. Оценка систематической составляющей погрешности определения пеленга в контролируемых условиях гидроакустического бассейна

В качестве примера оценки влияния реальной конструкции антенны на характер ошибок приведем результаты исследования характеристик разреженной антенны с осесимметричным размещением семи отдельных сферических гидрофонов на круговой базе (рис. 3.19) [86].

Антенна была предназначена для навигационной системы с рабочей частотой 12 кГц. Волновой диаметр измерительной базы составлял около двух длин волн. В качестве приемников для сохранения высокой чувствительности применялись сферические



Рис. 3.19. Внешний вид приемной антенны ГАНС УКБ

180

гидрофоны с волновым диаметром $\lambda/6$. Измерения проводились с использованием радиоимпульсных сигналов длительностью 10 мс при размещении источника в плоскости антенны. В лабораторных условиях на частоте 12 кГц были определены фазовые характеристики антенны между всеми возможными парами гидрофонов.

Общее число таких измерительных баз составляет 21. Их можно разделить в соответствии с размером на семь малых, семь средних и семь больших. На рис. 3.20 приведены экспериментальные



Рис. 3.20. Фазовые характеристики для различных пар элементов антенны

фазовые характеристики антенны – штриховые линии с точками, разделенные на семейства в соответствии с размером диагональной базы между всеми возможными парами гидрофонов в антенне.

Далее, была выполнена аппроксимация (сплошные линии на рис. 3.20, значения в градусах) экспериментальных данных для больших, средних и малых баз соответственно аналитическими зависимостями вида

$$\theta_{b}(\beta) = A_{0} \sin \frac{4\pi}{7} \sin \left(\frac{4\pi}{7} - \beta\right), \\ \theta_{l}(\beta) = A_{0} \sin \frac{2\pi}{7} \sin \left(\frac{2\pi}{7} - \beta\right), \\ \theta_{s}(\beta) = A_{0} \sin \frac{\pi}{7} \sin \left(\frac{\pi}{7} - \beta\right).$$
(3.65)

Наибольшие дифракционные искажения измеренных фазовых характеристик (штриховые линии на рис. 3.20, а) наблюдаются, если объект пеленгования расположен на линии соответствующей измерительной базы, причем абсолютное их значение для измерительных баз разного размера оказывается примерно одинаковым (рис. 3.21).



Рис. 3.21. Оценки искажений фазовых характеристик семиэлементной антенны

Как видно из рисунка, увеличение межэлементного расстояния (разрежение) обеспечило формирование более широких угловых секторов приема сигналов, в которых дифракционные искажения были минимальными. Кроме того, для больших измерительных баз уменьшается отношение невязки измеренных и аппроксимирующих значений к размеру базы, что ведет к уменьшению погрешности угловых измерений.

Определенные здесь компоненты фазовой функции антенны применяются далее для расчета пеленга $\hat{\beta}$ и оценки системати-

ческой погрешности $\Delta\beta = \beta - \hat{\beta}$ («пеленгационная характеристика»), где $\hat{\beta}$ – задаваемый пеленг, отсчитываемый на лимбе прецизионной поворотной платформы. При вычислении пеленга $\hat{\beta}$ используется точное уравнение пеленга, заданное выражением (3.44), и в соответствии с этим уравнением формируется 21 слагаемое по числу всех возможных измерительных баз. Характерной особенностью уравнения пеленга является использование для различных измерительных баз весовых геометрических коэффициентов, отражающих крутизну фазовой характеристики соответствующей базы в окрестности ожидаемого значения пеленга. Фактически это означает, что при пеленговании максимальную значимость приобретают измерительные базы, ориентированные ортогонально направлению прихода сигнала. Это ведет к существенному ослаблению влияния дифракционных искажений и позволяет рассчитывать на уменьшение неучтенной систематической погрешности при заданном аналитическом описании фазовой функции.

Градуировка «пеленгационных характеристик» выполнялась для всех значений углов горизонтальной плоскости и ряда фиксированных вертикальных углов, максимальное значение которых определялось размерами измерительного бассейна. Для различных значений вертикального угла γ размер измерительной базы *kb* становится равным *kbcos* γ . В результате расчетов получим оценку пеленга $\hat{\beta}$ и, соответственно, оценку систематической погрешности $\Delta\beta = \beta - \hat{\beta}$. Ее итоговое значение складывается из погрешностей технологического оборудования при проведении измерений и собственно некомпенсированных погрешностей антенны.

Для полученных оценок пеленга, определенных во всем диапазоне горизонтальных углов 0–360°, можно также вычислить среднеквадратичное отклонение значений измеряемых фаз от соответствующих значений компонент фазовой функции, принимаемых при расчете пеленга. Очевидно, эта характеристика является мерой погрешности полученного решения и задает требования по погрешности фазовых измерений в каналах приемника. Характер изменения пеленгационных характеристик при различных значениях угла места и соответствующие угловые зависимости среднеквадратичного отклонения измеренных фаз от фазового распределения, использованного для расчета пеленга, приведены на рис. 3.22. При фиксированном положении источника сигнала и приемной антенны можно получить потенциальные оценки точности систем в зависимости от отношения сигнал/шум.



Рис. 3.22. Пеленгационные характеристики антенны (слева) и соответствующая среднеквадратичная погрешность определения фазы в каждом канале (справа) для различных вертикальных углов прихода семиэлементной антенной

В табл. 3.6 приведены такие оценки для исследуемой антенны. Там же измеренные значения сравниваются с расчетными оценками, полученными на основании разработанной математической модели (нижняя строчка таблицы).

Таблица 3.6

Отношение сигнал/шум, дБ	40	30	20	10	0	-10
\overline{eta} , град	0	0	0,1	0,1	0,3	0,5
$\sigma_{_0}$, град	0,1	0,1	0,1	0,2	1,2	2,8
$ar{\sigma}$, град	0,0	0,0	0,1	0,2	0,6	2,0

Потенциальная точность пеленгования

Одной из важных характеристик навигационной системы с ультракороткой базой является угловое разрешение. Эта характе-

ристика при пеленговании одиночного источника понимается как способность системы при обработке информации фиксировать минимальное изменение углового положения источника. Экспериментальные оценки углового разрешения для семиэлементной антенны при различном уровне входных сигналов приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

a T	β	9 = 0,5	$\beta = 1,0$		
<i>Ч</i> ,дв	Δeta , град	$\sigma_{\scriptscriptstyleeta}$, град	Δeta , град	$\sigma_{\scriptscriptstyleeta}$, град	
0	0,17		-0,22		
10	0,11	0,18	0,10	0,38	
20	-0,06	0,07	0,05	0,11	

Экспериментальные оценки углового разрешения для семиэлементной антенны

В таблицах обозначены: β – среднее значение измеряемого пеленга, σ_0 – среднеквадратичное отклонение пеленга, $\overline{\sigma}$ – теоретическая оценка, $\Delta\beta$ – отклонение среднего измеренного от заданного значения пеленга (задавались изменения пеленга 0.5 и 1.0 град).

Подводя итоги раздела, отметим, что учет систематической составляющей погрешности за счет градуировки антенны и минимизация случайной составляющей, благодаря выбору конфигурации антенны и примененной модели обработки данных, обеспечили высокую точность разработанной навигационной системы с УКБ. Для дальномерных измерений относительная погрешность составила десятые доли процента, а для угломерных – десятые доли градуса.

Результаты проведенных исследований показали, что при применении круговых осесимметричных антенн с небольшим числом элементов, фазовые характеристики которых определены в контролируемых условиях, и использовании статистических методов обработки сигналов возможна реализация ГАНС УКБ с высокой точностью угловых измерений.

Глава 4

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И АТТЕСТАЦИИ ГАНС

Рассмотренные в главах 2 и 3 математические модели работы и обработки данных, предложения по технической реализации систем и отдельных устройств гидроакустической навигации стали основой создания реальных образцов аппаратуры. Ниже приведены сведения о таких разработках ИПМТ ДВО РАН, анализируются проблемы, представлены практические результаты, связанные с оценкой основных характеристик созданных навигационных систем и их проверкой в условиях мелкого и глубокого моря.

4.1. ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ИПМТ ДВО РАН ДЛЯ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ

4.1.1. История разработки

ИПМТ ДВО РАН, занимаясь в течение почти полувека созданием подводных роботов, значительное внимание уделял разработке средств их навигационного обеспечения (фотографии наиболее значимых проектов представлены на рис. 4.1). Первая гидроакустическая навигационная система, разработанная в 1973–1975 гг. для навигации АНПА «Скат», была дальномерной с длинной базой и предназначалась, как и сам аппарат, для работы в мелком море на шельфовых глубинах. Основу системы составляли радиогидроакустические буи с заякоренными акустическими приемниками [20, 21, 107].

В дальнейшем при создании глубоководных аппаратов был разработан ряд модификаций глубоководной дальномерной ГАНС. Ее основу составили донные маяки-ответчики, синхронный передатчик на объекте навигации, приемопередатчик и судовой блок обработки навигационной информации, устанавливаемые на обеспечивающем судне. Были разработаны также соответствующие математические модели решения задачи и отработана технология Опыт разработки и аттестации ГАНС





MT-88



Тифлонус

OKPO-6000







Клавесин-М



САНПА

TSL

Рис. 4.1. Основные проекты автономных подводных роботов ИПМТ ДВО РАН. (Окончание рис. см. на стр. 188)



Клавесин



Галтель



МТ-2010 (Пилигрим)



MMT-300

Рис. 4.1. Основные проекты автономных подводных роботов ИПМТ ДВО РАН (Начало рис. см. на стр. 187)

практического применения. Эта система имела технические характеристики [3, 7, 22, 108], близкие к техническим характеристикам известных зарубежных аналогов [23, 109].

Следующие шаги по созданию различных конфигураций ГАНС, включая дальномерные и угломерные системы, доплеровские лаги, системы телеуправления и телеметрии, были тесно связаны с особенностями применения и функционального назначения разрабатываемых АНПА.

История появления гидроакустических навигационных средств для поддержки работы подводных роботов, созданных ИПМТ ДВО РАН, показана в табл. 4.1. В таблице также приведены хронология разработки аппаратов различных классов и степень их навигационной оснащенности гидроакустическими средствами [2, 10–12, 110].

Таблица 4.1

История появления гидроакустических навигационных средств для поддержки работы подводных роботов ИПМТ ДВО РАН

Наименование	Год	Гидроакустическое навигационное
Скат-Гео	1975	Эхолот, дальномерная ГАНС с заякоренными радиогидробуями
Л-1, Л-2	1980	Синхронная ГАНС ДБ с сетью донных мая- ков-ответчиков, эхолокационная система (ЭЛС)
МТ-88, МТ-Гео	1988–1990	Синхронная ГАНС ДБ с сетью донных мая- ков-ответчиков, ЭЛС, система телеуправления и телеметрии (ТУ и ТМ)
TSL	1994–2000	ЭЛС, синхронная ГАНС-УКБ с размещением пеленгатора и измерителя дальности на борту ап- парата и передачей навигационной информации по оптокабелю
CR-01, CR-02, OKPO-600	1995–2001	Синхронная ГАНС ДБ с сетью донных мая- ков-ответчиков, ЭЛС, ТУ и ТМ
САНПА	1998	Амплитудный портативный пеленгатор на бор- ту судна, несинхронный пингер на борту аппара- та
Клавесин-М	1998–2004	Синхронная ГАНС ДБ с сетью донных мая- ков-ответчиков, ЭЛС, ТУ и ТМ, ГАНС УКБ, ги- дроакустическая система связи (ГАСС), допле- ровский лаг
MMT-2000	2005	Синхронная ГАНС ДБ без маяков-ответчиков, ЭЛС, ТУ и ТМ, ГАНС УКБ с размещением пе- ленгатора и измерителя дальности на борту ап- парата и передачей информации по гидроакусти- ческому каналу, доплеровский лаг
Клавесин	2007	Синхронная ГАНС ДБ с маяками-ответчиками, ЭЛС, ТУ и ТМ, ГАНС УКБ с размещением пе- ленгатора и измерителя дальности на борту судо- вой антенны, доплеровский лаг
МТ-2010 Пилигрим	2010	Синхронная ГАНС ДБ с маяками-ответчиками, ЭЛС, ТУ и ТМ, ГАНС УКБ с размещением пелен- гатора и измерителя дальности на борту аппарата и передачей информации по гидроакустическому каналу, доплеровский лаг

Окончание табл. 4.1

Наименование проекта	Год создания	Гидроакустическое навигационное оборудование
Галтель	2012	Синхронная ГАНС ДБ с маяками-ответчиками и без маяков, ЭЛС, ТУ и ТМ, ГАНС УКБ с раз- мещением пеленгатора и измерителя дальности на борту аппарата и передачей информации по гидроакустическому каналу, доплеровский лаг
MMT-300	2018	ЭЛС, ТУ и ТМ, ГАНС УКБ с размещением пе- ленгатора и измерителя дальности на обеспечи- вающем судне и передачей информации по ги- дроакустическому каналу, доплеровский лаг

4.1.2. Гидроакустический навигационный комплекс

Опыт работы ИПМТ ДВО РАН при проведении реальных операций также показал, что средства связи и навигации целесообразно объединить в рамках единого комплекта оборудования. Такой комплекс обеспечивает навигацию, телеуправление, телеметрию и контроль хода поисковой операции путем анализа передаваемых с борта АНПА текущих результатов работы. В целом навигационный комплекс АНПА включает бортовые, гидроакустические и спутниковые средства навигации. Комплекс конструктивно и функционально объединяет разнообразные элементы судового оборудования, включая судовые антенны и другие средства обеспечения навигации АНПА, в зависимости от вида решаемых задач и оперативной обстановки.

Гидроакустическая аппаратура навигационного комплекса (рис. 4.2). содержит комплект маяков-ответчиков, комплект аппаратуры АНПА и комплект судовой аппаратуры. В структуре судового оборудования разделяются собственно аппаратура, установленная непосредственно на борту судна, и выпускаемый с борта судна на кабель-тросе буксируемый гидроакустический антенный модуль (БАМ). Такой комплекс может работать в режимах:

 – ГАНС ДБ, совмещенной с низкоскоростной системой телеуправления и телеметрии. Рабочие частоты – 11...14 кГц;



Рис. 4.2. Общая структура гидроакустических средств навигации и управления в составе комплекса многоцелевого АНПА

– ГАНС УКБ, комплексированной с ГАНС ДБ. Рабочая частота
– 11,75 кГц;

– ГАСС для передачи информации в глубоком море по вертикальному каналу АНПА–обеспечивающее судно с дальностью 6–10 км, скоростью передачи данных 4000 бит/с и вероятностью ошибки 10⁻².

Кроме названных средств навигации и связи в составе комплекса используется акустический доплеровский лаг, входящий в состав БАНС для измерения компонент абсолютной скорости аппарата, работающий при отстоянии от дна в диапазоне 0,5...60 м и измеряющий вектор скорости в диапазоне ± 2 м/с и погрешностью не более 0,02 м/с [111, 112].

Гидроакустическая навигационная система в конфигурации ГАНС–ДБ/УКБ обеспечивает определение координат АНПА и судна-носителя в системе, связанной с донными маяками-ответчиками, и в географической системе координат. Аппаратурой ГАНС также осуществляется двухсторонний информационный обмен между АНПА и обеспечивающим судном в режимах телеуправления и телеметрии.

Основные средства гидроакустического комплекса навигации показаны на рис. 4.3.



Стационарная антенна управления



Судовая буксируемая навигационная антенна



Комплект донного маяка-ответчика



Аппаратура судового управления



Компьютер навигатора

Для обеспечения синхронного режима ГАНС и навигационной привязки данных борт АНПА и судовой блок управления и контроля оснащаются идентичными высокостабильными системами хранения единого времени, которые синхронизируются перед началом работ. В режиме ГАНС ДБ бортовой передатчик АНПА и передатчик БАМ поочередно излучают акустические навигационные импульсы с заданным периодом следования, заданной частоты и длительности. Маяки-ответчики (МО) ретранслируют принятые навигационные сигналы, которые принимаются аппаратом и судовой антенной. Каждый маяк излучает сигнал на собственной частоте. На борту судна определяются временные задержки навигационного сигнала, прошедшего по трассам АНПА-БАМ и АНПА-МО-БАМ. Далее, с использованием методов лучевой акустики рассчитывается скорость распространения акустических сигналов и определяются дальномерные данные, необходимые для решения навигационной задачи. Аналогичная обработка выполняется в БАНС



Рис. 4.3. Гидроакустические средства навигации подводных роботов

Судовая многофункциональная антенна навигационно-информационной поддержки В ГАНС УКБ положение объекта навигации определяется путем определения фазовых параметров сигнала, принимаемого дискретной малогабаритной акустической антенной, входящей в состав БАМ. Измеряемыми величинами являются дальность до АНПА, пеленг в горизонтальной плоскости и угол места в вертикальной плоскости.

Система связи для обмена информацией между АНПА и обеспечивающим судном отличается от обычных гидроакустических средств связи различным характером передаваемой информации. Это обстоятельство делает возможным варьирование скорости передачи, объема и частоты обновления информации в зависимости от текущего состояния канала связи и, соответственно, достоверности принимаемого сообщения. Так, для контроля работы обзорно-поисковых систем АНПА скорость передачи должна быть максимальной при умеренных требованиях к вероятности ошибки (10⁻¹-10⁻²). В командном канале (навигация, телеметрия, телеуправление) скорость может быть снижена в десятки раз с ужесточением требований по допустимой вероятности ошибки до 10-3-10-4. В разработанной ГАНС ДБ навигационная система конструктивно интегрирована с низкоскоростной (командной) системой телеметрии и управления, причем разделение систем обеспечивается применением комбинированных сигналов. За счет частотного разделения и кодирования команд системы могут работать с различным числом объектов, а количество жестко заданных команд составляет несколько десятков [10].

В зависимости от дальности действия и удаленности объекта навигации от обеспечивающего судна могут быть сформированы три состава навигационного оснащения.

1. Комплект, который включает ГАНС (ДБ или УКБ) с дальностью до 10–15 км, систему телеуправления и телеметрии, доплеровский лаг, односторонний канал связи при выполнении обзорно-поисковых работ в глубоком море и на шельфе.

Эта конфигурация навигационного гидроакустического комплекса применяется во всех разработках ИПМТ ДВО РАН последнего времени.

2. Системы навигации для работы подводного аппарата с выходом за пределы действия обычной ГАНС.

Применение дальномерных систем для аппаратов с дальностью действия сотни километров и автономностью десятки суток при выполнении длинных протяженных миссий невозможно, применение угломерных с движением судна в режиме сопровождения не всегда рационально. При таком сценарии работ навигация обеспечивается тем, что в дополнение к гидроакустическим средствам на первый план выходит применение инерциальной навигационной системы на борту аппарата для выработки курса совместно с доплеровским лагом для измерения абсолютной скорости. Коррекция счисления производится по данным спутниковых систем с обсервациями на поверхности или на глубине по данным сети опорных маяков, размещенных, например, вдоль трассы движения. Кроме того, подводные аппараты дальнего действия оснащаются средствами приема низкочастотных акустических сигналов с дальностью распространения не меньше дальности действия аппарата в качестве средства дальнего приведения к борту носителя.

3. Системы навигации, связи и управления при выполнении процедуры докования.

Проблема докования требует от навигационного обеспечения значительно более высокой точности, обеспечения супервизорного режима управления средствами двухсторонней связи, идентичности отображения навигационной обстановки на бортах аппарата и судна, высокой оперативности. Для решения этих задач средства навигации и связи должны быть высокочастотными, а их рабочая дальность обычно не превышает сотен метров. Система может быть реализована с использованием короткой измерительной базы (или совместно с УКБ) и объединять в одном комплекте оборудования системы навигации и связи [113–115].

Вся информация о работе систем навигации и управления через БАМ поступает на судовую аппаратуру обработки и отображения данных. На рис. 4.4 приведен вид планшета навигатора в посту управления. На планшет выведена вся необходимая информация о работе комплекса, его систем и датчиков. Навигатор также имеет возможность получать информацию о качественном состоянии каналов связи и условиях приема сигналов.

Глава 4



Рис. 4.4. Планшет навигатора

4.1.3. Основные характеристики систем гидроакустического навигационного комплекса

ГАНС ДБ

Гидроакустическая навигационная система с длинной базой уже много лет входит в состав основного обеспечивающего оборудования подводных аппаратов, постоянно модернизируется и к настоящему времени имеет следующие технические характеристики (табл. 4.2):

Основным режимом работы ГАНС ДБ является режим определения координат. Кроме того, можно передавать команды телеуправления АНПА, принимать и декодировать данные телеметрии, переданные с борта АНПА, и управлять работой маяков-ответчиков. Для передачи команд управления судовая антенна излучает импульсы специальной частоты. Период следования является информационным признаком команды. Эффективная скорость пере-

Таблица 4.2

Характеристики ГАНС ДБ

Дальность действия системы при благоприятных условиях распространения акустических сигналов	До 15 км
Частота опроса МО	12,5 кГц,
Количество МО	3
Рабочие глубины	До 6 км
Тип МО – многократного использования с управлением режимом расцепления по гидроакустическому каналу	
Количество команд управления МО	4
Количество команд телеуправления	10
Число передаваемых параметров	12
Время передачи команды	10 c
Погрешность определения местоположения, в процентах от дальности	0,1–0,5

дачи информации составляет единицы бит в секунду. Для передачи телеметрической информации с борта АНПА используются импульсы частот запроса, задержанные относительно опорного (навигационного) импульса на время, пропорциональное значению передаваемого параме-

тра. В табл. 4.3 приведена сводка наиболее часто используемых команд системы управления.

ГАНС УКБ

ГАНС УКБ обеспечивает определение дальности и углового положения АНПА. Эти данные обрабатываются программой «Планшет навигатора» для Таблица 4.3

Команды телеуправления

Номер команды	
1	Поворот вправо на 45 град
2	Поворот влево на 45 град
3	Всплытие на 0,5м
4	Погружение на 0,5м
5	Вклвыкл. фотосистемы
6	Вклвыкл. ГАСС
7	Стоп. Зависание
8	Увеличение скорости на 0,1
9	Сброс шага программы
10	Сброс балласта. Всплытие

определения местоположения АНПА и построения траектории его движения. Основные характеристики системы приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Дальность действия системы при благоприятных условиях	до10 км
распространения акустических сигналов	
Рабочая частота	11,75 кГц
Диапазон измеряемых пеленгов, град	0–360
Диапазон измеряемых углов места, град	0–90
Погрешность угловых измерений, град менее	0.2
Погрешность определения местоположения, в процентах от лальности, не более	1
Ammineetin, 112 conte	

Характеристики ГАНС УКБ

Структурная схема ГАНС УКБ, разработанной и эксплуатируемой в ИПМТ ДВО РАН, дана на рис. 4.5. Конструктивно система состоит из судового комплекса аппаратуры, включающего подводный и бортовой блоки, и блока излучения навигационных сигналов, устанавливаемого на борту АНПА. Блок АНПА является общим для ГАНС-ДБ и ГАНС-УКБ и предназначен для излучения тональных радиоимпульсов с частотой заполнения 12,5 кГц, длительностью 20 мс и периодом следования 30 с. Уровень излучения 192 дБ относительно 1 микропаскаля. Судовой блок обработки связан кабель-тросом с подводным блоком.

В подводном блоке размещены приемная антенна в виде семиэлементной разреженной круговой базы, датчики угловой ориентации антенны, семиканальный линейный аналоговый приемный тракт, обнаружитель, АЦП, устройства управления и сопряжения с кабелем. Обнаружитель обеспечивает запуск АЦП и блоков обработки при обнаружении навигационного сигнала, излучаемого объектом навигации. По времени обнаружения определяется дальность. Обработка данных выполняется в такой последовательности. Навигационный сигнал, излучаемый АНПА, преобразуется гидрофонами антенны ГАНС УКБ в семь электрических сигналов, каждый из которых имеет свою амплитуду и фазу, значения кото-



Рис. 4.5. Структурная схема ГАНС УКБ

рых зависят от искомых угловых навигационных параметров – пеленга и угла места. В момент приема навигационного сигнала фиксируются также показания датчиков угловой ориентации антенны. Эти датчики установлены на одной платформе с антенной.

Далее, в приемнике выполняются фильтрация, усиление и аналого-цифровое преобразование сигналов. Эти операции выполняются в подводном блоке. Затем цифровые отсчеты сигналов по кабель-тросу поступают в судовой блок и специализированный компьютер. В компьютер также вводятся данные антенны спутниковой навигационной системы. Далее, в соответствии с (см. п. 3.2.3) программно реализованы процедуры фазирования, определения дальности, угла места, решения точного уравнения пеленга, определение погрешности текущего измерения пеленга, накопление и фильтрация дальномерных и угловых данных.

На рис. 4.5 обозначены: А – излучающая антенна АНПА, УМ – усилитель мощности, ФС – формирователь сигналов, РС – профессиональный компьютер, GPS – приемник спутниковой навигационной системы, УС – устройство сопряжения, ИП – источник питания, ПУ – предварительный усилитель, А – приемная антенна, МУ – масштабный усилитель, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, УО – усилитель-ограничитель, Д – детектор.

Отличительной особенностью этой ГАНС УКБ является применение в составе многоэлементных круговых антенн [35, 100]. Общий размер антенны выбирался из условия обеспечения необходимой точности, а число каналов (равное семи) – из требований по ограничению энергетических и массогабаритных ресурсов. При реализации этих требований волновой размер измерительной базы между гидрофонами превышает половину длины волны, что приводит к неоднозначности пеленгования. Эта проблема решается обработкой в два этапа. На первом этапе грубой оценки определяется угловой сектор, в котором расположен объект навигации. Антенна при этом работает как амплитудный пеленгатор. На втором этапе решается точное уравнение пеленга, начальным приближением которого является значение угла компенсации при амплитудном пеленговании (осевого угла выбранного сектора наблюдения). При расчете пеленга используется вся информация, принятая в каждом канале системы: амплитуда, фаза, дисперсия шума (см. п. 3.2.3). Потенциальные точностные характеристики и, соответственно, угловое разрешение разработанной системы составляют менее 0,2 град при диаметре антенны, равном двум длинам волны. Эти оценки подтверждены экспериментально в различных условиях (см. п. 3.4 и 4.3).

Об опыте эксплуатации ГАНС

Описанный комплекс ГАНС был отлажен на полигоне и успешно работал в условиях мелкого и глубокого моря при проведении различных морских операций [2, 11, 12]. Примеры работы созданных навигационных средств при комплексной обработке данных бортовой, спутниковой и гидроакустической навигационных систем показаны на рис. 4.6–4.9.

На рис. 4.6 представлена реальная траектория движения АНПА в условиях мелкого моря (при глубине менее 20 м) в ходе выполнения миссии по сплошному гидролокационному обследованию акватории. Траектория в реальном времени отображается на борту сопровождающего судна. Расстояние между галсами – 40 м. Коррекция координат, счисленных бортовой системой, обеспечивалась за счет дальномерных данных от трех донных маяков-ответчиков.



На рис. 4.7 приведена траектория АНПА при выполнении сложной миссии по поиску и отслеживанию протяженного подводного кабеля в мелком море. Миссия включала три фазы: обнаружение кабеля на основе сплошного гидролокационного поиска, уточнение реального положения средствами электромагнитного контроля с выполнением движения в виде серии коротких галсов, пересекающих кабель, и в заключение движение АНПА на фикси-



Рис. 4.7. Траектории движения носителя и АНПА при выполнении операции по поиску и отслеживанию подводного кабеля: траектория носителя, построенная по данным от GPS;траектория антенны БАМ или СРГА, построенная по данным ГАНС ДБ; траектория АНПА, построенная по данным ГАНС ДБ

рованном расстоянии от кабеля с записью положения кабеля гидролокационными средствами.

Комплекс также успешно работал в условиях больших глубин. В качестве примера работы в условиях глубокого моря при параллельной работе систем с ультракороткой и длинной базой приведем реальную траекторию движения АНПА при его погружении на глубину 6000 м в одном из районов Тихого океана. На рис. 4.8, 4.9 синим цветом обозначены данные ГАНС УКБ, красным – данные ГАНС ДБ, также показаны выставленные маяки-ответчики и приведена траектория смещения обеспечивающего судна по данным спутниковой навигационной системы. В ходе миссии выпол-





Рис. 4.8. Траектория АНПА в глубоком море по данным ГАНС ДБ и ГАНС УКБ в горизонтальной плоскости

Рис. 4.9. Траектория АНПА в глубоком море по данным ГАНС ДБ и ГАНС УКБ

нены фазы погружения и подъема по спиралевидным траекториям и обзор дна четырьмя замкнутыми прямыми галсами.

4.2. ТЕХНОЛОГИИ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ГАНС В УСЛОВИЯХ МЕЛКОГО МОРЯ

Навигационный комплекс в составе каждого подводного робота, как правило, сформирован рядом навигационных систем, устройств и датчиков. Комплексная обработка данных обеспечивает решение навигационной задачи, но ключевое значение имеет точность этого решения. Оценка точности возможна только на основании аттестации этих систем комплекса в составе робота. Для этого в реальных условиях необходимо выполнить градуировки датчика абсолютной скорости, гидроакустических навигационных систем различного типа, систем, обеспечивающих информационный обмен с судном-носителем, а также в целом комплексированной бортовой навигационной системы робота.

Названные работы обычно выполняются в ходе натурных испытаний АНПА по нестандартизованным методикам, причем

методы градуировки основаны на выполнении исключительно дальномерных измерений в подводной среде, которые подтверждаются данными спутниковых навигационных систем на поверхности – единственной доступной внешней навигационной системы. Следует, однако, отметить, что вплоть до настоящего времени отсутствует какое-либо метрологическое обеспечение процедуры гидроакустической дальнометрии и поверочной схемы для передачи размерной единицы от образцовых средств измерения к рабочим средствам, что можно объяснить только многообразием и сложностью условий работы ГАНС.

Сама градуировка каждой системы сводится к определению шкалы измерений и оценке ее точности. Оценка точности гидроакустических дальномерных измерений между двумя подводными объектами, текущее положение которых контролируется или оценивается внешними надводными средствами, оказывается достаточно грубой в основном за счет ошибок, формируемых при передаче координатных отсчетов, полученных на поверхности, под воду.

Тем не менее на основе обработки гидроакустических дальномерных данных были разработаны методы оценки точности ГАНС ДБ, ГАНС УКБ, доплеровского лага, оценки координат стартовых точек, оценки текущих параметров движущегося объекта навигации. Такие градуировки выполняются на специальном полигоне в условиях мелководной акватории, чтобы минимизировать ошибки, обусловленные несоответствием надводных и подводных координат в ключевых точках траектории робота.

Специализированный полигон для испытаний и аттестации систем подводных роботов

Задачей специализированного полигона [116] для испытаний и аттестации систем подводных роботов является получение объективной информации о параметрах и характеристиках робота и его систем, подвергаемых испытаниям, путем обеспечения единства и точности измерений, воспроизведения и поддержания с требуемой точностью заданных условий испытаний для максимального числа систем и задач назначения. Иначе – определение в нормируемых условиях с заданной точностью и достоверностью параметров, установленных в документации на АНПА и его системы на различных стадиях жизненного цикла.

Столь жесткие требования к качеству натурных испытаний АНПА порождают много технических и технологических проблем при создании полигона. Вот некоторые из них:

 – рациональная оптимизация оборудования, конфигурации, района размещения полигона;

 методологическое обоснование основных натурных измерений;

 – оптимизация планирования испытаний в целом, а также отельных, частных экспериментов (измерений), выработка критериев эффективности для всех этапов испытаний;

проблема тестирования, калибровки и поддержания технической готовности многочисленных датчиков, основанных на различных физических принципах с учетом их сезонной работы;

 объективные и точные координатные измерения под водой, траектории движения АНПА и их навигационная привязка с учетом относительного расположения находящихся поблизости объектов;

 – разработка оборудования и методик для измерения слабых физических полей (акустического, магнитного и др.), свойственных АНПА;

– реалистичная имитация сценариев действий для АНПА (навигация АНПА относительно цели и распознавания цели по характерным признакам);

 – моделирование и имитация условий морской и атмосферной окружающей среды для планирования экспериментов, отработка бортовых систем управления АНПА при их функционировании в условиях слабо определенной среды.

Создание полигона сопровождается также разработкой методик выполнения типовых испытаний и измерений, апробацией средств измерений и процедур подготовки отчетных документов.

Ключевая составляющая такого подводного полигона – прецизионная подводная навигация. Все задачи аттестации и сертификации систем АНПА основаны на точном определении текущего местоположения, скорости и дальности испытуемого объекта и испытательного оборудования. Поэтому начальным этапом создания специализированного полигона является размещение координатного поля из ряда опорных точек на дне акватории с точной геодезической привязкой их координат. В этом координатном поле должны размещаться все элементы оборудования полигона: маяки-ответчики, управляющие антенны ГАНС, муляжи целей, комплекты, средства обозначения мерных линий и другое.

Наиболее важные процедуры метрологической аттестации гидроакустических навигационных средств должны обеспечивать следующее.

Проверку и градуировку гидроакустических дальномеров

С этой целью на акватории из элементов оборудования гидроакустических навигационных систем формируется ряд постоянно действующих в ходе испытаний стационарных трасс для проверки текущей анизотропии скорости распространения сигналов на акватории и оценок инструментальных погрешностей обнаружителей сигналов дальномерного оборудования, обусловленных неопределенностью фиксации моментов прихода навигационных сигналов. Итогом градуировки должна стать оценка абсолютной погрешности навигационной системы дальномерного типа путем расчета координат объекта навигации, размещенного в ряде точек с известными координатами, по дальномерным данным от установленных опорных точек.

Измерение абсолютной скорости АНПА (градуировка доплеровского лага)

Необходимо создание мерной линии, стартовая и финишная точки которой должны иметь известные координаты, причем контроль прохождения этих точек должен обеспечиваться датчиками систем технического зрения самого носителя лага. На мерной линии проверяются (градуируются) показания лага при движении носителя в условиях прямолинейного равномерного движения носителя в диапазоне градуируемых скоростей на основе точного измерения времени движения на выделенной мерной линии.

Проверку траекторий движения для режима сплошной площадной фотосъемки дна Целесообразно создать поле фотомишеней с известными координатами размером, например, 5×5 м или 10×10 м для отладки режима сплошной площадной фотосъемки и исследования возможности навигационной системы и системы управления робота при работе в режиме прецизионного позиционирования.

Проверку абсолютных ошибок системы счисления и комплексированной бортовой навигационной системы

Эта процедура включает ряд этапов. Сначала – формирование стартовой точки в локальной системе координат бортовой навигационной системы робота на основе выхода в точку с известными координатами, определяемым по данным системы технического зрения, или доставку робота перед погружением в стартовую точку (в условиях малой глубины акватории) по данным спутниковой навигации. Далее, после выполнения подводных миссий различной продолжительности робот должен выйти в точку с известными координатами при контроле этой операции по данным систем технического зрения или датчиков системы управления. Примерная структура полигона с такими возможностями представлена на рис. 4.10.



Рис. 4.10. Примерная структура морского полигона в мелком море для аттестации систем подводных роботов

4.2.1. Градуировка ГАНС ДБ в условиях полигона

Общие рекомендации по организации работ для оценки характеристик ГАНС в мелком море рассматривались в [117–119]. На специализированном полигоне в мелководной бухте (рис. 4.11) стационарно размещаются три маяка-ответчика и управляющая навигационная антенна, которые являются абонентами ГАНС ДБ. Координаты ключевых точек на полигоне определяются геодезическими методами с погрешностью не более 1 м.



Рис. 4.11. Геодезический план полигона с ключевыми точками для аттестации гидроакустических навигационных средств

В ходе аттестации эти устройства фактически реализуют функции постоянно действующих стационарных разнонаправленных измерительных дальномерных трасс на мелководной акватории, в которой движется подводный робот, выполняющий градуировку своих навигационных средств.

Накопление измеряемых дальномерных данных по трассе, на которой выставлены абоненты навигационной сети, служит для оценки

эффективных скоростей распространения сигналов по различным направлениям в акватории. Это позволяет дать взвешенную оценку этой скорости и достаточно точную оценку координат объекта навигации [120].

Метрологическое обеспечение ГАНС ДБ

В комплекс необходимых процедур, связанных с метрологическим обеспечением ГАНС ДБ в условиях полигона, входят градуировка измерительных устройств и интегральная точностная

оценка системы в целом. Положение объекта навигации в развернутой системе определяется по измеренным текущим дальностям: $d_i = C_e t_i$, здесь t_i – время распространения навигационного сигнала от объекта до соответствующего маяка, $i = 1, 2, 3, C_e - эффек$ тивная скорость распространения сигналов, которая устанавливается постоянной по всей акватории полигона. Значение скорости задается с учетом текущей гидрологической обстановки, но подлежит оперативному уточнению за счет избыточности дальномерных данных. Ее величина определяется в два этапа. Первый этап заключается в определении координат фиксированной управляющей антенны по дальномерным данным от маяков-ответчиков и «притягивании» результатов расчета к истинным геодезическим координатам этой антенны. На втором этапе уточняется введенное значение эффективной скорости распространения сигнала и минимизируется ошибка определения координат на основе дальномерного треугольника ошибок. Весь опыт работ на мелководном полигоне показывает, что таким образом можно довести относительную ошибку измерения эффективной скорости до 0.1–0,3 %.

При аттестации следует также учесть ошибки измерения дальности, обусловленные неточным измерением времени прихода навигационных сигналов. Оценим инструментальную ошибку обнаружителя сигналов, величина которой, как известно, устанавливается соотношением $\sigma_t = \frac{1}{qF}$, где q – отношение сигнал/ шум, F – полоса пропускания приемника. Для ранее описанной в п. 4.1 ГАНС, в которой используются гармонические сигналы короткой длительности, эти величины составляют ориентировочно q = 5-10 и F = 100 Гц, что дает ошибку $\sigma_t = 1-2$ мс. Полученная оценка подтверждаются длительными наблюдениями за временем распространения и срабатывания обнаружителей, реализованных в составе навигационного оборудования на развернутых стационарных трассах (между управляющей антенной и маяками). Некоторые примеры приведены на рис. 4.12. На рисунках приведены времена прихода в мс.

С учетом сделанных оценок ошибок определения эффективной скорости и времени распространения сигнала можно после

Глава 4



Рис. 4.12. Изменчивость времени прихода сигналов на стационарных трассах, образованных антенной и маяками ГАНС

несложных преобразований дать оценку ошибки измерения дальности, которая составляет $\sigma_D = 4-5$ м.

Оценки координатных измерений с использованием установленных значений эффективной скорости дополнительно подтверждаются результатами обработки траектории АНПА, представленной на рис. 4.13. Расчет координат аппарата на плоскости выполнялся по трем дальностям. При использовании уточненной скорости, для которой треугольник невязки сводится в точку, величина средней ошибки уменьшается с 7 до 1,3 м.

Приведенные выше оценки точности навигационной системы подтверждаются также сравнением координат АНПА, полученным по данным ГАНС ДБ, и спутниковой навигационной системы (СНС). На рис. 4.14 приведены траектории АНПА при движении по мерным линиям, а текущие координаты определяются по ГАНС ДБ и счислению пути. Точки старта и финиша на поверхности



Рис. 4.13. Координатные движения АНПА по данным ГАНС ДБ при исходной (слева) и уточненной (справа) эффективной скорости сигналов



Рис. 4.14. Сравнение данных ГАНС ДБ и СНС

моря определяются дополнительно по данным СНС. Ошибки не превышают 3–5 м.

4.2.2. Аттестация навигационного комплекса в условиях мелководного полигона

Метрологическое обеспечение комплексной обработки навигационных данных

При аттестации комплекса необходимы оценки точности датчиков БАНС – доплеровского лага и датчика курса. Точность измерений абсолютной скорости и курса существенно зависит от размещения и выставки доплеровского лага и измерителей курса на борту АНПА. Погрешности измерений, обусловленные неточностью установки этих устройств, могут быть учтены путем комплексной обработки бортовых автономных и гидроакустических навигационных данных [121, 122]. При выполнении таких калибровочных измерений в условиях специально оборудованного полигона подводный аппарат должен совершать стандартные движения строго вдоль фиксированных мерных линий с различными скоростями при точном контроле временных интервалов движения. Положение мерных линий контролируется средствами ГАНС. По результатам эксперимента в процессе обработки данных формируются соответствующие шкалы измерений доплеровского лага и измерителей курса и определяются оценки их точности.

Примеры обработки навигационных данных при движении АНПА вдоль мерных линий для двух значений скорости приведены в табл. 4.5.

Γ	I		
	Значения		
Параметры движения	Пуск 1	Пуск 2	
Продолжительность пуска, с	2520	2520	
Длина мерной линии, м	1500	1400	
Установленная скорость движения, м/с	0,8	0,7	
Реальная скорость движения, м/с	0,806	0,703	
Координаты точки финиша по СНС, м	x = -1539	x=-1285,2	
	y = -904, 1	y = -761,5	
Координаты точки финиша по счислению, м	x = -1499	x=-1244,1	
	y = -919,3	y=-774,9	
Координаты точки финиша по ГАНС (пуск 1)	x = -1538	x=-1280,3	
и по счислению с коррекцией (пуск 2), м	y = -915,4	y=-761,5	
Погрешность счисления координат в точке	42	43	
финиша, м			
Погрешность координат ГАНС в точке финиша,	11	5	
М			

Параметры калибровочных измерений

Таблица 4.5

Фактический курс по данным ГАНС, град	-118,17	-118,34
Курс по данным бортовой системы навигации, град	-118,86	-119,11
Ошибка задания курса, град	-0,69	-0,77

Окончание табл. 4.5

Размер мерных линий составил с учетом ошибки ГАНС (1500±6) м и (1400±5) м, что соответствует погрешности калибровки доплеровского лага (0,003–0,005) м/с.

Экспериментальные оценки точности комплексированной навигационной системы

Точность измерений в КНС зависит от точностных характеристик устройств, входящих в ее состав, и методики интегрального оценивания всех составляющих ошибки измерений. Сказанное относится к ошибкам счисления пути, зависящим, в свою очередь, от инструментальных ошибок измерителей скорости и курса и ошибок средств гидроакустической навигации. Для экспериментального оценивания точности измерений необходимо иметь достаточно полный набор данных при выполнении типовых траекторий в различных режимах движения. С этой целью формируются специальные программные миссии, при выполнении которых уточняются исходные параметры и производится взаимная коррекция комплексируемых измерений. К числу наиболее важных факторов относится получение уточненных данных об эффективной скорости распространения акустических сигналов. Это можно пояснить на примере реальных миссий, в которых АНПА совершал циклические траектории с регистрацией их параметров, используя результаты работы КНС (рис. 4.15).

Из приведенного примера следует, что даже при значительном разбросе дискретных данных ГАНС ДБ, обусловленном сложными условиями распространения в мелком море, коррекция координат по уточненным значениям скорости позволяет более точно оценить ошибки КНС.

В качестве другого примера, иллюстрирующего сравнительные точностные характеристики системы счисления пути и ГАНС ДБ с коррекцией по СНС, рассмотрим рабочую миссию, пред-



Глава 4



Рис. 4.16. Траектория АНПА при выполнении рабочей миссии

ставленную схематически на рис. 4.16. В данном примере миссия включала выход АНПА в заданный район, обследование площади размером 315 × 235 м сетью прямолинейных галсов с шагом 60 м, возвращение в точку старта. Параметры движения приведены в табл. 4.6.

Таблица 4.6

Параметры движения	Значения
Продолжительность пуска, с	2820
Скорость движения, м/с	0,9
Координаты точки старта по СНС, м	x = 25,6; y = -27,3
Координаты точки финиша по СНС, м	x = -69; y = -78,9
Координаты точки финиша по счислению, м	x = -47,1; y = -91,5
Координаты точки финиша по счислению с коррекцией,	x = -65,6; y = -79,7
М	
Погрешность счисления координат в точке	25
финиша, м	
Погрешность счисления координат с коррекцией в	3,5
точке финиша, м	

Параметры	лвижения	при	выполнении	рабочей	миссии
inapanterpbi	Apunkemin .	mpm	DDinotintinin	paco icn	mineemin

Из приведенных данных следует, что скорость накопления ошибки счисления координат без коррекции составляет $\sigma_{ki} = 31$ м/ч, Погрешность в режиме с коррекцией от ГАНС составила 3,5 м. Погрешность измерения координат по данным счисления относительно показаний СНС составила 25 м, что соответствует погрешности абсолютного лага 0,0088 м/с, т. е. менее 1 % от измеряемой величины.

Проверка характеристик навигационной системы в ходе продолжительного запуска

При выполнении подводных работ продолжительностью до нескольких десятков часов без подъема АНПА на борт судна большое значение имеет изменчивость гидрологических условий, формирующих навигационные ошибки. К их числу можно отнести длиннопериодные изменения скорости распространения звука на акватории, временные флуктуации гидроакустических сигналов, наличие подводных течений и турбулентности. Для того чтобы
учесть эти особенности, необходимо иметь достаточно большой набор статистических данных, соответствующих различным условиям среды при длительных пусках АНПА в заданном районе работ. С этой целью проводились тестовые измерения в условиях мелководного полигона при выполнении циклических программ движения АНПА по координатам заданных целей.

В табл. 4.7 приведены данные о движении в одном из тестовых пусков АНПА по траектории, представляющей собой циклически повторяемый квадрат со стороной 300 м (рис. 4.17).

Таблица 4.7

Параметры движения	Значения
Продолжительность пуска, ч	24, 56
Скорость движения, м/с	0,8
Пройденная дистанция, м	81900
Координаты точки старта по СНС, м	x = -15.6 y = -43.3
Координаты точки финиша по СНС, м	x = -102,4 y = -255,3
Координаты точки финиша по счислению, м	x = -57,1 y = -305,8
Координаты точки финиша по счислению с коррекцией, м	x = -102,2 y = -262,5
Погрешность счисления координат в точке финиша, м	67,8
Погрешность счисления координат с коррекцией в точке финиша, м	7,2

Параметры движения по траектории «циклический квадрат»

Суммарная погрешность определения координат в эксперименте составила 67,8 м за 24 ч 36 мин работы, т. е. скорость накопления погрешности счисления равна 2,6 м в час. Такая сравнительно малая величина погрешности обусловлена циклическим характером движения, в котором погрешность частично компенсировалась на взаимно противоположных галсах. Иллюстрацией этого может служить запись процесса изменения погрешности на интервале времени 16 ч (рис. 4.18).



Рис. 4.17. Траектория движения АНПА по траектории «циклический квадрат»



Рис. 4.18. Изменение ошибки счисления координат при циклическом движении по замкнутой траектории

Процесс накопления ошибки носит колебательный характер, и для корректной оценки необходимо выделить составляющие ошибки на идентичных галсах. Так, например, при движении идентичными взаимно обратными галсами АНПА проходит суммарно около 20 км одним курсом с формированием ошибки на каждом галсе 2–3 м. Это дает в целом накопленную абсолютную ошибку около 200 м (около 30 м/ч), а относительную – порядка 1 %. Для более корректной оценки точности счисления координат в данном эксперименте рассчитывался пройденный путь по данным БАНС и КНС. Отметим, что накопление погрешности линейно зависит от времени и в целом составляет 2600 м, или 3 % от пройденного расстояния, при счислении с заданной скоростью звука и 1842 м, или 2 % от пути для уточненной скорости звука.

Из анализа отдельных фрагментов траектории следует, что для повышения точности навигации необходимо, во-первых, с максимальной точностью определять эффективную скорость распространения сигналов и, во-вторых, компенсировать инструментальную погрешность измерителя абсолютной скорости, т. е. обеспечить дополнительную калибровку доплеровского лага. Последнее условие можно выполнить, вычисляя по данным ГАНС пройденный путь по одной замкнутой траектории и вводя калибровочный коэффициент в показания доплеровского лага. На рис. 4.19 показан фрагмент траектории АНПА (один квадрат) за первые 20 мин



Рис. 4.19. Траектория АНПА по данным ГАНС (постобработка) и данным счисления на одном из квадратов

движения. Приведены траектория ГАНС с учетом уточненной скорости распространения сигналов и счисленные координаты с калибровочным коэффициентом для лага, равным 1,0223. С учетом поправок траектории АНПА в ходе суточного запуска по данным ГАНС и БАНС приобретают вид, представленный на рис. 4.20.



Рис. 4.20. Траектория АНПА по данным ГАНС (постобработка) и счисленным данным за 24 ч

В результате погрешность счисления за суточный пробег уменьшается до величины, равной 2 м (менее 0,01 % от пройденной дистанции). График формирования погрешности счисления в ходе выполнения миссии при уточненной скорости звука и калибровочном коэффициенте лага показан на рис. 4.21.



Отметим, что в ходе суточного запуска зависимость навигационной ошибки имеет близкую к гармонической, что, видимо, связано с суточными изменениями гидрологических условий. Несмотря на уменьшение погрешности счисления пути до 0,01 % от пройденной дистанции, погрешность счисления координат фактически сохранилась и составила 57 м за 24 ч. На рис. 4.22 показано, как накапливалась погрешность счисления координат (автономный режим без коррекции от ГАНС).



Рис. 4.22. Погрешность счисления координат автономной навигационной системой после калибровки лага

4.2.3. Методы исследования точности ультракороткобазисной навигационной системы в условиях мелкого моря

Основными характеристиками гидроакустических навигационных систем являются дальность действия и погрешность определения местоположения объекта навигации. Оценка погрешности определения угловых величин – основная метрологическая проблема разработки ультракороткобазисной системы [123, 124]. Ряд таких градуировочных работ можно выполнить в строго контролируемых внешних условиях и оценить потенциальную точность всей системы (3.4). Далее, характеристики навигационной системы, как правило, подтверждают в ходе экспериментальных исследований в условиях специальных испытательных полигонов на основе сравнения с данными других ранее сертифицированных систем. Ниже изложены некоторые предложения, связанные с практической реализацией методов градуировки навигационных систем с ультракороткой базой в условиях мелкого моря.

Методика оценки точности угловых измерений по дальномерным данным

Если ГАНС УКБ используется для навигации подводного робота, параметры движения которого контролируются бортовыми навигационными средствами, то оценку угломерных характеристик можно получить без привлечения вспомогательных навигационных средств с использованием некоторых аналитических соотношений, связывающих угловые и дальномерные данные системы. Процедуры оценки точности угловых измерений существенно упрощаются, если известны или заданы некоторые параметры движения АНПА, а дальномерные измерения выполняются с высокой точностью.

В мелководном случае такая схема работ проще всего реализуется, если объект навигации движется равномерно относительно неподвижной навигационной антенны. Рассмотрим ситуацию, когда АНПА совершает прямолинейный равномерный галс с пересечением точки траверса от места расположения приемника.

В течение галса по данным ГАНС УКБ накапливаются массивы дальномерных $\{D_k\}$ и угломерных $\{\beta_k\}$ данных, поступающих с периодом следования навигационных импульсов T. Для принятых дальностей определяется модуль скорости V как величина, обеспечивающая минимальную среднеквадратичную ошибку аппроксимации реальных дальномерных данных расчетной зависимостью, соответствующей условию прямолинейного движения с привязкой по измеренным траверсным значениям дальности и пеленга. Затем вычисляются текущие изменения пеленга для модели движения АНПА со скоростью V:

$$\beta_{k+1} = \beta_k + \arccos\left(\frac{D_k^2 + D_{k+1}^2 - T^2 V^2}{2D_k D_{k+1}}\right)$$
(4.1)

и осредненное расчетное изменение пеленга в течение к навигационных импульсов на прямолинейном галсе в соответствии с выражением

$$\beta_{k} = \beta_{0} + \arccos\left(\frac{D_{k}^{2} + D_{0}^{2} - k^{2}T^{2}V^{2}}{2D_{k}D_{0}}\right),$$
(4.2)

где D_0 и β_0 – начальные значения дальности и пеленга, D_k – текущая дальность и β_k – текущий пеленг.

Приведем пример обработки экспериментальных данных. Для фрагмента траектории движения АНПА в мелководной бухте, полученной по данным ГАНС УКБ, была построена модельная траектория для скорости V = 0,57 м/с, определенной по массиву дальностей. Радиальная составляющая скорости определена как $V = \frac{D_{k+1} - D_k}{T}$. На рис 4.23 приведены осредненное расчетное изменение пеленга на прямолинейном галсе в соответствии с выражением (4.2) и соответствующее изменение реальных данных. Оценка суммарной погрешности на выделенном галсе не превосходит 1–2 град, при этом погрешность единичных измерений пеленга достигает 4–6 град.



Рис. 4.23. Сравнение измеренного и расчетного пеленгов

Детальные оценки точности единичного измерения пеленга можно дать, сравнив расчетные и с осреднением по формулам (4.1) и (4.2) соответственно. Результаты расчетов приведены на рис. 4.24.

Дифференциальные характеристики дают возможность оценить погрешность единичных измерений. Анализируя эти данные, можно отметить, что по предложенной методике можно дать оценку суммарной погрешности пеленга, дистанции и ошибок единичных измерений.

Опыт разработки и аттестации ГАНС



Рис. 4.24. Приращение текущих пеленгов по реальным модельным данным

Метод градуировки ультракороткобазисной навигационной системы в натурных условиях с использованием опорного маяка-ответчика

Оценки угловой точности, сделанные выше, являются локальными в том смысле, что получены при некоторых установившихся п проведении конкретных экспериментов угловых секторах приема измерительной навигационной антенной. Соответственно, получаемые оценки погрешности также необходимо относить к тем же угловым секторам приемной антенны.

Учитывая, что точность дальномерных измерений существенно выше угломерных измерений, можно достаточно оперативно выполнить градуировку системы в натурных условиях для всего диапазона горизонтальных углов антенны. Для этой цели необходимы дополнительно маяк-ответчик и канал измерения дальности маяка, установленный на АНПА.

В мелководной бухте на якорь устанавливается маяк-ответчик, на дистанции *D* также на якорь устанавливается приемная антенна ГАНС УКБ. АНПА совершает движение по замкнутой траектории, охватывающей мерную базу, составленную из маяка и приемной антенны.

Очевидно, пеленг на АНПА относительно мерной базы можно найти из равенства $R_2^2 = D^2 + R_1^2 - 2DR_1 cos\beta$, где R_1 , R_2 – измеряемые дальности АНПА от приемной антенны и маяка соответственно.

Поскольку положение мерной линии достаточно точно определено средствами спутниковой навигации, дисперсию оценки пеленга можно выразить через дисперсии дальномерных данных:

$$\sigma_{\beta}^{2} = \frac{\frac{\sigma_{D}^{2}}{D^{2}} \left(D^{2} - R_{1}^{2} + R_{2}^{2}\right)^{2} + \frac{\sigma_{R_{1}}^{2}}{R_{1}^{2}} \left(-D^{2} + R_{1}^{2} + R_{2}^{2}\right)^{2} + \frac{\sigma_{R_{2}}^{2}}{R_{2}^{2}} R_{2}^{4}}{4D^{2} R_{1}^{2} - \left(D^{2} + R_{1}^{2} - R_{2}^{2}\right)^{2}}, \quad (4.3)$$

где σ_D^2 , σ_{R1}^2 , σ_{R2}^2 – дисперсии измерений мерной линии и дальностей АНПА.

Если относительная ошибка всех дальномерных измерений одинакова $\frac{\sigma_D^2}{D^2} = \frac{\sigma_{R1}^2}{R_1^2} = \frac{\sigma_{R2}^2}{R_2^2} = \Delta^2$, тогда ошибка определения пеленга по дальномерным данным составит

$$\sigma_{\beta} = \Delta \left\{ \frac{2\left(D^2 - R_1^2\right)^2 + 6R_2^4}{4D^2R_1^2 - \left(D^2 + R_1^2 - R_2^2\right)^2} \right\}^{\frac{1}{2}}.$$
(4.4)

Для численной оценки значений погрешности предположим, что АНПА движется по окружности радиуса R_1 , центр которой – точка размещения приемной антенны. Введем параметр $\gamma = \frac{R_1}{D}$, тогда

$$\sigma_{\beta} = \Delta \frac{\sqrt{2}}{\sin\beta} \left\{ \left(\frac{1}{\gamma} - \cos\beta \right)^2 + \left(\gamma - \cos\beta \right)^2 + \left(\frac{1}{\gamma} + \gamma - 2\cos\beta \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

При $\gamma = 1$ и $\beta = \frac{\pi}{2} \left(\frac{3\pi}{2} \right)$ на траверзе измерительной линии погрешность минимальна и составляет $\sigma_{\beta} = \Delta \sqrt{6}$. Если принять относительную ошибку дальномерных измерений $\Delta = 10^{-3}$, тогда получим оценку точности угловых измерений $\sigma_{\beta} = 0,14$ град.

Очевидно, для реализации метода, чтобы обеспечить минимальную методическую погрешность во всем диапазоне углов, при проведении градуировки необходимо выполнить два прохода АНПА по замкнутой траектории с переустановкой маяка на 90 град от начального положения мерной линии или сразу установить два опорных маяка, образующих две ортогональные мерные линии с приемной антенной в центре района градуировки.

Оценка характеристик ГАНС УКБ сравнением с данными других систем

На практике в условиях мелководного полигона по развернутой ГАНС ДБ характеристики ГАНС УКБ в части построения траекторий движения объекта навигации можно выполнить обычным сравнением. Пример такой оценки дан ниже. Измерения производились в условиях полигона и сравнивались данные СНС, ГАНС УКБ и ГАНС ДБ с тремя маяками-ответчиками. Результаты приведены на рис. 4.25.



Рис. 4.25. Траектории движения АНПА по данным отдельных систем при градуировке навигационного комплекса нп полигоне

Приведем еще один пример траекторий движения, полученных при параллельной работе ГАНС ДБ и ГАНС УКБ, во время запусков АНПА в мелководной бухте. АНПА совершал движение прямолинейными галсами по замкнутой траектории. На рис. 4.26 эти траектории изображены на одном планшете.





Рис. 4.26. Параллельная работа ГАНС ДБ и ГАНС УКБ в условиях мелкого моря

4.3. ПРОВЕРКА ХАРАКТЕРИСТИК ГАНС В ГЛУБОКОМ МОРЕ

4.3.1. ГАНС ДБ

Для сертификации ГАНС ДБ при работе в условиях глубокого моря необходимо дополнительно к полигонным измерениям проверять ее дальность действия и оценивать точность. Методику таких работ покажем на примере проведенных испытаний в летний сезон в глубоководном районе Японского моря при глубине места 2800–2900 м и горизонтальных дальностях до 20 км.

Работа выполнялась после постановки трех маяков-ответчиков при глубине места около 2850 м. Постановка выполнялась с борта обеспечивающего судна. Время погружения каждого маяка составило около 32 мин. Каждый маяк был установлен на высоте 150 м.

Общее время постановки составило около 4 ч с учетом времени на координирование. Время непрерывной работы маяков в течение глубоководных испытаний составило 7 суток. После завершения работ и подачи команд на расцепление все маяки всплыли и были собраны. Время на подъем составляло 28 мин. Штатная работа ГАНС обеспечивалась выставляемым с борта носителя на глубину до 400 м буксируемым антенным модулем (БАМ) при дальности от борта носителя до 300 м. На борту судна работали вспомогательные двигатели и штатные судовые механизмы.

Проверка дальности действия ГАНС ДБ

Проверялись характеристики ГАНС ДБ, описанной в 4.1. При выполнении проверки судно-носитель двигалось прямолинейными равномерными галсами на скорости 3–3,5 узла и буксировало БАМ на глубине 40–120 м, при его удалении от судна на дистанции 100–300 м. Перемещение судна фиксировались по спутниковым координатам. Положение БАМ по глубине определялось штатным датчиком глубины, установленным на БАМ, а в горизонтальной плоскости, относительно судовой антенны СНС, – по длине вытравленного кабеля и углам его входа в воду.

БАМ работал в штатном режиме ГАНС – излучался навигационный сигнал запроса маяков-ответчиков и принимались сигналы ответов от каждого маяка. Измерялись времена распространения по трассам «БАМ–МО–БАМ». Определялись наклонные дальности маяков от БАМ и рассчитывались координаты БАМ навигационной программой «Планшет навигатора». Эти координаты сравнивались с координатами, полученными средствами спутниковой навигации.

В ходе проверки судно удалялось от маяков до полного исчезновения ответных сигналов, затем ложилось на обратный галс.

В результате проверки для заданных гидрологических условий были установлены максимальная дальность действия и границы зон уверенного приема маяков. Эти данные приведены в табл. 4.8.

Таблица 4.8

Максимальная дальность действия и границы зон уверенного приема маяков

Номер маяка	Максимальная дальность, м	Граница зоны уверенного приема, м
MO1	18 824	17 763
MO2	16 378	16 378
MO3	16 279	13 027

При расчетах принята эффективная скорость сигнала 1475 м/с. Дальность действия иллюстрируется рис. 4.27, где изображены измеренные дальности маяков при движении судна-носителя.



Рис. 4.27. Дальность действия гидроакустической навигационной системы

При проверке точностных характеристик ГАНС сравнивались траектории движения БАМ по данным ГАНС и спутниковой системы (рис. 4.28, 4.29).

Скорость движения, рассчитанная как изменение дальности по данным ГАНС и СНС, представлена на рис. 4.30 Красные точ-



Рис. 4.28. Траектории движения БАМ по данным ГАНС



Рис. 4.29. Траектории движения БАМ по данным СНС

ки – данные СНС. Синие и желтые – данные ГАНС от различных маяков. Как следует из рисунка, ошибки измерения дискретных отсчетов скорости по данным ГАНС не превышают 0,2 м/с. Эти данные усредняются за навигационный период, равный 30 с. С учетом последнего получим ошибку единичного измерения текущей дальности, которая не превосходит 6 м.



Для фрагмента траектории, представленного на рис. 4.28, определена разница между расчетными значениями координат БАМ, полученными по данным СНС и данным ГАНС. Результат приведен на рис. 4.31. В целом можно отметить, что в условиях глубокого моря ошибка определения координат средствами ГАНС не превышает 20 м при дальности до 10 км.

4.3.2. Оценка характеристик ГАНС УКБ в условиях глубокого моря

При проведении метрологических работ с ГАНС УКБ в условиях глубокого моря необходимо считаться с движением обеспечивающего судна, на котором установлена приемная аппаратура навигационной системы с ультракороткой базой. Даже при создании специальных условий (зависание АНПА и постановка судна в дрейф) из-за возможных течений и ветра необходимо определять математическую модель измерений, основанную на данных судовой и бортовой навигационных систем. На основании данных СНС целесообразно строить аппроксимирующие зависимости, соответствующие простейшим траекториям типа прямолинейного равномерного дрейфа. Эта методика дает хорошие результаты по координированию заякоренных маяков-ответчиков. При координировании движущегося АНПА совместно с моделью движения судна необходимо найти подходящую модель движения АНПА и оценить возможность использования некоторых типичных фрагментов его движения для целей калибровки.

Поскольку точность дальномерных измерений значительно выше точности угломерных данных, для типовых фрагментов траектории АНПА можно использовать аналитические соотношения между дальностью и угловым положением, чтобы выполнить поверку угломерных измерений по дальномерным данным. Если создать условия, при которых движение АНПА можно описать несложной и достоверной математической моделью, то, сравнивая затем полученные экспериментальные данные с модельными, можно дать оценку точности всей навигационной системы. Для сравнения могут быть применены также легкодоступные данные бортовой навигационной системы аппарата [38, 86].

Модель движения АНПА

Типичный сценарий работы в глубоком море таков. АНПА начинает погружение из точки, координаты которой точно определены средствами судовой навигации. Выставленная антенна навигационной системы с ультракороткой базой ведет прием навигационных сигналов с борта дрейфующего судна. АНПА обычно заглубляется по винтовой линии относительно вертикальной оси. Параметры траектории погружения можно считать известными из данных бортовой навигационной системы. Это диаметр винтовой линии $2r_0$, период витка по времени T_0 и глубине ΔH_0 . Тогда текущее значение горизонтальной дальности R можно найти, аппроксимировав ее выражением

$$R_{k}^{2} = \left(kd + R_{0} + r_{0}sin\theta_{k}\right)^{2} + \left(r_{0}cos\theta_{k}\right)^{2}, \qquad (4.5)$$

где kd – смещение судна за k навигационных импульсов, R_0 – расстояние между приемной антенной УКБ и точкой начала заглубления, θ_k – угловое положение АНПА на винтовой линии, которое определяется из выражения $\theta_k = 2\delta(k-\alpha)$ $\delta = \frac{\pi T}{T_0}$, T = 30 с – период навигационных импульсов, α – постоянная величина, привязывающая начальное положение АНПА к линии пеленга.

Приращение горизонтальной дальности за навигационный период найдем из $\Delta R_k = d + 2r_0 \sin\delta \cos(\delta(2k - 2\alpha - 1))$.

Определим также пеленг и угол места:

$$\beta_k = \beta_0 + \arcsin\left(\frac{r_0 \cos\theta_k}{R_k}\right), \ \gamma_k = \arccos\frac{R_k}{D_k}, \tag{4.6}$$

где β_0- пеленг на ось траектории погружения.

Для обработки экспериментальных данных целесообразно также ввести оценку приращения пеленга:

$$\Delta\beta_k = \frac{2r_0}{R_k} \sin\delta\sin\left(\delta\left(2k - 2\alpha - 1\right)\right) \tag{4.7}$$

и угла места:

$$\Delta \gamma_k = \frac{\sin \gamma_k}{D_k} \left[d + 2r_0 \sin \delta \cos \left(\delta \left(2k - 2\alpha - 1 \right) \right) \right] .$$
(4.8)

Найдем также оценку изменений приращения дальности:

$$\Delta^2 R_k = \Delta R_k - \Delta R_{k-1} = 4r_0 \sin\delta \sin\frac{\delta}{2} \sin(2k - 2\alpha).$$
(4.9)

После завершения погружения начинается горизонтальное движение АНПА. На *k*-м шаге приращение наклонной дальности имеет вид

$$\Delta D_k = \Delta H_k \sin \gamma_k + \Delta R_k \cos \gamma_k , \qquad (4.10)$$

где $\Delta H_k = H_k - H_{k-l}, \Delta R_k = R_k - R_{k-l}$. При горизонтальном движении $\Delta H_k = 0$, тогда $\Delta D_k = \Delta R_k \cos \gamma_k$, а ΔR_k имеет смысл проекции горизонтальной скорости АНПА на направление пеленга:

$$\Delta R_k = D_k \left[\frac{d}{D_k} \cos(\beta_k - \varepsilon) + \frac{Tv}{D_k} \cos(\beta_k - \varphi) \right],$$

где φ – курс АНПА, ε – курс судна, v. – скорость АНПА.

Пусть *v* = 0 тогда при зависании получим приращение пеленга и дальности в виде

$$\Delta \beta_k = \frac{d}{D_k} \cos(\beta_k - \varepsilon), \ \Delta R_k = d \cos(\beta_k - \varepsilon).$$

Если зависание выполняется в течение *k* навигационных периодов, то соответствующее изменение пеленга составит

$$\Delta\beta_k = \arccos\left(\frac{\Delta D}{D_0} - \frac{d^2k^2}{D_0 D_k}\right).$$

Используя эти параметры математической модели движения АНПА, можно выполнить ряд оценок точности ГАНС УКБ по экспериментальным данным, полученным при пуске АНПА в глубоком море.

Обработка и анализ экспериментальных данных

Приведем пример обработки реальных данных. АНПА запускался с борта судна-носителя. Навигация обеспечивалась ГАНС УКБ, приемная антенна которой размещалась в составе БАМ. В ГАНС УКБ была применена рассмотренная ранее разреженная семиэлементная круговая антенна, с борта судна выставленная на бо́льшую глубину, чем залегает ось подводного звукового канала. Навигационный сигнал состоял из двух фрагментов. Первый использовался для измерения дальности и синхронизации второго фрагмента длительностью 20 мс, по которому квадратурным приемником определялись параметры сигнала (амплитуды, фазы, отношения «сигнал/шум») на апертуре антенны.

В ходе одного из глубоководных пусков измеряемые навигационные параметры (наклонная дальность, пеленг и угол места) накапливались в течение 3,5 ч с навигационным периодом 30 с. За это время АНПА совершил погружение под балластом до глубины 2000 м, выполнил зависание на этой глубине, погрузился под моторами до дна на глубину 2500 м, провел исследовательские работы у дна и всплыл, сбросив балласт. На рис. 4.32, 4.33 приведены значения пеленга и наклонной дальности, полученные навигационной системой в ходе этого запуска.



Рис. 4.32. Пеленг АНПА при пуске в глубоком море

Сначала рассчитаем картину приращения наклонной дальности в течение всего пуска (рис. 4.34). Общее число принятых навигационных импульсов (тактов) около 400. Из анализа приращения дальности отчетливо можно выделить все фазы движения подводного робота: 1 – погружение под балластом, 2 – ход и зависание,





Рис. 4.33. Наклонная дальность АНПА при пуске в глубоком море



Рис. 4.34. Приращение наклонной дальности АНПА при пуске в глубоком море

3 – погружение под винтами по окружности большого радиуса, 4 – ход и зависание, 5 – смена курса и короткий галс, 6 – длинный прямолинейный галс, 7 – зависание и ход, 8 – всплытие

Очевидно, эти данные можно использовать для оценки точности угловых положений АНПА в различных режимах его движения.

Оценка точности угловых измерений

Рассмотрим более подробно 1 фрагмент (погружение под балластом). Ось времени на приведенных ниже рисунках 4.35–4.38

обозначена номером навигационного такта і с периодом 30 с. Общее число тактов в выделенном фрагменте составило 70, а за время погружения – 46. На рис. 4.35, а-д приведены данные наклонной дальности D_i , пеленга β_i и угла места у, полученные ГАНС УКБ, а также расчетные значения глубины $H_i = D_i \sin \gamma_i$ и горизонтальной дальности $R_i = D_i \cos \gamma_i$ объекта навигации от обеспечивающего судна.

Сначала лалим оценку точности дальномерных измерений. Необходимую для этого информацию можно получить ИЗ анализа приращений наклонной лальности за навигационный такт $\Delta D_i =$ $D_{i+1} - D_i$, которая опрелеляется изменениями глубины $\Delta H_i = H_{i+1} - H_i$ и горизонтальной дальности ΔR_{i} . Последняя состоит из дальности точки положения вертикальной оси заглубления с учетом дрейфа













д) расчетная горизонтальная дальность, м

Рис. 4.35. Данные работы ГАНС УКБ с АНПА в глубоком море

судна d и текущего положения объекта в винтовой зоне заглубления с радиусом r_0 . Тогда получим

$$\Delta D_i \approx \Delta H_i + \frac{R_i}{D_i} \Delta R_i \,,$$

где $\Delta R_i \approx d + 2r_0 \sin \frac{\delta_1}{2} \sin \left[\frac{\delta_1}{2} \left(\frac{2i+1}{2} \right) \right]$ – на этапе погружения (*i* = 1–46) и $\Delta R_i \approx d$ – при зависании (*i* = 50–70).

Значения глубины с высокой точностью известны по данным датчика глубины АНПА. Кроме того, известны $\Delta H \approx 35$ м – вертикальное перемещение АНПА за такт и $d \approx 4,5$ м – дрейф судна за навигационный такт, $r_0 = 25$ м и $\delta_1 = \frac{2\pi N}{70}$ – параметры линии погружения, где N = 6 – число периодов за время погружения. На рис. 4.36 приведены изменения глубины по данным датчика бортовой навигационной системы АНПА и приращения наклонной дальности по данным ГАНС УКБ. Приращение наклонной дальности, как видно из рисунка, соответствует расчетным значениям по модели движения. Для оценки абсолютной погрешности измерения дальности используется параметр $\Delta^2 D_i = \Delta D_{i+1} - \Delta D_i$, определяющий изменение приращения дальности за навигационный такт. Значения этого параметра во время зависания АНПА (для i = 49–70) фактически определяют случайную составляющую погрешности измерения дальности и приведены на рис. 4.37.



Рис. 4.36. Приращение наклонной дальности по данным ГАНС УКБ (красная линия) и изменение глубины по данным датчика глубины АНПА (черная линия), м





Погрешность измерения дальности составила около 2 м при наклонной дальности около 2000 м.

Рассмотрим более подробно оценки точности определения угла места. При решении уравнения пеленга фазовая функция задавалась в виде (3.33), где значения угла места фигурировали в качестве параметра. Важно, что на погрешность определения угла места не влияет погрешность датчика курса. Если приемная антенна достаточно точно выставлена относительно вертикальной оси, то результаты этих угловых измерений определяются только параметрами акустического сигнала. Стоит отметить, что величина угла места, измеряемая при балластном погружении АНПА, составляла около 80–85 град. Поскольку точность измерения угла пропорциональна эффективному раскрыву приемной антенны

$$\sigma_{\gamma}^{-1} = kbqsin\gamma_i \sqrt{M} , \qquad (4.11)$$

то при измерении углов в вертикальной плоскости на этапе погружения достигается точность, близкая к потенциальной при действующем отношении «сигнал/шум» (q = 30 дБ) и равная, как следует из (4.11), примерно 0,1°.

На рис. 4.38 приведены значения угла места, измеренные ГАНС УКБ, которые сравниваются с расчетными по данным датчика глубины и наклонной дальности, а на рис. 4.39 – изменения угла места, рассчитанные через приращения величин наклонной дальности и угла: $\Delta_{i} = \frac{\Delta D_{i} - \Delta H_{i}}{H_{i} \cos_{i}}.$



Рис. 4.38. Угол места, измеренный (черная линия) и рассчитанный по данным датчика глубины и наклонной дальности (красная линия), град



Рис. 4.39. Изменение угла места за навигационный такт, град

Необходимо заметить, что АНПА при заглублении винтовой траектории совершает около 6 витков, в течение каждого из них ГАНС УКБ получает в среднем 7 обсерваций с интервалом 30 с. Наблюдаемое изменение угла места за виток, например, на глубине около 1200 м составляет около 3 град. Эта величина формируется за 210 с по семи измерениям угла места. При этом очевидно, что использование обсерваций не дает возможности получить точность более 0,4–0,5 град. Тем не менее изменение угла места, представленное на рис. 4.39 в виде затухающей гармонической кривой, подтверждает возможность достижения точности на уровне 0,1 град.

Далее, оценим точность измерений пеленга. При угле места около 80-85 град эффективный размер приемной антенны в го-

ризонтальной плоскости резко уменьшается, в связи с чем потенциальная точность определения пеленга будет пропорциональна $\cos\gamma_i$, а именно $\sigma_{\beta}^{-1} = kbq\cos\gamma_i \sqrt{N}$, и составлять при имеющемся отношении «сигнал/шум» около 1 град. Эта оценка подтверждается экспериментом. На рис. 4.40 приведены значения изменений горизонтальной дальности, которые можно получить с использованием изменений угла места и сравнить их с известным радиусом витка при заглублении $r_0 = 25$ м. Далее, с учетом известных горизонтальной дальности и изменения положения АНПА в горизонтальной плоскости можно оценить значения пеленга. Расчеты и экспериментально полученные данные приведены на рис. 4.41.



Рис. 4.40. Изменение горизонтальной дальности, м



Рис. 4.41. Пеленг по ГАНС УКБ (красная линия) и расчет пеленга через горизонтальную дальность и положение объекта на горизонтальной проекции по модели заглубления по винтовой траектории (черная линия), град

Совпадение этих данных также подтверждает высокую точность угловых измерений. Таким образом, привлечение данных судовой навигации и бортовых навигационных средств АНПА может эффективно использоваться для оценки точности ГАНС УКБ, поддерживающей работу подводного робота.

Оценки точности дальномерных измерений

С метрологической точки зрения важным является также фрагмент траектории, где АНПА погружается под винтами с глубины 2000 м до 2500 м. На рис. 4.42 дана картина приращения наклонной дальности. Соответствующая модель может быть представлена в виде

$$\Delta D_{k} = \Delta H_{k} \sin \gamma_{k} + \cos \gamma_{k} \left(d + 2r_{0} \sin \delta \sin \left(\delta \left(2k - 1 \right) \right) \right),$$

где по данным бортовой навигационной системы $r_0 = 200 \text{ м} - \text{ра-}$ диус окружности погружения, $\Delta H_k = 7,5 \text{ м} - \text{вертикальное}$ перемещение за навигационный период, d – скорость дрейфа, γ_k – угол места, k – текущий номер навигационного импульса. Как следует из рисунка, АНПА совершает виток погружения за 40 навигационных тактов и, соответственно, $\delta = \frac{2\pi}{40}$. После подстановки исходных данных получим, что изменение дальности должно соответствовать функции $\Delta D_k = 9,8+10,5\cos(k\delta)$, которая хорошо согласуется с экспериментальными данными на рис. 4.42. Определим далее для этого фрагмента ускорение – изменение приращения дальности:

$$\Delta^2 D_k = \Delta D_k - \Delta D_{k-1} = 4r_0 \cos\gamma_k \sin(k\delta) \sin^2 \frac{\delta}{2}$$

Нас интересует максимальное значение ускорения при погружении (отнесенное к периоду 30 с), которое составляет $\Delta^2 D_{kmax} \approx 1,7$

Отклонение экспериментальных данных от ожидаемой гармонической зависимости с амплитудой 1,7 м даст абсолютную погрешность дальномерного канала (точнее, ее случайную составляющую). Результаты определения ускорения приведены на



Рис. 4.42. Приращение наклонной дальности АНПА на этапе погружения под моторами

рис. 4.43. Среднее значение погрешности на выделенном фрагменте составляет около 2 м, единичные сбои достигают 3–4 м. Надо напомнить, что наклонная дальность при этих измерениях составляла 2500–3000 м.



Рис. 4.43. Изменение приращения наклонной дальности АНПА на этапе погружения под моторами

Аналогично можно оценить абсолютную погрешность угломерного канала. Рассмотрение проведем для угла места, чтобы исключить влияние погрешности датчика курса. В качестве меры для оценки точности определим приращение угла места, которое после преобразований примет вид

$$\Delta \gamma_k = \frac{\sin \gamma_k}{D_k} \Big[d + 2r_0 \sin \delta \cos \left(\delta \left(2k - 1 \right) \right) \Big]. \tag{4.12}$$

Амплитуда каждой их трех полуволн на рассматриваемом фрагменте траектории будет зависеть от текущего значения угла места и составит по порядку 0,7, 1,0 и 0,6 град соответственно. На рис 4.44 приведены экспериментальные значения угла места и соответствующие изменения угла места. Штриховой линией дана оценка, сделанная на основе модели.

Величина погрешности, как следует из сравнения, в среднем составляет около 0,2 град. Единичные сбои достигают 1 град, но их появление связано с изменением положения антенны, фиксируемым датчиками крена и дифферента.

Аналогичный результат для оценки точности угломерного канала был получен ранее из сравнительного анализа приращения глубины по данным бортовой навигационной системы и данным ГАНС УКБ (рис. 4.36). Из приведенных там дифференциальных характеристик приращения глубины по данным этих систем следует, что $\sigma_D = 3$ м, $\sigma_H = 8$ м. Тогда при D = 2500 м получим оценку погрешности угловых измерений $\sigma_{\gamma} = 0,12$ град.



Рис. 4.44. Приращение угла места АНПА на этапе погружения под моторами

Глава 5

ОРГАНИЗАЦИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ ГАНС В СОСТАВЕ КОМПЛЕКСОВ АНПА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РЕАЛЬНЫХ РАБОТ

5.1. МЕТОДЫ ОРГАНИЗАЦИИ ГАНС В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ АНПА

Влавах 2–4 представлены результаты исследований для создания систем с длинной и ультракороткой базой в широком диапазоне глубин и дальностей. Разработанные технические средства находят самое широкое применение при организации работ АНПА для поисковых, обзорно-поисковых и обследовательских миссий. Однако с развитием технологического потенциала АНПА формируется новый круг задач их назначения. Для решения этих задач необходимы новые технологии комплексного применения отдельных систем и их интеграции с аналогичными средствами конкретного подводного аппарата.

5.1.1. Доработка ГАНС ДБ для навигационного сопровождения двух аппаратов в одной акватории

Одним из возможных способов увеличения эффективности подводных поисково-обследовательских работ является одновременное применение группировки подводных аппаратов для выполнения общей миссии.

Задачи обеспечения работы группировки роботов привлекают в последнее время большое внимание [123, 124], но направлены, прежде всего, на оптимизацию управления их синхронной работой для решения конкретной поисковой задачи. Создание навигационных средств идет по различным направлениям. Рассмотрим одно из них – доработку ГАНС ДБ, описанную в п. 4.1, для работы с двумя аппаратами. Такая задача возникает при применении роботизированных комплексов, включающих несколько АНПА.

Схема работы ГАНС ДБ для навигации двух аппаратов

Как правило, каждый АНПА при выполнении индивидуальной миссии работает в навигационном поле ранее установленных маяков-ответчиков ГАНС ДБ. Очевидно, для навигационного обеспечения и информационного обмена при одновременной работе двух АНПА необходима программная доработка структуры и организации информационного обмена между маяками и АНПА. Выполненные изменения далее необходимо проверить на полигоне и в условиях реальной совместной работы двух аппаратов.

При доработке было учтено, что контроль выполнения миссий аппаратами с небольшой (до 1 м/с) скоростью не требует высокой оперативности, и то, что автономные бортовые средства навигации АНПА обеспечивают непрерывное и достаточно точное формирование координатных оценок.

С учетом этих условий в штатной схеме применяемой ГАНС было выполнено разделение навигационных циклов на четные и нечетные для поочередного обслуживания каждого аппарата. Циклы включали временные слоты для обсервации маяков и работы систем телеметрии и телеуправления. Кроме того, был введен режим передачи координат, счисленных на борту, по гидроакустическому каналу связи без изменения структуры кодирования телеметрической информации за счет выделенных специальных частотных каналов.

Разделение навигационных циклов на четные и нечетные устанавливается на борту аппаратов на этапе формирования очередного задания. В связи с этим не исключается режим работы, при котором аппарат может работать на всех навигационных циклах (когда есть подтверждение в том, что второй аппарат не будет использоваться). Распознавание четности и взаимная синхронизация аппаратов и поста навигатора происходят в системе единого времени. Штатный навигационный период составляет половину минуты. Разделение происходит по принципу: первая половина минуты (нечетный) и вторая половина минуты (четный). Таким образом, полный пакет навигационно-информационных данных передается на пост навигатора один раз в минуту от каждого аппарата. Организация и применение ГАНС в составе комплексов АНПА ...

При штатной навигационной схеме для точного определения места положения аппарата по дальномерным данным, полученным от маяков-ответчиков, на посту навигатора необходимо знать точное место положения судовой приемной антенны. Обычно ее положение определялось по дальномерным данным от маяков-ответчиков в собственном подцикле каждого навигационного цикла с выделением отдельных частотных каналов для сопровождения работы. При этом приемная антенна поста навигатора излучала импульс для маяков-ответчиков и получала ответы от них, определяя дальность каждого. С учетом решения навигационной задачи на борту робота отпадает необходимость доставки на борт судна сопровождения большого объема дальномерных данных, используемых для расчета положения антенны, а в дальнейшем для расчета текущего положения аппарата. Таким образом, в схеме обмена информацией освободилось три информационных слота, которые были использованы для получения дальномерных характеристик от маяков-ответчиков. Далее, два из них были использованы для передачи координат аппарата, счисленных на его борту, а последний оставлен в резерве для передачи дополнительного параметра (например, заряд батареи, выполненный шаг миссии, особое извещение и пр.).

В используемой схеме обмена информацией команды телеуправления формируются последовательностями импульсов одной частоты с различными временными периодами. При работе с двумя аппаратами для каждого аппарата была введена своя частота телеуправления. Состав основных команд телеуправления для каждого из аппаратов остался таким же, как и в классической схеме, состав же дополнительных изменился для обеспечения специфики работы группировки.

Отладка работы системы в условиях специализированного полигона

Особенности обработки данных при работе группировки с разделением их на временной оси поясняются на рис. 5.1, на котором изображены структура сигналов и помех, принимаемых в одном из частотных каналов приемника, для случаев работы одно-



Рис. 5.1. Временная структура принимаемых навигационных сигналов. В выноске S – уровень принятого сигнала, N – действующий уровень шума. Значения указаны в децибелах

го аппарата (слева) и двух аппаратов (справа). Цифровые данные показывают уровень сигнала и текущего шума (в децибелах). Обе кривые последовательного приема ответов отображают динамику изменения параметра для каждого аппарата (зеленые и синие прямоугольники являются ключами служебной информации). По оси Х – внутрицикловое время в миллисекундах, по оси Y – минуты, соответствующие двум циклам.

При отладке системы проверялись (рис. 5.2) прием информации на пост навигатора, а также динамика телеуправления при движении АНПА под водой. Маяки-ответчики располагались в стационарных точках при глубине от 5 до 8 м. На пост навигатора от аппаратов передавались координаты, счисленные на борту каждого из аппаратов.



Рис. 5.2. Два АНПА на рабочей акватории в ожидании команды для начала работ

Была выполнена коррекция миссии командами телеуправления. На заключительном этапе миссий аппаратов \mathbb{N} 1 и \mathbb{N} 2 с поста навигатора была подана команда «заглубление» для аппарата \mathbb{N} 2 шесть раз подряд. При этом аппарат \mathbb{N} 1, находящийся в непосредственной близости от аппарата \mathbb{N} 2, переданную с поста навигатора команду не воспринимал.

На рис. 5.3 показаны траектории аппаратов АНПА 1 и АНПА 2, полученные во время группового запуска. Запуск обоих аппаратов осуществлялся с пирса полигона. После получения команды на погружение по радиомодему (каждому аппарату отдельно) АНПА приступили к выполнению заложенной программы. Слежение за аппаратами во время выполнения миссии осуществлялось с одного поста навигатора, при этом на мониторе навигатора одновременно отображались две траектории. Опрос маяков-ответчиков аппаратами во время группового запуска производился поочередно, таким образом, период опроса маяков для каждого АНПА при работе в группе увеличился с 30 до 60 с.

Глава 5



Рис. 5.3. Траектории движений двух АНПА при отладочных работах на полигоне

Проверка в условиях реального поиска

Одновременно двумя АНПА выполнялась работа по поиску объектов в Уссурийском заливе. Район предварительно был оборудован маяками-ответчиками ГАНС. На пост навигатора от аппаратов передавались координаты, счисленные на борту каждого из аппаратов. Миссия аппарата № 1 заключалось в обследовании локальной точки с помощью фотосистемы. Миссия аппарата № 2 заключалось в обследовании района средствами гидролокационного поиска. Глубина места работ варьировалась от 25 до 35 м.

Длительность периода наблюдения за аппаратами была равна 1 ч 53 мин. Аппарат № 1 выполнял миссию на глубине 29–32 м и высоте от дна 1–4 м. Аппарат № 2 выполнял миссию на глубине 14–16 м и высоте от дна около 17–20 м в первую часть задания и на глубине 30–32 м и высоте от дна 2–4 м во вторую часть задания. Картина перемещения обоих аппаратов в поле маяков-ответчиков показана на рис. 5.4.



Рис. 5.4. Траектории движения двух АНПА при выполнении поисковой операции. Траектория красного цвета соответствует траектории аппарата № 2. Траектория синего цвета соответствует траектории аппарата № 1

Режим движения корректировался командами телеуправления. На заключительном этапе миссий аппаратов № 1 и № 2 с поста навигатора была подана команда «окончание выполнения миссии» для аппарата № 2. После подъема аппарата № 2 на борт была подана команда «окончание выполнения миссии» для аппарата № 1.

Выполненные эксперименты подтвердили возможности простой доработки ГАНС для ее применения с увеличенным числом абонентов системы.

5.1.2. Навигационная поддержка группировки роботов в общей акватории

На практике часто возникает задача определения местоположения группы специализированных подводных аппаратов (далее СПА), выполняющих общую миссию, например, по контролю шумового акустического поля в заданной мелководной акватории в составе группировки, дополнительно включающей командный (или ведущий) АНПА, обеспечивающий сбор данных и управление работой группы.

Средства навигации, обеспечивающие работу аппаратов, описанных в 4.1, могут быть применены для групп аппаратов. В навигационном поле донных маяков-ответчиков могут работать несколько идентичных подводных аппаратов. При организации группового запуска производится синхронизация систем единого времени подводных аппаратов, каждому из них выделяется свой слот времени для опроса маяков и для передачи данных измерений по акустическому каналу на пост управления (см. п. 5.1.1).

Другой возможный метод навигационного обеспечения группы аппаратов состоит в том, что в акватории в точках с известными координатами можно выставить 2–3 синхронных навигационных излучателя. Прием навигационных сигналов от каждого такого излучателя позволяет определять по измеренным дальностям положение каждого аппарата и использовать эти данные для коррекции БАНС (см. п. 2.2.2) [4].

Но методы с использованием маяков-ответчиков и синхронных излучателей дороги, требуют наличия БАНС и системы высокоточного времени на борту аппарата, предварительной подготовки акватории, не обеспечивают скрытности работ, увеличивают количество выставляемого оборудования и усложняют операции применения из-за необходимости поддерживать развернутую навигационную сеть.

При этом одним из важных условий навигационного обеспечения групп подводных аппаратов является уменьшение стоимости навигационных средств.

Для этого точной БАНС, включающей дорогостоящий доплеровский лаг для измерения абсолютной скорости и дорогостоящую инерциальную систему для выработки точного курса, в составе группировки оснащается только один командный аппарат, а остальные (называемые ведомыми) – навигационными системами с меньшей точностью и пониженной стоимостью. Для увеличения точности определения положения ведомых аппаратов используются дальномерные данные между аппаратами группы. Различные варианты таких технических решений известны из работ [125, 126].

В работе [127] предложен способ групповой навигации, основанный на измерении дальностей аппаратов группы от ведущего аппарата с известными координатами, измерении взаимных дальностей между аппаратами группы и использовании данных бортовых навигационных систем каждого аппарата. Для решения навигационной задачи на борту каждого аппарата группы применяется система счисления пути с коррекцией результатов дальномерными данными. При этом все аппараты оборудованы акустическими модемами, предназначенными для связи между собой и ведущим аппаратом. Бортовой вычислитель каждого ведомого аппарата выполняет операции счисления пути по данным датчиков глубины, курса и скорости, расчета дальности до ведущего аппарата и взаимных дальностей между ведомыми аппаратами группы, осуществляет информационный обмен навигационными оценками, формируемыми бортовыми навигационными системами ведомых аппаратов и обеспечивает решение навигационной задачи по совокупности данных с использованием известных методов кальмановской фильтрации.

Однако высокая стоимость навигационного обеспечения, определяемая необходимостью оснащения каждого ведомого аппарата оборудованием системы счисления пути и бортовыми вычислителями для выполнения операций, необходимых при решении навигационной задачи, является серьезным препятствием для применения этого метода. При этом данными, получаемыми при прямых измерениях (относительно точки с известными координатами), являются только дальности ведущего аппарата от ведомых аппаратов группы, а взаимные дальности аппаратов группы формируются между точками, координаты которых подлежат определению, что в целом определяет зависимость достигаемой точности от точности текущих навигационных оценок ведомых аппаратов.

Рассмотрим работу группы СПА, выполняющих общую миссию в локальной мелководной акватории с участием командного
АНПА, в ходе которой предусматривается периодический выход аппаратов группы на поверхность [128].

При этом АНПА, выполняющий функции управления с использованием гидроакустического канала информационного обмена с каждым СПА, оснащен точными средствами бортовой автономной навигации и возможностями ее коррекции под водой внешними гидроакустическими или на поверхности спутниковыми средствами навигации, обеспечивающими при комплексной обработке всех данных точную текущую географическую оценку координат АНПА. Также каждый СПА стартует с поверхности в начале миссии и оснащен средствами спутниковой навигации для определения своих географических координат при нахождении на поверхности, оборудован средствами для передачи и приема команд управления по гидроакустическому каналу информационного обмена с АНПА.

В ходе миссии в подводном положении СПА группы периодически осуществляют согласованные сеансы гидроакустической связи с АНПА, при которых АНПА излучает навигационный сигнал, принимает ответы от каждого СПА, определяет времена распространения сигнала по трассам «АНПА–каждый СПА» и определяет текущие дальности каждого СПА от АНПА. В ходе сеансов связи также каждый СПА по очереди излучает навигационный сигнал, принимает ответы от остальных СПА, определяет времена распространения сигнала по трассам «очередной СПА–остальные СПА» и определяет свои текущие дальности от остальных СПА в составе группы.

Коме того, каждый СПА передает свои текущие дальности от остальных СПА по гидроакустическому каналу на борт АНПА вместе со своими географическими координатами, полученными при крайней обсервации на поверхности. В результате сеанса на борту АНПА формируется массив дальномерных данных, достаточных для определения текущих относительных координат каждого СПА в локальной системе координат с центром в точке размещения АНПА, с использованием системы уравнений:

$$D_{i0}^{2} = x_{i}^{2} + y_{i}^{2}; \quad x_{i}x_{j} + y_{i}y_{j} = \frac{1}{2} \left(D_{i0}^{2} + D_{j0}^{2} - D_{ij}^{2} \right)$$
(5.1)

и граничных условий

$$x_i \in \left(x_{i0} \pm R_i\right), \quad y_i \in \left(y_{i0} \pm R_i\right), \tag{5.2}$$

где i = 1...I, j = 2...I, I – число СПА в группе, $x_i y_i$, – неизвестные текущие относительные координаты каждого СПА в локальной системе координат с центром в точке размещения АНПА, $x_{i0} y_{i0}$ – относительные координаты каждого СПА, определенные им при крайней обсервации на поверхности, R_i – накапливаемая ошибка координат каждого СПА за время выполнения миссии, D_{i0} – дальности каждого СПА от АНПА, D_{ij} – взаимные дальности между СПА. Модель решения задачи поясняется планом размещения группировки в горизонтальной плоскости (рис. 5.5).



Рис. 5.5. Схема оценки координат и возможных ошибок

Накопление на борту АНПА всех измеренных дальностей (между аппаратами группы) и данных для формирования граничных условий, при этом знание текущей дальности *i* -го СПА от ведущего АНПА обеспечивает уменьшение области, формирующей ошибку определения местоположения *i*-го СПА зоной пересечения круга радиусом R_i и дуги с шириной r_i (где r_i – ошибка измерения дальности D_{i0}), а набор взаимных дальностей D_{ij} устанавливает расстояние между всеми парами СПА и позволяет сформировать план размещения группы СПА на плоскости в виде жесткого многоугольника, в вершинах которого находятся СПА, при этом нет необходимости знать координаты СПА.

Приведенная система уравнений с граничными условиями математически строго определяет текущие относительные координаты каждого СПА в локальной системе координат при их нахождении в подводном положении. При этом расчет текущих координат каждого СПА выполняется на борту командного АНПА, для которого определены географические координаты.

Результатом становится определение географических координат группы подводных аппаратов в ходе выполнения миссии в подводном положении, в составе которой только один аппарат оснащен средствами точной подводной навигации для определения географических координат. При этом ошибка определения координат всех аппаратов группы фактически соответствует аналогичной ошибке в известных ГАНС ДБ, в которых положение объекта навигации определяется по его дальностям от сети навигационных маяков. Применение метода осуществляется по следующему сценарию. Группа, включающая по меньшей мере три СПА и командный аппарат, выставляется на поверхность моря с борта судна в мелководном локальном районе для применения по задачам назначения. Текущие географические координаты каждого аппарата контролируются его средствами спутниковой навигации.

Далее, АНПА погружается на середину глубины акватории для управления работой группы, определяет свои текущие географические координаты средствами бортовой автономной навигации с использованием комплексирования данных этой системы, включающей доплеровский лаг для измерения абсолютной скорости и инерциальную систему для выработки точного курса, и данных, полученных от внешних навигационных систем. Для получения спутниковых навигационных данных и связи с пунктом управления АНПА может иметь отделяемый поверхностный радиобуй.

Рабочими режимами СПА являются работа у дна или работа с перемещением в водной толще от поверхности до дна и обратно с использованием специализированных инструментов для решения задач назначения. Например, СПА несут на борту скалярно-векторные приемники звука с задачей контроля шумовой обстановки в акватории, а вся развернутая группа СПА образует в горизонтальной плоскости пространственную приемную антенну большой апертуры. Данные от такой антенны передаются по каналам связи «СПА–АНПА» и «АНПА–пункт управления» и обрабатываются в пункте управления, причем эффективность такой антенны определяется точностью координатной привязки положения каждого ее элемента. Каждый СПА находится в зоне действия гидроакустической системы связи с АНПА.

При проведении работ СПА стартуют от поверхности моря из точек с известными географическими координатами X_{i0} , Y_{i0} . Вследствие различных факторов (течений и т. д.) текущие координатные оценки СПА в подводном положении x_i , y_i отличаются от координат крайней обсервации на поверхности и содержат ошибки в виде кругов радиусом R_i , величины которых растут с увеличением времени.

Данные инструментального поиска на борту СПА по установленной периодичности (например, каждые 30 мин) передаются на борт АНПА по гидроакустическому каналу во время сеанса связи. Возможен также экстренный сеанс связи, необходимость которого определяется на борту СПА важностью полученных данных инструментальных исследований.

Для определения координат каждого СПА при его нахождении в подводном положении на борту АНПА формируется информация о дальностях СПА от АНПА D_{i0} , взаимных дальностях СПА D_{ij} . и географических координатах X_{i0} , Y_{i0} , полученных СПА при крайней обсервации на поверхности Далее, программными средствами своей системы бортового управления, которыми оснащен АНПА, решается задача определения текущих относительных координат каждого СПА в локальной системе координат с центром в точке размещения АНПА путем решения системы уравнений. Система уравнений в случае трех СПА в составе группы будет иметь вид

$$D_{10}^{2} = x_{1}^{2} + y_{1}^{2}; D_{20}^{2} = x_{2}^{2} + y_{2}^{2}; D_{30}^{2} = x_{3}^{2} + y_{3}^{2};$$

$$x_{1}x_{2} + y_{1}y_{2} = \frac{1}{2} \left(D_{10}^{2} + D_{20}^{2} - D_{12}^{2} \right);$$

$$x_{1}x_{3} + y_{1}y_{3} = \frac{1}{2} \left(D_{10}^{2} + D_{30}^{2} - D_{13}^{2} \right);$$

$$x_{2}x_{3} + y_{2}y_{3} = \frac{1}{2} \left(D_{20}^{2} + D_{30}^{2} - D_{23}^{2} \right).$$
(5.3)

Решение этой системы шести квадратных уравнений относительно шести неизвестных x_i , y_i (i = 1, 2, 3) становится однозначным при учете граничных условий

$$\begin{aligned} x_1 \in & \left(x_{10} \pm R_1 \right); \ y_1 \in \left(y_{10} \pm R_1 \right); \ x_2 \in \left(x_{20} \pm R_2 \right); \ y_2 \in \left(y_{20} \pm R_2 \right), \\ & x_3 \in \left(x_{30} \pm R_3 \right); \ y_3 \in \left(y_{30} \pm R_3 \right), \end{aligned}$$

связывающих координаты СПА, определенные ранее на поверхности, с границами возможных ошибок. В приведенных формулах x_{i0} , y_{i0} – относительные координаты каждого СПА, определенные им при крайней обсервации на поверхности, т. е. значения географических координат X_{i0} , Y_{i0} , пересчитанные в локальной системе координат с центром в точке размещения АНПА.

При измерении дальности каждого СПА от АНПА $D_{i0}, (D_{i0}^2 = x_i^2 + y_i^2)$, зона ошибок определения координат каждого СПА формируется пересечением круга накапливаемой ошибки с центром в точке крайней обсервации на поверхности x_{i0}, y_{i0} и радиусом R_i , пропорциональным времени от крайней обсервации на поверхности (радиус этого круга при наличии даже незначительного течения, например, 0.1 м/с при времени миссии, равном 1 ч, может составлять несколько сотен метров), и дуги радиусом D_{i0} , равным текущей дальности СПА от АНПА, с шириной r_i (–

ошибка дальномерных измерений). Дополнительные измерения взаимных дальностей СПА D_{ii} :

$$D_{ij}^{2} = (x_{i} - x_{j})^{2} + (y_{i} - y_{j})^{2},$$

которые приводятся к виду

$$x_i x_j + y_i y_j = \frac{1}{2} \left(D_{i0}^2 + D_{j0}^2 - D_{ij}^2 \right),$$

позволяют сформировать конфигурацию (топологию) текущего положения СПА в виде жесткого многоугольника (в случае трех СПА – треугольника). Далее, сформированный многоугольник соответствующими вершинами вписывается в области пересечений кругов и дуг, однозначно определяя текущие координаты СПА (рис. 5.5).

При очередном появлении СПА на поверхности их координаты X_{i0} , Y_{i0} уточняются спутниковыми средствами навигации.

Таким образом, предложен способ координирования группы СПА, находящихся в подводном положении и связанных гидроакустическим каналом связи с АНПА управления на основе формирования текущих дальномерных данных между АНПА управления и каждым СПА из группы, а также между всеми отдельными СПА. Обработка всех дальномерных данных на борту АНПА, текущие координаты которого известны с высокой точностью, позволяет определить географические координаты каждого СПА с ошибкой не более $2r_i$, соответствующей ошибке определения координат при трилатеральной обработке дальностей.

При работе группы в мелководных акваториях и обоснованном предположении размещения группировки в плоскости одного горизонта (например, при глубинах акватории в десятки метров и диапазоне дальностей до единиц километров) можно значительно упростить и удешевить средства бортовой навигации специализированных подводных аппаратов, оснастив их только недорогими средствами спутниковой навигации для точного определения местоположения при нахождении на поверхности и простыми навигационными датчиками глубины, курса и скорости для обеспечения возможного перемещения СПА в подводном положении. Способ также может быть применен для навигационной поддержки в случае, когда СПА представляют собой группу выставленных гидроакустических или океанологических станций, оснащенных гидроакустическими модемами для связи между собой и с командным АНПА [128].

5.1.3. Организация навигации АНПА большой автономности, совершающего протяженный подводный переход

С учетом перспектив резкого увеличения автономности и расширения исследований по созданию АНПА с большой дальностью действия значительный интерес представляют технологии создания средств навигации и информационного обмена при выполнении миссий подо льдом, в условиях отсутствия сопровождающего судна-носителя и необходимости минимизации дополнительного внешнего навигационного оборудования.

Для навигационно-информационной поддержки АНПА большой автономности, совершающего протяженный подводный переход, с целью уменьшения массогабаритных характеристик и энергопотребления навигационного гидроакустического оборудования аппарата можно предложить такую модель применения. Ее суть состоит в том, что по трассе движения расставляют редкую сеть опорных маяков большой дальности действия с известными координатами. Текущее положение АНПА определяется бортовой системой счисления, а ошибки счисления корректируются на основании расчета координат АНПА по дальномерным данным от ближайшего опорного маяка с известными координатами в соответствии с установленным периодом обсервации. Кроме того, АНПА выполняет прием команд телеуправления и передачу данных телеметрии с использованием опорного маяка, снабженного средствами гидроакустической связи с АНПА, а также средствами спутниковой навигации и связи с удаленным пунктом управления. Для реализации этих возможностей опорные маяки оснащаются высокочастотным (ВЧ) малой дальности действия и низкочастотным (НЧ) большой дальности действия гидроакустическими приемопередающими средствами информационного обмена с АНПА.

АНПА также оснащают ВЧ гидроакустическими средствами приема-передачи и НЧ гидроакустическими средствами приема для информационного обмена с опорным маяком. Дополнительно АНПА обладает возможностями выхода к опорному маяку на основании приема и обработки данных, принятых от опорного маяка в НЧ диапазоне. При реализации способа опорные маяки по трассе следования размещаются в точках предполагаемых обсерваций, а период обсерваций устанавливается временем, в течение которого формируемая ошибка счисления координат на борту АНПА будет сравнима с дальностью действия НЧ канала связи. Затем на борту АНПА выполняется коррекция счисленных координат путем их сравнения с расчетными координатами по дальномерным данным опорного маяка с известными координатами на основании приема и обработки данных, принятых в ВЧ диапазоне. Команды управления АНПА получает от опорного маяка в ВЧ диапазоне и в том же диапазоне выполняет передачу данных телеметрии с борта АНПА на опорный маяк [48].

Значения рабочих частот гидроакустических средств информационного обмена в НЧ диапазоне выбирают из условия достижения требуемой дальности действия этих средств, которая должна быть как минимум вдвое большей максимальной ошибки счисления координат по данным бортовой навигационной системы АНПА за период обсервации, а значения рабочих частот гидроакустических средств информационного обмена в ВЧ диапазоне выбирают из условия обеспечения пропускной способности канала для передачи задаваемого объема телеметрических данных.

В этом способе АНПА выполняет автономную миссию без сопровождающего судна. Его миссию поддерживает редкая сеть опорных маяков с большой дальностью действия по трассе движения АНПА, габариты и энергопотребление гидроакустического навигационного оборудования АНПА минимальны за счет отсутствия на его борту аппаратуры передачи НЧ диапазона гидроакустической связи. Например, оптимальная частота НЧ системы связи с дальностью 80 км составляет около 1 кГц [74]. На такой частоте диаметр эффективно работающих ненаправленных передающих антенн составит десятки сантиметров при массе до сотен

килограммов и энергопотреблении единиц киловатт. Размещение оборудования с такими массогабаритными и энергетическими характеристиками на АНПА ведет к уменьшению его автономности и является неприемлемым. На основании этого на борту АНПА размещают только малогабаритную и мало потребляющую электроэнергию (единицы Вт) приемную аппаратуру этой системы связи.

На рис. 5.6 изображена структурная схема реализации предложенного способа с распределением оборудования на борту подводного аппарата и опорного маяка, где а) – схема траектории движения подводного аппарата по протяженному маршруту, б) – схема движения подводного аппарата в зоне действия НЧ канала гидроакустической связи и переход в зону действия ВЧ канала гидроакустической связи.



Рис. 5.6. Структурная схема навигационно-информационной поддержки АНПА, совершающего протяженный подводный переход

При скорости движения, например, 5 м/с АНПА за сутки пройдет более 400 км, при этом накопленная ошибка системы счисления за счет технических характеристик измерителя абсолютной скорости и курса может составить до 5 % от пройденного пути, или более 20 км. В этом случае опорный маяк должен быть размещен по трассе движения на дистанции 400 км от точки старта, а дальность действия его НЧ низкоскоростной системы связи должна быть вдвое больше ошибки счисления, т. е. около 40 км.

При выходе АНПА в зону работы передатчика НЧ гидроакустической связи опорного маяка на АНПА принимается навигационный сигнал и обеспечивается измерение текущей дальности до опорного маяка. Далее, бортовой системой управления АНПА выполняется операция «выход на маяк» по дальномерным данным от него (с использованием алгоритмов управления, изложенных, например, в [114]). При достижении дистанции сотни метров между АНПА и маяком дальнейшая операция точного выхода на маяк выполняется по дальномерным данным ВЧ канала связи, имеющего, например, рабочую частоту 100 кГц и скорость передачи данных 20–30 кбит/с. При попадании АНПА в окрестность нескольких метров от опорного маяка производятся:

– коррекция счисленных координат по дальномерным данным в ВЧ диапазоне,

 – сброс накопленной ошибки счисления координат и формирование координат стартовой точки для перехода к опорному маяку в следующей точке обсервации,

– прием команд управления на борту АНПА, переданных от маяка в ВЧ диапазоне,

– передача данных телеметрии с борта АНПА на маяк в ВЧ диапазоне.

При этом команды управления и данные телеметрии от удаленного пункта управления передаются (принимаются) маяком по каналу спутниковой связи (по возможности) или сохраняются (считываются) во внутренней памяти маяка.

Еще больший эффект может быть получен при применении маяков с существенно меньшей рабочей частотой НЧ диапазона. Например, при частоте 1 кГц дальность действия может составить

до 100 км, а период расстановки маяков при упомянутой ошибке счисления и скорости АНПА будет уже более 1000 км.

5.1.4. Особенности создания системы навигации и управления глубоководного АНПА

Большой интерес во всем мире вызывают разработки АНПА для предельных глубин Мирового океана. Наличие технических средств, способных работать на таких глубинах, становится одним из показателей технологического уровня развития различных стран [129].

Успешная реализация масштабных проектов по созданию робототехнических комплексов для предельных глубин во многом определяется качеством систем информационного взаимодействия и навигации. В навигационном комплексе глубоководного аппарата наибольшее значение приобретают гидроакустические системы. Однако в существующих технологиях навигационно-информационной поддержки АНПА при работе на больших и предельных глубинах есть ряд серьезных проблем:

 необходимость предварительной установки и координирования сети маяков в районе работ, сложность и стоимость этих работ становится значительной при увеличении глубины акватории;

– резкий рост габаритов гидроакустического оборудования, размещаемого на АНПА, для информационного обмена с маяками и судном при увеличения дальности действия систем навигации за счет понижения рабочих частот системы, поскольку необходимо обеспечить прямую двухстороннюю связь АНПА и ОС, а район работы АНПА привязан к зоне действия опорных маяков, дальность до которых определяется выбранным частотным диапазоном гидроакустического канала связи.

 уменьшение точности навигации и уменьшение скорости информационного обмена за счет применения низкой несущей частоты в гидроакустическом канале информационного обмена,

– значительное время для координирования стартовой точки миссии АНПА при работе с одиночным маяком,

– зависимость точности, дальности действия и скорости информационного обмена от условий распространения акустических сигналов по сложным траекториям. Например, по трассе АНПА– судно при значительном горизонтальном удалении аппарата от судна в условиях глубоководного погружения в силу рефракции формируется очень сложная картина звукового поля с образованием зон тени, что приводит к потере связи. При этом расчетные оценки структуры зон тени при неточном или недостоверном знании гидрологии по всей глубине акватории оказываются неприемлемыми.

Также такие внешние навигационные системы не используют текущие данные БАНС аппарата, комплексирование с которыми обеспечивает эффективную фильтрацию гидроакустических данных и повышает точность и надежность навигации.

В качестве решения проблемы предлагается применение в составе ГАНС специальной автономной стационарной донной станции как основного средства обеспечения глубоководных погружений робота и выполнения рабочих миссий в локальных районах [130, 131]. Станция выполняется с широкими функциональными возможностями. Для этого в составе станции могут быть размещены осмотровые и измерительные средства, которые могут быть полезны, например, для получения первичной информации о районе предполагаемого применения робота. Конструктивные и энергетические возможности станции должны быть достаточными для организации гидроакустического канала информационного обмена для работы на больших дистанциях с использованием низких частот и применением габаритного энергозатратного оборудования.

Основные функции станции заключаются в обеспечении высокоскоростного информационного обмена по вертикальному гидроакустическому каналу связи с судовой антенной в относительно низкочастотном диапазоне, а также в ее работе как маяка-ответчика ГАНС для информационного обмена с роботом в придонном горизонтальном канале на более высоких частотах в установленном радиусе его действия.

В целом для организации навигационно-информационной поддержки глубоководного комплекса необходимы:

• судовой пост управления;

• судовая гидроакустическая антенна (СГА), предназначенная для информационного обмена со стационарной донной станцией с дальностью действия до 20 км;

• стационарная донная станция (СДС), обеспечивающая навигационно-информационной обмен с АНПА при его работе вблизи дна с дальностью действия до 10 км и информационного обмена с СГА с дальностью действия до 20 км.

Схема работы глубоководного навигационного комплекса поясняется рис. 5.7 [129].



Рис. 5.7. Модель навигационно-информационной поддержки глубоководного АНПА. 1 – обеспечивающее судно с СГА, 2 – донная стационарная станция, 3 – АНПА

Ключевое значение имеют состав и порядок применения донной станции. Станцию оснащают НЧ приемопередающими средствами гидроакустической связи с ОС и АНПА с большой дальностью (ориентировочно вдвое большей, чем глубина установки станции), а также ВЧ приемопередающими средствами гидроакустической связи с АНПА. АНПА при этом оборудуют ВЧ приемопередающими средствами гидроакустической связи и НЧ приемными средствами гидроакустической связи. Также АНПА обладает возможностью выхода к станции на основании приема и обработки данных, принятых от нее по гидроакустической связи в НЧ диапазоне. Координаты стартовой точки АНПА устанавливают по дальномерным данным в ВЧ диапазоне гидроакустической связи. Кроме того, через станцию обеспечивается прием команд управления на борту АНПА от ОС, переданных от ОС в НЧ диапазоне и ретранслированных стационарным донным маяком в ВЧ диапазоне, а также передача данных телеметрии с борта АНПА, принятых маяком в ВЧ диапазоне и ретранслированных на ОС в НЧ диапазоне гидроакустической связи.

Значения рабочих частот гидроакустических средств информационного обмена в НЧ диапазоне выбирают из условия максимального удаления ОС от станции, а значения рабочих частот гидроакустических средств информационного обмена в ВЧ диапазоне – из условия заданного максимального удаления АНПА от станции и необходимой скорости передачи данных.

Таким образом, донная станция выполняет функции ретранслятора в канале информационного обмена, при котором АНПА связан со станцией в ВЧ диапазоне по горизонтальному каналу распространения акустических сигналов, а станция с ОС – в НЧ диапазоне по вертикальному каналу распространения акустических сигналов. При этом габариты и энергопотребление гидроакустического навигационного оборудования АНПА минимальны за счет отсутствия на его борту аппаратуры передачи НЧ диапазона гидроакустической связи.

Особенности навигационно-информационной поддержки заключаются в том, что

 увеличение точности навигации достигается за счет применения ВЧ канала для измерения текущей дальности АНПА от стационарного донного маяка;

 – определение координат стартовой точки миссии АНПА выполняется путем его выхода на стационарный донный маяк с установленными координатами;

 – зона поисковых и исследовательских работ миссии АНПА планируется в виде круга, в центре которого размещен стационарный донный маяк с радиусом, равным дальности действия ВЧ системы связи; – повышение надежности гидроакустической связи в низкочастотном диапазоне между судном и маяком достигается за счет расположения судна над стационарным маяком в радиусе 1–2 км.

На рис. 5.8 изображена структурная схема комплекса навигационно-информационной поддержки глубоководного АНПА с распределением оборудования на борту ОС, подводного аппарата и донной станции.



Рис. 5.8. Структурная схема навигационно-информационной поддержки глубоководного автономного необитаемого подводного аппарата

Модель работы реализуется следующим образом. Обеспечивающее судно прибывает в район исследований. При выполнении глубоководных работ в районе исследований выставляется донная станция. Станцию размещают вблизи центра предполагаемого района работ. Производится ее координирование по известным методикам с использованием судовых средств навигации и связи. Далее, с помощью аппаратуры, размещенной на СГА, организуется связь с донной станцией. Положение СГА относительно судна должно вычисляться с высокой точностью с использованием дополнительных гидроакустических средств. СДС при работе с АНПА выполняет функции опорного маяка гидроакустической навигационной системы, необходимого для дальномерных или дальномерно-угловых измерений на борту АНПА. Кроме того, донная станция должна передавать в направлении от АНПА на обеспечивающее судно информацию о состоянии бортовых устройств и избранные кадры гидроакустической и фототелевизионной съемки. В обратном направлении через донную станцию на подводный аппарат будут поступать команды телеуправления.

Далее, выполняется пуск АНПА на рабочую глубину. При погружении на борту АНПА ведется прием данных от станции по НЧ каналу связи с определением текущей дальности. При достижении определенной глубины (например, равной 0,9 от глубины района) бортовыми средствами управления АНПА выполняется процедура выхода на донную станцию по дальномерным данным НЧ гидроакустической связи.

Дальномерные измерения по НЧ каналу связи в финальной части выхода на донную станцию (на дальностях первые сотни метров и меньше) дублируются дальномерными данными ВЧ гидроакустической связи, что позволяет выйти к донной станции с минимальной (первые единицы метров) ошибкой для формирования координат стартовой точки. Далее, стартует миссия АНПА на рабочей глубине вблизи дна. Миссия сопровождается информационным обменом между станцией и АНПА по ВЧ каналу связи с измерением текущей дальности АНПА от станции. Выполняется расчет координат по счислению. Эти данные корректируются по дальномерным данным от станции. Условия распространения сигналов в горизонтальной плоскости, где размещены станция и АНПА, в глубоководных миссиях соответствуют практически однородной среде с минимальным градиентом скорости звука. Это обстоятельство улучшает точность измерения дальности и упрощает организацию достоверного информационного обмена между АНПА и станцией. Данные навигации и телеметрии, сформированные на борту АНПА и переданные по ВЧ каналу на станцию, далее ретранслируются станцией по НЧ гидроакустической связи на борт обеспечивающего судна, которое в режиме поддержки выполняемой миссии позиционируется над станцией, с использованием вертикального канала распространения акустических сигналов. Для глубоководных работ оптимальная частота НЧ системы связи с дальностью до 20 км может составить около 5-7 кГц, а

диаметр эффективно работающих ненаправленных передающих антенн составит до полуметра при массе несколько десятков килограммов и энергопотреблении более 1 кВт. Размещение оборудования с такими габаритными и энергетическими характеристиками на АНПА ведет к уменьшению его автономности. В настоящем же техническом решении на борту АНПА размещается только малогабаритная и потребляющая мало электроэнергии приемная аппаратура этой системы связи, что увеличивает автономность АНПА. ВЧ система связи может иметь несущую частоту 30–40 кГц. В этом диапазоне обеспечиваются необходимые характеристики по точности при удалении АНПА от донного маяка до 3–5 км, при минимальных габаритах и энергопотреблении аппаратуры.

Такой комплекс обеспечивает не только высокую точность навигации на борту подводного аппарата, но и возможность его контроля и управления с обеспечивающего судна в реальном времени. Необходимо отметить ряд достоинств представленного комплекса.

Во-первых, благодаря распределению между элементами комплекса функций навигации и информационного обмена значительно уменьшаются энергозатраты и объем бортового оборудования АНПА, обеспечивающего работу комплекса.

Во-вторых, повышается точность навигационного обеспечения в целом, поскольку скорость распространения акустических сигналов в горизонтальной плоскости в однородной среде происходит с минимальным градиентом, и, кроме того, при использовании высокочастотных сигналов может быть соответственно уменьшен период работы ГАНС.

5.1.5. Стационарная система навигации в локальном районе

Большой практический интерес представляют гидроакустические средства навигации для определения местоположения и управления АНПА, выполняющих непрерывный (периодический) мониторинг технического состояния объектов подводной инфраструктуры, например подводных добычных комплексов (ПДК) с большим количеством разнородных инспектируемых объектов, размещенных на большой площади, в том числе при выполнении миссий подо льдом.

Очевидно, что АНПА, используемые для этих целей, в том числе с учетом возможного применения в условиях ледового покрытия, должны иметь широкий диапазон функциональных характеристик [132]. В составе АНПА должно быть соответствующее бортовое измерительное оборудование для применения при длительных миссиях по всей контролируемой площадке (например, гидролокационной съемки и профилирования дна, фото обследования, отслеживания и планово-высотного контроля протяженных объектов типа трубопроводов, измерения физических и химических полей) и оборудование для локальных работ на компактных отдельных объектах (планово-высотный контроль, детальное фото- и видеообследование, выполнение механических работ, применение контактного измерительного оборудования для технологических операций на объектах). При выполнении программируемых управляемых миссий по всему району, размеры которого велики (например, протяженности подводных трубопроводов по доставке продуктов добычи на берег могут составлять десятки километров), АНПА должны обладать средствами точной географической привязки выполняемых работ по всему району работы. АНПА с бортовым оборудованием для выполнения локальных работ по отдельным объектам и в их окрестности, кроме того, должен быть обеспечен средствами прецизионной навигации и высокоскоростного информационного обмена с удаленным пунктом с целью реализации режимов супервизорного управления.

Для задач мониторинга требуются одновременное увеличение дальности действия гидроакустических систем навигационно-информационной поддержки, которое достигается понижением их рабочих частот, а также увеличение скорости информационного обмена, которое достигается увеличением рабочих частот этих систем.

Обычное применение двухчастотных маяков для этих целей ведет к тому, что вне зоны действия высокочастотных средств гидроакустической связи текущее местоположение определяется по данным счисления БАНС с большой ошибкой, значение которой неприемлемо при выполнении непрерывных работ по площадке (например, при детальном отслеживании и планово-высотном контроле протяженных объектов типа трубопроводов ошибка координатной привязки не должна превышать единиц метров, а ошибка счисления без коррекции нарастает, как минимум, со скоростью несколько десятков метров за час). Кроме того, применение таких маяков ограничено отсутствием информационной поддержки по гидроакустическому каналу связи при движении вне зон обсервации, наблюдаются недостаточная навигационная точность при работе АНПА на инспектируемом объекте, недостаточная пропускная способность канала ВЧ гидроакустической связи и большое время передачи больших объемов информации, например кадров изображения, необходимых для супервизорного управления АНПА при выполнении им технологических операций на объектах в режиме реального времени.

Рассмотрим метод навигации АНПА, совершающего миссии по выполнению широкого круга задач мониторинга на компактных и протяженных объектах, размещенных на обширном участке морского дна [133].

Для этого в районе работ расставляют сеть опорных маяков с известными координатами, оснащенных ВЧ малой дальности действия и НЧ большой дальности действия гидроакустическими приемо-передающими средствами информационного обмена с АНПА. Маяки соединены кабельными линиями связи с удаленным пунктом управления. АНПА оснащается бортовой системой счисления, НЧ гидроакустическими средствами приема и ВЧ гидроакустическими средствами приема-передачи для информационного обмена с опорными маяками. Важным условием является необходимость установки опорных маяков с оборудованием для НЧ и ВЧ гидроакустической связи на каждом инспектируемом объекте. При этом рабочую частоту НЧ оборудования выбирают из условия обеспечения дальности, равной размеру района, а рабочую частоту ВЧ оборудования выбирают из условия обеспечения скорости передачи данных, достаточной для передачи кадра видеоизображения в режиме реального времени.

Дополнительно АНПА имеет средства измерения времени распространения навигационных сигналов в НЧ и ВЧ диапазонах от выставленных маяков и расчета значения эффективной скорости этих сигналов, минимизирующих ошибку расчета текущих координат по сформированным дальномерным данным в НЧ диапазоне и обеспечивающих уточнение этих текущих координат при нахождении АНПА в зоне действия ВЧ, за счет их фильтрации по дальномерным данным ВЧ диапазона.

Управление АНПА при его нахождении на площадке мониторинга выполняют через оборудование опорного маяка в НЧ диапазоне и обеспечивают двухсторонний информационный обмен через оборудование маяка в ВЧ диапазоне при нахождении АНПА в окрестности инспектируемого объекта.

Особенности метода заключаются в том, что:

 в НЧ диапазоне на борту АНПА устанавливается только аппаратура приема без громоздкой аппаратуры излучения, а функции маяков выполняют синхронные навигационные излучатели;

– обеспечен прием НЧ навигационных сигналов борту АНПА от каждого установленного маяка в каждой точке района, при этом прием сигналов от трех маяков уже позволяет однозначно определять текущее положение АНПА на всей площадке, а прием от большего числа маяков используется для повышения точности;

– обеспечена высокая точность навигации по площадке мониторинга, поскольку при расчете дальностей эффективная скорость сигналов не устанавливается фиксированной, а является параметром расчета по избыточным дальномерным данным.

 обеспечена возможность супервизорного управления подводным аппаратом при выполнении им технологических операций на инспектируемом объекте и используется для дополнительного точного определения дальности АНПА от инспектируемого объекта;

– обеспечена возможность достижения прецизионной точности на инспектируемом объекте путем комплексирования данных ГАНС НЧ, БАНС и текущей дальности по ВЧ диапазону. ГАНС НЧ определяет положение АНПА в виде круга, центр которого – расчетная оценка координат, а радиус – ошибка их расчета. При комплексировании этих данных с дальностью от маяка в ВЧ диапазоне положение АНПА определяется областью пересечения этого круга с кольцом, радиус которого – дальность, а ширина кольца – ошибка измерения дальности. С подключением данных БАНС при движении, например, фиксированным курсом и скоростью счисляется пройденный путь. При этом определяется также изменение текущей дальности по ВЧ диапазону. Отношение изменения дальности к пройденному пути определяет пеленг на АНПА из точки размещения маяка, за счет этого область нахождения АНПА устанавливается пересечением упомянутых круга и кольца в угловом секторе, определяемом значениями пеленга и ошибки его расчета. Легко показать, что если ошибка по ГАНС НЧ составляет 1–3 м, ошибка измерения дальности в ВЧ диапазоне – 0,02 м, ошибка счисления пути по данным датчиков курса и скорости составляет 0,2 м за 10 с, то АНПА в зоне работы ВЧ оборудования определяет свое местоположение с ошибкой менее 0,1 м.

Модель применения состоит в следующем. АНПА после получения задания перемещается по всему району и принимает навигационные сигналы в НЧ диапазоне от установленных маяков в общей системе единого времени и определяет время распространения от каждого маяка. При приеме сигналов от трех и более маяков избыточные данные позволяют установить усредненную эффективную скорость распространения навигационных сигналов и с большей точностью рассчитать дальности от маяков, а затем определить текущие координаты АНПА. Кроме того, в составе НЧ навигационных сигналов с использованием известных методов кодирования передаются при необходимости команды управления ходом работ из удаленного (берегового) пункта. При выполнении работ по площадке мониторинга работа измерительного оборудования становится жестко привязанной ко времени и географическим координатам, что позволяет выполнять работы по контролю состояния, гидролокационную съемку рельефа, профилирование донной структуры и другие работы по всему локальному району.

Для выполнения сложных технологических операций непосредственно на инспектируемом объекте и в его ближайшей окрестности АНПА, находясь в зоне действия ВЧ оборудования, использует двухсторонний информационный обмен в ВЧ диапазоне. Алгоритм решения навигационной задачи по дальномерным данным НЧ диапазона дополняется измерениями текущей дальности АНПА от этого маяка в ВЧ диапазоне, что обеспечивает повышение точности навигации на этом объекте за счет фильтрации координат, полученных по данным НЧ диапазона. Например, если рабочая частота ВЧ диапазона составляет 500 кГц, то при нахождении АНПА в окрестности маяка радиусом менее 10 м в ВЧ диапазоне реализуется измерение дальности с ошибкой единицы сантиметров. Комплексирование данных БАНС, ГАНС в НЧ диапазоне и дальномерных данных в ВЧ диапазоне позволяет достичь прецизионной навигации (с интегральной ошибкой навигации менее 0,1 м) на инспектируемом объекте.

Высокая частота ВЧ оборудования также позволяет значительно увеличить пропускную способность этого канала связи (например, при частоте 500 кГц и полосе 100 кГц скорость передачи по гидроакустическому каналу может составлять более 100 кбит/с) и обеспечить передачу кадров фото- или видеоизображения с борта АНПА в пункт управления в режиме реального времени, обеспечивая супервизорное управление необходимыми технологическими операциями.

Покажем, как такая навигационная система может быть применена при работе гибридного АНПА на объектах подводного добычного комплекса (ПДК). Навигационная инфраструктура может оказаться достаточно дорогой и сложной, однако, например, при подледном использовании аппарата на действующем ПДК эти затраты могут быть вполне оправданы. При этом на эксплуатируемых объектах нефтегазодобычи навигационные каналы связи должны быть интегрированы в инфраструктуру добычных комплексов [134].

Один из возможных вариантов инфраструктуры приведен на рис. 5.9, где пункт управления 1 кабельными линиями 2 и 3 связан со станцией подводного базирования 4 и объектами стационарного оборудования добычного комплекса 9, на которых предусмотрено выполнение контактных работ. В состав станции включены гидроакустический маяк 5 для обеспечения навигации по району работ и приведения к станции, модем подводной оптической связи 6 для супервизорного управления аппаратом при стыковке, системы для



Рис. 5.9. Вариант инфраструктуры, обеспечивающей выполнение работ гибридного АНПА на подводном добычном комплексе

приема и выпуска аппарата 7, средства бесконтактного информационного обмена и заряда аккумуляторных батарей 8.

Инспектируемые объекты контактных работ также оборудованы гидроакустическим маяком 5 и модемом подводной оптической связи 6, обеспечивающим супервизорное управление аппаратом от береговой базы. Объекты бесконтактных работ 10 оснащены только маяком 5, который обеспечивает автоматическое приведение и координирование аппарата в ходе выполнения миссии. Гибридный аппарат 11 оснащен инструментальными средствами автономного аппарата 12 (гидролокаторы бокового и секторного обзора, электромагнитный искатель, профилограф, цифровая фотосистема, датчики среды и продуктов добычи), а также дополнительным оборудованием для контактных работ 13 (средства детального видеообзора, манипулятор, лазерный сканер и др.). Дополнительно введено оборудование, необходимое для подводного базирования 7, бесконтактного информационного обмена и заряда батарей 8, а также модем подводной оптической связи 6. Перечисленный состав оборудования гибридного аппарата позволяет выполнить весь перечень задач мониторинга объектов подводного добычного комплекса, включая контактные работы по ультразвуковой толщинометрии, измерению потенциала протекторной защиты и работ по перемещению механизмов объекта. Кроме того, аппарат может выполнять типовые бесконтактные работы при мониторинге точечных и линейных протяженных объектов.

Модель применения гибридного подводного аппарата на подводных добычных комплексах в рамках представленной выше инфраструктуры состоит из нескольких этапов. В исходном состоянии аппарат размещается на станции подводного базирования 4. В дежурном режиме он подключен к пункту управления 1 стационарным кабелем связи 3 через терминалы системы бесконтактного информационного обмена и заряда 7, 8 на борту станции и аппарата. При этом обеспечивается штатное обслуживание аппарата – подготовка новой миссии, проверка состояния систем, считывание полученных данных, заряд аккумуляторной батареи. Для выполнения контактных работ аппарат в автономном режиме переходит к объекту работ, оснащенному средствами оптической связи 6, координируя свое движение по данным гидроакустической навигационной сети. Эта сеть сформирована комплектом маяков 5 или излучателей, установленных на осматриваемых объектах 9-10 и размещенных по району применения. С момента выхода к объекту на дистанцию устойчивой оптической связи дальнейшее управление работой аппарата выполняется оператором с визуальным контролем процесса через бортовые видеокамеры. После сближения с объектом аппарат совершает маневрирование вокруг него, необходимое для выполнения назначенного перечня работ (манипуляции с механизмами объекта, очистка контактных поверхностей, толщинометрия, контроль катодного потенциала и т. п.).

Завершив контактные работы на объекте, аппарат автоматически возвращается к месту базирования, координируя свое движение по акустическому маяку-ответчику 5 донной станции 4. С момента выхода на дистанцию устойчивой оптической связи с донной станцией аппарат позиционируется по визуальным маркерам под управлением оператора с целеуказанием от комплекса бортовых видеокамер и далее осуществляет автоматическую посадку, обеспечив надежный контакт элементов системы бесконтактного заряда и механическую фиксацию элементов системы коммуникации. После посадки проверяется устойчивость связи аппарата с береговым постом управления и контролируется наличие бесконтактного заряда.

5.1.6. Средства контроля АНПА с борта обеспечивающего судна

Задача навигации текущего положения АНПА при длительных переходах в район работ или выполняющих рабочие миссии, например, по контролю состояния протяженных трубопроводов очень актуальна в связи со значительным развитием подводной инфраструктуры объектов, размещенных на шельфе, где линейные размеры трубопроводов и кабельных линий могут достигать многих десятков километров.

Один из возможных способов навигации подводного робота, совершающего протяженную миссию, рассмотрен в (п. 5.1.3) [135]. Однако необходимость предварительной установки большого числа маяков вдоль трассы движения робота и их точного координирования резко увеличивает время проведения работ и их стоимость, а кроме того, это не всегда возможно, например, при возникновении критических ситуаций, где требуется высокая оперативность.

Актуальной представляется перспектива замены стационарных маяков судовой антенной в качестве опорного навигационного маяка. Судовая навигационная антенна выполняется в виде буксируемого устройства, координаты которого определяются средствами судовой навигации и передаются по гидроакустическому каналу на борт аппарата в составе навигационных сигналов. Кроме того, судовая антенна принимает по гидроакустическому каналу с борта АНПА навигационный сигнал, содержащий информацию о его местоположении и другие навигационные параметры.

При такой организации навигационного обеспечения достаточная точность достигается использованием БАНС с коррекцией счисленных координат. Коррекция счисления обеспечивается при траекторной обработке текущих дальномерных данных АНПА от судовой антенны, а также при измерении углового положения антенны относительно аппарата. Зона работ ограничена только автономностью и скоростью аппарата, время подготовки системы к работе определяется только временем вывешивания буксируемого устройства, т. е. значительно меньше времени постановки стационарных маяков. Информационный обмен между АНПА и ОС обеспечивается за счет применения специальных навигационных сигналов, содержащих необходимую навигационную информацию, что упрощает в целом средства навигации и контроля.

Наличие надежного информационного канала обмена между АНПА и обеспечивающим судном, оборудованного буксируемой антенной, открывает возможности построения гидроакустической навигационной системы без опорных гидроакустических маяков, что является альтернативой традиционной ГАНС ДБ [136]. На рис. 5.10 изображена структурная схема реализации этого способа подводной навигации с распределением оборудования на борту подводного робота и обеспечивающего судна [137].

Аппаратура робота включает: устройство счисления пути по данным датчиков курса, глубины и абсолютной скорости, приемник навигационных сигналов, включающий измеритель дальности, подводный робот-маяк, измеритель углового положения маяка (пеленга и угла места); устройство обработки первого навигационного сигнала для выделения координатной информации, устройство комплексной обработки навигационных данных, передатчик навигационных сигналов, содержащих информацию о текущих координатах робота.

Аппаратура судна включает опорный гидроакустический маяк, выполненный в виде буксируемого устройства и снабженный кабельной линией связи с судном. Маяк содержит приемник навигационных сигналов, включающий устройство обработки второго навигационного сигнала для выделения координатной информации, и передатчик навигационных сигналов, содержащих информацию о текущих координатах судна.

Перед началом работ навигационными судовыми средствами устанавливается стартовая точка аппарата x_0 , y_0 , принимаемая за

Глава 5



Рис. 5.10. Структурная схема реализации навигационной системы

начало координат в локальной координатной системе. Далее, интегрированием составляющих скорости v_x , v_y на борту аппарата БАНС определяет его текущие координаты (x_d, y_d) . Для коррекции счисленных данных с борта судна излучается навигационный сигнал. Этот сигнал принимается дальномером и угловым пеленгатором на борту аппарата. Вычисленные значения наклонной дальности D, пеленга β и угла места γ судовой антенны передаются в систему комплексирования навигационных данных. Кроме того, навигационный сигнал объединен с информационным сигналом, который содержит информацию о текущих координатах судовой антенны x_c , y_c , получаемых судовыми средствами навигации. Далее, на борту робота формируется оценка его координат в виде

$$x_u = x_c - D\cos\beta\cos\gamma$$
, $y_u = y_c - D\sin\beta\cos\gamma$

Полученные дискретные оценки координат робота комплексируются с непрерывно получаемыми данными (x_d, y_d) и после фильтрации формируется взвешенная оценка координат аппарата в виде $(x_a, y_a) = A(x_d, y_d) + B(x_u, y_u)$, где A, B – операторы комплексирования.

Эти данные в составе кодированной навигационной посылки передаются по гидроакустическому каналу, принимаются аппаратурой судовой антенны, передаются по кабельной линии связи на

борт судна и отображаются в реальном времени. В составе судовой навигационной антенны для приема и передачи навигационных сигналов используются одна гидроакустическая антенна и один приемопередающий тракт аппаратуры. Аналогичный комплект аппаратуры на борту робота дополнен многоэлементной приемной антенной углового пеленгатора и соответствующей аппаратурой обработки многоканальных данных. Навигация АНПА, контролируемого с борта ОС, осуществляется при перемещении ОС в соответствии с движением робота, выполняющего рабочую программу.

Все средства навигации и контроля (в составе буксируемой судовой антенны) размещены только на обеспечивающем судне, что расширяет зону работы подводного аппарата за счет движения судна.

Экспериментальная проверка разработанного метода контроля положения АНПА с борта обеспечивающего судна была выполнена с использованием навигационного оборудования одного из разработанных АНПА. При проведении работ с борта судна выставлялась судовая антенна, содержащая аппаратуру для реализации ГАНС в режиме ультракороткой базы и аппаратуру информационного обмена с подводным аппаратом. На борту судна устанавливалась аппаратура обработки и отображения информации. На борту АНПА работала система счисления, излучались навигационные и информационные сигналы. В составе информационных сигналов были закодированы текущие навигационные данные как результат работы комплексированной бортовой навигационной системы – счисленные координаты в горизонтальной плоскости, высота, глубина, курс, скорость. С борта носителя траектория движения АНПА определялась средствами ГАНС УКБ. Принятые и декодированные навигационные данные также отображались на борту носителя. Результаты приведены на рис. 5.11, где сравниваются данные ГАНС УКБ и траектория, рассчитанная по принятым данным телеметрии – скорости и курсу.

Как следует из приведенного примера, метод контроля и навигации с расчетом координат по данным бортовых средств навигации с последующей передачей полученных данных на борт носителя реализуется с использованием минимального набора





Рис. 5.11. Экспериментальная проверка навигационной системы подводного робота без опорных маяков

аппаратуры, и в ряде случаев нет необходимости для развертывания средств гидроакустической навигации типа ГАНС ДБ и ГАНС УКБ. Разработанная технология была использована для выполнения практических работ в экстремальных условиях высокоширотной Арктики [12].

5.2. ПРИМЕНЕНИЕ ГАНС В СОСТАВЕ КОМПЛЕКСОВ АНПА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РЕАЛЬНЫХ РАБОТ

5.2.1. Групповая операция подводных роботов по поиску малоразмерной цели

Подводные роботизированные комплексы

Опыт проведения поисковых работ с использованием автономных аппаратов, как отечественный, так и зарубежный, показывает,

что наиболее эффективными оказываются технологии совместного использования автономных аппаратов с различными буксируемыми и телеуправляемыми подводными аппаратами. Причем выбор методик работ в зависимости от глубины места напрямую определяется исходной точностью задания района поиска. В зависимости от размера поисковой площади могут быть использованы различные варианты поискового оборудования. Например, предварительный поиск на большой площади выполняется гидролокаторами бокового обзора с большой дальностью действия при их установке в составе буксируемых аппаратов. При уменьшении размеров обследуемого района более целесообразным становится выполнение гидролокационного поиска с использованием автономного аппарата. Допоиск и детальное обследование обнаруженных объектов выполняются бортовыми фото- и видеосредствами автономного или телеуправляемого аппаратов. Однако в каждом случае условием успешного выполнения работ является их точная навигационная привязка, что достигается способностью аппаратов различных типов работать в одном подводном навигационном пространстве. Как правило, для глубоководных поисковых работ привлекаются все доступные виды поискового и навигационного оборудования, однако реальные операции по поиску по-прежнему остаются достаточно продолжительными и затратными. Так, например, в поисковой операции по обнаружению места падения аэробуса компании Air France в Атлантическом океане на глубине 4000 м были задействованы два глубоководных автономных аппарата REMUS-6000, телеуправляемый аппарат рабочего класса REMORA 6000, десять маяков для поддержки гидроакустической навигации. А сама операции выполнялась в течение трех сезонов 2009–2011 гг.

При выполнении поисковых работ в мелком море, где могут быть расширены возможности использовании телеуправляемых аппаратов, очевидной стала необходимость создания поисковых комплексов, в которых автономный аппарат со всеми средствами его обеспечения дополнен управляемым по кабелю подводным аппаратом и унифицированными средствами навигационной поддержки. В составе комплексов высокая производительность гидролокационных средств АНПА при поиске на большой площади дополняется высокой оперативностью осмотровых операций, выполняемых телеуправляемым аппаратом. Формирование первичных данных объектов с характеристиками предполагаемых целей и их точная координатная привязка, получаемые в результате работы автономного аппарата, являются исходными данными для дообследования и классификации целей [138]. При этом для существующих моделей автономных аппаратов поисковая производительность гидролокационного обзора может составлять до нескольких квадратных километров за час работы. Если дообследование выделенных целей выполняется АНПА, то миссия должна задаваться, как показывает опыт практических работ, с некоторым расширением площади в окрестности установленных координат для исключения возможных пропусков дообследуемых целей. Типовая миссия АНПА для фотообследования цели, ранее обнаруженной с использованием гидроакустических средств, предусматривает движение параллельными плотными галсами, и по времени эта операция, даже при надежно установленных географических координатах, как правило, не менее продолжительна, чем первичная гидролокационная съемка. Очевидно, более эффективным является применение телеуправляемого необитаемого подводного аппарата (ТНПА), причем в случае оперативного поступления исходных данных на борт обеспечивающего судна запуск ТНПА может быть сделан до завершения миссии автономного аппарата и его подъема на борт носителя. Двухэтапное решение поисково-обследовательской задачи с разделением функций поиска и доследования между АНПА и ТНПА позволяет резко сократить время и снизить затраты на выполнение обзорно-поисковых работ.

Кроме того, для сокращения времени поисково-обследовательской операции на борту автономного аппарата должны быть реализованы средства первичной обработки гидролокационной информации, выделение и предварительная классификация целей, определение их географических координат и возможность оперативной передачи текущих данных на борт судна-носителя. После анализа этой информации и принятия решения о необходимости доследования выделенных объектов может быть выполнен запуск телеуправляемого аппарата. А в посту управления должна быть предусмотрена возможность одновременной работы как автономного, так и телеуправляемого аппаратов с использованием идентичного комплекта обеспечивающего навигационного оборудования.

Для решения названных задач ИПМТ ДВО РАН создал подводный робототехнический комплекс «Галтель» [139]. В состав комплекса входят два АНПА, один ТНПА и комплекс средств гидроакустической навигации и связи. Обеспечивается одновременная работа всех аппаратов в одной акватории с управлением по командам гидроакустического телеуправления и с автоматической коррекцией по данным работы бортовых поисковых средств. Фотография комплекса с обеспечивающим навигационным оборудованием приведена на рис. 5.12.



Рис. 5.12. Оборудование робототехнического комплекса «Галтель»

Функциональные характеристики комплекса и организация его навигационного обеспечения для конкретных поисково-обследовательских операций отрабатывались в ряде морских работ.

Модели поисково-обследовательских операций

Поиск малоразмерных целей

J -450

-550

-50

0

50 X(M)

Работы с применением автономного и телеуправляемого аппаратов проводились на полигоне, оборудованном средствами ГАНС ДБ. АНПА и ТНПА имели идентичные средства навигационного обеспечения.





Точка отсчета 131deg 54.127143min 42deg 54.765372min

б

100

150

```
Организация и применение ГАНС в составе комплексов АНПА ...
```

Для проверки возможностей комплекса по поиску малоразмерных целей на дне были выставлены три небольших металлических предмета. Был задан район поиска площадью около 1 км². Сначала



Рис. 5.14. Поиск малоразмерных предметов на дне моря с использованием АНПА, ТНПА и навигационных средств

был выполнен обзор дна с использованием высокочастотного гидролокатора бокового обзора (ГБО) и определена зона размером 40×40 м, в которой могли быть искомые предметы. Затем эта зона дообследовалась фотосредствами АНПА, определялись координаты целей и выполнялся контрольный выход ТНПА в точку с назначенными координатами для детального осмотра объектов. Траектории движения по данным комплексированной навигационной системы приведены на рис. 5.13. Общее время такой операции в акватории с глубиной около 50 м составило несколько часов.

Результаты работы иллюстрируются на рис. 5.14. Представлены фотографии, сделанные АНПА при дообследовании, и фотографии при контрольном выходе ТНПА.

Контроль состояния дна в контролируемом районе

Для проверки наличия в контролируемой акватории сторонних объектов был выставлен на дне цилиндр диаметром около 0,5 м и длиной 3 м, а затем организован запуск АНПА для сплошного гидролокационного обзора акватории. Поступаемая информация обрабатывалась, и при обнаружении целей миссия корректировалась для выхода аппарата к целям и их дообследованию. Некоторые фрагменты этих операций поясняются рис. 5.15, 5.16.



Рис. 5.15. Отработка гидролокационного контроля дна акватории. Траектория движения АНПА и данные ГБО

Время на выполнение поиска и классификации малоразмерного объекта в мелководной бухте при заданном размере района поиска 200 × 400 м составило 1,5 ч.



Рис. 5.16. Фотообследование цели, обнаруженной автономным аппаратом. Траектория движения и фотографии объекта

Автоматическое наведение ТНПА на цель с известными географическими координатами

На оборудованном полигоне подтверждались также возможности выхода ТНПА на цель, обнаруженную средствами АНПА по заданным географическим координатам. Локальная система координат ТНПА была привязана к системе, в которой проводился локационный поиск автономным аппаратом. Бортовая навигация ТНПА поддерживалась средствами установленной ГАНС ДБ. На рис. 5.17 показан скриншот планшета ТНПА с картой местности и изображением участка съемки.

ГБО изображение цели привязывается к карте района на графическом планшете оператора ТНПА, где 3 – ГСО-грамма, полученная АНПА, 2 – отметка цели (точка финиша), 1 – отметка ТНПА (точка старта). Далее ТНПА в автоматическом режиме двигался к отметке цели. Траектория движения ТНПА к цели с известными географическими координатами и конечное его положение в районе поиска на момент захвата цели бортовым локатором секторного обзора (ГСО) также представлены на рис. 5.17.

Этот эксперимент показал, что применение на ТНПА развитой навигационной системы с возможностью счисления координат и комплексирование ее с ГАНС позволяют значительно упростить работу по поиску и обнаружению объектов с известными географическими координатами. Управление движением ТНПА возможно в автоматическом режиме по заданной программе. При этом
Глава 5



Рис. 5.17. Автоматическое наведение ТНПА на цель с известными географическими координатами. Фотоснимки выхода ТНПА на визуальный контакт с условной целью в полуавтоматическом режиме. Этапы сближения ТНПА с целью по ГБО-граммам, до цели 36 м (слева) и 5 м (справа)

оператор может в любой момент прервать выполнение миссии и взять управление на себя. Практическая целесообразность таких режимов очевидна, например, при площадной фотосъемке дна, возврате ТНПА к обеспечивающему судну, обследовании гидротехнических сооружений и т. п.

5.2.2. Выполнение поисковых и обследовательских операций на большой площади

Применение подводных роботов для выполнения поисково-обследовательских работ производится обычно по сценарию, включающему несколько этапов и соответствующих им операций. К ним относятся:

• организация навигационного обеспечения путем установки маяков-ответчиков, подготовка судовой антенны для управления ходом работ и при возможности применение оборудования ГАНС УКБ;

• предварительный обзор района поиска путем крупномасштабной съемки дна с помощью ГБО и нанесение целей для детального обследования;

• обработка данных на борту робота для автоматической коррекции текущей миссии;

• выход АНПА на объект поиска (заданную цель) и выполнение обследовательских действий с использованием фото и телевизионных систем и высокоразрешающих ГСО [140–143].

Точная навигационная привязка проводимых работ является основным требованием, выполнение которого минимизирует продолжительность таких операций.

Поиск и обследование района аварии самолета в Татарском проливе комплексом АНПА «Клавесин»

АНПА «Клавесин» в течение ряда лет выполнил несколько реальных морских работ в различных морских акваториях (рис. 5.18). В результате этих работ была разработана технология применения АНПА для поиска и обследования одиночных и протяженных донных объектов с использованием гидроакустических, электромагнитных и оптических средств обнаружения. Ключевое значение для успеха этих операций имела высокоточная навигационная привязка, которая обеспечивалась комплексированной навигационной системой.



Рис. 5.18. Фрагмент морских работ с применением АНПА «Клавесин»

В качестве примера на рис. 5.19 приведены траектории движения АНПА «Клавесин» при поисковой операции в Татарском проливе по фотообследованию дна в районе падения самолета Ту-142МЗ. Полный планшет движения составлен из ряда квадратных и прямоугольных участков, а красным цветом отмечены места обнаруженных обломков. Общая площадь, обследованная методами сплошной фотосъемки и гидролокационной съемки, составила соответственно 1,48 и 1,585 млн м². Было отснято 480400 фотокадров. По данным обследования была локализована зона разброса обломков (рис. 5.20). При этом на съемку было затрачено 255 ч. Успешность проведенной работы наряду с прецизионной навигацией во многом была обусловлена внедрением эффективной модели управления АНПА для сплошного фото- и гидролокационного обследования локальных участков морского дна [144].



Рис. 5.19. Траектория движения при сплошном фотографировании морского дна

Фотографирование донной поверхности, полоса обзора-4м, производительность 10000 кв.м/час



Рис. 5.20. Фрагменты поисковой операции со сплошным фотографированием дна

Гидролокационный обзор большой площади по маршруту

Глава 5

При выполнении миссии АНПА совершал длительный переход (около 3 ч) со средней скоростью около 0,8 м/с с работой ГБО.



движения судна

Рис. 5.21. Траектория АНПА по данным ГАНС УКБ, полученная в режиме движения сопровождающего судна в мелком море

Сопровождающее судно двигалось переменными курсами и скоростью до 5 узлов, удерживая ΑΗΠΑ листанции на 1-2 км. Навигация поддерживалась средствами ГАНС УКБ с использованием судовой буксируемой антенны. На рис. 5.21 приведена тра-

ектория движения АНПА (левая кривая) и траектория обеспечивающего судна (правая кривая) при глубине моря 100–200 м. Построение траектории обеспечивалось в реальном времени. При



Рис. 5.22. Гидролокационный кадр с обнаруженным подводным объектом

выполнении работ приемная антенна вывешивалась на глубину до 50 м. Траектория определялась относительно опорной точки на обеспечивающем судне.

В результате обзора донной поверхности обнаружено затонувшее судно. По данным ГАНС УКБ определены его координаты и материалы переданы гидрографам (рис. 5.22).

5.2.3. Особенности применения гидроакустических навигационных средств в высокоширотной Арктике

Во всем мире признана перспективность использования подводной робототехники для задач исследования и освоения Арктики [145, 146]. Уникальный опыт практического применения гидроакустических навигационных средств был связан с проведением научных исследований в Арктике с использованием АНПА «Клавесин» [147–149]. В августе 2007 г. в Северном Ледовитом океане на хребте Ломоносова, на глубине около 1500 м, в экспедиции на атомном ледоколе «Россия» АНПА «Клавесин» выполнил исследования дна на площади более 50 км². Погружение и всплытие аппарата осуществлялись через полынью размером около 70 × 150 м при состоянии ледового покрытия примерно 9.5 балла (сплошной лед с отдельными редкими полыньями размером до сотни метров) и при скорости дрейфа ледового поля до 0.5 узла. Целью работ было определение возможности и оценка эффективности применения подводных роботов для исследования батиметрических, физических и геоморфологических характеристик дна Северного Ледовитого океана в условиях сплошного ледового покрытия.





Рис. 5.23. АНПА «Клавесин» на борту атомного ледокола «Россия»

Адаптация навигационных средств АНПА к работе в условиях высокоширотной Арктики

Поскольку АНПА «Клавесин» предназначен для обзорно-поисковых работ в океане на глубинах до 6000 м, для его работы в условиях полярных широт и сплошного ледового покрытия потребовались некоторые изменения в организации средств управления, навигации и связи, способов спуска с борта ледокола и подъема на борт после завершения работ. Конкретно это означало адаптацию всех технических средств и методики проведения работ к экстремальным условиям высокоширотной Арктики [19, 150]. Во-первых, требовалась организация операций спуска и подъема АНПА через полынью, размеры которой ограничены размерами ледокола. При этом должно быть гарантировано возвращение аппарата в точку старта после выполнения многочасовой миссии под полярными льдами. Во-вторых, ледовая база вместе с размещенными на ней средствами навигации дрейфовала со скоростью примерно 900 м/ч, и это обстоятельство следовало учитывать не только в оценке точности навигации, но и в обеспечении надежного возвращения аппарата на борт обеспечивающего судна. Наконец, хорошо известно, что точность угловых измерений магнитных и гироскопических датчиков зависит от географической широты, и, следовательно, при работе в полярных широтах необходима их дополнительная коррекция для минимизации навигационной ошибки.

Кроме того, навигационное обеспечение в условиях подледного использования автономного аппарата не только ключевой фактор эффективного выполнения миссии путем точной координатной привязки проводимых работ, но и в значительной степени это средство оперативного контроля и гарантии возвращения АНПА к обеспечивающему судну. При удалении аппарата от стартовой полыньи на расстояние до 10–15 км важно было обеспечить надежную гидроакустическую связь с судовой антенной. При этом обязательным является оперативный текущий контроль состояния этого канала связи, чтобы избежать рисков, связанных с потерей гидроакустического контакта.

АНПА «Клавесин» оснащен хорошо отработанными гидроакустическими средствами навигации и управления, обеспечивающими его использование в открытой воде и в условиях умеренных широт. Эти средства, описанные в 4.1, включают систему с длинной базой, требующую постановку маяков-ответчиков, систему с ультракороткой базой и систему телеуправления и телеметрии. Последняя обеспечивает передачу команд управления с борта судна на АНПА и передачу данных о состоянии систем АНПА и его местоположении на борт судна по гидроакустическому каналу. Работу систем навигации и управления обеспечивает общее устройство – буксируемый антенный модуль (БАМ). БАМ вывешивается с борта судна на кабель-тросе (рис. 5.24).

К числу основных элементов в общей структуре навигационного оборудования относятся также инерциальная навигационная система (ИНС) и гидроакустический доплеровский лаг. Эти устройства необходимы для счисления пути на борту аппарата, а получаемые расчетные данные передаются по каналу телеметрии на борт судна.

Применение этих систем на Севере в штатных режимах ограничивалось рядом обстоятельств. ГАНС УКБ, работа которой не требует постановки маяков-ответчиков, в штатном составе была оснащена магнитным датчиком



Рис. 5.24. Буксируемый антенный модуль АНПА «Клавесин» в Арктике

курса, который в полярных широтах дает большую погрешность. Постановка в районе работ донных гидроакустических маяков-ответчиков, возвращаемых или разовых, и развертывание ГАНС ДБ в штатном режиме неэффективны из-за значительного дрейфа ледового поля на поверхности. При значительном удалении приводящей акустической антенны, дрейфующей вместе с судном, резко ухудшаются условия гидроакустического контроля и управления работой с борта носителя. Постановка поверхностных маяков ГАНС ДБ также имеет свои недостатки. Во-первых, для определения текущих координат каждого маяка требуется включение в их состав приемника спутниковой навигации, средств передачи координат в пост управления и ввод этих данных для решения навигационной задачи. Во-вторых, для обеспечения нормальной работы маяков с учетом особенностей вертикального распределения скорости звука в арктических широтах необходимо устанавливать маяки на глубинах не менее 250–300 мм. Размеры полыньи и, соответственно, измерительной базы маяков ограничены. При этом неучитываемое смещение маяков, устанавливаемых на гибких фалах, приводит к появлению значительных ошибок и сбоев в работе навигации.

Для работы в Арктике аппаратура ГАНС, описанная в 4.1, в целом не потребовала значительных изменений, однако методика ее работы и элементы программного обеспечения были доработаны [151, 152]. Штатные программные средства АНПА были дополнены рядом специальных функциональных модулей.

1. Разработана система, реализующая процедуру автоматического приведения АНПА на судовую гидроакустическую антенну. Процедура инициализируется при завершении миссии.

2. Изменен стандартный набор команд телеуправления, передаваемых по гидроакустическому каналу связи, для прецизионного управления АНПА при всплытии в полынье.

3. Введен специальный режим стабилизации с помощью вертикальных подруливающих движителей для удержания аппарата на поверхности после окончания миссии при уменьшении его плавучести в условиях опресненного приповерхностного слоя воды.

Наибольшее значение приобретали разработка и отладка системы гидроакустического приведения АНПА к судну, основанные на измерении текущей дальности. После проведенных исследований и натурных экспериментов была установлена последовательность действий, выполняемых АНПА при реализации алгоритма приведения.

На первом этапе АНПА выполняет поисковое движение по траектории в виде окружности, формирует массив значений дальности до судовой антенны в зависимости от текущего курса и определяет направление, соответствующее максимальной скорости уменьшения дальности. Выбрав нужное направление, аппарат движется к судну установленным курсом. При подходе АНПА к судовой антенне на дистанцию не более 100 м аппарат переходит на движение в виде «восьмерки» (в центре которой находится судовая антенна) и ожидает поступление команд с борта судна. Завершающий этап управления при приведении АНПА к полынье выполняется оператором в режиме гидроакустического телеуправления.

Элементы описанного алгоритма были испытаны при подготовке АНПА. Испытания показали, что приведение к носителю совершается с достаточно малыми затратами времени. В проведенном эксперименте при крейсерской скорости 1 м/с средняя скорость приближения к антенне составила с учетом всех движений аппарата 0,57 м/с, без учета начального поискового движения – 0,8 м/с [114]. Для реализации описанного алгоритма приведения потребовалось дополнить стандартный набор команд существующей системы телеуправления командами, предусматривающими следующие действия:

остановка и изменение рабочего горизонта (всплытие) на 15 м;





Рис. 5.25. Пример автоматического приведения АНПА на судовую антенну

остановка и изменение рабочего горизонта (погружение) на 15 м;

- старт процедуры наведения на антенну;

– переход на глубину 50 м с последующей остановкой.

Заданные в командах значения глубин учитывали осадку ледокола и возможную высоту ледовых подводных торосов и должны были минимизировать риски, связанные с всплытием аппарата вблизи носителя и у кромки ледового поля. На рис. 5.25 приведена одна из траекторий движения АНПА при приведении к судовой антенне в открытой воде при начальной дальности 750 м.

Работа ГАНС при выполнении глубоководных пусков АНПА подо льдом

В итоге для навигационного сопровождения АНПА была реализована следующая схема. По контуру полыньи, выбранной для пуска и всплытия АНПА, устанавливались три маяка-ответчика ГАНС ДБ с максимально возможными дистанциями между ними. Координаты маяков определялись в момент их постановки и непосредственно перед стартом АНПА, а затем вводились в навигационную программу в качестве постоянных данных. В ходе выполнения миссии производились периодические измерения положения маяков, которые оперативно вводились в навигационную программу. Текущее положение судна и, соответственно, выставляемой судовой антенны определялось штатным приемником спутниковой навигации. С учетом получаемых данных определялся текущий дрейф ледового поля и оценивалось положение измерительной базы маяков. Фиксировались координаты стартовой точки АНПА на поверхности. Далее, по данным ГАНС ДБ определялись координаты точки старта миссии АНПА у дна и, соответственно, точки начала координат работы бортовой навигационной системы.

В ходе выполнения миссии текущая траектория движения АНПА счислялась по данным бортовых датчиков абсолютной скорости, курса, глубины, крена, дифферента. Во время работы АНПА излучал синхронизированные навигационные сигналы и сигналы телеметрии, а носитель – навигационные сигналы и при необходимости сигналы телеуправления. Для навигационного контроля АНПА при его удалении от носителя контролировались время прихода, абсолютный уровень и отношение сигнал/шум принимаемых навигационных сигналов. По измеренной временной задержке навигационных сигналов определялась прямая дальность «АНПА–носитель» на борту носителя. Контроль за параметрами навигационного сигнала осуществлялся оператором ГАНС. Аналогичный контроль в автоматическом режиме обеспечивался на борту АНПА. В случае значительного ухудшения сигнала или при его потере в течение установленного времени система управления аппарата инициировала переход к программе поиска и приведения аппарата к судну.

По данным телеметрии, передаваемой с борта АНПА по гидроакустическому каналу связи, выполнялось счисление траектории движения АНПА в реальном времени на борту обеспечивающего судна. На навигационном планшете навигатора параллельно отображались траектория дрейфа судна с базой маяков и траектория движения АНПА относительно дрейфующей базы маяков (рис. 5.26).



Рис. 5.26. Траектория движения АНПА в глубоководном запуске подо льдом. А – относительно дна по данным БАНС, Б – относительно дрейфующей базы маяков по данным ГАНС ДБ

Накапливаемая ошибка системы счисления корректировалась по ряду дискретных точек, в которых расчет местоположения АНПА производился по данным ГАНС ДБ с использованием уточненных координат маяков.

После завершения миссии АНПА выполнял процедуру автоматического выхода на приводную судовую гидроакустическую антенну. На заключительной фазе приведения перед всплытием положение АНПА в полынье контролировалось по данным о дальностях аппарата от антенны и каждого маяка. Команды на завершающие процедуры всплытия (подъем с глубины 20 м, а затем с глубины 5 м) подавались при получении минимальной дальности до судовой антенны (не более 20–25 м) и нахождении АНПА в центре полыньи (определяемом по дальностям АНПА от маяков).

В ходе рабочих пусков положение АНПА контролировалось на борту носителя с отображением траектории движения в реальном времени и представлением текущих параметров состояния АНПА – координат, курса, скорости, глубины, высоты, прямой наклонной дальности от судовой антенны.

Описанная схема и методика навигационного обеспечения позволили определять текущее положение АНПА, управлять им, контролировать ход выполнения миссии и обеспечивать точный выход аппарата в полынью для всплытия. На заключительной фазе миссии АНПА, всплытии после 22 ч автономной работы, был обеспечен контроль прямой дальности аппарата от судовой антенны и установленных маяков. Ошибка измерения дальности в этот момент не превышала 10 м, а при выходе на поверхность АНПА находился в 10–15 м от борта носителя и в 20–30 м от судовой антенны.

На основании анализа ряда доступных данных можно дать ориентировочную оценку точности такой навигационной привязки. В ходе продолжительного запуска в течение 22 ч суммарная нескорректированная ошибка бортовой навигационной системы, определенная как расхождение координат точки всплытия, счисленных бортовой навигационной системой, и координат, полученных при обсервации СНС, составила 1370 м, или около 60 м/ч. Эта ошибка была накоплена и формировалась за счет следующих источников: • ошибки определения географических координат стартовой точки начала миссии на дне. При этом координаты точки старта на поверхности устанавливались достаточно точно, но в течение погружения (около 50 мин) АНПА двигался по сложной траектории, и его положение контролировалось ГАНС, использующей дрейфующую базу маяков. Расчетное положение стартовой точки по данным ГАНС корректировалось путем компенсации дрейфа базы маяков с ошибкой около 50 м;

• ошибки бортовой навигационной системы при счислении пути. По данным экспериментов, проведенных во время отладки системы в ходе подготовки к экспедиции, суммарная ошибка счисления составляла до 1 % от пройденного пути, что дает при скорости 1 м/с не более 50 м/ч;

• ошибки счисления пути при всплытии АНПА и во время приведения на глубинах, исключающих возможность работы доплеровского лага. При этом данные о скорости аппарата вырабатывались относительным лагом, точность которого существенно ниже точности доплеровского лага. Общая продолжительность работы системы счисления в режиме приведения была не менее 3 ч, что также сказалось на величине суммарной ошибки.

Уменьшение ошибки достигается прежде всего за счет привязки отдельных точек счисленной траектории к точкам, рассчитанным в этот момент времени по данным ГАНС ДБ с использованием эпизодически уточняемых координат дрейфующих маяков. Ошибка в определении координат, рассчитанных по данным ГАНС ДБ, имеет величину, сравнимую с относительной ошибкой измерения дальностей (не более 1 % для самых неблагоприятных условий работы) и составляет 60 м на дальностях 6000 м. Далее, как уже отмечалось, на борту носителя кроме курса и скорости, необходимых для счисления пути, принимаются телеметрические данные о глубине, высоте, а также непрерывно контролируется прямая дальность АНПА от приводной антенны с точно известными координатами. При знании параметров дрейфа носителя и выполнении аппаратом прямолинейных равномерных галсов перечисленных исходных данных с использованием несложных математических моделей достаточно для определения координат аппарата по изменению дальномерных данных от приводящей антенны. Ошибка определения этих координат составляет примерно 2 % от текущей дальности (для условий проведенных работ – порядка 100 м).

Некоторые результаты глубоководных работ подо льдом

Экспедиция работала на хребте Ломоносова в сложных ледовых условиях. Вначале было выполнено пробное погружение АНПА на глубину до 100 м для балластировки и проверки работы систем. Полученные результаты позволили принять решение о глубоководных пусках. В течение полутора суток далее были сделаны два рабочих погружения с выполнением установленных заданий.

Во время глубоководных погружений по маршруту следования АНПА были получены:

 материалы съемки рельефа морского дна (батиметрические данные);



Рис. 5.27. Траектория рабочего пуска АНПА

данные); – гидролокационные изображе-

ния поверхности морского дна;

 материалы акустического профилирования грунта морского дна;

 – фотографии отдельных участков морского дна;

данные измерения температуры и электропроводности морской воды.

Принципиальное значение имела точная навигационная привязка всех выполненных измерений. Траектория движения АНПА в рабочем запуске показана на рис. 5.27.

Батиметрическая съемка выполнялась при движении аппарата заданными галсами путем прямых измерений глубины аппарата с использованием датчика глубины и измерений расстояния АНПА до дна с использованием эхолокационной системы. При скорости АНПА 1 м/с дискретность полученных данных составляет 1 м. Суммарная ошибка измерения батиметрических данных не превосходила 3 м. Все измерения были привязаны к международной системе координат WGS-84. По данным измерений построены батиметрическая и температурная карты района (рис. 5.28).



Рис. 5.28. Фрагменты построения батиметрической карты (слева) и карты поля температур (справа) при обследовании хребта Ломоносова в Арктике

АНПА также выполнял комплексную геологическую съемку морского дна. Это обеспечивалось синхронно выполненными батиметрическими измерениями, гидролокационной съемкой и профилированием структуры морского дна. Совместное рассмотрение указанных материалов позволяет получить ясное представление о структуре грунта морского дна с учетом его рельефа. На рис. 5.29 дан пример такой картины на хребте Ломоносова. По сути, это разрез морского дна вертикальной плоскостью, наружные контуры которого определяют батиметрический профиль, профилограмма дает структуру грунта, а ГБО-грамма – изображение поверхности дна по обе стороны от разреза.

Получение такой информации с заданными требованиями по точности навигационной привязки и измерительных датчиков является важнейшей задачей каждой страны на континентальном шельфе, и прежде всего в слабо исследованных арктических рай-





Рис. 5.29. Синхронные данные ГБО, акустического профилирования грунта и батиметрии

онах. Эти данные составляют основу описания районов интенсивного освоения и разведки полезных ископаемых. В арктических районах, покрытых льдом, автономные роботы – наиболее эффективный инструмент решения этой задачи.

Опыт применения АНПА для решения задач, связанных с геологической разведкой на больших глубинах и топографической съемкой рельефа дна, демонстрирует большие преимущества АНПА по сравнению с другими видами подводных технических средств. Специалистами признается огромное значение, которое могут иметь АНПА при геологических и геодезических работах в глубоководных районах, богатых залежами полезных ископаемых и отличающихся исключительным разнообразием геологических форм рельефа дна и активных процессов в районах вулканической деятельности.

К перспективным направлениям использования АНПА в области геодезии и геологоразведки можно отнести также исследования придонных аномальных явлений и активных геологических образований океанского дна. Аппараты подобного назначения, кроме обычных задач, могут решать задачи геомагнитной и гравиметрической съемки, акустического профилирования дна, съемки геологических разломов и наблюдения за процессами вулканической деятельности. Практический опыт разработки и использования АНПА в данной области пока еще довольно беден, и сама постановка задач требует проведения сложных технических экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Romeo J., Lester G. Navigation Is Key to AUV Missions // Sea Technology. – 2001. December. – P. 24–29.

2. Ваулин Ю.В., Инзарцев А.В., Каморный А.В., Киселев Л.В., Львов О.Ю., Матвиенко Ю.В., Рылов Н.И. Средства навигации и управления для автономных необитаемых подводных аппаратов // Подводные технологии и средства освоения Мирового океана. – М.: ИД «Оружие и технологии», 2011. – 780 с.

3. Агеев М.Д., Касаткин Б.А., Киселев Л.В., Молоков Ю.Г., Никифоров В.В., Рылов Н.И. Автоматические подводные аппараты. – Л.: Судостроение, 1981. – 248 с.

4. Бородин В.И., Смирнов Г.Е., Толстякова Н.А., Яковлев Г.В. Гидроакустические навигационные средства. – Л.: Судостроение, 1983. – 262 с.

5. Милн П.Х. Гидроакустические системы позиционирования. – Л.: Судостроение, 1989. – 316 с.

 Комляков В.А. Гидроакустические системы с маяками-ответчиками для слежения за буксируемыми подводными комплексами. – Л.: Судостроение, 1997. – С. 39–45.

7. Автономные необитаемые подводные аппараты / под общ. ред. акад. М.Д. Агеева. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – 272 с.

8. Парамонов А.А., Афанасьев В.Н. Гидроакустическая навигационная система ГАНС-М // VI Междунар. науч.-техн. конф. «Современные методы и средства океанологических исследований». – М., 2000. – С. 100–112.

9. Кебкал К.Г., Машошин А.И. Гидроакустические методы позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов // Гироскопия и навигация. – 2016. – № 3 (94). – С. 115–130.

10. Матвиенко Ю.В., Рылов Р.Н., Сидоренко А.В. Гидроакустические средства навигации и телеуправления для автономных необитаемых подводных аппаратов // Подводные технологии. – 2005. – № 1. – С. 20–27.

11. Автономные подводные роботы: системы и технологии / М.Д. Агеев, Л.В. Киселев, Ю.В. Матвиенко и др.; под общ. ред. акад. М.Д. Агеева [отв. ред. Л.В. Киселев]; Ин-т проблем морских технологий. – М.: Наука, 2005. – 398 с. – ISBN 5-02-033526-6.

12. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы технологии, применение. – Владивосток, 2018. – 368 с.

13. Агеев М.Д., Ваулин Ю.В., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В., Рылов Н.И., Щербатюк А.Ф. Системы подводной навигации для АНПА // VIII Междунар. науч.-техн. конф. «Современные методы и средства океанологических исследований». – М., 2003. – Ч. 2. – С. 13–22.

14. Scherbatjuk A. Integrated Positioning System for Underwater Autonomous Vehicle MT-88 // OCEANS 94. – 1994. – Vol. 3. – P. 384–388.

15. Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Матвиенко Ю.В., Ваулин Ю.В. Навигация и управление в подводном пространстве // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 5. – С. 23–28.

16. Kiselyov L.V., Inzartsev A.V., Matviyenko Yu.V., Rylov N.I. Actual Problems of Navigation and Control at Creation of Autonomous Underwater Vehicles // Proceedings of International Conference on Subsea Technologies SubSeaTech'2007, June 25–28, 2007. – St. Petersburg, 2007. – ISBN 5-88303-409-8.

17. Ageev M.D., Kiselev L.V., Shcherbatjuk A.Ph. Integrated positioning system of underwater robot // Intervention'9, ROV'90, Canada. – 1990.

18. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Интегрированная навигационная система автономного подводного робота и опыт ее применения в высоких широтах Арктики // XV СПб. Междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, 26–28 мая 2008 г.

19. Inzartsev A.V., Kiseljev L.V., Matviyenko Yu.V. et al., Integrated Positioning System of Autonomous Underwater Robot and Its Application in High Latitudes of Arctic Zone // Gyroscopy and Navigation. – 2010. – Vol. 1, no. 2. – P. 107–112.

20. Демидин В.М., Матвиенко Ю.В., Плотский В.Д., Серветников М.И. Навигационная система подводного аппарата «Скат» // Тез. докл. I Всесоюз. конф. по исследованию и освоению ресурсов Мирового океана. –Владивосток: Изд-во ДВПИ, 1976.

 Касаткин Б.А., Кобаидзе В.В. Особенности гидроакустической навигации в шельфовой зоне // Подводные аппараты и их системы. – Владивосток: Издво ДВНЦ, 1977 – С. 84–88.

22. Касаткин Б.А., Кобаидзе В.В. Гидроакустическая синхронная дальномерная навигационная система: пат. РФ № 713278. – G01S 9/60. — 1978.

23. Lurton Xavier, Millard Nicholas W. The feasibility of a vary-long baseline acoustic positioning system for AUV // Proceeding of Ocean-94, Brest-France. – 1994. – Vol. 3. – P. 403–408.

24. Касаткин Б.А., Косарев Г.В. Физические основы акустической дальнометрии // Вестник ДВО РАН. – 1998. – № 3. – С. 41–50.

25. Thomson D., Elson S. New Generation Acoustic Positioning Systems // Oceans-2002. – 2002. – P. 1312–1318.

26. Касаткин Б.А., Матвиенко Ю.В., Злобина Н.В., Рылов Р.Н. Принципы построения гидроакустических навигационных систем дальнего радиуса действия // Proceedings of International Conference on Subsea Technologies SubSeaTech'2007, June 25–28, 2007. – St. Petersburg, 2007. – ISBN 5-88303-409-8.

27. Акуличев В.А., Каменев С.И., Моргунов Ю.Н. Применение сложных акустических сигналов в системах связи и управления подводными объектами // ДАН. – 2009. – Т. 426, № 6. – С. 821–823.

28. Буренин А.В., Войтенко Е.А., Матвиенко Ю.В., Моргунов Ю.Н., Рылов Р.Н. Экспериментальные исследования особенностей подводной дальнометрии в шельфовой зоне Японского моря // Подводные исследования и робототехника. – 2009. – № 2 (8). – Владивосток: Дальнаука, 2009. – С. 44–49.

29. Акуличев В.А., Матвиенко Ю.В., Моргунов Ю.Н., Половинка Ю.А., Рылов Р.Н. Пилотный акустический эксперимент по определению координат

подводного объекта в шельфовой зоне Японского моря // ДАН. – 2010. – Т. 433, № 3. – С. 394–396.

30. Бурдинский И.Н., Матвиенко Ю.В., Миронов А.С., Рылов Р.Н О применении сложных сигналов в гидроакустических системах навигации и управления подводными роботами // Подводные исследования и робототехника. – 2008. – № 1. – С. 39–46.

 Матвиенко Ю.В. Статистическая обработка информации гидроакустической навигационной системы с ультракороткой базой // Морские технологии. – Владивосток: Дальнаука, 1998. – Вып. 2. – С. 70–80.

32. Watson M., Loggins C. and Ochi Y.T. A New High Accuracy Super Short Base Line (SSBL) System // Underwater Technology. – Tokyo, Japan, 1998. – P. 210–215.

33. Kebkal K.G., Kebkal O.G., Bannash R., Yakovlev S.G. Performance of Combined USBL Positioning and Communication System Using S2C Technology // Proceeding of the OCTANS 2012 IEEE Yeosu Conference and Exhibition. – Korea, 2012.

34. Zielinski A., Zhou L. Precision acoustic navigation for remotely operated vehicles (ROV) // Polskie Towarzystwo Akustyczne, Hydroacoustics. – Gdansk, 2005. – Vol. 8. – P. 255–264.

35. Матвиенко Ю.В. Навигация подводного робота. Гидроакустические системы с ультракороткой базой. – Palmarium: Academic publishing; Саарбрюкен, Германия, 2013. – 199 с. – ISBN 978-3-659-98684-0.

36. Матвиенко Ю.В., Нургалиев Р.Ф., Рылов Н.И. Гидроакустическая система слежения за местоположением автономного подводного аппарата (АНПА) // Акустика океана: докл. 9-й Школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. – М., 2002. – С. 347–350.

37. Luo Q, Yan X, Ju C, Chen Y, Luo Z. An Ultra-Short Baseline Underwater Positioning System with Kalman Filtering. Sensors (Basel). 2020 Dec 28; 21(1): 1 43. – doi: 10.3390/s21010143. PMID: 33379311; PMCID: PMC7796008.

38. Matvienko Yu.V. Estimation of the Practically Attainable Accuracy of Modern Ultrashort Baseline Hydroacoustic Navigation Systems for Underwater Robots // Gyroscopy and Navigation. – 2023. – Vol. 14, no. 2. – P. 166–175. – doi: 10.1134/ S2075108723020074.

39. Method and device for the monitoring and remote control of unmanned mobile underwater vehicle: Pat. № 5579285. – 1996, Nov. 26.

40. Larsen M.B. Methods and Systems for Navigating under Water: Pat. US2003/0078706 A1, G01C21/00; USA; опубл. 07.09.2001.

41. Desset S., Damus R., Morash J., Bechaz C. Use of GIBs in AUVs for Underwater Archaeology // Sea Technology. – 2003, December. – P. 22–27.

42. Scherbatjuk A. The AUV Positining using Ranges from one Transponder LBL // OCEANS 95. – 1995. – Vol. 3. – P. 1620–1623.

43. Matos A., Cruz N. AUV Navigation and Guidance in a Moving Acoustic Network // Proc. of OCEANS'05 MTS/IEEE. – Brest, France, 2005.

44. Eustice R.M., Singh H., Whitcomb L.L. Synchronous-Clock One-Way-Travel-Time Acoustic Navigation for Underwater Vehicles // Field Robotics, Special Issue on State of the Art in Maritime Autonomous Surface and Underwater Vehicles. – 2011. 45. Машошин А.И. Исследование точности одномаяковой навигации автономных необитаемых подводных аппратов // 23-я СПб. Междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. – СПб., 2016.

46. Curcio J., Leonard J., Vaganay J., Patrikalakis A., Bahr A., Battle D., Schmidt H., Grund M. Experimentsin Moving Baseline Navigationusing Autonomous Surface Craft // Proc. Of OCEANS'05 MTS/IEEE. – Washington, USA, 2005.

47. Twiggs B., Kitts C., Ballou P. Self-Positioning Smart Buoys, The "Un-Buoy" Solution: Logistic Considerations using Autonomous Surface Craft Technology and Improved Communications Infrastructure // Proc. of OCEANS'06 MTS/IEEE. – Boston, USA, 2006.

48. Матвиенко Ю.В., Львов О.Ю. Способ навигационно-информационной поддержки автономного необитаемого подводного аппарата большой автономности, совершающего протяженный подводный переход: пат. РФ № 2687844. – 2019. – Бюл. № 2.

49. Manson B. Wide-area positioning with 1m accuracy // International Ocean Systems. -2001. - P. 15-19.

50. Santos N., Matos A., Cruz N. Navigation of an Autonomous Underwater Vehicle in a Mobile Network // Proc. of OCEANS'08 MTS/IEEE. – Quebec, Canada, 2008.

51. Eustice R.M., Whitcomb L.L., Singh H., Grund M. Experimental Results in Synchronous-Clock One-Way-Travel-Time Acoustic Navigation for Autonomous Underwater Vehicles // Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation. – Rome, Italy, 2007.

52. Касаткин Б.А., Косарев Г.В. Использование траверзного метода для определения абсолютных координат маяков-ответчиков // Морские технологии. – Владивосток: Дальнаука, 1998. – Вып. 2. – С. 65–69.

53. Касаткин Б.А., Косарев Г.В. Анализ точности измерения координат маяков-ответчиков гидроакустической навигационной системы // Морские технологии. – Владивосток: Дальнаука, 1996. – Вып. 1. – С. 60–68.

54. Волков А.Е., Галошин А.И., Густов А.А. Руководство по использованию гидроакустических навигационных систем для определения места судна и подводных технических средств при выполнении морских геологоразведочных работ / Мин-во природных ресурсов. – СПб.: Севморгео, 1998. – 78 с.

55. Матвиенко Ю.В., Рылов Н.И., Рылов Р.Н. Способ определения горизонтальных координат неподвижного подводного источника навигационных сигналов: пат. 2008123343/28 РФ. № 2378663; заявл. 09.06.2008; опубл. 10.01.2010. – Бюл. № 1.

56. Ваулин Ю.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Мокеева И.Г., Рылов Н.И. Особенности координирования донных источников навигационных сигналов с использованием буксируемого антенного модуля // Подводные исследования и робототехника. – Владивосток: Дальнаука, 2018. – № 2 (26). – С. 4–11.

57. Акуличев В.А., Бородин А.Е., Буренин А.В., Моргунов Ю.Н., Стробыкин Д.С. Применение сложных акустических сигналов в дальней навигации подводных объектов // ДАН. – 2007. – Т. 417, № 5. – С. 693–696. 58. Безответных В.В., Буренин А.В., Войтенко Е.А., Моргунов Ю.Н. Оценки эффективной скорости распространения низкочастотных фазоманипулированных сигналов на протяженных трассах при сложных гидролого-акустических условиях и переменном рельефе дна // Подводные исследования и робототехника. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – № 2 (6). – С. 59–63.

59. Burdinskiy I.N., Mironov A.S., Naumov L.A. System Simulation for Digital APS Signal Processing On the Basis of Programmable Array Logic // Signal Transmission, Processing, Sensor and Monitoring Systems: Proceeding of the Korea-Russia Joint-Workshop 2006. – Korea: Obprint ltd., 2006. – P. 115–120.

60. Burdinsky I.N., Mironov A.S., Myagotin A.V. A Multichannel Correlational Detector of Pseudonoise Hydroacoustic Signals // 16th International Conference On Integrated Navigation Systems. – Saint Petersburg: State Research Center of Russia CSRI Electropribor, 2009. – P. 218–219.

61. Карабанов И.В., Бурдинский И.Н., Линник М.А., Миронов А.С. Аппаратная реализация приемника гидроакустической телекоммуникационной системы // 13-я Междунар. конф. «Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA-2011», Москва. – М., 2011. – Вып. XIII-1. – С. 201–204.

62. Матвиенко Ю.В., Рылов Р.Н., Каморный А.В. Экспериментальные исследования модели гидроакустической информационно-навигационной системы подводного робота без навигационных маяков // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения Мирового океана». – Владивосток: Дальнаука, 2005. – С. 212–215.

63. Karabanov I.V., Burdinskiy I.N., Linnik M.A., Mironov A.S. Estimation of different acoustic signals usage efficiency for navigation systems of underwater autonomous vehicles // Proceedings of OCEANS 2011 IEEE Santander Conference and Exhibition. – Santander, 2011.

64. Акуличев В.А., Безответных В.В., Моргунов Ю.Н., Половинка Ю.А. Применение псевдослучайных сигналов для подводной дальнометрии на шельфе // ДАН. – 2010. – Т. 432, № 4. – С. 541–543.

65. Акуличев В.А. Моргунов Ю.Н., Бородин А.Е. Региональная система подводного навигационного обеспечения и дистанционного управления // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2014. –Т. 7, № 2. – С. 36–40.

66. Безответных В.В., Буренин А.В., Войтенко Е.А., Моргунов Ю.Н., Половинка Ю.А. О возможности применения сложных акустических сигналов в задачах дальней навигации подводных объектов // Технические проблемы освоения Мирового океана: материалы науч.-техн. конф. – Владивосток: Дальнаука, 2007. – С. 381–385–410.

67. Акуличев В.А., Безответных В.В., Каменев С.И., Кузьмин Е.В., Моргунов Ю.Н., Нужденко А.В. Акустическая томография процессов в шельфовой зоне моря с использованием сложных сигналов // Акустический журнал. – 2002. – Т. 48, № 1. – С. 5–11.

68. Безответных В.В. Буренин А.В., Моргунов Ю.Н., Половинка Ю.А. Экспериментальные исследования особенностей распространения импульсных сигналов из шельфа в глубокое море // Акустический журнал. – 2009. – Т. 55, № 3. – С. 371–380.

69. Моргунов Ю.Н., Безответных В.В., Буренин А.В., Войтенко Е.А. Исследование влияния гидрологических условий на распространение псевдослучайных сигналов из шельфа в глубокое море // Акустический журнал. – 2016. – Т. 62, № 3. – С. 341–347.

70. Моргунов Ю.Н., Голов А.А., Лебедев М.С. Распространение импульсных псевдослучайных сигналов из шельфа в глубокое море в зимних гидрологических условиях Японского моря // Акустический журнал. – 2017. – Т. 63, № 6. – С. 646–650.

71. Моргунов Ю.Н., Безответных В.В., Буренин А.В., Войтенко Е.А., Голов А.А. Экспериментальное тестирование технологии высокоточной подводной акустической дальнометрии // Акустический журнал. – 2018. – Т. 64, № 2. – С. 191–196.

72. Моргунов Ю.Н., Голов А.А., Каменев С.И., Матвиенко Ю.В. Средства и методы гидролого-акустического обеспечения высокоточного позиционирования подводных объектов на больших дальностях // Акустический журнал. – 2019. – Т. 65, № 6. – С. 793–798.

73. Матвиенко Ю.В., Бурдинский И.Н. Энергетические характеристики гидроакустической навигационной системы большой дальности для автономных подводных аппаратов // Подводные исследования и робототехника. – Владивосток: Дальнаука, 2020. – № 3 (33). – С. 4–13.

74. Евтютов А.П., Митько В.Б. Инженерные расчеты в гидроакустике. – Л.: Судостроение, 1988. – 2-е изд., перераб. и доп. – 287 с.

75. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.

76. Способ позиционирования подводных объектов: пат. РФ № 2469346, МПК G01S 3/80 / Моргунов Ю.Н., Тагильцев А.А., Безответных В.В., Буренин А.В., Голов А.А. – № 2011128643/28; заявл.: 11.07.2011; опубл.: 10.12.2012. – Бюл. № 34.

77. Способ навигации и позиционирования подводных объектов в глубоководном канале на больших дальностях и система для его осуществления: пат. РФ № 2674404 МПК G01S 3/80 / Половинка Ю.А., Максимов А.О.

78. Способ позиционирования подводных объектов: пат. РФ № 2702700 МПК G01S 3/80 / Машошин А.И., Пашкевич И.В., Соколов А.И.

79. Способ позиционирования автономного подводного аппарата в глубоком море: пат. РФ № 2792922, МПК G01S 3/80 / Матвиенко Ю.В., Моргунов Ю.Н. – № 2022120452; заявл.: 26.07.20122.

80. Хворостов Ю.А., Матвиенко Ю.В. Характеристики собственного шумоизлучения малогабаритного АНПА // Подводные исследования и робототехника. – Владивосток: Дальнаука, 2019. – № 4 (30). – С. 58–63.

81. Абонентский приемник в составе гидроакустической системы позиционирования большой дальности для глубокого моря: пат. РФ № 2789636, МПК G01S 3/80 / Матвиенко Ю.В., Бурдинский И.Н. Хворостов Ю.А., Львов О.Ю. – Опубл.: 06.02.2023. – Бюл. № 4.

82. Бортовой блок подводного объекта для определения координат и приема команд управления в гидроакустической навигационной системе большой даль-

ности: пат. РФ № 214384 на полезную модель МПК G01S 3/80 / Матвиенко Ю.В., Бурдинский И.Н. Хворостов Ю.А., Львов О.Ю. – Опубл.: 25.10.2022. – Бюл. № 38.

83. Douglas B. and Pietsch R. Optimal Beamforming Techniques for Imperfectly Calibrated Arrays // Proc. of Ocean-96.

84. Матвиенко Ю.В. Обработка данных в УКБ-пеленгаторе, основанном на несовершенной многоэлементной антенне // VIII Междунар. науч.-техн. конф. «Современные методы и средства океанологических исследований». – М., 2003. – Ч. 1. – С. 24–25.

85. Jinwu Tong, Xiaosu Xu, Lanhua Hou, Yao Li, Jian Wang and Liang Zhang. An Ultra-Short Baseline Positioning Model Based on Rotating Array & Reusing Elements and Its Error Analysis // Sensors. – 2019. – V. 19. – doi: <u>10.3390/c19204373.</u>

86. Матвиенко Ю.В. Оценка практически достижимой точности современных гидроакустических систем с ультракороткой измерительной базой для подводных роботов //. – 2023. – Т. 31, № 2 (121). – С. 106–120.

87. Сосулин Ю.Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации. – М.: Радио и связь, 1992. – С. 134.

88. Матвиенко Ю.В. О точности амплитудных пеленгаторов // Морские технологии. – Владивосток: Дальнаука, 2003. – Вып. 5. – С. 56–62.

89. Смарышев М.Д., Добровольский Ю.Ю. Гидроакустические антенны. Справочник. – Л.: Судостроение, 1984. – С. 171.

90. Касаткин Б.А., Кулинченко С.И., Матвиенко Ю.В., Нургалиев Р.Ф. Исследование характеристик фазового пеленгатора для УКБГАНС // Подводные роботы и их системы. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – Вып. 6. – С. 75–83.

91. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. – М.: Наука, 1970. – 720 с.

92. Касаткин Б.А.Оценка погрешности УКБ-пеленгатора с круговой базой // Морские технологии. – Владивосток: Дальнаука, 1996. – Вып. 1. – С. 69–73.

93. Касаткин Б.А., Матвиенко Ю.В. Способ определения пеленга на источник излучения и устройство для его осуществления: пат. РФ № 2158430. – 2000. – Бюл. изобр. № 33.

94. Austin Thomas C., Stokey Roger. Relative Acoustic Tracking // Sea Technology. – 1998. – P. 21–27.

95. Рылов Н.И. Об определении навигационных параметров в УКБ ГАНС по данным многоэлементной антенны // Морские технологии. – Владивосток: Дальнаука, 2003. – Вып. 5. – С. 46–55.

96. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир,1990. – 584 с.

97. Steele A., Byrne C. High Resolution Array Processing Using Implicit eigenvector Weighting Techniques // IEEE Journal Oceanic Engineering. – 1990. – Vol. 15, no. 1. – P. 8–13.

98. Матвиенко Ю.В., Макаров В.Н., Кулинченко С.И., Нургалиев Р.Ф., Рылов Р.Н. Гидроакустическая навигационная система с ультракороткой базой // Морские технологии. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – Вып. 3. – С. 102–113.

99. Матвиенко Ю.В., Макаров В.Н., Кулинченко С.И., Нургалиев Р.Ф., Рылов Р.Н., Касаткин Б.А. Пеленгатор гидроакустической навигационной системы с ультракороткой базой.: пат. РФ № 2179730. – 2002. –Бюл. изобр. № 5.

100. Usbl-system. – URL:https://www.sonardyne.com.

101. Posidonia 6000. Underwater acoustic positioning system. - URL: www. ixsea-oceano.com.

102. USBL. – URL: https://evologics.de/usbl.

103. Acoustics-Positioning-and-Communication. – www.kongsberg.com/ru/ maritime/products/

104. Матвиенко Ю.В., Макаров В.Н., Кулинченко С.И., Рылов Р.Н., Пеленгатор широкополосных навигационных сигналов // Морские технологии. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – Вып. 3. – С. 114–120.

105. Матвиенко Ю.В. Гидроакустическая навигационная система с ультракороткой измерительной базой: пат. РФ № 2815608. – Опубл. 19.03.2024.

106. Кинкулькин И.Е., Рубцов В.Д., Фабрик М.А. Фазовый метод определения координат. – М., 1979. – 280 с.

107. Глухов Ю.А., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В., Молоков Ю.Г., Никифоров В.В., Рылов Н.И. Использование подводного аппарата «Скат» для автоматизации гидрохимических исследований озера Байкал // Подводные аппараты с программным управлением и их системы. – Владивосток: Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1977.

108. Золотарев В.В., Касаткин Б.А., Косарев Г.В., Кулинченко С.И, Матвиенко Ю.В. Гидроакустический комплекс для глубоководного автономного необитаемого подводного аппарата // Сб. тр. Х сессии РАО. – М., 2000.

109. Gestone J.A., Cyr R.J., Roesler G., George E.S. Recent developments in acoustic underwater navigation // Journal of Navigation. -1977. - V. 30, N 2. - P. 246-280.

110. Агеев М.Д., Касаткин Б.А., Матвиенко Ю.В., Рылов Р.Н., Рылов Н.И. Гидроакустические средства навигации подводного робота // VIII Междунар. науч.-техн. конф. «Современные методы и средства океанологических исследований». – М.: ИО РАН, 2003.

111. Матвиенко Ю.В., Макаров В.Н., Кулинченко С.И., Кузьмин А.В. Приемный тракт импульсного высокоточного доплеровского лага: пат. РФ № 2120131, МПК Н04R1/44. – 1998.

112. Матвиенко Ю.В. Антенный модуль прецизионного доплеровского лага для глубоководного подводного аппарата: пат. РФ № 2477011. МПК H04R1/44; опубл.: 27.02.2013. – Бюл. № 6.

113. Inzartsev A.V., Matvienko Yuri, Pavin A.M., Vaulin Yu.V. and Scherbatyuk A.Ph. Algorithms of Autonomous Docking System Operation for Long Term AUV // Proceedings of 14th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST05), August 21–24, 2005, Durham, New Hampshire, USA.

114. Павин А.М. Автоматическое приведение автономного подводного робота к гидроакустическому маяку // Подводные исследования и робототехника. – 2008. – № 1 (5). – С. 32–38.

115. Pavin Alexander, Inzartsev Alexander, Matvienko Yuri. Experience of AUV Automatic Homing to Hydroacoustic Transponder // Proceedings of 6th International Symposium on Underwater Technology (UT2009), April 21–24, 2009, Wuxi, China. – P. 201–206. 116. Купцов Е.А., Матвиенко Ю.В. Мобильный испытательный морской метрологический полигон ИПМТ ДВО РАН // Пятая Всерос. науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения Мирового океана». – Владивосток: Дальнаука, 2013. – С. 56–63.

117. Злобина Н.В., Касаткин Б.А., Матвиенко Ю.В., Рылов Р.Н. Физические основы и метрологическое обеспечение гидроакустической дальнометрии в мелком море // Приборы. – 2006. – № 11. – С. 55–60.

118. Матвиенко Ю.В., Рылов Н.И., Рылов Р.Н. Метрологическое обоснование аттестации систем гидроакустического навигационного комплекса АНПА в мелком море // Пятая Рос. науч.-техн. конф. «Современное состояние и проблемы навигации и океанографии» (НО-2004, г. Санкт-Петербург).

119. Ваулин Ю.В., Матвиенко Ю.В., Каморный А.В. Оценка характеристик навигационных средств подводных роботов в условиях полигона // Материалы Шестой Всерос. науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения Мирового океана». – Владивосток: Дальнаука, 2015. – С. 107–112.

120. Матвиенко Ю.В., Ваулин Ю.В., Каморный А.В. Градуировка навигационных средств подводных роботов // Подводные исследования и робототехника. – 2015. – № 1 (19). – С. 16–23.

121. Kinsey J.C., Whitcomb L.L. Preliminary Experiments with a Calibration Technique for Gyro and Doppler Navigation Sensors for Precision Underwater Navigation // Proceeding of MTS/IEEE OCEANS-97.

122. Opderbecke J. At-sea Calibration of a USBL Underwater Vehicle Positining System. – Oceans'2000.

123. Туфанов И.Е., Щербатюк А.Ф. Разработка алгоритмов группового поведения АНПА в задаче обследования локальных неоднородностей морской среды // Управление большими системами. – 2012. – № 36. – С. 262–284.

124. Ваулин Ю.В., Дубровин Ф.С., Щербатюк Д.А., Щербатюк А.Ф. О методах обеспечения навигации групп АНПА. Краткий обзор // Подводные исследования и робототехника. – 2019. – № 4 (30). – С. 27–36.

125. Gao R., Chitre M. Cooperative Positioning using Range – Only Measurements Between Two AUVs // Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS 2010. Sydney, NSW, Australia, 2010. – P. 1–6.

126. Zhang L., Liu M., Zhang F. Cooperative Localization Method for AUV Using Acoustic Communication Measurement // Advanced Engineering Forum. – 2012. – Vol. 4. – P. 227–231.

127. Scherbatyuk A., Sergeenko N., Dubrovin F. Some Algorithms of Cooperative AUV Navigation with Mobile Surface Beacon// OCEANS 2013 MTS/IEEE Conference, September 23–27, 2013. – San Diego, USA. – ISBN CD-ROM: 978-0-933957-40-4.

128. Матвиенко Ю.В., Щербатюк А.Ф., Переселков С.А., Кузькин В.М., Ткаченко С.А., Рыбянец П.В. Способ навигационной поддержки группы специализированных подводных аппаратов, выполняющих общую миссию в мелководной акватории. Патент на изобретение № 2819199. Заявка № 2023129818. Приоритет изобретения 17 ноября 2023 г. Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 15 мая 2024 г. 129. Матвиенко Ю.В., Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Львов О.Ю. О проекте создания подводного робототехнического комплекса для исследования предельных глубин океана // Подводные исследования и робототехника. – 2016. – № 2 (22). – С. 4–12.

130. Матвиенко Ю.В, Ваулин Ю.В. The navigation support of autonomous underwater vehicles for extreme ocean depths // 23-rd Saint Petersburg Conference on Integrated Navigation Systems. – 2016. – Р. 422–424.

131. Матвиенко Ю.В., Львов О.Ю., Борейко А.А. Способ навигационно-информационной поддержки глубоководного автономного необитаемого подводного аппарата: пат. РФ № 2689281. – 2019. – Бюл. изобр. № 3.

132. Матвиенко Ю.В., Ремезков А.В. Концепция создания роботизированного комплекса обследования и мониторинга технического состояния объектов подводной добычи // Газовая промышленность. Автоматизация. – 2020. – № 2(802). – С. 30–37.

133. Матвиенко Ю.В. Способ навигационно-информационной поддержки автономного необитаемого подводного аппарата, выполняющего мониторинг подводного добычного комплекса: пат. 2021108665 РФ. № 2756668; заявл. 31.03.2021; опубл. 04.10.2021. – Бюл. № 20.

134. Борейко А.А., Матвиенко Ю.В., Ремезков А.В. Система мониторинга технического состояния подводного добычного комплекса: пат. РФ № 2774662; заявл. 11.10.2021; опубл. 21.06.2022. – Бюл. № 10.

135. Матвиенко Ю.В., Рылов Н.И., Рылов Р.Н., Каморный А.В. Гидроакустическая навигационная система подводного робота без опорных навигационных маяков // Подводные исследования и робототехника. – 2009. – № 1. – С. 15–21.

136. Матвиенко Ю.В., Нургалиев Р.Ф., Рылов Н.И. Гидроакустическая система слежения за местоположением автономного подводного аппарата (АНПА) // Акустика океана: доклад 9-й Школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. – М., 2002. – С. 347–350.

137. Матвиенко Ю.В., Каморный А.В., Кузьмин А.В. Нургалиев Р.Ф., Рылов Р.Н Способ навигационного обеспечения автономного подводного робота контролируемого с борта обеспечивающего судна: пат. РФ № 2344435. – 2009. – Бюл. изобр. № 2.

138. Наумов Л.А., Матвиенко Ю.В. Подводные робототехнические комплексы для обзорно-поисковых работ на шельфе // Пятая Всерос. науч. – техн. конф. «Технические проблемы освоения Мирового океана». – Владивосток: Дальнаука, 2013. – С. 4–7.

139. Матвиенко Ю.В., Борейко А.А., Ваулин Ю.В., Костенко В.В., Львов О.Ю. Комплекс робототехнических средств для выполнения поисковых работ и обследования подводной инфраструктуры на шельфе // Подводные исследования и робототехника. – 2015. – № 1 (19). – С. 4–16.

140. Кузнецов О.Л., Матвиенко Ю.В., Рылов Н.И., Наумов Л.А. Опыт широкомасштабного поиска подводного потенциально опасного объекта в Охотском море // Подводные исследования и робототехника. – 2010. – № 2 (10). – С. 36–43.

141. Матвиенко Ю.В. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Щербатюк А.Ф. Перспективы повышения эффективности автономных подводных роботов // Изв. ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск «Перспективные системы и задачи управления». – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2016. – № 1. – С. 123–141. – ISSN 1999-9429.

142. Инзарцев А.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Рылов Н.И. Мониторинг морского дна с применением технологий интеллектуальной обработки данных поисковых устройств на борту автономного необитаемого подводного аппарата // Подводные исследования и робототехника. – 2015. – № 2 (20). – С. 20–27.

143. Inzartsev Alexander, Pavin Alexander, Matvienko Victor. AUV Application for Inspection of Partly Silted Underwater Cables // Proceedings of 6th International Symposium on Underwater Technology (UT2009), April 21–24, 2009, Wuxi, China. – P. 284–292.

144. Борейко А.А., Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Рылов Н.И. Научно-технические проблемы, достижения и приоритетные направления развития многофункциональных подводных робототехнических комплексов // Освоение морских глубин. – М.: ИД «Оружие и технологии», 2018. – С. 277–282.

145. Uliana M., Andreucci F., Papalia B. The Navigation System of an Autonomous Vehicle for Antarctic Exploration // Proceeding of MTSIEEE OCEANS-97.

146. Борейко А.А., Сергиенко В.И., Матвиенко Ю.В. Перспективы использования подводной робототехники для задач исследования и освоения Арктики // Доклад на научной сессии Междунар. арктич. саммита. – М.: МАДИ, 2022.

147. Буриличев А.В., Ефременко С.В., Наумов Л.А., Рылов Н.И., Матвиенко Ю.В. Выполнение исследовательских работ на хребте Ломоносова в Северном Ледовитом океане с использованием автономного необитаемого подводного аппарата «Клавесин» // IX Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», Санкт-Петербург, 27–29 мая 2008.

148. Naumov L.A., Rylov N.I., Matvienko Y.V., Inzartsev A.V., Lvov O.Yu. Scientific Research Over Lomonosov Range In Arctic Zone With The Help Of Autonomous Unmanned Underwater Vehicle (Auv) OCEANS-08 MTS/IEEE, Quebec, 14–18 Sept. 2008.

149. Инзарцев А.В., Каморный А.В., Львов О.Ю., Матвиенко Ю.В., Рылов Н.И. Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике // Подводные исследования и робототехника – 2007. – № 2. – С. 5–14.

150. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Навигационный комплекс автономного подводного робота и особенности его применения в условиях Арктики // Подводные исследования и робототехника. – 2008. – № 1 (5). – С. 24–31.

151. Рылов Н.И., Матвиенко Ю.В., Рылов Р.Н., Каморный А.В. Особенности применения гидроакустических средств навигации подводного робота при работе подо льдом в полярных широтах // IX Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», Санкт-Петербург, 27–29 мая 2008 г.

152. Naumov L.A., Rylov N.I., Matvienko Y.V. Peculiarities of Use of Hydroacoustic Navigation Facilities of Autonomic Underwater Robot Working Under Ice Beyond Polar Circle 19-th ISTC-Korea Workshop 2009 Gwangju, Korea.

СОКРАЩЕНИЯ

ГАНС	Гидроакустическая навигационная система
ГАНС ДБ	Гидроакустическая навигационная система с длинной базой
ГАНС БД	Гидроакустическая навигационная система большой дальности
ГАНС УКБ	Гидроакустическая навигационная система с ультракороткой базой
ГАСС	Гидроакустическая система связи
МО	Маяк-ответчик
БАМ	Буксируемый антенный модуль
БАНС	Бортовая автономная навигационная система
CHC	Спутниковая навигационная система
КНС	Комплексированная навигационная система
ИНС	Инерциальная навигационная система
АНПА	Автономный необитаемый подводный аппарат
ТНПА	Телеуправляемый необитаемый подводный аппарат
СПА	Специализированный подводный аппарат
OC	Обеспечивающее судно
ТУ и ТМ	Телеуправление и телеметрия
ПЗК	Подводный звуковой канал
XH	Характеристика направленности
ГБО	Гидролокатор бокового обзора
ГСО	Гидролокатор секторного обзора
НИП	Навигационно-информационная поддержка

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ СОЗДАНИЯ НАВИ- ГАЦИОННЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПОДВОДНОЙ РОБО- ТОТЕХНИКИ	7
1.1. Методы и средства формирования навигационной информации полволных роботов	7
1.1.1. Конфигурация навигационного оборудования полволного робота	10
1.1.2. Комплексирование навигационных данных	15
1.2. Особенности гидроакустических средств в составе	
навигационного оборудования подводных роботов	18
1.2.1. ГАНС ДБ	20
1.2.2. TAHU YKB	24
рудования ГАНС в комплексе АНПА	28
Глава 2. ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ ДАЛЬНОМЕРНЫЕ НАВИ-	
ГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ	33
2.1. Оценки основных характеристик дальномерной ГАНС	33
2.1.1. Об эффективной скорости в задачах гидроаку-	22
2.1.2. Оценки погрешности определения координат в	55
ГАНС ЛБ	39
2.1.3. Задача координатной привязки опорных точек	
ГАНС	44
2.2. Развитие технологий гидроакустической навигации	
за счет применения сложных сигналов	54
2.2.1. Применение сложных сигналов для расши-	
рения функциональных возможностей суще-	54
2.2.2. Системы навигационного обеспечения общир-	54
ных мелковолных районов	73
2.2.3. Гидроакустические дальномерные системы	10
большой дальности	89
2.2.4. Навигационный приемник для абонентов	
ГАНС БД	105

Глава 3. НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ С УЛЬТРАКОРОТ-	117
2 1 A	11/
5.1. Анализ основных методов решения навигационной	117
задачи системами с ультракороткой базой	11/
3.1.1. Амплитудные методы определения угломер-	120
нои информации малогабаритными антеннами	120
3.1.2. Многоканальные системы фазового пеленгова-	105
	125
3.1.3. Пеленгование источника навигационных сиг-	
налов с использованием круговых антенн	131
3.2. Статистическая обработка информации в системах с	
многоэлементными антеннами	134
3.2.1. Решение задачи пеленгования методом макси-	
мального правдоподобия	135
3.2.2. Уравнения пеленгования для многоэлемент-	
ных антенн различной конфигурации	141
3.2.3. Приемник навигационных сигналов ГАНС УКБ	151
3.3. Особенности применения сложных сигналов в угло-	
мерных системах с ультракороткой базой	158
3.3.1. Структура системы	158
3.3.2. Основные расчетные соотношения	163
3.3.3. Экспериментальные оценки точности	167
3.4. Оценки точности угловых измерений многоэлемент-	
ными круговыми антеннами	171
3.4.1. Конфигурация антенны и оценка потенциаль-	
ной точности	171
3.4.2. Источники систематической составляющей	
погрешности угловых измерений	175
3.4.3. Оценка систематической составляющей по-	
грешности определения пеленга в контроли-	
руемых условиях гидроакустического бассейна	180
Глава 4. ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И АТТЕСТАЦИИ ГАНС	186
4.1. Гидроакустические навигационные системы ИПМТ	
ДВО РАН для подводных роботов	186
4.1.1. История разработки	186
4.1.2. Гидроакустический навигационный комплекс.	190
4.1.3. Основные характеристики систем гидроакус-	
тического навигашионного комплекса	196
4.2. Технологии оценки характеристик ГАНС в условиях	
мелкого моря	203
4.2.1. Градуировка ГАНС ДБ в условиях полигона	208

4.2.2. Аттестация навигационного комплекса в усло-	
виях мелководного полигона	2
4.2.3. Методы исследования точности ультракорот-	
кобазисной навигационной системы в услови-	
ях мелкого моря	2
4.3 Проверка характеристик ГАНС в глубоком море	2
4.3.1 ГАНС ЛБ	2
4.3.2. Оценка характеристик ГАНС УКБ в условиях	-
глубокого моря	2
	-
Глава 5. ОРГАНИЗАЦИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ ГАНС В СОСТА-	
ВЕ КОМПЛЕКСОВ АНПА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ	
РЕАЛЬНЫХ РАБОТ	2
5.1. Методы организации ГАНС в различных условиях	
применения АНПА	2
5.1.1. Доработка ГАНС ДБ для навигационного со-	
провождения двух аппаратов в одной аквато-	
рии	2
5.1.2. Навигационная поддержка группировки робо-	
тов в общей акватории	2
5.1.3. Организация навигации АНПА большой авто-	
номности, совершающего протяженный под-	
водный переход	2
5.1.4. Особенности создания системы навигации и	
управления глубоководного АНПА	2
5.15. Стационарная система навигации в локальном	
районе	2
5.1.6. Средства контроля АНПА с борта обеспечива-	
ющего судна	2
5.2. Применение ГАНС в составе комплексов АНПА для	
выполнения реальных работ	2
5.2.1. Групповая операция подводных роботов по по-	
иску малоразмерной цели	2
5.2.2. Выполнение поисковых и обследовательских	
операций на большой площади	2
5.2.3. Особенности применения гидроакустических	
навигационных средств в высокоширотной	
Арктике	2
т П	_
литература	2

Научное издание

Юрий Викторович МАТВИЕНКО

ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА НАВИГАЦИИ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ. ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ

Редактор Н.В. Давыденко Верстка И.В. Миромановой

Подписано в печать 15.12.2024 г. Формат 60×90/16. Усл. печ. 20,0 л. Уч.-из. л. 19,6 Тираж 100 экз. Заказ 150

> Индивидуальный предприниматель Шатских Галина Александровна 692756 г. Артем, площадь Ленина, 7/1