

### **СЕКЦИЯ 3**

Современные методы обработки сигналов, их применение для повышения эффективности и качества функционирования систем подводных объектов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ  
ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ВРЕМЕН ПРИХОДОВ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ  
В УСЛОВИЯХ МНОГОЛУЧЕВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ

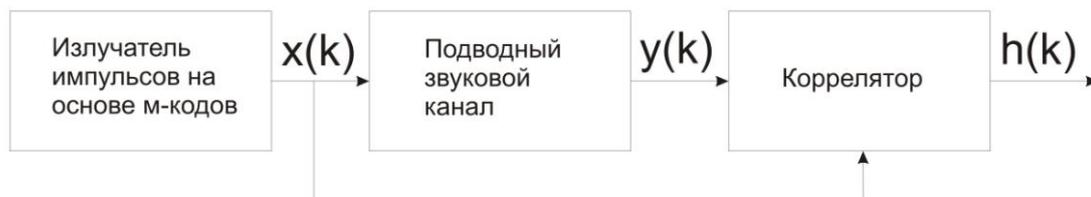
**Ю.Н. Моргунов, Ю.А. Половинка, А.В. Буренин,  
Д.С. Стробыкин, А.А. Азаров, М.С. Лебедев**

Учреждение Российской академии наук Тихоокеанский океанологический институт  
им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН  
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, тел.: (423) 231-16-31, факс: (423) 231-25-73,  
e-mail: yrivlad@poi.dvo.ru

В работе анализируются статистические характеристики распространяющихся вдоль стационарных (в пространстве) трасс импульсных акустических сигналов. Целью исследований является оптимизация измерений и обработки параметров сигналов, распространяющихся в условиях малых глубин и многолучевости приходов. На основании результатов обработки данных экспериментов в мелководных акваториях показано, что динамический во времени расчет статистических характеристик принимаемых гидрофонами сигналов позволяет определять оптимальный временной диапазон анализа и «сопровождать» его вариации на оси времен прихода сигналов.

Исследование и освоение прибрежных районов океана в последние годы требует создания новых и расширения возможностей используемых систем и средств, основанных на принципах подводной акустики. В отличие от распространения звука в глубоком океане, для акустики мелкого моря имеется ряд проблем, обусловленных распространением звука в условиях многолучевости и существенного влияния свойств границ волноводов на характеристики акустических сигналов. Без корректного учета влияния указанных факторов на характеристики используемых в акустических системах сигналов невозможно совершенствование используемых технических систем и создание новых для работы в сложных гидрологических условиях мелководных водоемов. В данной работе рассмотрены результаты статистической обработки данных амплитудно-временных характеристик импульсных акустических сигналов для различных гидрологических условий и различных мелководных акваторий. В экспериментах использовалась схема импульсного зондирования среды с измерением времени распространения акустических сигналов вдоль стационарных трасс с помощью установленных вблизи дна излучателей и гидрофонов [1]. С целью повышения точности измерений, применялись импульсные фазоманипулированные на основании м-кодов сигналы. Экспериментальные данные для расчетов когерентности и анализа стабильности во времени свойств акустических каналов получены при проведении комплексных акустико-гидрологических исследований распространения звука на шельфе Японского моря, в бухте Витязь и в Корейском проливе в 2005-2010 гг.

Функция отклика акустического канала в эксперименте  $\{h(k)\}$  определялась с использованием импульсных сигналов с фазовой манипуляцией на основе м-кодов. Блок-схема расчета  $\{h(k)\}$  приведена на рис. 1.



**Рис. 1.** Блок-схема расчета функции отклика акустического канала

Фазоманипулированный на основании м-кода акустический импульс  $x(k)$  с центральной частотой 2500 Гц излучался в среду. Функция отклика канала  $h(k)$  рассчитывалась в корреляторе путем взаимной корреляции (свертки) излученного сигнала  $x(k)$  и принятого гидрофоном сигнала  $y(k)$ . Взаимная корреляция для дискретных значений функций  $x(k)$  и  $y(k)$  может быть записана в виде:

$$\{h(k)\} \equiv \phi_{xy}(k) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x(j-k) \bullet y(j) \quad (1)$$

Измерения ФОК в рассматриваемых экспериментах выполнялись с периодичностью один раз в минуту. На рис. 2 приведены измеренные в экспериментах функции отклика акустических каналов для трех мелководных акваторий за период времени порядка 24 часов.

Отметим значительную амплитудную изменчивость для всех представленных на рис. 1 функций отклика акустических каналов (ФОК). Значения амплитуд ФОК изменяются в 10 раз для одних и тех же кластеров за время проведения конкретных экспериментов. Стабильность времен приходов первых 6-7 кластеров за период наблюдений достаточно высокая. В тоже время для кластеров с 8 по 15-й видна значительная временная изменчивость, которая коррелирует с фазами прилива.

Идентификация по углам выхода и траекториям собственных лучей, импульсов формирующих ФОК, была выполнена путем численного моделирования в рамках лучевого приближения по параметрам эксперимента и гидрологическим параметрам среды. Общей чертой ФОК для всех экспериментов является то, что параметры собственных лучей, по которым происходит распространение сигналов, имеют близкие значения: по углам выхода – это диапазон +/- 20 градусов и по числу отражений от поверхности и от дна – это количество от 0 до 15-18.

Статистический анализ проводился в представлении амплитудно-временных последовательностей ФОК в виде ансамблей случайных реализаций  $p(t_i)$ . Если совместно рассматривать две случайные величины, в нашем случае  $p(t_i)$  и  $p(t_i + \tau)$ , между ними может существовать, либо отсутствовать статистическая связь. Отсутствие такой связи означает, что плотность вероятности одной случайной величины не зависит от того, какое значение принимает другая случайная величина. Двумерная плотность вероятности при этом представляет собой произведение одномерных плотностей вероятности:

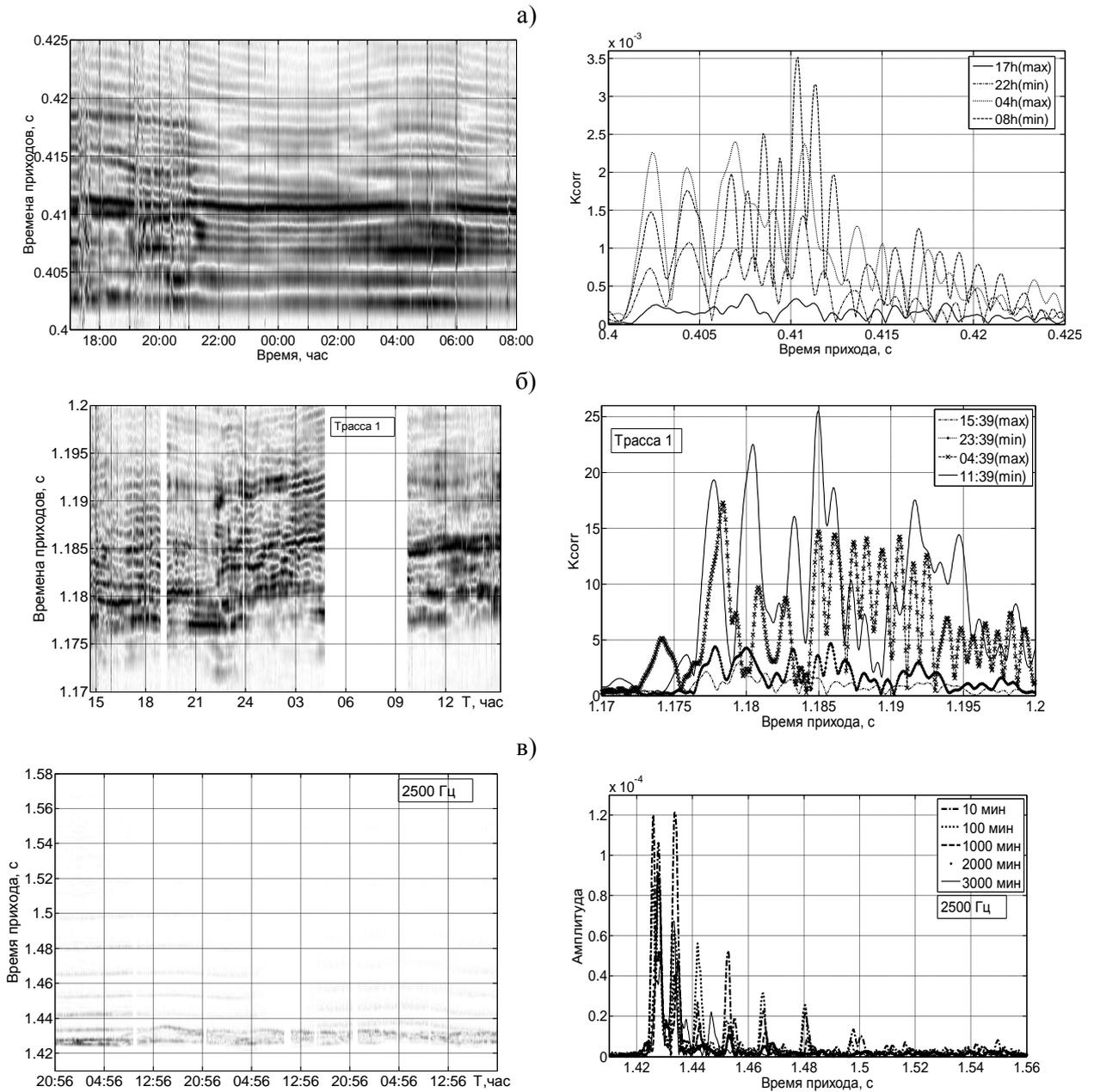
$$p(t, t + \tau) = p_1(t) \times p_2(t + \tau) \quad (2)$$

Выражение (2) означает условие статистической независимости случайных величин. При наличии статистической связи между случайными величинами, статистические свойства каждой из них зависят от значения, принимаемого другой случайной величиной. Эта связь может быть сильной, слабой, линейной или нелинейной. Мерой линейной статистической связи между случайными величинами является коэффициент корреляции:

$$r_{12} = \frac{M\{p(t)p(t+\tau)\} - M\{p(t)\}M\{p(t+\tau)\}}{\sqrt{D\{p(t)\}D\{p(t+\tau)\}}} \quad (3),$$

где  $M\{\}$  и  $D\{\}$  математическое ожидание и дисперсия процессов, соответственно. Можно показать, что  $|r_{12}| \leq 1$ . Предельные значения  $\pm 1$  достигаются, если реализации случайных величин жестко связаны линейным соотношением  $p(t) = a \times p(t + \tau) + b$ , где  $a$  и  $b$  – некоторые константы. Знак коэффициента корреляции при этом совпадает со знаком множителя  $a$ . Равенство коэффициента корреляции нулю свидетельствует об отсутствии линейной статистической связи между случайными величинами. Как следует из (2) математическое ожидание произведения случайных величин равно произведению их математических ожиданий:

$$M\{p(t)p(t+\tau)\} = M\{p(t)\}M\{p(t+\tau)\} \quad (4).$$



**Рис. 2.** Передаточные функции акустических каналов во временной области (левые панели) и результаты корреляционной свертки излученных и принятых импульсных акустических сигналов (правые панели): а) для трасс в Корейском проливе, б) в бухте Витязь, в) на шельфе Японского моря

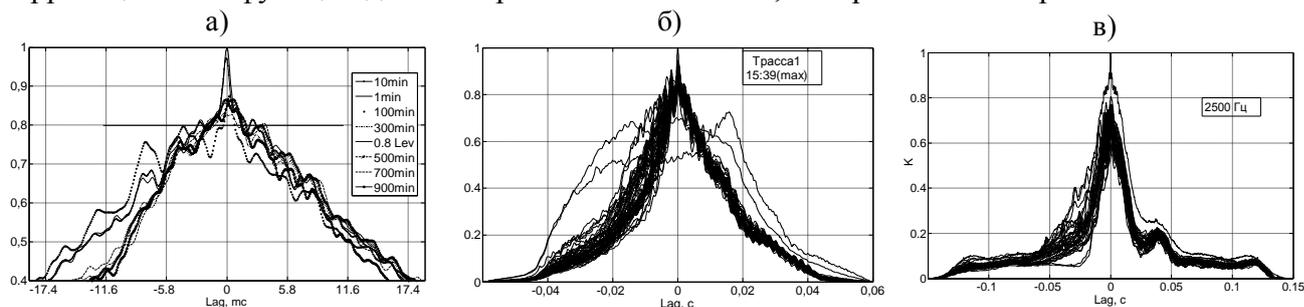
Из статистической независимости следует некоррелированность случайных величин. Но отсутствие корреляции случайных величин не означает их независимости.

В работе [2] также предлагается метод оценки времени когерентности для широкополосных сигналов, имеющих времена задержки  $\tau$ :

$$\rho(t, \tau) = \left\langle \frac{[p^*(t) \otimes p(t + \tau)]_{\max}}{\sqrt{[p^*(t) \otimes p(t)]_{\max} [p^*(t + \tau) \otimes p(t + \tau)]_{\max}}} \right\rangle \quad (5),$$

где  $\left[ p^*(t) \otimes p(t+\tau) \right]_{\max}$  – это максимальное значение взаимной корреляции двух временных выборок или максимум в свертке обращенного во времени сигнала (обозначенного  $*$ ) с другим сигналом. Выражение (5) следует из выражения (3) и является частным случаем для коэффициента корреляции  $r_{12}$ .

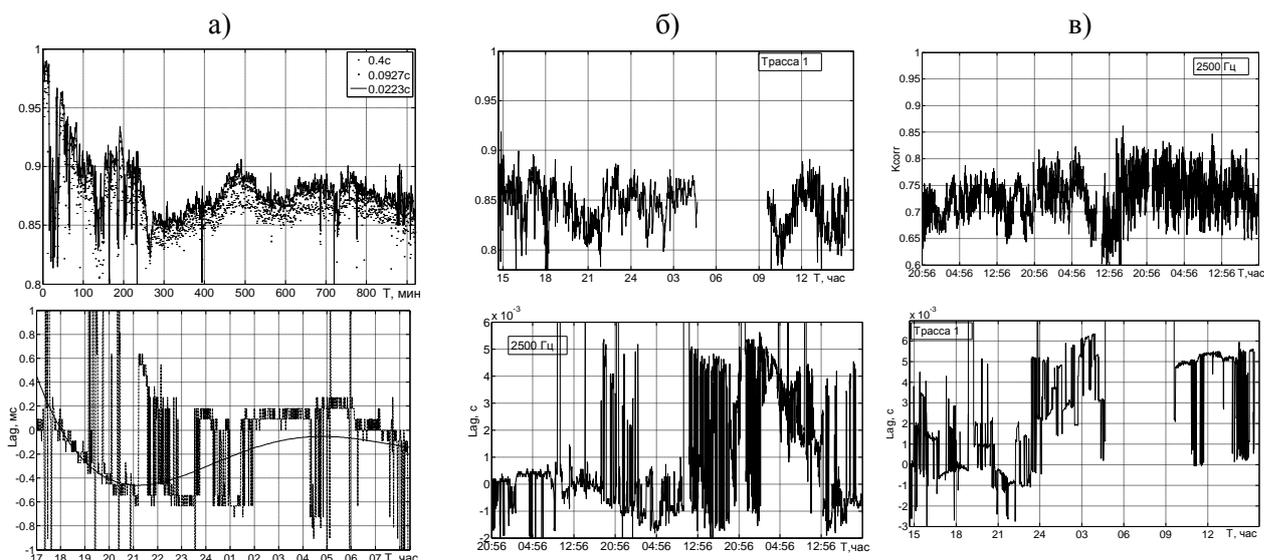
Статистическая обработка функций отклика канала в данной работе проводилась в вычислительной среде Matlab с использованием программ cov, covcoeff, xcov, xcovf, реализующих алгоритмы расчета взаимных корреляционных функций и коэффициентов корреляции в соответствии с формулами (1)-(4). На рис. 3 приведены рассчитанные взаимно корреляционные функции для экспериментальных ФОК, изображенных на рис. 2.



**Рис. 3.** Функции взаимной корреляции ФОК по результатам экспериментов: а) в Корейском проливе, б) в бухте Витязь, в) на Шельфе Японского моря

В качестве одного из результатов анализа отметим, что для одних и тех же параметров импульсных сигналов (частота 2500 Гц, длина м-кода 511 символов, кодирование 4-я периодами на символ) вид взаимно корреляционных функций для различных каналов (акваторий) различен. В то же время корреляция выше уровня 0,65 наблюдается для всех рассматриваемых случаев.

Расчет коэффициентов корреляции и их лагов во времени (уравнение 3) позволяет количественно оценить временные периоды для заданных значений коэффициента корреляции, а также выделить «медленные» перемещения всей ФОК вдоль оси времен приходов, в зависимости от гидрофизических процессов в конкретных акваториях. На рис. 4. приведены результаты расчетов коэффициентов корреляции и лагов во времени для рассматриваемых в работе ФОК. Часть результатов по динамике во времени коэффициентов корреляции и лагов для различных акваторий сведена в таблицу 1. Представленные на графиках рис. 4 и в таблице 1 результаты обработки свидетельствуют о стабильности структуры ФОК в мелководных акваториях со значениями коэффициента корреляции на уровне 0,65-0,8. То же относится и к временным лагам коэффициентов корреляции. Значения лагов находятся в диапазоне 0,15-6,0 мс, практически во всем диапазоне времен наблюдений. В диапазоне указанных значений коэффициентов корреляции и лагов имеется возможность их использования для идентификации принимаемого сигнала и определения точного времени прихода. В данном подходе улучшается соотношение сигнал/шум и разрешение по времени, за счет увеличения периода анализа. Данную методику можно использовать для систем позиционирования, акустической томографии и некогерентной передачи информации, проводя «подстройку» интервала анализа маски – то есть, корректируя опорную ФОК, при снижении коэффициента корреляции, например, ниже уровня 0,7.



**Рис. 4.** Коэффициенты корреляции и лаги для ФОК по результатам экспериментов: а) в Корейском проливе, б) в бухте Витязь, в) на Шельфе Японского моря

**Таблица 1.** Временная изменчивость коэффициентов корреляции и лагов

Район работ	<i>Kcorr</i>			<i>Lag</i>		
	0,95	0,8	0,65	60 мин	180 мин	900 мин
Корейский пролив	60 мин	900 мин	N	0,15 мс	0,5 мс	1,0 мс
Бухта Витязь	5 мин	1440 мин	N	1,0 мс	2,0 мс	6,0 мс
Шельф Японского моря	1 мин	N	4300	2,0 мс	2,0 мс	2,5 мс

Для работы в рамках когерентных схем передачи информации или позиционирования в мелководных акваториях сложность заключается в небольшом времени высокой когерентности (порядка 0,95) ФОК. В этом случае необходимо более часто проводить коррекцию опорной ФОК.

В заключение приведем результаты оценки времени анализа ФОК на точность определения коэффициентов корреляции. На рис. 4, а на верхней панели приведены результаты расчета коэффициентов корреляции ФОК в Корейском проливе с периодами анализа 0,4 с, 0,0927 с и 0,0223 с. Рассчитанные коэффициенты корреляции для времени анализа 0,0223 с на 3-5 % выше, чем для времени анализа 0,4 с. Таким образом, указанный временной диапазон включает все значимые амплитуды приходов в ФОК и является оптимальным как по точности, так и по эффективности, поскольку значительно сокращается количество выполняемых операций и время расчета. Выбор оптимального времени анализа ФОК определяется в каждом конкретном случае и зависит от качества используемой аппаратуры и уровня окружающих шумов в исследуемой акватории.

Работа выполнена с частичной поддержкой РФФИ (проект 09-05-00074-а) и гранта Президента РФ для поддержки научных школ (НШ-3641.2010.5).

## Литература

1. Akulich V.A., Bezotvetnykh V.V., Burenin A.A., Voytenko E.A., Kamenev S.I., Morgunov Yu.N., Polovinka Yu.A., Strobikin D.S. Remote Acoustic Sensing Methods for Studies in Oceanology // Ocean Science Journal. 2006. V. 41, №2. P.105-111.
2. Yang T.C. Measurements of temporal coherence of sound transmission through shallow water // J.Acoust.Soc.Am. 120(5). November 2006. P. 2595-2614.

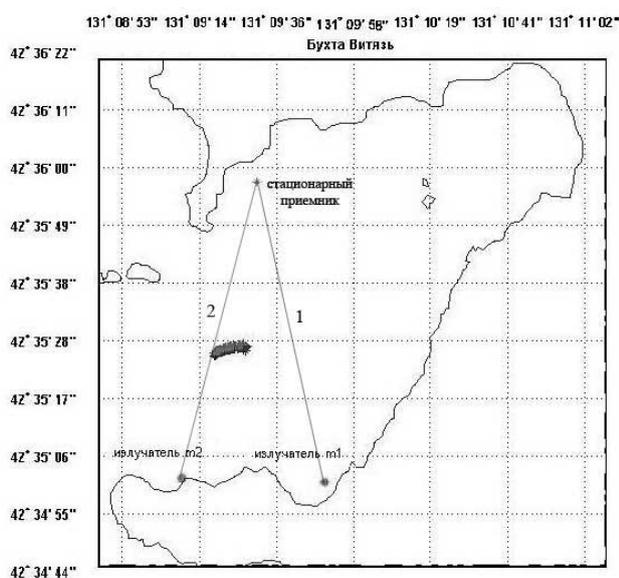
# АНАЛИЗ ОШИБОК В ОПРЕДЕЛЕНИИ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ПОДВОДНОГО АКУСТИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

**Ю.Н. Моргунов, А.А. Тагильцев, А.В. Буренин, В. В. Безответных,  
Е.А. Войтенко, П.Г. Кушнир Д.С. Стробыкин, А.А. Азаров, М.С. Лебедев,  
А.А. Голов**

Учреждение Российской академии наук  
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева  
Дальневосточного отделения РАН  
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43  
тел.: (423) 231-16-31, факс: (423) 231-25-73, e-mail: golov\_alexander@inbox.ru

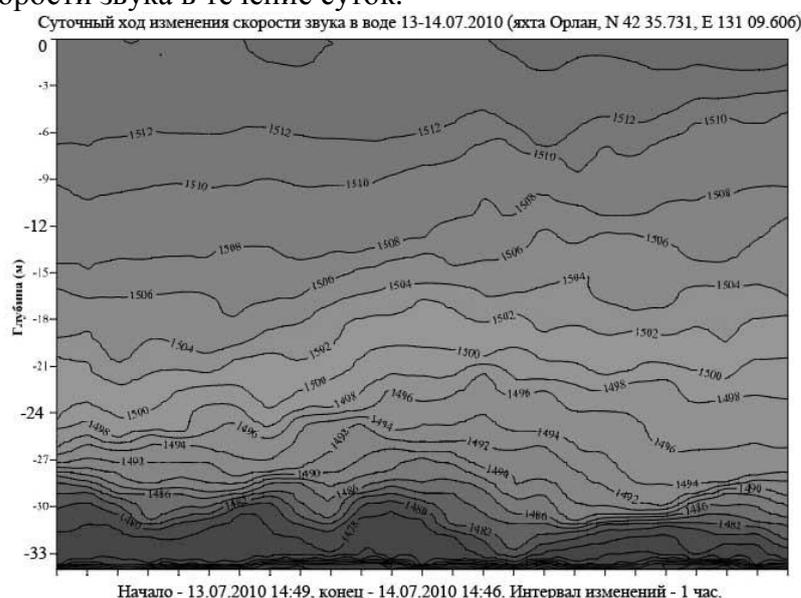
Разработка и реализация акустической системы навигации для автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) является одной из приоритетных задач подводной робототехники. В докладе приведены и обсуждаются результаты экспериментальной апробации одной из таких систем, проведен анализ ошибок (разности показаний между системой акустического позиционирования (САП) и GPS) сделаны выводы о возможных причинах их возникновения и методах их устранения.

Эксперимент проводился 13-14 июля 2010 года в бухте Витязь залива Посыета. Два широкополосных излучателя, установленных вблизи берега (координаты места постановки определялись с помощью приемника GPS: ET – 112), излучали ежеминутно сложные фазоманипулированные сигналы типа М-последовательности. Сигналы принимались стационарным акустическим приемником, расположенным у противоположного берега бухты, и свободно дрейфующим имитатором подводного объекта (радиогидроакустическим бумом). Гидрологические измерения выполнялись на суточной станции с 14ч 49м 13 июля по 14ч 46м 14 июля 2010 года с интервалом 1 час. Полигонная съемка выполнялась дважды утром и вечером 15 июля 2010 года, также в этот период был выполнен промер глубин вдоль акустических трасс.



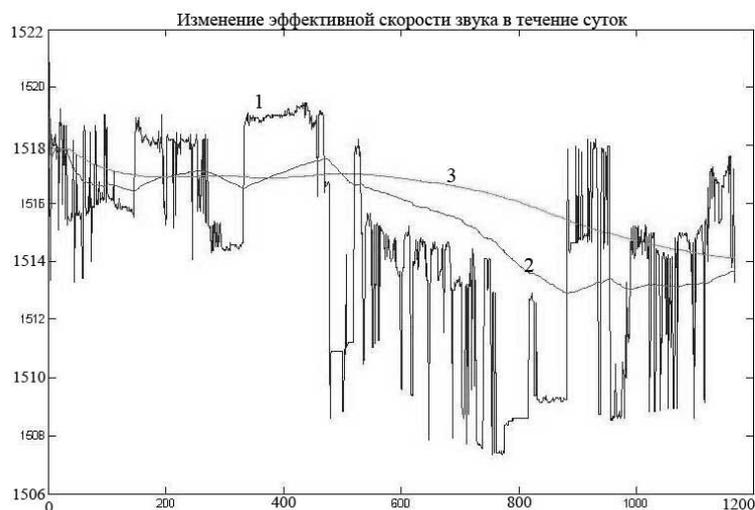
**Рис. 1.** Схема эксперимента: 1, 2 – номера трасс

На рис. 1 представлена общая схема эксперимента: расположение излучателей, приемников, и результаты измерения координат имитатора АНПА. На рис. 2 приведено рассчитанное по стационарным гидрологическим измерениям вертикальное распределение скорости звука в течение суток.



**Рис. 2.** Вариации вертикального распределения скорости звука в течение суток (синхронно с акустическими измерениями на стационарных трассах)

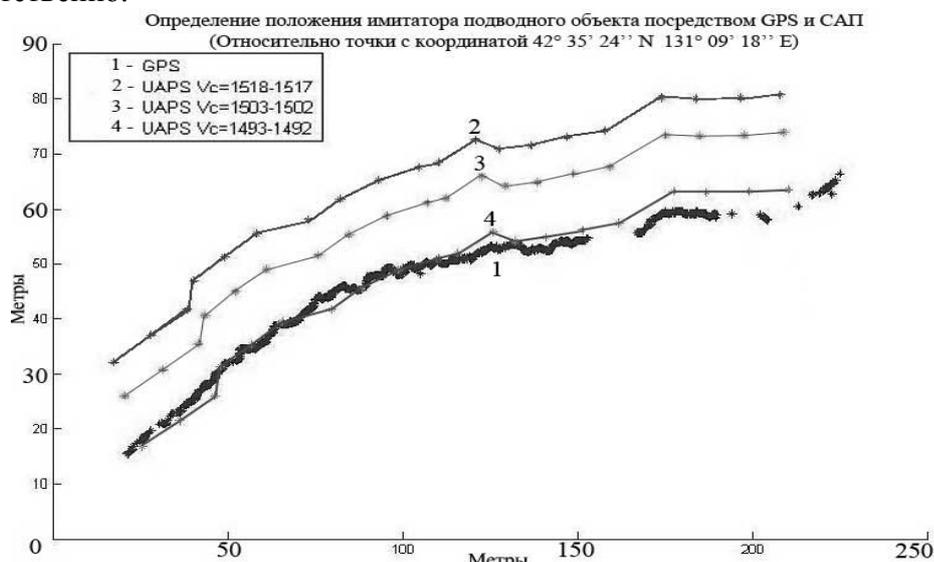
После проведения корреляционной обработки сигналов, зарегистрированных стационарным приемником, была вычислена и построена зависимость эффективной скорости звука в течение суток для двух трасс в направлении излучателей. Результаты применения алгоритма адаптивной фильтрации для ее сглаживания отображены на рис. 3.



**Рис. 3.** Эффективная скорость звука на трассе: 1 – результат расчета, 2- то же, после обработки фильтром Кальмана 1-го порядка, 3- второго порядка

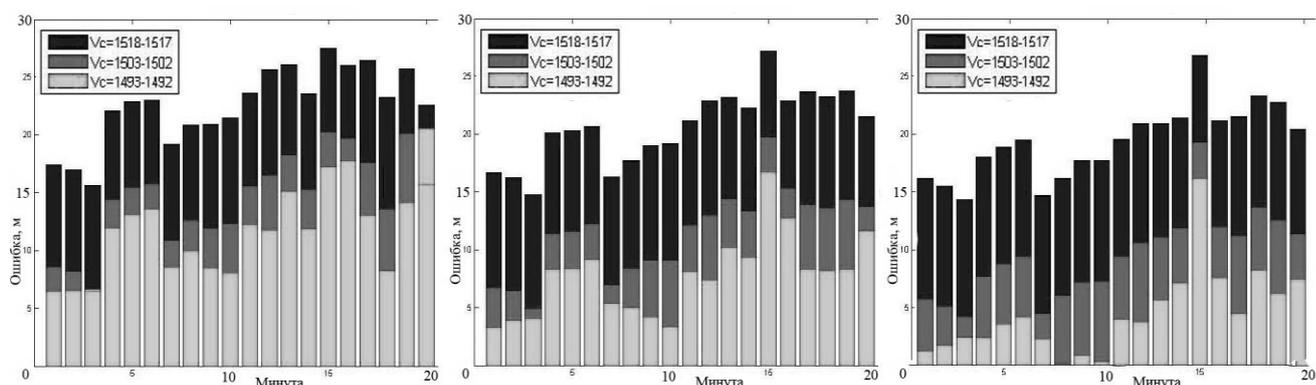
Эффективная скорость звука для первой трассы составила 1518 м/с, для второй – 1517 м/с. Посредством корреляционной обработки сигналов, принятых имитатором АНПА, вычислялось время распространения акустической волны от излучателей до имитатора. По рассчитанной эффективной скорости звука рассчитывалось расстояние между излучателями и имитатором, и методом триангуляции находились географические координаты положения объекта.

На рис. 4 приведены координаты имитатора АНПА, полученные двумя методами – GPS и САП. Как видно из рисунков, минимальное отклонение показаний САП и GPS достигается при значении эффективной скорости звука 1492 и 1493 м/с для первой и второй трасс соответственно.



**Рис. 4.** Результаты определения местоположения объекта в декартовой системе координат при различных скоростях звука

Данные результаты соответствуют двадцати минутам эксперимента, то есть 20 координатам полученных САП и около 1000 координат – GPS. Далее проводился анализ ошибок в определении местоположения объекта системой акустического позиционирования по отношению к GPS методом вычисления дистанции между координатными точками, полученными САП и GPS. Так как количество координат полученных по GPS значительно превышает количество координат, полученных САП, проводилось усреднение в пределах минуты и поиск наименьшей и наибольшей ошибки, результаты представлены на рис. 5.



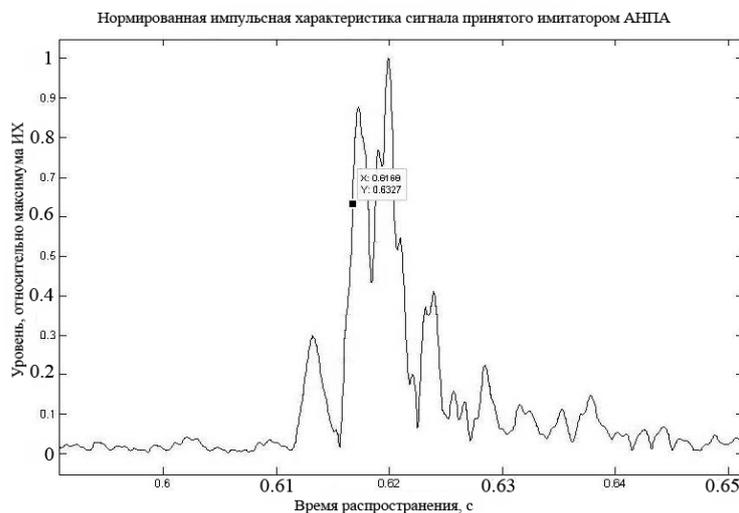
**Рис. 5.** а) Максимальная ошибка на минуту, б) средняя, в) минимальная

Таким образом, из рисунка 5, в видно, что все ошибки находятся в пределах 8 метров, что соответствует точности определения местоположения используемой системой GPS. Увеличение ошибки на 15-ой минуте объясняется сбоем в работе GPS.

Что касается факта уменьшения ошибок при понижении эффективной скорости звука, возможной причиной является наличие систематической погрешности, связанной с недостаточно точным определением координат стационарной приемной системы и излучателей, что может иметь место из-за ограничения времени усреднения при оценке координат по GPS (погрешность определения координат  $\pm 8$  м при наличии трех спутников).

Как показала последующая обработка применение фильтра Кальмана для сглаживания расчетных данных о скорости звука завывает ее значение на величину 2-3 м/с.

Следует отметить, что для данных гидрологических условий ширина импульсной характеристики составляла 10-15 мс, что при неправильном определении времени прихода акустической волны даст ошибку 5-15 метров (рис. 6). На этом же рисунке отмечен уровень, по которому рассчитывалось время распространения акустической волны ( $1/e$  относительно максимального значения).



**Рис. 6.** Импульсная характеристика сигнала, принятого имитатором подводного объекта

Можно отметить, что точность САП может быть приближена к точности GPS при устранении систематических и снижении случайных ошибок. Целесообразно при определении координат стационарных систем использовать большее время усреднения получаемых GPS-координат. Для точного соответствия времени регистрации координат GPS и САП дополнительно разработана программная система синхронизации, которая способствует получению достоверных результатов сравнения координат. Существенному снижению погрешности послужит и поиск возможных решений по анализу импульсной характеристики в целях определения более точного времени распространения акустической волны.

## Литература

1. Akulichev V.A., Bezotvetnykh V.V., Burenin A.A., Voytenko E.A., Kamenev S.I., Morgunov Yu.N., Polovinka Yu.A., Strobikin D.S. Remote Acoustic Sensing Methods for Studies in Oceanology // Ocean Science Journal. 2006. V. 41. №2. P.105-111.
2. Моргунов Ю.Н., Половинка Ю.А., Стробыкин Д.С. Экспериментальные исследования влияния прилива на формирование акустического поля на стационарной трассе в шельфовой зоне Японского моря // Акустический журнал. 2008. Т.54. №3. С.587-588.
3. Акуличев В.А., Безответных В.В., Буренин А.В., Войтенко Е.А., Моргунов Ю.Н. Эксперимент по оценке влияния вертикального профиля скорости звука в точке излучения на шельфе на формирование импульсной характеристики в глубоком море // Акустический журнал. 2010. Т.56. №1. С.51-52.
4. 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.

# ОТОБРАЖЕНИЕ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ АНПА НА БОРТУ СУДНА-НОСИТЕЛЯ

А.В. Каморный, Ю.В. Матвиенко

Институт проблем морских технологий ДВО РАН  
690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел./факс: (423)2432416,  
e-mail: ymat@marine.febras.ru

Контроль автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) с борта судна обеспечивается оборудованием судового поста навигатора, включающим выносную судовую антенну, кабельную линию связи, судовую блок обработки информации и компьютер. Также в состав оборудования поста входят приемник GPS/ГЛОНАСС, предназначенный для определения координат судна-носителя, и устройство синхронизации между судовым блоком и АНПА.

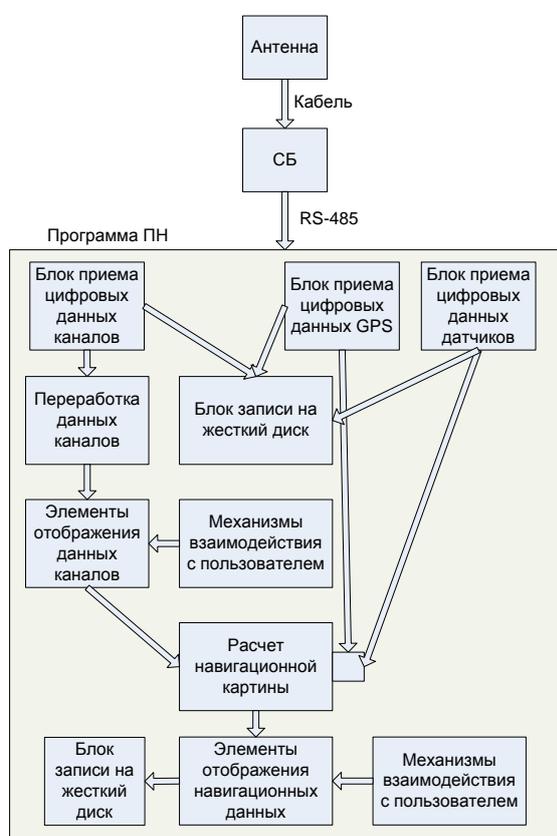


Рис. 1. Информационные потоки программы «Планшет навигатора»

В результате работы гидроакустического навигационного комплекса на персональный компьютер навигатора приходит поток разнородной информации, которая обрабатывается специальным программным обеспечением «Планшет навигатора» (ПН). На рис. 1 показана организация взаимодействия информационных потоков, реализованная в программе, а на рис. 2 – монитор программы. Программа выполняет следующие функции:

1. Взаимодействие с устройствами гидроакустического комплекса, мониторинг технического состояния устройств.
2. Прием данных гидроакустических каналов. Их графическое отображение и контроль.
3. Взаимодействие с навигационными данными и отображения их в дружественном для пользователя интерфейсе.
4. Отображение навигационных объектов на графическом поле с координатной сеткой и взаимодействие с пользователем.
5. Накопление и хранение полученной навигационной информации для ее последующей обработки и воспроизведение ранее полученной информации в имитационной форме.
6. Расчет гидроакустических и вспомогательных

данных и их преобразование в навигационную информацию.

7. Обеспечение управления АНПА посредством гидроакустических команд телеуправления.
8. Обеспечение сетевого взаимодействия с другими программами, входящими в пакет навигационного программного обеспечения.

Программа ПН обеспечивает связь с устройствами судового комплекса непосредственно через интерфейс RS-485 по специфическому протоколу связи. Взаимодействие программы происходит по принципу «запрос-ответ» для каждого

устройства в отдельности и обеспечивается набором библиотек специфичного вида. В ходе работы происходит постоянный опрос всех доступных устройств, что обеспечивает непрерывный мониторинг физического состояния всего комплекса судового оборудования в целом. Это позволяет оперативно оповещать пользователя о неполадках, вызванных неправильной эксплуатацией отдельных частей комплекса.

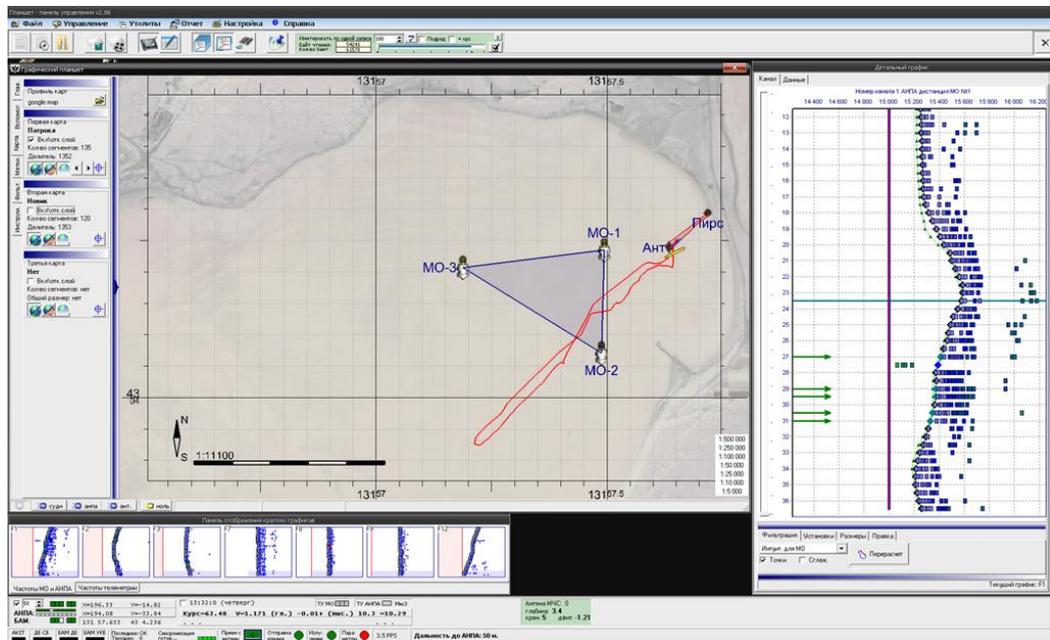


Рис. 2. Программа «Планшет навигатора»

Одной из основных задач программы ПН является формирование для последующей обработки данных, полученных по гидроакустическим каналам связи. Для этого создан механизм отображения и взаимодействия пользователя с данными посредством табличных и графических средств интерфейса.

В навигационных комплексах АНПА сейчас отслеживаются 13 информационных и 2 специальных гидроакустических канала связи. Информационные каналы реализованы шестью частотными каналами в диапазоне от 10 до 14 kHz с разделением адресатов во времени. Специальные каналы имеют собственные частоты в том же диапазоне частот. Информационные каналы служат для измерения дальностей. Специальный канал не привязан к единой точке отсчета времени и является специфичным видом гидроакустического сигнала, предназначенного для телеуправления АНПА и его пеленгования. В программе для каждого информационного канала отведен собственный краткий график (рис. 3), отображающий акустическую обстановку (специфичную для данного канала) за некоторый период времени. Для контроля состояния каналов в программе ПН предусмотрен подробный график (рис. 4) выбранного гидроакустического канала, который дает пользователю возможность в случае некачественного приема, вмешаться в процесс расчета.



Рис. 3. Форма кратких графиков

В результате обработки данных, полученных по гидроакустическим каналам связи и от устройств судового оборудования, формируется поток навигационной информации, который можно разделить на основной и дополнительный. Основной навигационной информацией являются данные телеметрии и координаты АНПА, полученные по гидроакустическим каналам связи, координаты судна – носителя и антенны, расстояния между навигационными объектами и т.д. Данная информация является исчерпывающей для построения навигационной картины района работ. Отображение выше обозначенных данных в программе ПН выполнено двумя способами. Первый – отображение текущих данных в специально отведенной области интерфейса, которая всегда остается доступной (рис. 5). И второй – отображение данных за весь период работы программы ПН в табличном виде, которое можно вызвать по желанию пользователя. Стоит отметить, что любой параметр основной навигационной информации можно отобразить в виде графика (рис. 4). Дополнительной или вспомогательной информацией являются табличные формы состояния устройств, табличное отображение данных гидроакустических каналов и т.д. Полученная навигационная информация в программе ПН отображается на поле графического планшета в виде объектов и линий (рис. 6).

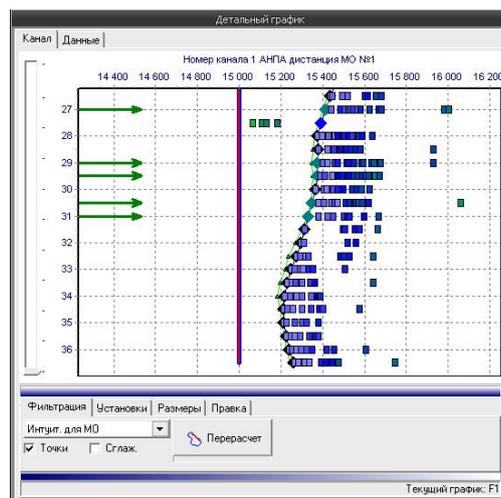


Рис. 4. Форма детального графика

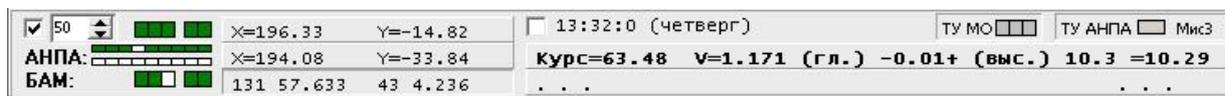


Рис. 5. Панель текущих данных

Для отображения навигационных объектов на графическом поле программы ПН используется технология OpenGL с функциями GLScene реализованными под языком Object Pascal.

Данное поле программы оснащено координатной сеткой двух видов: географических координат (единицы измерения – градусы) и местных координат (единицы измерения – метры) со свободно выбранным началом отчета. Благодаря технологии OpenGL удалось добиться плавности отображения элементов поля при движении видимого сектора в стороны и изменения его размера. Навигационные объекты отображаются на поле в виде иконок с линиями, соответствующими траекториям движения этих объектов. Помимо основной навигационной информации, отображаемой на планшете, в программе предусмотрен инструментарий, позволяющий выполнять измерения, отображать дополнительную навигационную информацию и ставить дополнительные метки по желанию пользователя (рис. 6). Также, в программе реализован широкий спектр настроек отображения и опций управления данным полем, в числе которых следует отметить возможность наложения на поле растрового картографического изображения, привязанного к координатам сетки. Для подготовки растров карт к использованию их в программе ПН специально была создана соответствующая утилита, которая позволяет пользователю значительно сократить время, затрачиваемое на адаптацию растра большого размера к использованию его в поле планшета.

Все данные, полученные в результате работы программы ПН, записываются на жесткий диск в файлы с различными специально разработанными форматами. Хранение полученных данных в программе ПН организовано по принципу «записал и забыл», который действует непрерывно, весь период функционирования программы.

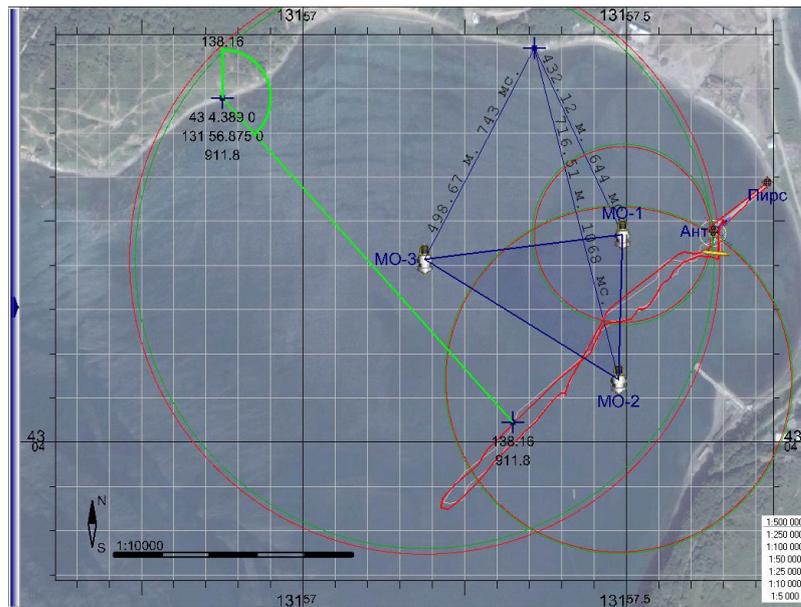


Рис. 6. Поле графического планшета

Файлы, создаваемые программой в процессе своей работы, можно подразделить на три вида: основные, дополнительные и расширенные. Каждый вид имеет свой формат хранения и кодирования информации. В основные файлы записываются данные от всех устройств гидроакустического комплекса в бинарном виде. Дополнительные файлы хранят в себе информацию вспомогательного типа, такую как действия пользователя, настройка программы и др. Расширенный тип файлов предназначен для глубокого анализа навигационной и гидроакустической обстановки в районе работ. Программа ПН способна обрабатывать ранее сгенерированные файлы двух видов: основные и дополнительные. Расширенный вид файлов, генерируемый программой ПН, сохраняется в виде таблиц, совместимых с Microsoft Excel. Обработка основных и дополнительных файлов в программе ПН происходит двумя способами: загрузка всего файла целиком и режим симуляция. Режим симуляции выполнен в виде постепенной загрузки информации с использованием всех функциональных возможностей программы по контролю гидроакустических каналов, пересчета траекторий и др., функций программы при работе непосредственно с судовым оборудованием. Этот режим позволяет выполнять полноценное обучение пользователей работе с программным обеспечением вне эксплуатационного режима гидроакустического комплекса, а также применим для детального изучения полученных ранее навигационных и гидроакустических данных.

Расчетные модули в программе ПН включают: модуль для определения времени прихода сигнала; модули для определения позиции навигационных объектов в системе координат; модули фильтрации и прогнозирования линейных функций; модуль расчета лучевых траекторий гидроакустических сигналов. Расчетный модуль для определения времени прихода сигнала выполнен в виде набора функций. Результатом работы данного модуля является полученные значение, либо предполагаемый прогноз значения, либо факт отсутствия сигнала. Расчетный модуль для определения позиции навигационных объектов выполнен в виде математических функций и визуально реализован на поле графического планшета. Модуль фильтрации и прогнозирования линейных функций выполнен в виде вспомогательного комплекса математических и логических функций программы ПН. Он играет роль опциональной ступени в расчетах траекторий навигационных объектов, тенденций в гидроакустических каналах, последовательных значений телеметрии АНПА и пр. Модуль расчета лучевых траекторий выполнен в виде математических функций и реализован как дополнительная ступень в расчете дальностей, получаемых через

гидроакустические каналы связи. Результатом работы данного модуля является уточнение погрешности расчета расстояния между приемником и источником гидроакустического сигнала на больших дистанциях в глубоком море.

Обеспечение двусторонней связи носителя с АНПА происходит по заранее заданной схеме распределения сигналов по гидроакустическим каналам во времени. Со стороны АНПА, получаемые судовым оборудованием сигналы четко привязаны к единому времени, что позволяет точно получать дальности и телеметрию. От носителя АНПА получает информацию командного типа, такую как изменения курса, скорости, глубины и др., специфичные команды, такие как управление поисковыми устройствами, коррекция миссии аппарата. Доступ к инструментам телеуправления АНПА организован таким образом, чтобы не допустить непреднамеренной активации последних, в то время, когда доступ к функциям получения телеметрии АНПА является наиболее открытым.

Программное обеспечение поста навигатора состоит не только из программы ПН, но и других сервисных и специализированных программных продуктов, одним из которых является сервисная программа удаленного доступа к судовому оборудованию гидроакустической навигации (рис. 7). Эта программа предназначена для условий многопользовательского использования гидроакустических и других данных получаемых от судового оборудования. Сама же программа ПН оснащена средствами сетевого взаимодействия с этой сервисной программой.

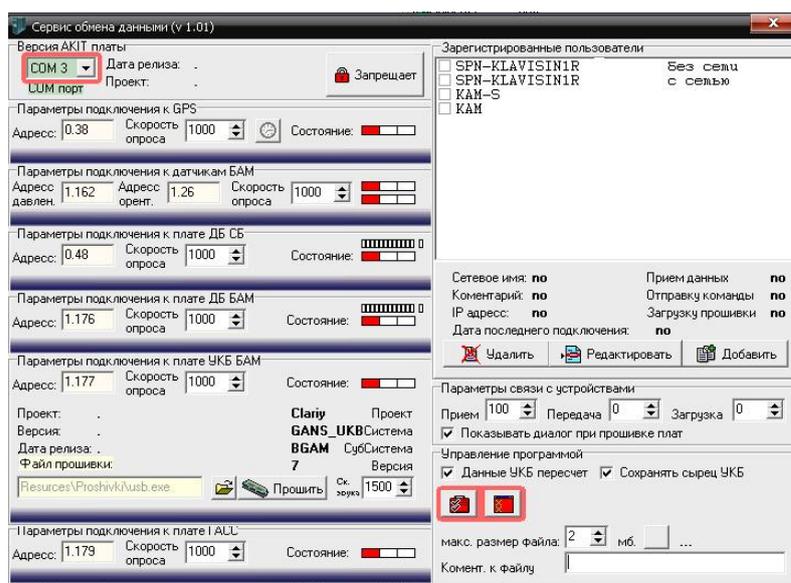


Рис. 7. Программа сетевого доступа к ГА данным

Следует отметить, что сервисная программа при взаимодействии с судовыми устройствами, помимо непрерывной записи всех операций, связанных с подключенными пользователями, выполняет дублирующую запись полученных данных от судовых устройств, которые по формату совместимы с программой ПН. Программа ПН в составе программного обеспечения судового поста гидроакустической навигации прошла испытания и обеспечивала навигацию АНПА «Клавесин» в Северном Ледовитом Океане в экстремальных условиях высоких широт, а также обеспечивала навигацию АНПА «Клавесин» в Тихом Океане при погружениях аппарата на глубину 6 км.

## ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ СИНХРОНИЗАЦИИ ПРИЕМНИКА ЦИФРОВОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ ДЛЯ КАНАЛОВ С ВЫРАЖЕННОЙ РЕВЕРБЕРАЦИЕЙ

**К.Г. Кебкал**

EvoLogics GmbH, Берлин

При осуществлении цифровой гидроакустической связи точное время поступления сигнала на прием неизвестно. Для оценки этого времени, и таким образом, синхронизации приемника связи, обычно используются широкополосные сигналы специальной формы – синхросигналы. За счет расширения полосы отклик взаимной корреляционной функции принимаемого и опорного сигналов (интервал неопределенности времени поступления сигнала на прием) становится более коротким, и точность синхронизации растет. Однако это остается справедливым лишь в случае приема сигнала на фоне гауссова шума. Если канал отличается от гауссовского, то отклик взаимной корреляционной функции принимаемого и опорного сигналов может иметь сложную форму и большую продолжительность, а погрешность синхронизации приемника – неопределенно большую величину. Поскольку точность синхронизации приемника может существенно сказываться на достоверности детектирования цифрового значения принимаемого сигнала, в текущей статье выполнена качественная и количественная оценка влияния эффекта многолучевого распространения на точность синхронизации приемника, при условии использования для синхронизации широкополосных сигналов с линейной модуляцией частоты.

Один из способов борьбы с искажениями принимаемого (цифрового) сигнала, вызываемыми многолучевым распространением, состоит в непрерывном расширении спектра передаваемого (цифрового) сигнала, в частности, с помощью линейной частотной модуляции его несущей [1], [2]. Способы формирования сигналов связи, характеризующиеся непрерывной частотной модуляцией его несущей, нашли применение, как для разработки цифровых гидроакустических каналов управления, так и для разработки скоростных гидроакустических каналов передачи цифровых данных [3], [4].

Использование сигналов с расширением спектра имеет множество преимуществ [5], [6] реализация которых, однако, зависит от выполнения ряда повышенных требований к организации обмена такими сигналами. Одно из таких требований – высокая точность синхронизации принимаемого сигнала с опорным [7]-[10].

Для повышения точности синхронизации используются синхронизирующие импульсы с большой базой (большим значением произведения ширины занимаемой частотной полосы на продолжительность сигнала). С расширением базы сигнала ширина пика автокорреляционного отклика сужается, что снижает неопределенность в оценке времени поступления сигнала на прием.

Применение такого подхода в гидроакустике является целесообразным уже по той причине, что принимаемый гидроакустический сигнал часто характеризуется дискретным профилем избыточной задержки распространения. В результате лучевые компоненты принимаемого сигнала с широкой базой могут быть изолированы и обработаны по отдельности [11], [12]. В частности, могут быть точно определены моменты их поступления на прием, и соответственно, может быть выполнена точная синхронизация приемника с одним из компонентов (как правило, наиболее энергетическим). Однако, в случае, когда профиль избыточной задержки распространения не является дискретным, или когда один из лучевых компонентов является составным (например, содержит энергию двух компонентов, для разрешения которых база сигнала оказывается недостаточно широкой), пик

автокорреляционного отклика такого сигнала существенно расширяется, и неопределенность в оценке времени синхронизации принимаемого сигнала возрастает.

Известно, что при больших погрешностях синхронизации приемника, работающего с сигналами с расширением спектра, производительность канала связи падает [13] (возрастает вероятность битовой ошибки).

В случае обеспечения возможности оценки погрешности синхронизации приемника при работе в гидроакустическом канале с неизвестными характеристиками представляется возможным преодоление эффекта снижения производительности канала связи. Например, в случае предварительного согласования приемником и передатчиком параметров несущей в канале с неизвестными характеристиками представляется возможным выбор синхроимпульсов с шириной базы, достаточной для обеспечения заданной точности синхронизации приемника на принимаемый сигнал и/или настройки параметров (расширения спектра) несущей так, что максимальная погрешность демодуляции следующего за синхроимпульсами блока символов данных не превышает заданное значение.

В данной статье рассмотрена возможность выполнения оценки погрешности синхронизации приемника (погрешности, вызванной "смещающим" влиянием лучевого компонента в составе принимаемого сигнала) для известных параметров синхроимпульса и известной избыточной задержки распространения лучевого компонента.

### Аналитическая модель погрешности синхронизации

Пусть передаваемый пакет данных содержит секцию синхронизации, размещенную на известном смещении перед блоком данных. После поступления синхросигнала в приемник максимум его корреляции с излучаемой копией соответствует времени завершения приема синхросигнала. Учитывая это время, а также известное смещение до начала блока, приемник вычисляет время синхронизации каждого из принимаемых в этом блоке цифровых сигналов.

Выполним аналитическую оценку погрешности синхронизации приемника, вызываемой влиянием задержанного лучевого компонента принимаемого синхросигнала. Запишем синхросигнал с линейной разверткой несущей в виде:

$$s_{\text{sync}}(t) = \sqrt{2E/T} \exp\left(j\left(\omega_L t + Gt^2/2\right)\right) \quad (1)$$

где  $T$  – длительность синхросигнала,  $E$  – его энергия,  $\omega_L = 2\pi f_L$ ,  $f_L$  – начальная частота,  $G = 2\pi f_d/T$  – градиент частоты,  $f_d$  – девиация частоты от центрального значения занимаемой полосы.

В канал распространения излучается действительная часть синхросигнала, и после его распространения по множеству путей принимаемый сигнал может быть представлен суммой лучевых компонентов, сдвинутых на некоторое время по отношению друг к другу

$$r_{\text{sync}}(t) = \sqrt{2E/T} \sum_n \alpha_n \cos\left(\omega_0(t - \tau_n) + G(t - \tau_n)^2/2 + \theta_n\right) \quad (2)$$

где  $\alpha_n$  – коэффициент ослабления  $n$ -го луча (нулевой индекс соответствует наиболее энергетическому лучу),  $\tau_n$  – избыточная задержка распространения  $n$ -го компонента, а  $\theta_n$  – случайное фазовое смещение лучевого компонента при его распространении по  $n$ -му лучу. Исследуем принимаемый синхросигнал, состоящий из двух лучевых компонентов, представленный моделью

$$r_{\text{sync}}(t) = \sqrt{2E/T} \left( \alpha_0 \cos\left(\omega_0(t - \tau_0) + G(t - \tau_0)^2/2 + \theta_0\right) + \alpha_1 \cos\left(\omega_0(t - \tau_1) + G(t - \tau_1)^2/2 + \theta_1\right) \right). \quad (3)$$

Поскольку наибольший интерес представляют внутренние соотношения параметров лучевых компонентов, для упрощения записи можно полагать, что избыточная задержка распространения первого луча равна нулю, а второго – некоторой  $\tau$ , а также, что фазовое смещение первого лучевого компонента равно нулю, а второго – случайной величине  $\theta$  (случайное смещение определяется свойствами канала распространения сигнала вдоль заданного луча). Тогда, после преобразования и нормирования по амплитуде принимаемый сигнал может быть также представлен в виде

$$r_{\text{sync}}(t) = \sqrt{2E/2} \left( \cos(\omega_0 t + Gt^2/2) + \frac{\alpha_1}{\alpha_0} \cos(\omega_0 t + Gt^2/2 - G\tau t - \theta_r) \right) \quad (4)$$

где  $\theta_r = \omega_0 \tau - G\tau^2/2 + \theta$  – смещение начальной фазы второго компонента по отношению к начальной фазе первого, состоящее из детерминированной части  $\omega_0 \tau - G\tau^2/2$  и случайной фазы  $\theta$ .

Известно, что для обработки принимаемого синхросигнала используются корреляторы: момент времени, в котором фиксируется максимальное значение отклика коррелятора, используется для синхронизации приемника. Очевидно, что в случае случайных смещений положения этого максимума могут возникать условия для возникновения погрешности синхронизации приемника.

Исследуем влияние задержанного лучевого компонента на положение максимума отклика коррелятора на оси времени. Сигнал на выходе коррелятора с комплексной опорой можно представить следующим образом

$$R(t') = \sqrt{2/T} \int_{t'}^{T+t'} r_{\text{sync}}(t) \exp(j(\omega_0(t+t') + G(t+t')^2/2)) dt \quad (5)$$

где  $(-T - \tau) < t' < (T + \tau)$  – смещение опорной функции во времени.

Поскольку принимаемый сигнал (4) представлен суммой двух лучей, правая часть выражения (5) может быть записана в виде суммы корреляционных функций

$$R(t') = R_{11}(t') + R_{12}(t') \quad (6)$$

где  $R_{11}(t')$  – АКФ опорного синхросигнала, а  $R_{12}(t')$  – взаимная корреляционная функция задержанного лучевого компонента с опорным сигналом. Тогда,

$$R_{11}(t') = 2/T \sqrt{E} \int_{t'}^{T+t'} \cos(\omega_0 t + Gt^2/2) \exp(j(\omega_0(t+t') + G(t+t')^2/2)) dt \quad (7)$$

$$R_{12}(t') = \frac{\alpha_1}{\alpha_0} \frac{2}{T} \sqrt{E} \int_{t'}^{T+t'} \cos(\omega_0 t + Gt^2/2 - G\tau t - \theta_r) \exp(j(\omega_0(t+t') + G(t+t')^2/2)) dt \quad (8)$$

Для частот наибольшего практического интереса, только разностные составляющие, получаемые в результате перемножения подынтегральных функций в (7) и (8), являются значимыми. После соответствующих преобразований они могут быть записаны в виде [14]:

$$R_{11}(t') \approx \sqrt{E} \frac{\sin(Gt'T/2)}{Gt'T/2} \exp(j(-Gt'T/2 - 3Gt'^2/2 - \omega_0 t')) \quad (9)$$

$$R_{12}(t') \approx \frac{\alpha_1}{\alpha_0} \sqrt{E} \frac{\sin(G(t'+\tau)T/2)}{G(t'+\tau)T/2} \exp(j(-G(t'+\tau)T/2 - \theta_r - Ggt'^2/2 - \omega_0 t')) \quad (10)$$

С учетом (9) и (10) выполним анализ выражения (6) и найдем положение максимума функции взаимной корреляции принимаемого сигнала с опорным.

Поскольку фаза принимаемого синхросигнала для целей синхронизации не интересует, найдем максимальное значение модуля взаимной корреляционной функции

$$\left| R(t') = \sqrt{\Re(R_{11}(t') + R_{12}(t'))^2 + \Im(R_{11}(t') + R_{12}(t'))^2} \right| \quad (11)$$

где  $\Re(\cdot)$  и  $\Im(\cdot)$  – обозначения действительной и мнимой частей аргумента.

Рассмотрим наиболее неблагоприятный случай, когда случайное фазовое смещение  $\theta_r$  принимает такое значение, при котором  $R_{11}(t')$  для любого  $t'$  является максимальным, т.е. когда  $\theta_r = -G(t'+\tau)T/2 - 3Gt'^2/2 - \omega_0 t' + \pi n$ , где  $n$  – натуральное число. Тогда, после соответствующих преобразований максимум выражения (5) может быть записан в виде

$$\max_{\theta_r} |R(t')| = \frac{\sqrt{E}}{\pi} \sqrt{\left(\frac{\sin(a(t'))}{a(t')}\right)^2 + \frac{\alpha_1}{\alpha_0} \left(\frac{\sin(b(t'))}{b(t')}\right)^2 + 2 \frac{\sin(a(t'))}{a(t')} \frac{\sin(b(t'))}{b(t')} \cos(c(t'))} \quad (12)$$

где  $a(t') = -Gt'T/2$ ,  $b(t') = -G(t'+\tau)T/2$ ,  $c(t') = -Gt'T/2 - 3Gt'^2/2 - \omega_0 t'$ .

Анализ выражения  $\max_{\theta_r} |R(t')|$  показывает, что при точном совпадении времени поступления нулевого лучевого компонента с опорным сигналом (т.е. при  $t'=0$ ), их взаимная корреляция может не достигать максимума. В частности, при больших  $\alpha_1$  и отрицательных значениях  $\cos(c(t'))$ , вклад  $\sin^2(b(t'))/b^2(t')$  преобладает, и максимум  $R(t')$  достигается при  $t'$ , смещенных в сторону положительных значений избыточной задержки распространения лучевого компонента.

С учетом (9), (12) погрешность синхронизации принимаемого сигнала равна:

$$\Delta t_{\text{sync}} = \arg(\max_{t'} |R_{11}(t')|) - \arg(\max_{t', \theta_r} |R(t')|) \quad (13)$$

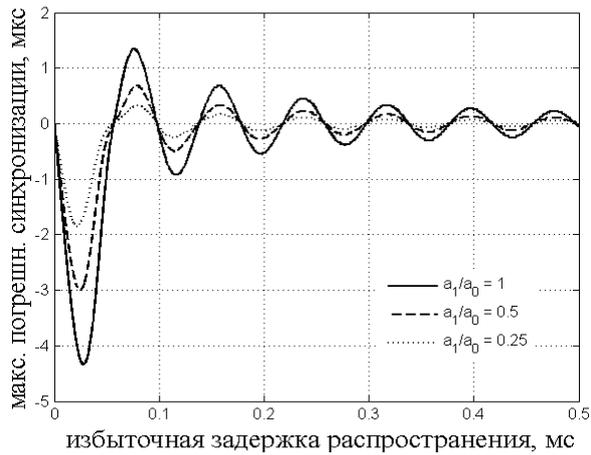
Результаты моделирования могут быть распространены на произвольное число лучевых компонентов. В силу суперпозиции волн корреляционная функция принимаемого сигнала может быть представлена суммой корреляционных функций его отдельных лучевых компонентов с опорным сигналом.

Используем выражение (13) для численного моделирования погрешности синхронизации при разных параметрах синхросигналов.

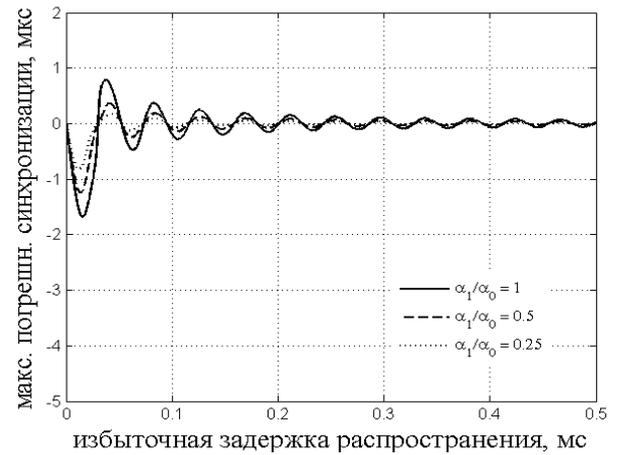
### Численная модель погрешности синхронизации

Ниже выполнено численное моделирование погрешности синхронизации для параметров синхросигналов (диапазонов частот и длительностей), практически используемых в цифровой ГА связи. На рис. 1 представлена зависимость максимальной погрешности синхронизации сигнала связи от избыточной задержки распространения лучевого компонента (диапазон частот 18 – 34 кГц, длительность  $T = 4.096$  мс). На рис. 2 представлена аналогичная зависимость, но для синхросигнала, занимающего диапазон частот 40 – 80 кГц и имеющего длительность  $T = 2.048$  мс. Как следует из рисунков, с увеличением избыточной задержки распространения лучевого компонента погрешность синхронизации принимаемого сигнала убывает, причем характер зависимости имеет вид затухающего колебания. Кроме того, для больших энергий лучевого компонента значения погрешностей синхронизации возрастают. Это проиллюстрировано на рис.1, 2 для трех значений отношения  $\alpha_1 / \alpha_0$ .

В частности, при равенстве энергий лучевых компонентов принимаемого сигнала максимальная погрешность синхронизации достигает наибольших значений и составляет в первом случае 3 мкс (рис.1, сплошная линия), а во втором случае 1.7 мкс (рис. 2, сплошная линия). Для других, более благоприятных соотношений между энергиями лучевых компонентов, погрешности синхронизации имеют меньшие значения. Например, при  $\alpha_1/\alpha_0 = 0.5$  (штриховая линия) наибольшее значение погрешности составляет в первом случае 3.0 мкс, а во втором случае 1.2 мкс. При соотношении  $\alpha_1/\alpha_0 = 0.25$  (пунктирная линия) наибольшие значения погрешностей достигают 1.8 мкс и 0.8 мкс соответственно.



**Рис. 1.** Зависимость  $\Delta t_{\text{sync}}$  для синхросигнала с частотами 18-34 кГц и длительностью 4.096 мс



**Рис. 2.** Зависимость  $\Delta t_{\text{sync}}$  для синхросигнала с частотами 48-78 кГц и длительностью 2.048 мс

Как следует из сравнения зависимостей, значения погрешностей также зависят от параметров синхросигнала, в частности от ширины занимаемой полосы и длительности. Так, максимальное значение погрешности синхронизации в первом случае (синхросигнал 18-34 кГц, 4.096 мс) в два с половиной раза превышает максимальную погрешность синхронизации, получаемую во втором случае (синхросигнал 48-78 кГц, 2.048 мс).

Для наиболее важных для цифровой ГА связи частот (полуоктавные – октавные диапазоны частот выше 10 кГц) и условий распространения сигнала (6-12 лучей) можно оценить диапазон значений погрешности синхронизации, и соответственно, обуславливаемый этой погрешностью показатель ухудшения характеристик принимаемого сигнала. В частности, наиболее универсальный из них – мера снижения выходного отношения сигнал/шум – лежит в диапазоне 0.1-0.3 дБ. Для большинства практических задач таким снижением можно пренебречь. Однако, в ряде задач, в которых ширина частотной полосы передаваемого сигнала сильно ограничена, например, из соображений акустической совместимости разнородных акустических устройств, такое снижение выходного отношения сигнал/шум может являться значимым. Тогда выражение для  $\max_{\theta_r} |R(t')|$  может

использоваться для оценки ожидаемого снижения отношения сигнал/шум и принятия решения о допустимости такого снижения, или необходимости настройки параметров манипуляции сигнала для заданных условий связи или необходимости дальнейшего совершенствование метода синхронизации.

## Выводы

1. В результате взаимодействия синхронного и лучевого компонентов принимаемого широкополосного синхроимпульса синхронизация приемника может быть выполнена не точно. Наибольшие погрешности синхронизации приемника вызываются влиянием лучевых компонентов, имеющих малую избыточную задержку распространения.

2. Полученные аналитические зависимости позволяют оценить максимальное значение погрешности синхронизации приемника при смещающем влиянии лучевого компонента с произвольной избыточной задержкой распространения. Используя принцип суперпозиции, оценка погрешности синхронизации приемника может быть выполнена также для любого множества лучей (профиля избыточной задержки распространения).

3. Аналитическая зависимость, полученная для погрешности синхронизации приемника, может быть использована для вывода зависимости ухудшения характеристик канала связи (например, вероятности битовой ошибки), что в свою очередь позволяет получить важную на практике зависимость для настройки параметров расширения спектра несущей при передаче цифровых гидроакустических сигналов в канале с произвольными характеристиками.

## Литература

1. Dotan A. A. Digital One Way Acoustic Communication in the Ocean. Doctoral thesis / A.A. Dotan. – La Jolla SCRIPPS, 1990. – 165 p.
2. Bannasch R. Kebkal K.G. Parallele akustische Informationsübertragung über konsonante oder harmonische Frequenzen. Patent PCT/DE99/02628. – 1998.
3. Kebkal K.G. Sweep-Spread Carrier for Underwater Communication over Acoustic Channels with Strong Multipath Propagation / K.G. Kebkal, R.Bannasch // Journal of Acoustical Society of America, 2002. Vol.112, issue 5. P. 2043-2052.
4. Collins T. Using Continuous Additive Training Sequences for High Rate, Doppler Tolerant Communications / T. Collins, P. Atkins & C. Bongiovanni, J.J. Davies, S. Dunn, S.A. Pointer // Conference of Acoustical Society of America: Proceedings. – Chicago, 2001. – P. 1-9.
5. Kilfoyle D. B. The state of the art in underwater acoustic telemetry. / D. B. Kilfoyle, A.B. Baggeroer // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2000. – Vol. 25, No. 1. – P. 4-27.
6. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и применение, 2-е издание. : Пер. с англ. / Б. Скляр. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
7. Tanaka H. Frequency and timing synchronization circuit making use of a chirp signal. / H. Tanaka. – US Patent 6498822. – 2002.
8. Boumard, S. Time domain synchronization using Newman chirp training sequences in AWGN channels / S. Boumard, A. Mammela. // International Conference on Communication: Proceedings. – Oulu, Finland, 2005. – Vol.2. – P. 1147-1151.
9. Wei W. Performance comparison of time synchronization algorithms for OFDM underwater communication system / W. Wei, H. Xiaoyi, W. Deqing, X. Ru, S. Haixin. //14<sup>th</sup> International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice: Proceedings. – Xiamen, 2007. – P. 104-107.
10. Samanchuen T. A non-coherent pseudo-noise acquisition scheme for direct-sequence spread-spectrum systems using an auxiliary signal / T. Samanchuen, S. Tantaratana // Thammasat Int. Jour. с. Tech., 1999. Vol.4, №3. P. 1-12.
11. Кебкал К.Г. Научно-технические проблемы создания гидроакустических телекоммуникационных систем / К.Г. Кебкал, В.П. Пешков, С.Г. Яковлев // Электроника и связь. Киев, 2003. №17. С. 59-62.

12. Кебкал К.Г. Метод цифровой передачи данных в горизонтально-стратифицированных подводных акустических каналах / К.Г. Кебкал, А.Г. Кебкал, С.Г. Яковлев // Акустический журнал. М., 2004. Т. 50, № 2. С. 220-230.
13. Shamain P. K. Acquisition of Direct Sequence Spread Spectrum Signals with Correlated Fading / P. K. Shamain, L. B. Milstein. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. Vol.19, №12. 2001. P. 2406-2419.
14. Kebkal K.G. Estimation of phase error limits for PSK-modulated sweep-spread carrier signal / K.G. Kebkal, R. Bannasch, A.G. Kebkal IEEE/ MTS Conference TECHNO OCEAN'04: Proceedings. – Kobe, Japan, 2004. – P. 748-756.

ОРГАНИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ МНОГОМЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ  
НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ  
ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

**А.О. Дерипаска, Н.А. Жукова**

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. проф. Попова, 5, тел./факс: (812) 234-35-69

**А.В. Панькин**

Санкт-Петербургский институт автоматики и автоматизации РАН  
1999178, Россия, Санкт-Петербург, Галерный проезд В.О., 5,  
тел./факс (812) 355-96-82, e-mail: nazhukova@mail.ru

Рассматривается технология обработки и анализа многомерных измерений, позволяющая проводить обработку данных в автоматизированном режиме, приводится описание структуры интеллектуальной геоинформационной системы, обеспечивающей реализацию предложенной технологии.

В настоящее время наблюдается активное использование геоинформационных систем (ГИС). Значимым направлением их развития является их интеллектуализация. Интеллектуальная геоинформационная система (ИГИС) представляет собой ГИС наделенную способностью получения, обработки и представления информации для решения задач пространственного моделирования без необходимости использования дополнительных программных модулей. Одной из задач построения ИГИС является разработка компонент, обеспечивающих обработку и системный анализ многомерной геопространственной информации. Первичными источниками данных являются существующие системы наблюдений в Мировом океане. В качестве примера могут рассматриваться сети фиксированных и дрейфующих буев, сети заякорных буев и др. [3]. Данный класс систем решает задачи гармонизации, интеграции и слияния разнородных измерений, поступающих от различных источников, а также обеспечивает организацию процесса обработки и анализа накопленных данных. Одной из основных проблем является обеспечение обработки данных в автоматизированном режиме. Это обусловлено необходимостью формирования единого информационного пространства, а также сложностью и нестационарностью обрабатываемых данных, наличием сбойных участков и выбросов, что требует постоянной адаптации и настройки алгоритмов обработки. Для обеспечения эффективного функционирования рассматриваемых систем целесообразным является использование интеллектуального подхода как к обработке измерений, так и к организации самой системы.

Интеллектуальный подход к обработке и анализу измерений предполагает динамическое формирование процессов обработки и анализа данных в зависимости от состава решаемых задач и типа обрабатываемых измерений на основе набора типовых процессов и правил их применения. Для этого необходимо разработать расширяемый каталог типов измерений и моделей их представления. Каждый тип объединяет совокупность измерений, которые могут быть описаны схожим набором статистических характеристик. Под моделью представления типа понимаются совокупность и диапазоны допустимых значений характеристик. Для каждого типа определяются алгоритмы построения модели из исходных данных, а также алгоритмы первичной и вторичной обработки. При необходимости для различных типов измерений определяются алгоритмы их совместной обработки. Вся совокупность моделей сводится в единую онтологию.

Технология обработки и анализа измерений предполагает три основных режима работы систем, которые ее реализуют – настроенный, статический и динамический. Настроенный

режим работы применяется до начала эксплуатации системы и обеспечивает настройку системы на обработку заданного состава данных, статический режим работы системы предполагает в ходе эксплуатации системы уточнение настроечных параметров системы, динамический режим – выполнение обработки и анализа данных. При настройке системы решаются задачи формирования онтологии, формирования моделей типов обрабатываемых данных, библиотеки алгоритмов обработки, типовых процессов обработки. Ниже более подробно рассматривается каждая из перечисленных задач.

Первая задача – формирование онтологии предметной области. При формировании онтологии осуществляется описание состава обрабатываемых данных и результатов обработки данных, а также перечня решаемых задач и процессов обработки, используемых для их решения, решается задача построения иерархии (наследования) моделей.

Формирование моделей типов измерений является следующей задачей. Для обработки измерительных данных необходимо предварительно определить перечень обрабатываемых типов измерений. Для каждого типа измерений определяется набор классификационных признаков совокупность диапазонов значений которых, позволяет определить соответствие полученных измерений одной из моделей. В качестве классификационных признаков могут выступать: частота измерений, значения статистических характеристик (среднее значение, медиана, дисперсия, разброс), поведение кривой во временной области (выпуклость/вогнутость кривой, вариабельность, ошибка кусочно-постоянной аппроксимации, ошибка кусочно-линейной аппроксимации, ошибка аппроксимации полиномом второй и более степени, значения характерных точек, кривизна), поведение кривой в частотной области (вектор коэффициентов Фурье). Приведенный перечень классификационных признаков, как правило, является достаточным, однако, при необходимости может быть расширен. В качестве характеристик, используемых для описания моделей, могут применяться такие характеристики как коэффициенты полинома, коэффициенты Фурье или вейвлет-коэффициенты при описании кривой с использованием полинома, в частотной или частотно-временной области соответственно.

Третьей при настройке системы решается задача описания алгоритмов обработки и анализа данных. Алгоритмы обработки и анализа измерений включают в себя следующие основные группы алгоритмов: алгоритмы первичной обработки данных, алгоритмы вторичной обработки данных, алгоритмы совместной обработки данных. Группа алгоритмов первичной обработки данных решает задачи приведения данных к стандартному формату, их интеграцию с существующими данными, обеспечивает очистку данных от шума, одиночных и групповых выбросов, заполнение разрывов в данных, а также проверку данных на корректность. Алгоритмы вторичной обработки данных предполагают построение формализованного представления данных и их последующий анализ. На этапе формализации представления данных, как правило, используются алгоритмы сегментации, которые позволяют представить временной ряд в виде набора стационарных фрагментов, кластерного анализа, обеспечивающего объединение разнесенных во времени схожих фрагментов в группы, и, при необходимости, классификации, позволяющей определить тип каждой группы при наличии априорно сформированного каталога типов. Группа алгоритмов совместной обработки данных позволяет выявлять зависимости в поведении временных рядов, как между их значениями, так и во времени. При совместной обработке данных могут применяться алгоритмы корреляционного анализа, ассоциации и секвенциального анализа. В рамках каждой из рассмотренных групп алгоритмов формируются подгруппы в соответствии с задачами, которые они позволяют решать. Для каждой группы и подгруппы алгоритмов и для каждого из алгоритмов отдельно формируется мета описание в виде соответствующих классов онтологии моделей типов обрабатываемых данных. Мета описание для групп и подгрупп алгоритмов содержит сведения о решаемой задаче, составе входных и выходных данных. Для каждого алгоритма дополнительно описываются условия применения

алгоритма, критериев оценки результатов выполнения алгоритма, а также значения настроечных параметров, которые рекомендуется применять для каждого из типов измерений. Условия применения алгоритмов представляются в виде продукционных правил и заносятся в базу знаний.

Четвертой задачей является задача определения типовых процессов (шаблонов) обработки и анализа измерительных данных. Под шаблоном обработки и анализа измерительных данных понимается формализованное описание последовательности групп алгоритмов, которые необходимо выполнить для решения целевой задачи, при этом выбор конкретного алгоритма осуществляется на этапе выполнения процесса. При необходимости реализации сложных процессов обработки, для которых последовательность применяемых групп алгоритмов априорно определена быть не может, формулируются продукционные правила, обеспечивающие в ходе исполнения процесса выбор группы алгоритмов обработки.

В статическом режиме обработки данных решаются задачи уточнения моделей типов измерений или расширения каталога типов, уточняются настроечные параметры алгоритмов обработки данных для каждого из типов, выявляются новые зависимости в поведении анализируемых измерений, уточняются шаблоны процессов обработки и анализа.

В динамическом режиме работы системы, при поступлении новых данных в онтологию в зависимости от решаемой задачи и состава данных осуществляется поиск шаблона процесса обработки. Реализация процесса обработки осуществляется в соответствии со следующими правилами:

- на каждом этапе обработки данных осуществляется выбор одного алгоритма обработки данных из группы алгоритмов, указанных в шаблоне исходя из типа обрабатываемых данных, а также текущих результатов обработки, полученных на предыдущих шагах выполнения процесса;

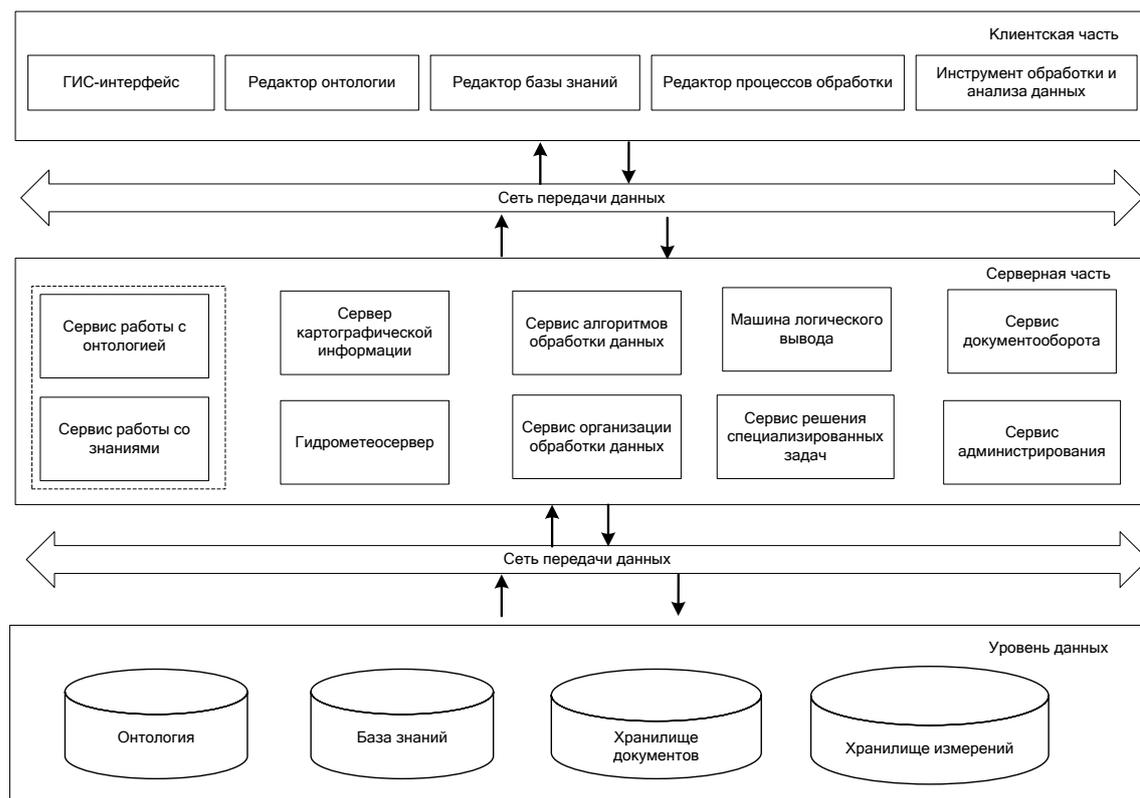
- переход к следующему этапу обработки осуществляется только в том случае, если в соответствии с сформулированными критериями оценки результатов выполнения алгоритмов обработка выполнена успешно, в противном случае осуществляется корректировка параметров применяемого алгоритма или осуществляется выбор другого алгоритма из этой же группы;

- в случае, если процесс обработки выполнен быть не может в связи с недостаточностью исходных данных, процесс обработки прекращается.

Реализацию рассмотренного процесса обработки целесообразно осуществлять при помощи интеллектуальной геоинформационной систем. Это обусловлено тем, что большинство обрабатываемых данных являются пространственными. Типовая ИГИС включает в себя четыре основные составляющие: аппаратные средства, программное обеспечение, данные и методы обработки данных. В качестве аппаратных средств могут использоваться различные типы компьютерных платформ, от централизованных серверов до отдельных или связанных сетью настольных компьютеров. Программное обеспечение ИГИС содержит функции и инструменты, необходимые для хранения, анализа и визуализации пространственной информации. Ключевыми компонентами программных продуктов являются инструменты для ввода и оперирования географической информацией; система управления базой данных; инструменты поддержки пространственных запросов, анализа и визуализации; графический пользовательский интерфейс для легкого доступа к инструментам. Данные о пространственном положении и связанная с ними информация могут собираться и подготавливаться самим пользователем, либо поставляться сторонними поставщиками. Эффективность методов обработки данных в ИГИС во многом определяют успешность применения системы.

В первую очередь интеллектуальные геоинформационные системы предназначены для решения задач поддержки принятия решений, а также как инструменты комплексного анализа и интерпретации разнотипных данных [1, 2]. Для обеспечения расширенных

возможностей ИГИС используется онтологический подход к представлению данных и базы знаний. Для обработки больших объемов измерительных данных требуется включение в состав системы дополнительных специализированных компонентов, обеспечивающих организацию процесса обработки измерений на основе шаблонов с учетом знаний об обрабатываемых данных, библиотеки типов измерений и алгоритмов обработки. Общая структура ИГИС, ориентированная на обработку и анализ измерений представлена на рисунке. Система включает в себя три основных составляющих – базы данных для хранения данных и знаний предметной области, серверную часть, обеспечивающую решение ресурсоемких вычислительных задач, и клиентскую часть, предоставляющую интерфейс конечному пользователю для работы с системой.



**Рис. 1.** Общая структура ИГИС

Основными элементами рассматриваемой ИГИС являются:

- онтология. Онтология представляет собой описание сущностей предметной области и отношений между ними, а также описание решаемых задач, моделей типов измерений, процессов и алгоритмов обработки данных;
- база знаний. База знаний представляет собой совокупность продукционных правил, сформулированных в терминах модели предметной области и отражающих логические зависимости между сущностями;
- хранилище документов. Хранилище документов предназначено для систематизированного хранения различного рода документов, формируемых и используемых в процессе работы с системой;
- хранилище измерений. Хранилище измерений предназначено для систематизированного хранения данных, поступающих в систему, а также данных, полученных в результате обработки;

- сервис работы с онтологией и знаниями. Сервис формирует модель предметной области после загрузки данных из таблиц базы данных и предоставляет другим сервисам и клиентским приложениям интерфейс для работы с моделью и логическими правилами;
- сервер картографической информации. Сервер предназначен для визуализации картографических данных, работы с картографическими данными в едином координатном пространстве;
- гидрометеосервер. Используется для приема оперативной гидрометеорологической информации, ее декодирования и представления пользователю;
- сервис алгоритмов обработки данных. Сервис содержит набор алгоритмов обработки данных, мета описание алгоритмов, а также каталог, описывающий структуру библиотеки;
- сервис организации обработки данных. Сервис обеспечивает решение задачи организации процесса обработки данных исходя из решаемых задач, имеющегося состава данных и заданного шаблона обработки;
- сервис решения специализированных задач. Сервис предназначен для решения расчетных задач, состав которых определяется отдельно для каждой предметной области;
- машина логического вывода. Машина логического вывода обеспечивает применение логических правил, размещенных в базе знаний к новым данным, занесенным в онтологию, результатами логического вывода являются новые значения свойств сущностей онтологии или новые сущности онтологии;
- сервис электронного документооборота. Обеспечивает формирование отчетов в процессе обработки и анализа данных и обмен отчетами между пользователями системы;
- сервис администрирования. Обеспечивает распределение ресурсов, управление доступом пользователей, настройками системы и протоколирование работы;
- ГИС–интерфейс. Служит для взаимодействия пользователя с системой и интеграции составных частей ИГИС для обеспечения функциональности системы;
- редактор онтологии. Редактор онтологии предоставляет графический интерфейс для формирования модели описания предметной области;
- редактор базы знаний. Редактор базы знаний предоставляет графический интерфейс для занесения и редактирования логических правил;
- редактор процессов обработки. Редактор процессов обработки предназначен для предоставления графического интерфейса для формирования процессов обработки;
- инструмент обработки и анализа данных. Инструмент обработки и анализа данных обеспечивает возможность графического просмотра и анализа данных с применением алгоритмов обработки из библиотеки алгоритмов.

ИГИС с такой структурой наиболее полно удовлетворяет требованиям по организации эффективного процесса обработки измерений. Интеграция геоинформационных технологий и рассмотренной технологии обработки и анализа данных позволяет повысить точность и оперативность получения результатов за счет автоматизации процесса обработки, а также обеспечивает масштабируемость системы, адаптивность к входным данным и решаемым задачам.

Апробация предложенного подхода проводилась в рамках составной части опытно-конструкторской работы «Галтель-Алеврит» для данных полученных необитаемыми подводными аппаратами в ходе выполнения своих миссий. Кроме того для данных наблюдений системы буев АРГО при решении задачи обеспечения исходными данными о состоянии Мирового океана системы гидроакустических расчетов. Проводился анализ измерений температуры, давления, электропроводности/ солености воды, полученных в период с 2009 по 2010 гг. Анализ выполнялся по данным, предоставляемым в рамках международного проекта АРГО [4].

## Литература

1. Попович В.В., Потапычев С.Н., Панькин А.В., Шайда С.С., Воронин М.Н. Интеллектуальная ГИС в системах мониторинга. – Тр. СПИИРАН, 2006. Вып. 3. Т. 1. С. 172–184.
2. Sorokin R. Intelligent Geoinformation Systems for Modeling and Simulation // Proceedings of The International Workshop on Harbor, Maritime and Multimodal Logistics Modeling & Simulation (HMS-2003) Riga. 2003. P. 395–398.
3. Global Ocean Observing System, <http://www.ioc-goos.org>
4. International Argo Project, <http://www.argo.net>

## ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫЕ МЕТОДЫ В ЗАДАЧЕ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

**А.Е. Ковтаниук, А.А. Сущенко**

Учреждение Российской академии наук Институт прикладной математики  
Дальневосточного отделения РАН  
690041, Владивосток, ул. Радио, 7, тел.: (423) 231-26-31, факс: (423) 231-18-56,  
e-mail: ankov@imcs.dvgu.ru

**И.Б. Агафонов, В.В. Золотарев**

Учреждение Российской академии наук Институт проблем морских технологий  
Дальневосточного отделения РАН  
690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел.: (423) 243-24-16, факс: (423) 243-24-16,  
e-mail: iks@marine.febras.ru, lab32imtp@marine.febras.ru

Рассматривается задача улучшения качества гидроакустических изображений на основе методов интерполяции функций с финитным спектром. Приведены результаты вычислительных экспериментов с реальными данными.

Важную роль при моделировании процессов распространения сигналов играют целые аналитические функции экспоненциального типа – функции из класса Винера, являющиеся преобразованиями Фурье от функций с компактными носителями. Такие функции часто называют функциями с ограниченным (или финитным) спектром, то есть спектром, сосредоточенным в ограниченном диапазоне частот. В реальной ситуации сигналы могут быть известны (измерены) лишь на некотором дискретном временном множестве, а требуется определить величину сигнала, вообще говоря, в любой момент времени. Таким образом, возникает задача восстановления сигнала, которая будет трактоваться нами как задача интерполяции целых функций.

Представляются весьма перспективными приложения рассматриваемой задачи в гидроакустике и подводной робототехнике. Вначале внимание привлекла возможность выделения и регистрации слабых эхосигналов от удаленных объектов в условиях, когда приемная антенна гидролокатора вынужденно располагается вблизи от источника электромагнитных и акустических помех, каковым является двигательный комплекс подводного робота, управляемый мощными электронными ШИМ-драйверами. При этом попытки повышения соотношения сигнал/шум на этапе вторичной обработки представлялись особенно актуальными тогда, когда электронные методы подавления помех и шумов были уже исчерпаны, а традиционные методы электрической фильтрации оказывались малоэффективными.

Но по мере решения рассматриваемой задачи, стали отчетливо выявляться и другие, возможно даже более значимые приложения. Известно, что гидроакустический канал (практически безальтернативный в подводной связи и локации) является весьма специфичным вследствие нестационарности, рефракционных и иных физических эффектов, что проявляется в виде многолучевости, интерференции и может приводить не только к сильным искажениям передаваемой информации, но и иногда к ее полной потере. В области гидроакустики и подводных технологий предложено немало решений по учету и минимизации этих факторов. Рассматриваемая здесь задача восстановления сигнала представляется весьма перспективным дополнением к уже существующим решениям.

Перейдем к описанию математического аппарата, необходимого для формулировки и решения задачи интерполяции. Пусть  $L_2(R)$  обозначает гильбертово пространство комплекснозначных функций со скалярным произведением и нормой. Обозначим через  $F: L_2(R) \rightarrow L_2(R)$  оператор преобразования Фурье, действующий по формуле

$$[Ff](\omega) = \tilde{f}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-2\pi i\omega x} dx.$$

При этом обратный оператор  $F^{-1}$  определяется формулой

$$[F^{-1}\tilde{f}](x) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{f}(\omega)e^{2\pi i\omega x} d\omega.$$

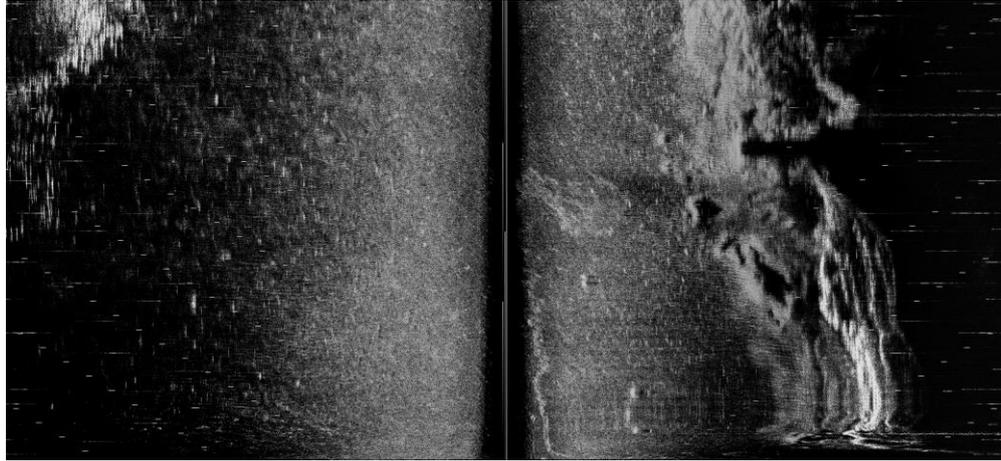
В дальнейшем любую функцию  $f \in L_2(R)$  будем называть сигналом, а ее преобразование Фурье  $\tilde{f}$  - спектром сигнала  $f$ . Под классом Винера  $W_\alpha$  будем понимать линейное многообразие в  $L_2(R)$ , состоящее из всех функций (сигналов)  $f$ , спектр которых сосредоточен на интервале  $(-\alpha, \alpha)$ , то есть  $\tilde{f}(\omega) = 0$ , почти всюду на  $R \setminus (-\alpha, \alpha)$ .

Рассмотрим  $M = \{x_k\}$ ,  $k \in Z = \{0, \pm 1, \pm 2, \dots\}$  — произвольное неограниченное множество в  $R$ , не имеющее конечных предельных точек. Будем полагать, что элементы множества  $M$  являются упорядоченными (то есть  $x_k < x_{k+1}$ ,  $k \in Z$ ), и  $x_0$  - наименьшее неотрицательное число.

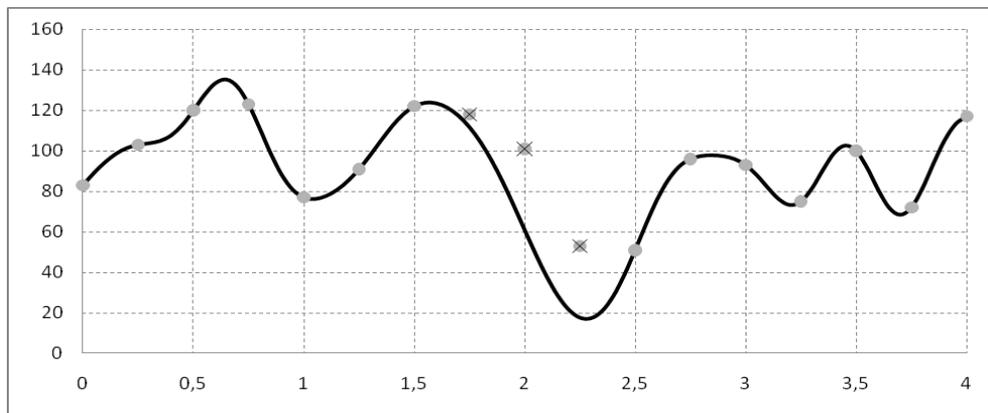
Рассмотрим задачу интерполяции в классе  $W_\alpha$ , заключающуюся в восстановлении функции  $f(z)$  на множестве  $C \setminus M$  по заданным ее значениям на множестве  $M$ . Решению указанной задачи интерполяции посвящено множество работ. В случае, когда  $M$  является равномерной сеткой, задачу интерполяции решает хорошо известная формула Котельникова [1]. Однако, во многих приложениях, связанных с потерей или зашумлением данных, возникает задача интерполяции сигнала с финитным спектром по его значениям на неравномерных сетках. В этих случаях применяются интерполяционные формулы для неравномерных сеток [2-4]. Например, для случая сетки, полученной из равномерной удалением конечного числа узлов, можно воспользоваться формулой Айзенберга [3,4]

$$f(z) = \lim_{\sigma \rightarrow \infty} \lim_{m \rightarrow \infty} f(x_k) e^{2\pi i \alpha (x_k - z)} \frac{2i\sigma}{(z - x_k + 2i\sigma)} \prod_{\substack{j=-m \\ j \neq k}}^m \frac{(z - x_j)(x_k - x_j + 2i\sigma)}{(x_k - x_j)(z - x_j + 2i\sigma)}. \quad (1)$$

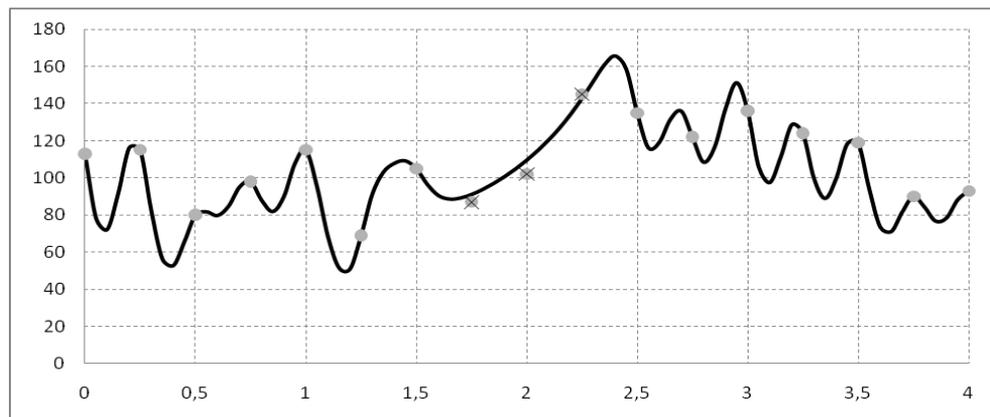
Для проведения вычислительных экспериментов брались выборочные фрагменты «скан-строк» эхолокационного изображения, представленного на рис.1, полученного с помощью гидролокатора бокового обзора (ГБО) автономного подводного робота. «Скан-строки» по сути являются последовательностью выборок физической огибающей эхосигнала. Вынужденное соседство высокочувствительных приемных антенн ГБО с силовыми узлами подводного робота нередко приводит к зашумлению, а в ряде случаев и к потере эхосигналов. Фильтрация, выполняемая в процессе первичной обработки, далеко не всегда обеспечивает желаемый результат, поэтому задача восстановления потерянных данных представляется актуальной и на стадии вторичной обработки.



**Рис. 1.** Пример эхолокационного изображения, полученного с помощью гидролокатора бокового обзора



**Рис. 2, а.** Экспериментальные значения сигнала (точечный график) и восстановленный сигнал (сплошная линия)



**Рис. 2, б.** Экспериментальные значения сигнала (точечный график) и восстановленный сигнал (сплошная линия)

Восстановление данных проводилось по формуле (1). При проведении вычислительных экспериментов предварительно проводилась подборка параметров  $\sigma$ ,  $\alpha$ , обеспечивающих минимальное среднеквадратичное отклонение восстановленного сигнала от известных экспериментальных данных. На рис. 2, а, б приводятся графики сигнала и его восстановления по значениям в 14-ти узлах сетки, полученной из равномерной сетки  $\{0; 0.25; 0.5; \dots; 3.75; 4\}$

удалением 3-х узлов {1.75; 2; 2.25}. Точками обозначены экспериментальные данные, полученные в ходе работы прибора, сплошной линией – восстановленный при помощи формулы Айзенберга сигнал. Перечеркнутые точки в центральной части графика – это измеренные данные, которые мы не учитываем при восстановлении сигнала. Тем самым, мы моделируем ситуацию «зашумления» или потери экспериментальных данных. Интерес представляет, насколько график восстановленного сигнала будет близок к «утерянным» значения. Как видно из графиков, формула (1) позволяет описать качественное поведение сигнала на промежутке зашумления/потери данных. В некоторых случаях (см., например, рис. 2, б), удастся восстановить значение сигнала с хорошей точностью.

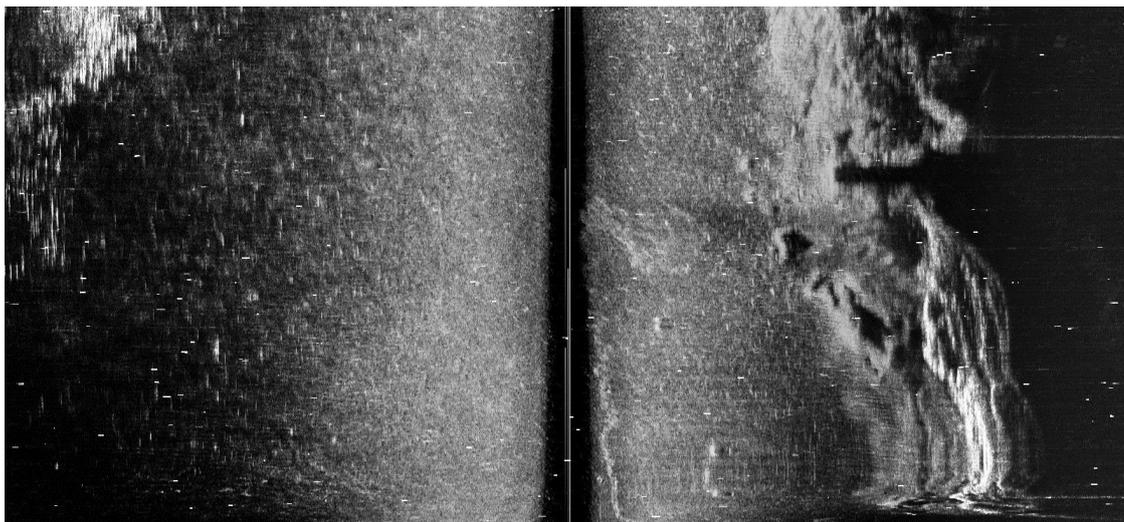
Интерполяционная формула (1) может быть применена в задаче улучшения качества гидроакустических изображений. Для проведения второй серии экспериментов были взяты данные, соответствующие изображению, представленному на рис. 1. Далее, был введен дополнительный случайный шум. Изображение морского дна, соответствующее новым «зашумленным» данным представлено на рис. 3, а. Улучшение качества изображения было реализовано двумя способами: с помощью медианного метода пакета MATLAB (рис. 3, б), и путем последовательного применения интерполяционной формулы (1) для восстановления «зашумленных» данных и метода наименьших квадратов для сглаживания значений сигнала (рис. 3, в).



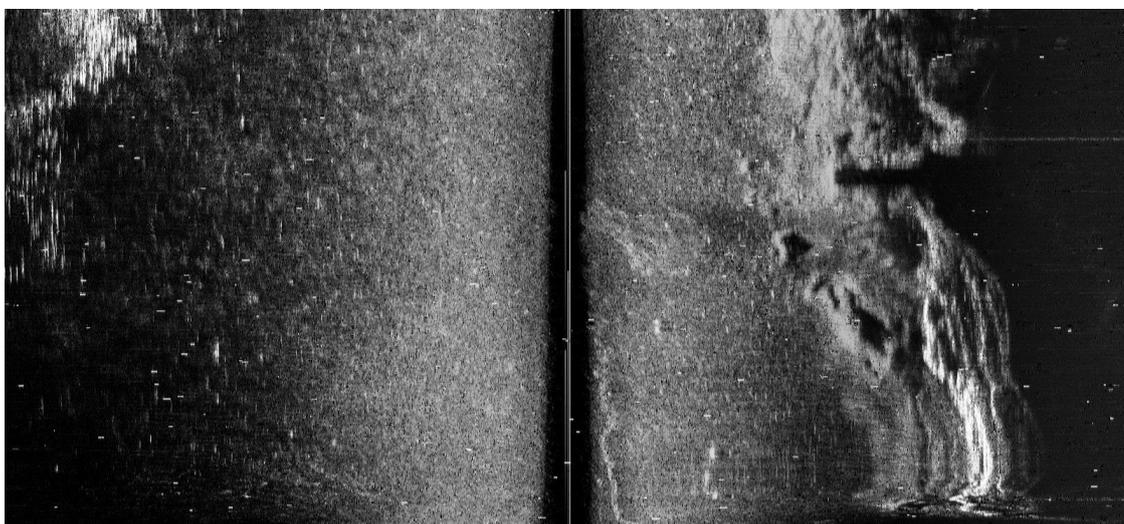
**Рис. 3, а.** Эхолотационное изображение, полученное с помощью гидролокатора бокового обзора, с дополнительным шумом

Таким образом, использование интерполяционных методов восстановления сигналов в комбинации с методами улучшения изображений представляется вполне перспективным направлением в задачах картографирования морского дна и улучшения качества гидроакустических изображений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-01-98521) и гранта конкурса интеграционных проектов ДВО и СО РАН (проект № 09-II-CO-01-004).



**Рис. 3, б.** Результат обработки эхолокационного изображения с помощью медианного метода пакета MATLAB



**Рис. 3, в.** Результат обработки эхолокационного изображения с помощью интерполяционной формулы (1) и метода наименьших квадратов

## Литература

1. Котельников В.А. О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи // Материалы по радиосвязи к 1-му Всесоюзному съезду по вопросам технической реконструкции связи. Всесоюзный энергетический комитет. Изд-во Управления связи РККА, 1933.
2. Ковтанюк А.Е., Суровенко Н.С., Агафонов И.Б., Золотарев В.В. Восстановление сигналов по неравномерным выборкам // Технические проблемы освоения Мирового океана Материалы 3-й Всероссийской научно-технической конференции, 22 –25 сентября 2009 г. – Владивосток: Дальнаука, 2010. С. 356-360.
3. Алексеев Г.В. Обратные задачи излучения волн и теории сигналов. – Владивосток: Изд-во ДВГУ, 1991. – 140 с.
4. Айзенберг Л.А. Формулы Карлемана в комплексном анализе. 1990.

## О ЗАДАЧЕ ПОСТРОЕНИЯ ГИДРОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ МОРСКОГО ДНА

**И.В. Прохоров**

Учреждение Российской академии наук Институт прикладной математики  
Дальневосточного отделения РАН  
690041, Владивосток, ул. Радио 7, тел./факс: (423) 2311856, e-mail: prh@iam.dvo.ru

**И.Б. Агафонов, В.В. Золотарев**

Учреждение Российской академии наук Институт проблем морских технологий  
Дальневосточного отделения РАН  
690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел./факс: (423) 2432416,  
e-mail: iks@marine.febras.ru, lab32imtp@marine.febras.ru

Рассматриваются теоретические проблемы, связанные с построением гидролокационных изображений морского дна в условиях, когда существенное влияние на измеряемый сигнал оказывают рассеивающие свойства морской среды. В рамках кинетической модели, основанной на уравнении переноса акустического излучения, сформулирована задача картографирования морского дна по измерениям, полученным с гидролокатора бокового обзора. Проводится анализ обратной задачи в случае точечной передающей антенны и учете однократного рассеяния в среде.

Из множества факторов, влияющих на качество гидролокационного изображения, наиболее существенными, наряду с траекторными нестабильностями движения подводного носителя гидролокационной антенны, являются рассеивающие свойства морской среды, вызванные, например, флуктуациями плотности и коэффициента сжимаемости [1]. В связи с этим при математическом моделировании рассматриваемого процесса представляется важным исследование класса моделей, учитывающих многократное рассеяние акустических волн в случайно-неоднородной среде [2, 3]. Существуют два основных подхода к рассмотрению проблемы многократного рассеяния звуковых волн: статистический и феноменологический. При статистическом рассмотрении исходят из стохастических волновых уравнений с последующим усреднением по ансамблю реализаций флуктуирующих полей. При феноменологическом подходе предметом исследования является уравнение переноса, выражающее закон сохранения энергии излучения.

В данной работе мы будем придерживаться феноменологического подхода, основанного на нестационарном интегро-дифференциальном уравнении переноса для плотности распределения звуковых волн с соответствующими граничными и начальными условиями. В рамках этой модели исследуется задача определения отражающих свойств морского дна по измерениям, полученным с носителя гидролокатора бокового обзора, движущегося с некоторой постоянной скоростью вдоль заданной траектории. Получено уравнение для нахождения коэффициента отражения дна и проанализированы его приближения при использовании точечной передающей антенны и при учете однократного рассеяния.

Для простоты будем рассматривать среду  $G$ , совпадающую с пространством  $\mathbf{R}^3$  и состоящую всего из двух зон:  $G_1$  и  $G_2$ . Область  $G_2 = \{\mathbf{r} = (r_1, r_2, r_3) \in \mathbf{R}^3 : r_3 < -l\}$ ,  $l > 0$ , интерпретируется как донная часть океана, а область  $G_1 = \{\mathbf{r} \in \mathbf{R}^3 : r_3 > -l\} \setminus \gamma_a(t)$  - как водная часть за вычетом некоторой поверхности  $\gamma_a(t)$ , на которой размещены излучающая и

приемная антенны (см. рис. 1, а). Отметим, что пространственное местоположение носителя антенн  $\gamma_a(t)$  зависит от времени.

Распространение акустических волн в случайно-неоднородной среде может быть описано уравнением переноса излучения [4-6]:

$$\left( \frac{1}{v(\mathbf{r})} \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{k} \cdot \nabla_{\mathbf{r}} + \mu(\mathbf{r}, \mathbf{k}) \right) f(\mathbf{r}, \mathbf{k}, t) = \int_{\Omega} \sigma(\mathbf{r}, \mathbf{k}', \mathbf{k}) f(\mathbf{r}, \mathbf{k}', t) d\mathbf{k}', \quad (1)$$

где функция  $f(\mathbf{r}, \mathbf{k}, t)$  интерпретируется как плотность энергии волны в момент времени  $t$  в точке  $\mathbf{r}$ , распространяющейся с волновым вектором  $\mathbf{k}$ . Не нарушая общности рассуждений, можно считать, что волновой вектор  $\mathbf{k}$  принадлежит единичной сфере  $\Omega = \{\mathbf{k} \in \mathbb{R}^3 : |\mathbf{k}| = 1\}$ . Коэффициент  $\mu$ , называемый коэффициентом ослабления, представим в виде

$$\mu(\mathbf{r}, \mathbf{k}) = \mu_a(\mathbf{r}, \mathbf{k}) + \mu_s(\mathbf{r}, \mathbf{k}), \quad \mu_s(\mathbf{r}, \mathbf{k}) = \int_{\Omega} \sigma(\mathbf{r}, \mathbf{k}, \mathbf{k}') d\mathbf{k}',$$

где  $\mu_s, \mu_a$  – коэффициенты рассеяния и поглощения, а функция  $\sigma(\mathbf{r}, \mathbf{k}', \mathbf{k})$  – сечение рассеяния. Величина  $\sigma$  зависит от флуктуаций плотности среды  $\rho(\mathbf{r})$  и ее сжимаемости  $\kappa(\mathbf{r})$ . Скорость распространения звуковой волны выражается формулой  $v(\mathbf{r}) = v_i = (\rho_i \kappa_i)^{-1/2}$ , где  $\mathbf{r} \in G_i$ ,  $\rho_i, \kappa_i$  – плотность и сжимаемость среды в отсутствие флуктуаций.

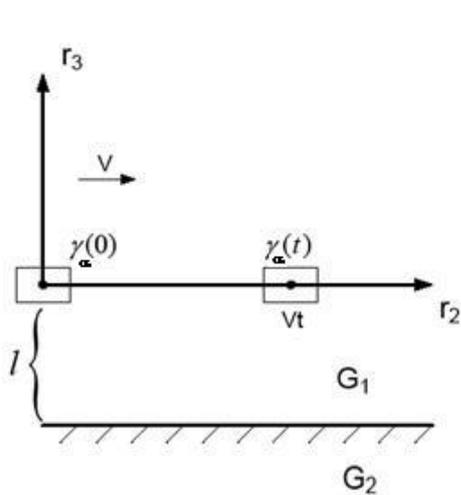


Рис. 1, а

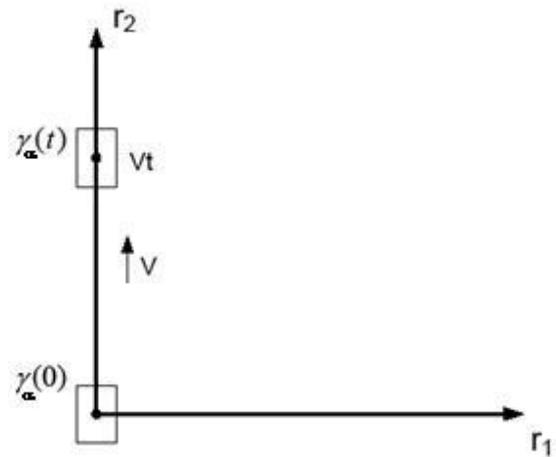


Рис. 1, б

В момент времени  $t=0$  источники звука в среде отсутствуют, то есть начальное условие для функции  $f$  имеет вид

$$f(\mathbf{r}, \mathbf{k}, 0) = 0, \quad (\mathbf{r}, \mathbf{k}) \in G \times \Omega \quad (2)$$

Будем полагать, что поверхность антенны  $\gamma_a(0)$  представляет собой достаточно малую прямоугольную часть плоскости  $z_2 = 0$ , центр симметрии которой расположен в начале координат (рис. 1а, 1б). Все точки множества  $\gamma_a(t)$  с течением времени перемещаются в пространстве  $\mathbb{R}^3$  с постоянной скоростью  $\mathbf{V} = (0, V, 0)$ , то есть

$$\gamma_a(t) = \{\mathbf{z} + t\mathbf{V}, \mathbf{z} \in \gamma_a(0)\}.$$

На множестве  $\gamma_a(t)$  задаются граничные условия [6]:

$$f^-(\mathbf{z}, \mathbf{k}, t) = h(\mathbf{z}, \mathbf{k}, t), \quad (\mathbf{z}, \mathbf{k}, t) \in \gamma_a(t) \times \Omega \times [0, T], \quad (3)$$

$$\int_{\Omega} S_a(\mathbf{z}, \mathbf{k}) f^+(\mathbf{z}, \mathbf{k}, t) d\mathbf{k} = H(\mathbf{z}, t), \quad (\mathbf{z}, \mathbf{k}, t) \in \gamma_a(t) \times \Omega \times [0, T]. \quad (4)$$

Здесь  $f^{\pm}(\mathbf{z}, \mathbf{k}, t) = \lim_{\varepsilon \rightarrow +0} f(\mathbf{z} \mp \varepsilon \mathbf{k}, \mathbf{k}, t)$ ,  $h(\mathbf{z}, \mathbf{k}, t)$  – плотность энергии передающей антенны,  $H(\mathbf{z}, t)$  – интенсивность на входе приемной антенны и функция  $S_a$  определяет диаграмму направленности приемных антенн, расположенных по обе стороны поверхности  $\gamma_a(t)$ . При  $\mathbf{k} \in \{\mathbf{k} = (k_1, k_2, k_3) \in \Omega : k_1 > 0\}$  функция  $S_a(\mathbf{z}, \mathbf{k})$  определяет диаграмму направленности «по правому борту», а при  $\mathbf{k} \in \{\mathbf{k} = (k_1, k_2, k_3) \in \Omega : k_1 < 0\}$  – «по левому» (см. рис. 1б).

Ограничимся случаем, когда отражающие свойства дна на границе раздела  $\gamma_d = \{\mathbf{z} \in \mathbb{R}^3 : z_3 = -l\}$  определяются диффузным отражением, то есть

$$f^-(\mathbf{z}, \mathbf{k}, t) = \frac{\sigma_d(\mathbf{z})}{4\pi} \int_{\Omega} f^+(\mathbf{z}, \mathbf{k}', t) d\mathbf{k}', \quad \mathbf{z} \in \gamma_d, \quad (5)$$

где функция  $\sigma_d(\mathbf{z})$  является коэффициентом отражения поверхности  $\gamma_d$  и описывает степень неоднородности дна океана. Резкие изменения этой функции могут указывать на наличие искусственных придонных объектов, сильно отличающихся по своим отражающим свойствам от естественного ландшафта дна. Рассмотрим следующую обратную задачу.

**Задача 1.** Определить функцию  $\sigma_d(\mathbf{z})$  в некоторой области  $\gamma'_d \subset \gamma_d$  из уравнения (1), начального условия (2) и граничных условий (3)-(5), если функции  $\mu$  и  $\sigma$  известны в области  $G_1$  и  $H(\mathbf{z}, t)$ ,  $h(\mathbf{z}, \mathbf{k}, t)$  и  $S_a(\mathbf{z}, \mathbf{k})$  заданы для всех  $(\mathbf{z}, t) \in \gamma_a(t) \times [0, T]$ ,  $\mathbf{k} \in \Omega$ .

Область  $\gamma'_d$  является подмножеством  $\gamma_d$ , которое может быть «озвучено» за промежуток времени  $[0, T]$  источником, расположенным на  $\gamma_a(t)$ .

Для всех точек  $\mathbf{z} \in \gamma_a(t)$  можно получить следующее соотношение [6]

$$H(\mathbf{z}, t) = \int_{\Omega} S_a(\mathbf{z}, \mathbf{k}) f^+(\mathbf{z}, \mathbf{k}, t) d\mathbf{k} = H_{\gamma}(\mathbf{z}, t) + H_G(\mathbf{z}, t), \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} H_{\gamma}(\mathbf{z}, t) &= \int_{\gamma_d} S_a\left(\mathbf{z}, \frac{\mathbf{z} - \mathbf{y}}{|\mathbf{z} - \mathbf{y}|}\right) \sigma_d(\mathbf{y}) \int_{\Omega} f^+\left(\mathbf{y}, \mathbf{k}', t - \frac{|\mathbf{y} - \mathbf{z}|}{v}\right) d\mathbf{k}' \times \\ &\times \exp\left(-\int_0^{|\mathbf{z} - \mathbf{y}|} \mu\left(\mathbf{z} - \tau \frac{\mathbf{z} - \mathbf{y}}{|\mathbf{z} - \mathbf{y}|}, \frac{\mathbf{z} - \mathbf{y}}{|\mathbf{z} - \mathbf{y}|}\right) d\tau\right) \left| \frac{\mathbf{z} - \mathbf{y}}{|\mathbf{z} - \mathbf{y}|^3} \cdot \mathbf{n}(\mathbf{y}) \right| dy, \\ H_G(\mathbf{z}, t) &= \int_{G_1} S_a\left(\mathbf{z}, \frac{\mathbf{z} - \mathbf{x}}{|\mathbf{z} - \mathbf{x}|}\right) \exp\left(-\int_0^{|\mathbf{z} - \mathbf{x}|} \mu\left(\mathbf{z} - \tau' \frac{\mathbf{z} - \mathbf{x}}{|\mathbf{z} - \mathbf{x}|}, \frac{\mathbf{z} - \mathbf{x}}{|\mathbf{z} - \mathbf{x}|}\right) d\tau'\right) \times \\ &\times \int_{\Omega} \sigma\left(\mathbf{x}, \mathbf{k}', \frac{\mathbf{z} - \mathbf{x}}{|\mathbf{z} - \mathbf{x}|}\right) f\left(\mathbf{x}, \mathbf{k}', t - \frac{|\mathbf{z} - \mathbf{x}|}{v}\right) \frac{d\mathbf{k}' d\mathbf{x}}{|\mathbf{z} - \mathbf{x}|^2} \end{aligned}$$

и  $\mathbf{n}(\mathbf{z})$  – вектор внешней единичной нормали в точке  $\mathbf{z}$ . Слагаемое  $H_{\gamma}$  в (6) описывает не рассеянную часть принимаемого сигнала. Именно это слагаемое несет в себе информацию о характеристиках дна. Напротив, слагаемое  $H_G$  отвечает сигналу, вызванному случайными флуктуациями среды, и в данной задаче является шумом, препятствующим выделению из  $H$  полезного сигнала  $H_{\gamma}$ .

Рассмотрим случай, когда в среде  $G_1$  учитывается только однократное рассеяние и передающая антенна является точечной:

$$h(\mathbf{z}, \mathbf{k}, t) = \frac{\delta(\mathbf{z} - \mathbf{V}t) s_a(\mathbf{z}, \mathbf{k})}{|\mathbf{n}(\mathbf{z}) \cdot \mathbf{k}|} h_0(t), \quad \mathbf{z} \in \gamma_a(t), \quad (7)$$

где  $\delta$  – поверхностная дельта-функция и  $s_a$  – диаграмма направленности передающей антенны. При этих предположениях вместо уравнения (6) при  $\mathbf{z} = \mathbf{V}t$  получаем следующее соотношение

$$\tilde{H}(\mathbf{V}t, t) = \tilde{H}_\gamma(\mathbf{V}t, t) + \tilde{H}_G(\mathbf{V}t, t), \quad (8)$$

Здесь  $\tilde{H}_\gamma(\mathbf{V}t, t)$  и  $\tilde{H}_G(\mathbf{V}t, t)$  есть отраженная от дна и однократно рассеянная части принимаемого сигнала в точках траектории носителя антенны  $\gamma_a(t)$ :

$$\tilde{H}_\gamma(\mathbf{V}t, t) = \iint_{\gamma_d^0}^t P(t, t', \mathbf{y}) \sigma_d(\mathbf{y}) \left| \frac{\mathbf{V}t - \mathbf{y}}{|\mathbf{V}t - \mathbf{y}|^3} \cdot \mathbf{n}(\mathbf{y}) \right| \frac{dt' d\mathbf{y}}{|\mathbf{y} - \mathbf{V}t'|^2}, \quad (9)$$

$$\tilde{H}_G(\mathbf{V}t, t) = \iint_{G_1^0}^t P(t, t', \mathbf{x}) \sigma \left( \mathbf{x}, \frac{\mathbf{x} - \mathbf{V}t'}{|\mathbf{x} - \mathbf{V}t'|}, \frac{\mathbf{V}t - \mathbf{x}}{|\mathbf{V}t - \mathbf{x}|} \right) \frac{dt' d\mathbf{x}}{|\mathbf{x} - \mathbf{V}t'|^2}, \quad (10)$$

где функция  $P(t, t', \mathbf{y})$  в равенствах (9) и (10) имеет вид

$$\begin{aligned} P(t, t', \mathbf{y}) = & S_a \left( \mathbf{V}t, \frac{\mathbf{V}t - \mathbf{y}}{|\mathbf{V}t - \mathbf{y}|} \right) \times \\ & \times \exp \left( - \int_0^{|\mathbf{V}t - \mathbf{y}|} \mu \left( \mathbf{V}t - \tau \frac{\mathbf{V}t - \mathbf{y}}{|\mathbf{V}t - \mathbf{y}|}, \frac{\mathbf{V}t - \mathbf{y}}{|\mathbf{V}t - \mathbf{y}|} \right) d\tau \right) \times \\ & \times \exp \left( - \int_0^{|\mathbf{y} - \mathbf{V}t'|} \mu \left( \mathbf{y} - \tau \frac{\mathbf{y} - \mathbf{V}t'}{|\mathbf{y} - \mathbf{V}t'|}, \frac{\mathbf{y} - \mathbf{V}t'}{|\mathbf{y} - \mathbf{V}t'|} \right) d\tau \right) \times \\ & \times s_a \left( \mathbf{V}t', \frac{\mathbf{y} - \mathbf{V}t'}{|\mathbf{y} - \mathbf{V}t'|} \right) \times h_0 \left( t - \frac{|\mathbf{y} - \mathbf{V}t|}{v} - \frac{|\mathbf{y} - \mathbf{V}t'|}{v} \right). \end{aligned}$$

Если коэффициент ослабления излучения в среде  $G_1$  постоянен ( $\mu = const$ ), то выражение для  $P$  существенно упрощается

$$\begin{aligned} P(t, t', \mathbf{y}) = & S_a \left( \mathbf{V}t, \frac{\mathbf{V}t - \mathbf{y}}{|\mathbf{V}t - \mathbf{y}|} \right) \times \exp(-\mu(|\mathbf{y} - \mathbf{V}t| + |\mathbf{y} - \mathbf{V}t'|)) \times \\ & \times s_a \left( \mathbf{V}t', \frac{\mathbf{y} - \mathbf{V}t'}{|\mathbf{y} - \mathbf{V}t'|} \right) \times h_0 \left( t - \frac{|\mathbf{y} - \mathbf{V}t|}{v} - \frac{|\mathbf{y} - \mathbf{V}t'|}{v} \right). \end{aligned}$$

Соотношение (8) при заданных функциях  $\tilde{H}$ ,  $\mu$  и  $\sigma$  является уравнением, из которого определяется функция  $\sigma_d(\mathbf{y})$ , характеризующая отражающие свойства дна. Представление функции  $\sigma_d(\mathbf{y})$  в графическом виде, например, как полутоновое изображение, где большому значению функции соответствует более светлый оттенок, можно интерпретировать как гидролокационное изображение морского дна.

Отметим тот факт, что при заданных величинах  $\mu$  и  $\sigma$  функция  $\tilde{H}_G$  находится по формуле (10), поэтому однократно рассеянная часть измеряемого сигнала может быть вычислена и отфильтрована вычитанием ее из  $\tilde{H}$ .

В отличие от уравнения (6), учитывающего многократное рассеяние в среде, уравнение (8) линейное относительно неизвестной функции  $\sigma_d$ , что в значительной мере облегчает исследование задачи.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-01-98521) и гранта конкурса интеграционных проектов ДВО и СО РАН (проект № 09-П-СО-01-004).

## Литература

1. Матвиенко Ю.В., Воронин В.А., Тарасов С.П., Скняря А.В., Тутынин Е.В. Пути совершенствования гидроакустических технологий обследования морского дна с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов // Подводные исследования и робототехника. 2008. Т. 2, № 8. С. 4-15.
2. Исимару А., Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. – М. Мир, 1,2, 1981.
3. Ярошук И.О., Гулин О.Э. Метод статистического моделирования в задачах гидроакустики. – Владивосток, Дальнаука, 2002.
4. Bal G., Keller J.B., Papanicolaou G., and Ryzhik L. Transport theory for acoustic waves with reflection and transmission at interfaces // Wave Motion. 1999. Vol. 30. P.303-327.
5. Bal G. Kinetics of scalar wave fields in random media // Wave Motion. 2005. Vol.43. P.132-157.
6. Прохоров И. В., Золотарев В. В., Агафонов И. Б., Задача акустического зондирования во флуктуирующем океане // Дальневосточный математический журнал. 2011. Т. 11. № 1. С. 76–87.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ  
ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ОЦЕНОК КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ШУМОВ В МОРСКОЙ ВОДЕ  
В ЗАЛИВЕ ПЕТРА ВЕЛИКОГО ЯПОНСКОГО МОРЯ

**С.В. Горовой, В.П. Рублев**

Дальневосточный государственный технический университет  
e-mail: GorovoySV@mail.ru, lavr46@mail.ru

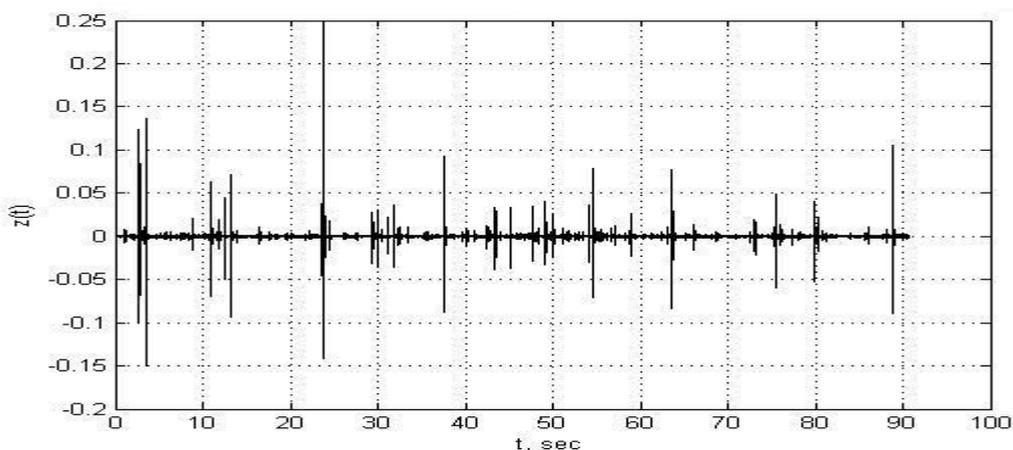
В настоящее время для передачи команд управления и связи с подводными техническими системами, речевой связи с легководолазами и т.д. наряду с акустическими используются и электромагнитные волны, преимущественно на частотах до 10 кГц. Вблизи морских портов, в районах проведения буровых работ, во время спасательных операций в море и т.д. интенсивность электромагнитных помех, их вероятностная и частотно-временная структура могут значительно отличаться от соответствующих характеристик для отдаленных районов океана. Для построения адаптивных систем управления и связи по электромагнитному каналу в морской воде необходимо знать характеристики помех и их зависимость от времени именно для данного района. В настоящей работе приведены некоторые результаты экспериментального исследования временной изменчивости оценок корреляционных функций электрической составляющей электромагнитных шумов, наблюдаемых в прибрежных водах залива Петра Великого Японского моря в диапазонах частот 3-4 и 5-7 кГц. Для измерений использовались два металлических электрода, расположенных горизонтально, перпендикулярно береговой линии на 0,5 м от дна на расстоянии 10 м друг от друга на удалении 50 м от берега. Глубина места составляла 5 м, грунт – ил-песок. Во время проведения измерений судов на дистанциях ближе 3 миль не наблюдалось, волнение составляло не более 2-х баллов, ветра и осадков не было. Сигналы от электродов по экранированным кабелям подавались на вход усилителя-формирователя с трансформаторным входом и полосой пропускания 0,3-8 кГц и далее на 24 разрядный АЦП. Собственные шумы используемой аппаратуры с учетом микрофонного эффекта в кабелях при наблюдавшемся волнении моря были не менее чем на 40 дБ ниже уровня исследуемых сигналов. Для уменьшения микрофонного эффекта в кабелях использовались специальные крепления. Частота квантования составляла 22050 Гц. Оцифрованные данные записывались в память компьютера и обрабатывались с помощью специально разработанных программных средств.

Обработка производилась следующим образом. С помощью цифровых фильтров выделялись составляющие сигнала в нескольких полосах частот, а затем для них вычислялись оценки корреляционных функций и анализировалась их временная изменчивость. Время накопления составляло 1-10 с. Были рассчитаны средние значения и характеристики разброса оценок корреляционных функций.

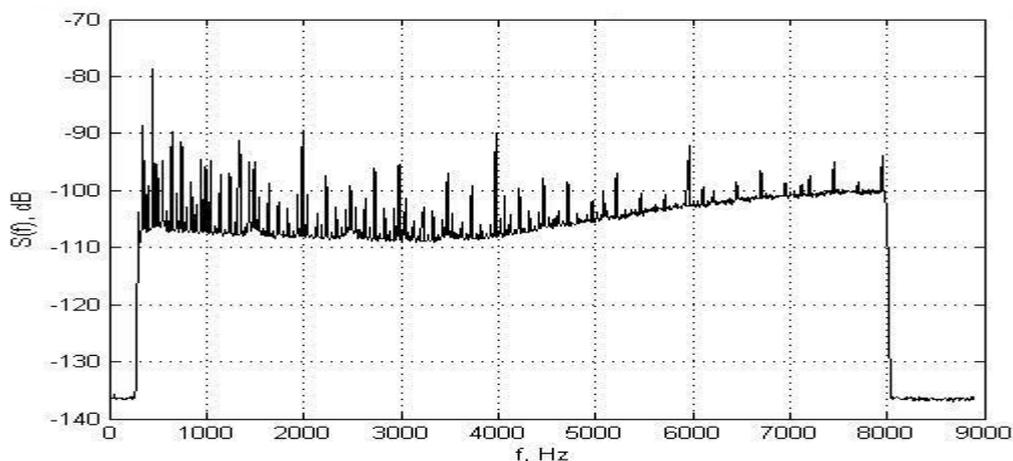
На рис. 1 показан типичный фрагмент осциллограммы входного сигнала после дополнительной фильтрации КИХ фильтром 1024 порядка в полосе частот 0,3-8 кГц. Сигнал представляет собой характерную шумовую дорожку с нерегулярными одиночными и групповыми всплесками длительностью 7-20 мс, в среднем по 20-30 всплесков на каждом 10-секундном интервале. Каждые 10-15 с наблюдаются всплески с значительно большими амплитудами. Детальный частотный анализ показал, что названные всплески имеют сплошной спектр в диапазоне частот от 5 кГц до 10 кГц и выше и напоминают микрофонные шумы в подверженных вибрациям кабелях и «pop-corn» составляющую шума использовавшихся в усилителе-формирователе операционных усилителей [1], но по уровню

превосходят их более чем на 40 дБ. Для большинства фрагментов исследованного сигнала средняя мощность всплесков не превышала 10-30% средней мощности шумовой дорожки.

На рис. 2 показан усредненный амплитудный спектр показанного на рис. 1 сигнала. При вычислении спектра использовалось 4096-точечное БПФ и линейное усреднение 1000 спектров, сдвинутых на 2048 выборок. Спектр имеет сплошную и дискретные составляющие. Сплошная составляющая при изменении частоты от 0,3 до 4 кГц уменьшается со скоростью 1-2 дБ на октаву, а в диапазоне 4-8 кГц возрастает со скоростью 6-8 дБ на октаву. Дискретные составляющие наиболее заметны в низкочастотной области. Их амплитуды уменьшаются при увеличении частоты. Частоты дискретных составляющих не кратны частоте питающей сети.



**Рис. 1.** Фрагмент осциллограммы входного сигнала



**Рис. 2.** Усредненный амплитудный спектр исследуемого сигнала

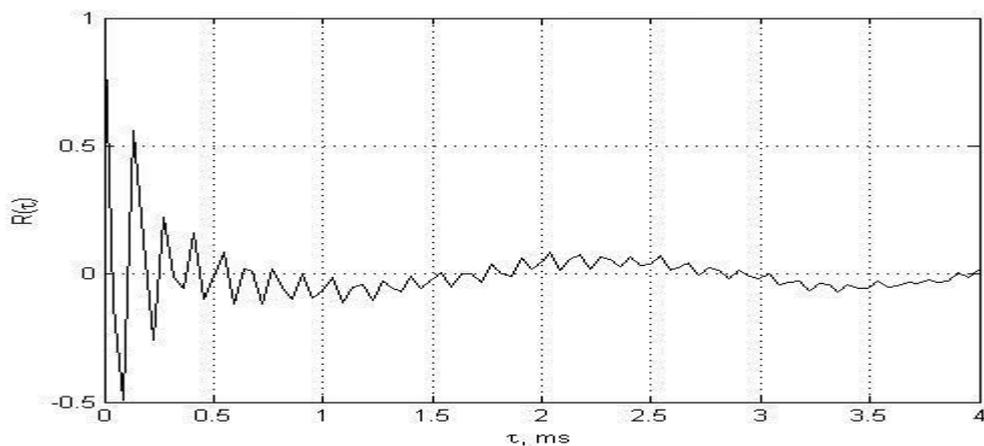
Для оценки эффективности корреляционного метода обнаружения сигналов в заданной помеховой обстановке важно знать характеристики изменчивости выборочных реализаций корреляционной функции помехи, в том числе при изменении времени накопления.

Для оценки корреляционной функции случайного сигнала  $z(t)$  используется известное соотношение:

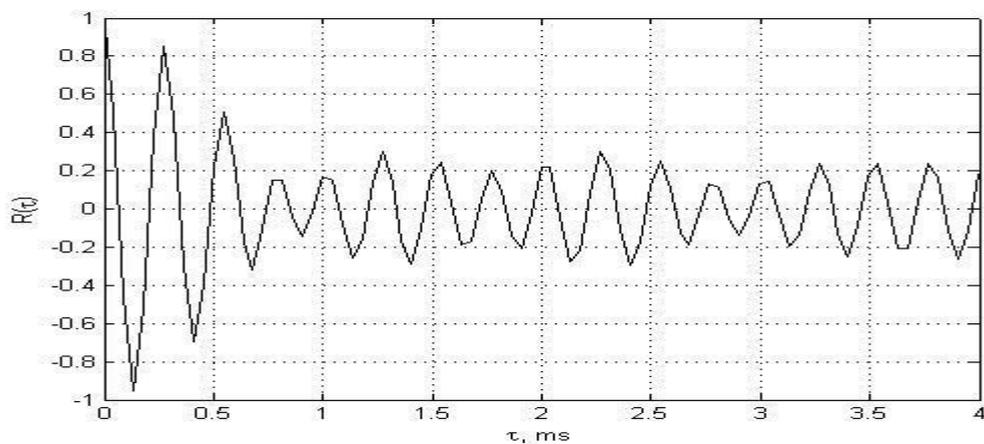
$$R(\tau) = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T z(t)z(t - \tau)dt.$$

Полученная в результате применения этого соотношения оценка корреляционной функции для каждого значения  $\tau$  является случайной величиной. При увеличении времени накопления  $T$  в ряде случаев точность оценки корреляционной функции возрастает. Некоторые соображения по выбору величины  $T$  приведены в [2]. Теоретический анализ статистических характеристик оценок значений корреляционной функции описан в [3].

На рис. 3-5 показаны начальные участки оценок автокорреляционных функций исследуемого сигнала при времени накопления  $T=60$  с в диапазонах частот 0,3-8 кГц, 3-4 кГц и 5-7 кГц соответственно. Из сравнения рис. 3-5 видно, что оценка автокорреляционной функции в полосе частот 3-4 кГц имеет более явно выраженный колебательный характер, и при увеличении  $\tau$  спадает значительно медленнее, чем для полосы 0,3-8 кГц и особенно для полосы 5-7 кГц. Это вызвано различиями в относительных уровнях дискретных составляющих в соответствующих полосах частот, как показано на рис. 2. Аналогичные результаты получаются и для других фрагментов исследуемого сигнала, с большим или меньшим количеством видимых на рис. 1. всплесков. В связи с этим, при использовании корреляционного метода обнаружения сигналов, в подобной помеховой обстановке при времени накопления порядка 60 с может оказаться наиболее предпочтительным использовать полосу частот 5-7 кГц.

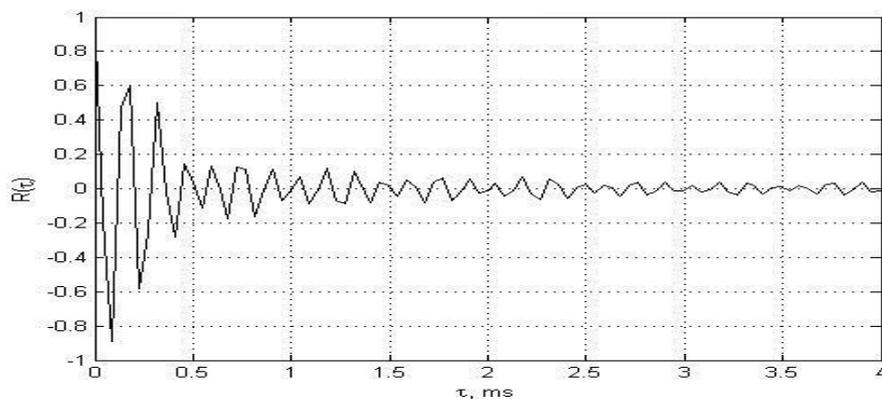


**Рис. 3.** Начальный участок автокорреляционной функции исследуемого сигнала в полосе частот 0,3-8 кГц при  $T=60$  с

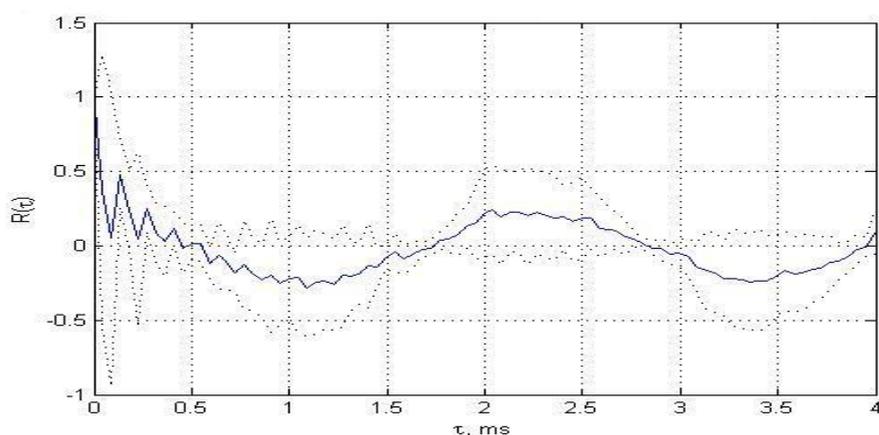


**Рис. 4.** Начальный участок автокорреляционной функции исследуемого сигнала в полосе частот 3-4 кГц при  $T=60$  с

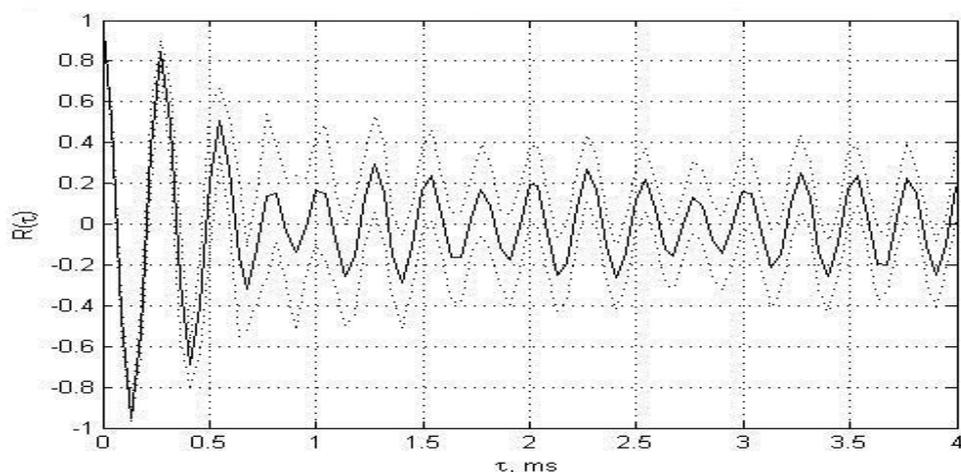
На рис. 6-8 показаны начальные участки средних оценок автокорреляционных функций исследуемого сигнала и границы области «трех сигм» для них при времени накопления  $T=0,4$  с в диапазонах частот 0,3-8 кГц, 3-4 кГц и 5-7 кГц соответственно для «относительно спокойного» участка сигнала от 4 до 14 с на рис. 1. Усреднение производилось по 1000 реализациям корреляционных функций, сдвинутых на 10 мс.



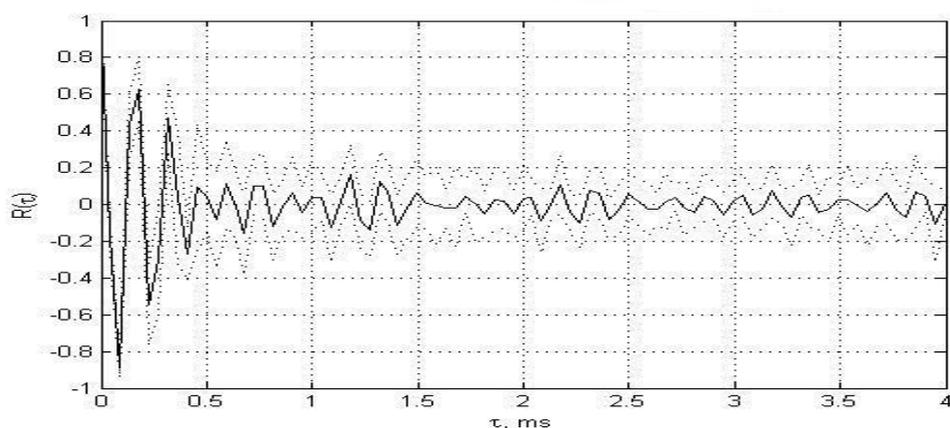
**Рис. 5.** Начальный участок автокорреляционной функции исследуемого сигнала в полосе частот 5-7 кГц при  $T=60$  с



**Рис. 6.** Начальный участок усредненной автокорреляционной функции исследуемого сигнала в полосе частот 0,3-8 кГц при  $T=0,4$  с



**Рис. 7.** Начальный участок усредненной автокорреляционной функции исследуемого сигнала в полосе частот 3-4 кГц при  $T=0,4$  с



**Рис. 8.** Начальный участок усредненной автокорреляционной функции исследуемого сигнала в полосе частот 5-7 кГц при  $T=0,4$  с

Из сравнения рис. 6-8 видно, что при уменьшении времени накопления границы доверительной области оценки корреляционной функции оказываются наименьшими для полосы частот 5-7 кГц.

Описанные в работе результаты затрагивают лишь некоторые детали структуры электромагнитных шумов, наблюдавшихся в конкретных условиях в море, но могут послужить в качестве ориентира при обосновании выбора параметров устройств электромагнитной связи, в которых используются адаптивные корреляционные алгоритмы обнаружения сигналов.

## Литература

1. Motchenbacher C.D., Connelly J.A. Low-Noise Electronic System Design. John Willey & Sons Inc: New York, 1993. 422 с.
2. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. – М.: Мир. 1989. – 540 с.
3. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов: Пер. с англ. – М.: Мир. 1976. – 755 с.

# АЛГОРИТМЫ СЕГМЕНТАЦИИ И РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ИСКУССТВЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

**С.В. Сай, А.А. Филей**

Тихоокеанский государственный университет  
680035 г. Хабаровск, ул.Тихоокеанская, 136, тел./факс: (4212) 224378,  
e-mail: sai@evm.khstu.ru

В статье рассматриваются особенности алгоритмов поиска, сегментации и распознавания искусственных объектов в ГБО изображении. Предлагается модифицированный алгоритм сегментации объектов на основе морфологического метода выделения границ. Приведены результаты исследований эффективности оригинального алгоритма фрактального распознавания объектов.

Алгоритмы поиска и распознавания объектов цифровых изображения используются в различных системах технического зрения. Описание известных алгоритмов поиска и распознавания объектов изображений достаточно хорошо представлено в литературе, например, в [1] и [2]. Обзор литературных источников показывает, что в большинстве случаев, в задачах распознавания учитываются такие признаки объекта как его геометрическая форма и распределение яркостей по площади всего объекта. В качестве критерия распознавания обычно используется среднеквадратичное отклонение. Дополнительно к основным признакам используются спектральные характеристики, числовые моменты, цветовые признаки, сегментация и др. К новейшим методам [3] обработки и распознавания изображений относится фрактальное распознавание.

Общий алгоритм поиска и обнаружения объектов на изображении включает следующие этапы:

- 1) фильтрация;
- 2) обнаружение разрывов яркости;
- 2) бинаризация;
- 3) выделение разрывов яркости;
- 4) сегментация.

С целью исследования эффективности общего алгоритма поиска и обнаружения объектов, в среде C++ разработана программа реализующая алгоритмы: 1) фильтрации – медианная, среднее, гауссовая; 2) выделения разрывов яркости – обнаружение точек, обнаружение линий, обнаружение контурных перепадов; 3) бинаризации – пороговая, адаптивная, метод к-средних, метод Niblack, метод Sauvola, метод Bernsan; 4) сегментации – выделение связных компонент, морфологические алгоритмы.

Авторами предложен оригинальный алгоритм сегментации объектов на основе морфологического алгоритма выделения границ. В математической морфологии используется язык теории множеств. Множествами представляются объекты на изображении. В нашем случае множество всех черных пикселей бинарного изображения является одним из вариантов его полного морфологического описания. Обозначим это множество буквой  $A$ . В терминах морфологической обработки изображений алгоритм выделения границ можно описать следующим образом. Граница  $\beta(A)$  множества  $A$  может быть выделена путем выполнения операции эрозии  $A$  по  $B$ , и далее получения разностного множества между  $A$  и результатом его эрозии, т.е.

$$\beta(A) = A \setminus (A \diamond B), \quad (1)$$

где  $B$  – примитив, который представляет квадрат с размерами  $3 \times 3$  пикселя заполненный нулями. Отметим, что выбор примитива с размерами  $3 \times 3$  пикселя приводит к построению границ толщиной в 1 пиксель. Эрозия, обозначенная как  $A \oslash B$ , представляет собой множество всех таких точек, при сдвиге в которые множество  $B$  целиком содержится в  $A$ .

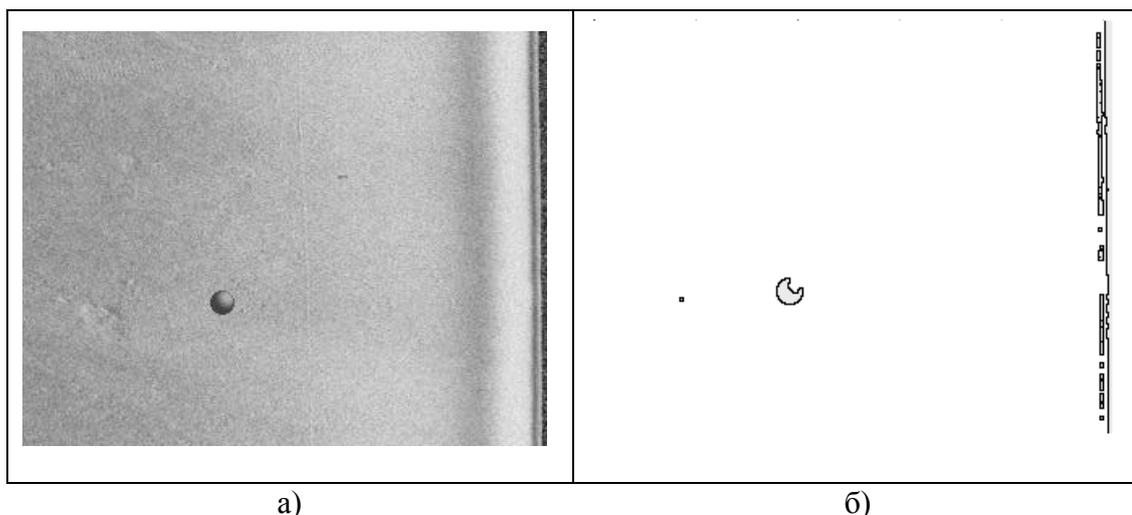
Рассмотрим поэтапное выполнение разработанного алгоритма. На первом этапе выполняем предварительную фильтрацию и бинаризацию изображения. На втором этапе выбираем примитив заполненный белыми точками, т.е. соответствующий не объекту, а фону. Далее вычисляем элементы границ согласно выражению (1). Процесс вычислений опишем в терминологиях языка программирования. Обработку изображения выполним с помощью скользящего окна с размерами  $3 \times 3$  пикселя. Пикселю изображения присваиваем инверсное значение, если все пиксели в окне примитива равны белому цвету. Если в окно попадает, хотя бы одна черная точка, значение пикселя остается неизменным, т.е.

$$\tilde{Y}_{i,j} = \begin{cases} \hat{Y}_{i,j} - 255, & \text{если } \frac{1}{9} \sum_{m=i-1}^{i+1} \sum_{n=j-1}^{j+1} Y_{m,n} = 255 \\ \hat{Y}_{i,j}, & \text{если } \frac{1}{9} \sum_{m=i-1}^{i+1} \sum_{n=j-1}^{j+1} Y_{m,n} < 255 \end{cases} \quad (2)$$

Далее смещаем окно на один пиксель и снова вычисляем условие (2). После анализа всех точек изображения инвертируем значение каждого пикселя:

$$\hat{Y}_{i,j} = 255 - \tilde{Y}_{i,j}. \quad (3)$$

Исследования алгоритма привели к определению его *нового свойства*. Если в процессе бинаризации каждой черной точке присвоить значение больше нуля, например  $\hat{Y}_{i,j,0} = 40$ , алгоритм позволяет не только выделять границы объектов, но и выделяет сегменты внутри контура объекта. При этом точки фона будут представлены белым цветом ( $\hat{Y}_\phi = 255$ ), точки границы объектов черным цветом ( $\hat{Y}_K = 0$ ) и точки сегмента внутри объектов серым цветом  $\hat{Y}_C = 215$ . На рис. 1 показаны пример подводного ГБО изображения до обработки и после обработки в градациях яркости. В качестве объекта поиска выбран объект в виде сферы. Как видно из рисунка разработанный алгоритм позволяет эффективно выделять контурные границы объекта с одновременной сегментацией.



**Рис. 1.** Результат сегментации объектов морфологическим методом

К достоинствам разработанного алгоритма, по сравнению с алгоритмами выделения контуров на основе операторов Собеля, Превитта и Кирша, относится следующее: 1) Контурные объекты изображения представлены линиями толщиной в один пиксель; 2) Сегменты внутри объекта выделены серым цветом, что позволяет выполнять сравнение объектов не только по контурным признакам, но и по сегментным признакам внутри объекта.

После поиска и обнаружения объекта необходимо сравнить его с эталоном. В результате исследований фрактальных методов обработки изображений авторами разработан оригинальный алгоритм распознавания, который можно разделить на следующие этапы:

- 1) поворот сегментированного объекта на угол, равный углу между горизонталью и осью инерции;
- 2) интерполяционное увеличение масштаба объекта изображения;
- 3) построение фрактальной сигнатуры объекта;
- 4) сравнение построенной сигнатуры с сигнатурой эталона из базы данных.

Чтобы сравнение было максимально достоверным, на первом этапе выполняем позиционирование объекта так чтобы он по масштабу и углу наклона соответствовал эталону. Для этого вычисляем следующие параметры: координаты центра масс объекта; оси инерции; эксцентриситет и ориентацию объекта. Далее осуществляем поворот объекта на угол, равный углу между горизонталью и осью инерции.

После позиционирования необходимо проанализировать изображение объекта. Фрактальный алгоритм распознавания очень плохо работает с объектами малой площади, это связано с тем, что с увеличением масштаба малый объект будет наблюдаться как размытое пятно, т.е. будет потеряна форма объекта, на основе которой и происходит фрактальное распознавание. В связи с этим на втором этапе необходимо предварительно изменить размер объекта на изображении, чтобы качественно сравнить его с эталоном. В данной работе была использована билинейная интерполяция, т.к. данный метод имеет высокое качество преобразование масштаба без наблюдения эффекта пикселизации [4].

Рассмотрим особенности построения фрактальной сигнатуры объекта. Анализ изображения только на двух масштабах не дает возможности различить два фрактала, имеющие элементы различных размеров. Самым простым выходом из этого положения является анализ на нескольких масштабах одновременно. В таком случае получаем не оценку фрактальной размерности  $D$ , а зависимость меры от масштаба  $S = f(M)$  в двойном логарифмическом масштабе, которая называется фрактальной сигнатурой или фрактальным кепстром [3]. Рассмотрение фрактальных сигнатур физически означает, что все операции обработки и распознавания проводятся на множествах дробных мер.

Для построения фрактальных сигнатур необходимо измерить площадь поверхности изображения на различных масштабах. В данной работе площадь поверхности измерялась методом триангуляции. Изображение представляется в виде двумерного массива значений пикселей, в градациях серого. Каждый пиксель кодируется 8 битами. Т.е. изображение можно представить как рельеф с высотами равными значениям яркости пикселей.

Площадь поверхности изображения вычисляется по следующему алгоритму:

- 1) измерительное окно с размером  $2\delta+1$  «скользит» по изображению с шагом  $2\delta+1$ ;
- 2) вычисляется площадь образования, покрытая скользящим окном;
- 3) локальные площади суммируются для вычисления площади целого изображения;
- 4) значение  $\delta$  увеличивается на единицу, и площадь образования вычисляется снова;
- 5) вычисления проводятся на 13 масштабах;
- 6) строится зависимость площади изображения от масштаба в двойных логарифмических координатах.

Для вычисления площади образования под скользящим окном используются стандартные формулы геометрии. Далее в двойных логарифмических координатах строим зависимость площади изображения от масштаба.

Для исследования эффективности разработанного алгоритма распознавания, в данной работе использованы три эталона: шар, прямоугольник, и фигура конической формы (рис. 2). На рис. 3 показаны сигнатуры трех эталонов и сегментированного объекта (шар).



Рис. 2. Эталоны: (а) шар; (б) прямоугольник; (в) коническая фигура

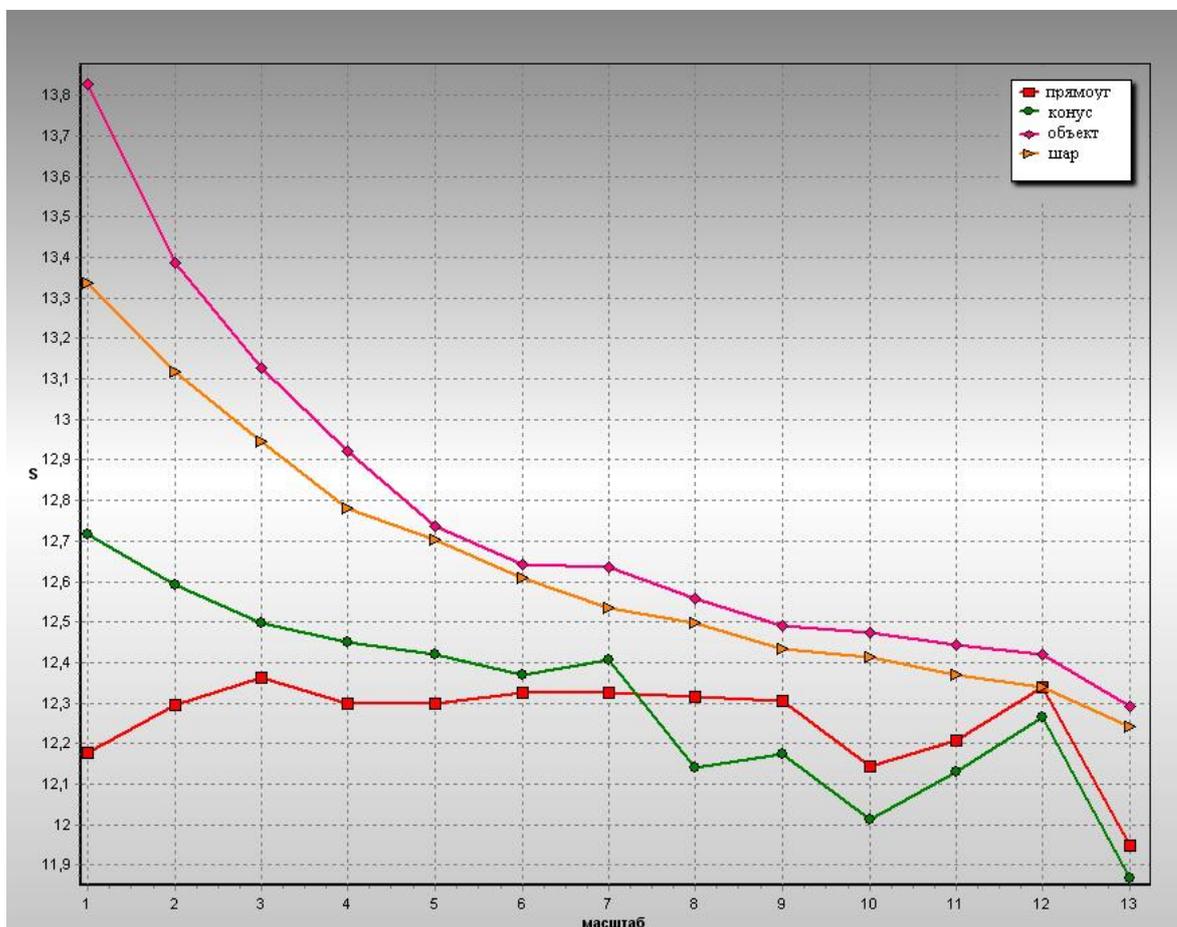


Рис. 3. Сигнатуры эталонов и объекта (шар)

На рисунке точками в виде квадрата изображена сигнатура прямоугольника, точками в виде окружности – сигнатура конической фигуры, в виде треугольника – сигнатура шара (эталон), в виде ромба – сигнатура сегментированного объекта (шар).

Анализ графиков показывает, что сигнатуры с точками в виде ромба и треугольника похожи. Т.е. сегментированный объект похож на эталон – шар. Также можно заметить, что два эталона прямоугольник и коническая фигура, начиная с масштаба рассмотрения  $M = 8$ ,

имеют схожие участки сигнатур. Этот факт подтверждается тем, что оба эталона имеют прямоугольную форму, и на старших масштабах разница между двумя эталонами при сглаживании изображения уменьшается. Это объясняется тем, что все сигнатуры объектов, при стремлении масштаба к определенному пределу, будут казаться одинаковыми.

Для сравнения двух сигнатур, с целью распознавания объектов, предложено вычислять угол наклона каждого участка сигнатуры в точках масштаба. При этом создаются массивы значений углов наклона фрактальной сигнатуры объекта и эталона. Затем идет сравнение значений углов, и подсчитывается число совпадений в пределах определенной ошибки  $\varepsilon$ , и производится решение о сходстве эталона и распознаваемого объекта.

Результаты распознавания сегментированных объектов (шар и цилиндр), внедренных в ГБО изображение показали, что процент совпадения углов наклона сигнатур объекта и эталона при распознавании цилиндра составляет 87%, а при распознавании шара 99%.

Из экспериментальных данных можно сделать вывод о работоспособности алгоритмов фрактального распознавания, которые позволяют с высокой вероятностью обнаружить тот или иной объект. Эксперименты также показали, что небольшие изменения формы объекта, на малых масштабах будут давать различия в форме фрактальных сигнатур. Т.е. данный алгоритм может также использоваться для обнаружения изменений на изображениях.

Один из недостатков фрактального распознавания заключается в том, что он плохо работает с объектами малых размеров, т.к. на малых масштабах два различных по форме малых объектов будут казаться одинаковыми, что дает большую ошибку в результат распознавания. Для устранения этой проблемы в работе используется интерполяционный метод увеличения размера изображения.

## Литература

1. Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю. Компьютерная обработка и распознавание изображений: учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО. – 2008.
2. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера. – 2006.
3. Новейшие методы обработки изображений / Под ред. А.А. Потапова. – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2008.
4. Билинейная интерполяция при повороте изображения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bitbybit.ru/article/186>

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ И НАВИГАЦИИ ПОДВОДНОГО РОБОТА НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИИ FPGA

**И.Н. Бурдинский, И.В. Карabanов, М.А. Линник, А.С. Миронов**

Тихоокеанский государственный университет  
680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 186, тел./факс: (4212) 224356,  
e-mail: igor\_burdinsky@mail.ru

Рассматриваются вопросы разработки системы телеметрии и навигации подводного робота с использованием технологии FPGA. Основой разработки является оптимальный коррелятор, осуществляющий обработку гидроакустического сигнала модулированного псевдослучайной M-последовательностью. Предложенный в статье формат информационного пакета на базе шумоподобных фазоманипулированных сигналов (ШПС-ФМ) может использоваться в качестве основного при реализации гидроакустических систем телекоммуникационного взаимодействия.

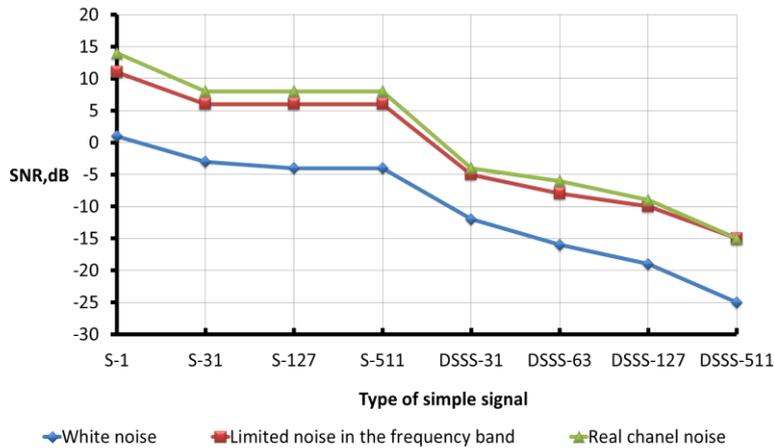
В связи с постоянным развитием микроэлектронной техники остро встает вопрос о своевременной замене существующих модулей цифровой обработки гидроакустических сигналов в системах навигации и телеметрии подводного робота. Применение новейших микропроцессорных средств с одной стороны, способствует повышению эксплуатационных характеристик, таких как массогабаритные показатели, энергопотребление, а с другой стороны стимулирует разработчиков к качественному усовершенствованию существующих систем с помощью применения новых более совершенных алгоритмов обработки сигналов.

Рассматриваемые в работе системы навигации и телеметрии подводного робота относятся к основным системам, наряду с системами управления и энергообеспечения. В основе как системы навигации, так и системы телеметрии лежит блок детектирования и обработки приходящего сигнала, задача которого заключается в максимально точном обнаружении сигнала (определении момента прихода) и выдачи заключения о степени достоверности приема.

Цель данной работы заключается в описании методов и средств позволяющих унифицировать блоки обработки и детектирования сигналов в рассматриваемых системах, улучшить качественные показатели данных систем: точность, скорость передачи, помехо- и шумозащищенность, что в целом позволит улучшить потребительские свойства необитаемых подводных аппаратов нового поколения, [1]. Стоит также отметить, что применение данных систем не ограничено подводной робототехникой и может применяться в робототехнике в целом, с учетом незначительных изменений (например, в беспилотных летательных аппаратах и наземных роботах).

В системах информационного обеспечения подводных роботов используются простые гармонические и сложные сигналы. Среди сложных сигналов наиболее часто используются сигналы с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ) и шумоподобные сигналы с фазовой манипуляцией специальными бинарными последовательностями (ШПС-ФМ). Важнейшими критериями при выборе типа сигнала являются: разрешающая способность по времени (от данного параметра зависит точность навигации и определяется он, как минимальный временной интервал между двумя одинаковыми сигналами, достаточный для решения задачи разрешения этих сигналов); выделение сигнала при низких отношениях сигнал/шум (обеспечивается большая дальность работы, при меньшей мощности излучения); наличие набора разделяемых сигналов (дает возможность управления объектами навигационного взаимодействия посредством набора команд, а также возможность одновременной работы нескольких систем).

В работе [2] производилась оценка эффективности использования гидроакустических сигналов различной структуры, которая позволила определить в каких случаях целесообразно применять тот или иной тип сигнала; возможно ли сократить энергетические затраты системы при переходе от одного типа сигналов к другим; влияют ли параметры среды на свойства приема сигнала; какова помехоустойчивость для определенного типа сигналов.

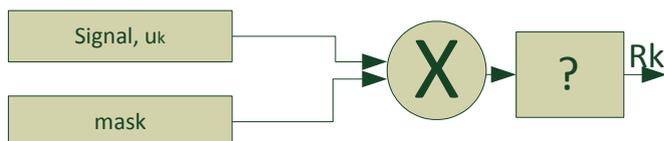


**Рис.1.** Результаты численного эксперимента по определению качества детектирования различных типов сигнала

сравнению с ШПС-ФМ, но при этом не позволяет производить кодовое разделение сигналов, что особенно важно как для навигационной системы, так и для системы телеметрии, поэтому в дальнейшем будут рассматриваться сигналы ШПС-ФМ. На рис. 1 приведены зависимости граничного значения отношения сигнал/шум на входе приемника при детектировании различного типа сигнала: простого гармонического и ШПС-ФМ для различных типов шума, при одинаковой мощности излучения и вероятности детектирования  $P_{det}=1$ . ( $S-x$  – простой гармонический сигнал длительностью  $x$ , DSSS- $x$  – ШПС-ФМ сигнал длительностью  $x$ ). Точность обнаружения сигналов на временном интервале для  $P_{det}=1$  не хуже  $x=0.86$  мс. Данные получены в результате численного эксперимента.

Классическим методом при обработке ШПС-ФМ сигналов с целью их обнаружения является корреляция [3] (далее, обычная корреляция). В данной работе предложены к рассмотрению три метода детектирование сигнала: обычная корреляция, посимвольная корреляция [4] и пиковый детектор.

Рассмотрим общие структурные схемы реализации рассматриваемых методов для цифровых систем. Обозначения: Signal – массив, содержащий отсчеты входного сигнала  $u_k$ , mask – массив, представляющий собой отсчеты маски искомого сигнала (идеальное представление искомого сигнала),  $R_k$  – значение корреляционной функции для отсчета signal номер  $k$ ,  $k$  – номера отсчетов входного сигнала и значения корреляционной функции.

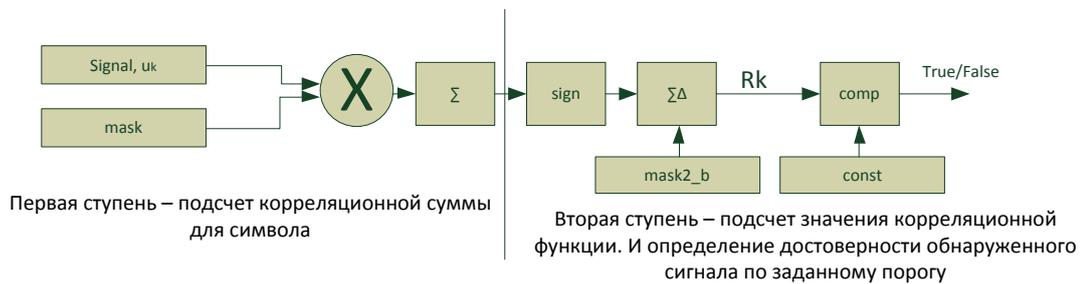


**Рис. 2.** Структурная схема модуля обработки сигналов по методу обычной корреляции

смещение на один отсчет по временной оси и производится очередное вычисление значения корреляционной функции – метод плавающего окна. В итоге имеем значения

Результаты работы показывают, что для различных параметров: соотношение сигнал/шум на входе приемника ( $SNR$ ), соотношение мощности, энергии, типа шума в канале (аддитивный белый гауссовский или реальный шум) наиболее эффективным является использование шумоподобных сигналов по сравнению с простыми гармоническими сигналами. Применение ЛЧМ сигналов позволяет получить выигрыш по отношению сигнал/шум около 3-5 дБ по сравнению с ШПС-ФМ, но при этом не позволяет производить кодовое разделение сигналов, что особенно важно как для навигационной системы, так и для системы телеметрии, поэтому в дальнейшем будут рассматриваться сигналы ШПС-ФМ. На рис. 1 приведены зависимости граничного значения отношения сигнал/шум на входе приемника при детектировании различного типа сигнала: простого гармонического и ШПС-ФМ для различных типов шума, при одинаковой мощности излучения и вероятности детектирования  $P_{det}=1$ . ( $S-x$  – простой гармонический сигнал длительностью  $x$ , DSSS- $x$  – ШПС-ФМ сигнал длительностью  $x$ ). Точность обнаружения сигналов на временном интервале для  $P_{det}=1$  не хуже  $x=0.86$  мс. Данные получены в результате численного эксперимента.

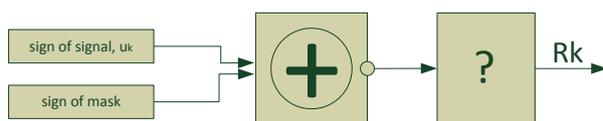
корреляционной функции для всего сигнала. Момент определения сигнала соответствует максимальному значению корреляционной функции.



**Рис. 3.** Структурная схема модуля обработки сигналов по методу «посимвольной корреляции»

Для «посимвольной корреляции» сначала вычисляется корреляционная сумма для каждого символа (первая ступень). Здесь *mask* – маска для одного символа. После чего, происходит определение знака получившейся корреляционной суммы, который записывается в промежуточный массив «*sign*». Затем рассчитывается значение корреляционной функции  $R_k$  из полученной бинарной последовательности, хранящейся в массиве «*sign*» и хранящейся бинарной маске искомого сигнала в массиве *mask2\_b*. Затем полученное значение корреляционной функции сравнивается с пороговым значением «*const*», и если превосходит его, то фиксируем детектирование сигнала. Для определения очередного значения корреляционной функции применяется метод плавающего окна. Качество определения сигнала данным методом на 1-2 дБ хуже, чем в предыдущем методе, но при этом позволяет в реальном времени асинхронно определять момент прихода сигнала по заранее выбранному порогу зависящему только от типа используемого типа ШПС-ФМ, и не зависящего от условий использования сигналов.

Отличие пикового детектора от обычной корреляции заключается в том, что вместо значений входного сигнала и значений маски используется их знаковое представление: *sign of signal* и *sign of mask* соответственно.



**Рис. 4.** Структурная схема модуля обработки сигналов по методу «пиковый детектор»

Преимуществом данного метода является простота реализации блока определения значений корреляционной функции, так как, нет необходимости использовать схемы много разрядных сумматоров и умножителей. Работа ведется только с бинарным (или знаковым представлением сигналов). Недостатком метода в общем случае является более

низкое качество определения сигналов по сравнению с предыдущими методами.

Для передачи телеметрических данных и осуществления навигации (упрощенный вариант, когда передается только символ синхронизации) в данной работе представлен ниже следующий общий информационный пакет данных. Для передачи информации используются сигналы ШПС-ФМ на базе *M*-последовательностей и последовательностей Голда [3]. Разработанный для передачи данных информационный пакет, состоит из *N* подпакетов. Каждый подпакет состоит из *m* информационных символов, между которыми формируется защитный интервал для уменьшения влияния межсимвольной интерференции. В начале каждого подпакета добавлена синхронизирующая последовательность, используемая для синхронизации и передачи служебной информации (тип пакета, тип абонента). Синхронизирующая последовательность (символ синхронизации) представляет собой *M*-последовательности из определенного набора, а данные кодируются последовательностями Голда. На один информационный символ приходится  $\log_2(L)$  бит, где

$L$  – количество последовательностей Голда, а количество  $M$ -последовательностей соответствует количеству подпакетов  $N$ . По символам синхронизации, можно вести отсчет времени прихода сигнала, который при известной скорости звука позволяет определять

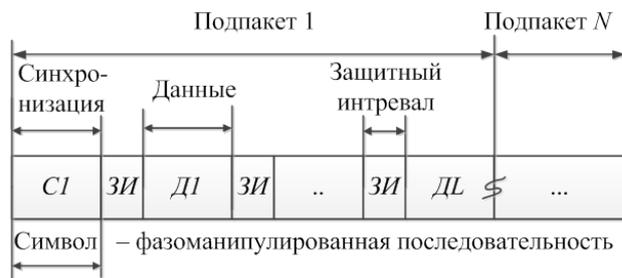


Рис. 5. Формат пакета данных

наклонную дальность и тем самым осуществлять навигацию для синхронных систем.

На рис. 5 представлен формат информационного пакета данных, где  $ЗИ$  – защитный интервал;  $C_i$  – синхронизирующие последовательности,  $i=1..N$ ;  $Д_j$  – последовательности данных,  $j=1..L$ .

Количество данных передаваемых с помощью пакета определяется как  $D=N \times m \times \log_2(L)$ . Длительность пакета определяется как  $T=N \times m \times t_D + N \times t_C + N \times (m+1) \times t_{ЗИ}$ , где  $t_D$  – длительность информационного символа,  $t_{ЗИ}$  – длительность синхронизирующей последовательности,  $t_{ЗИ}$  – длительность защитного интервала. При этом скорость передачи данных определяется как  $v=D/T$ .

При реализации рассматриваемых систем навигации и телеметрии, важным является вопрос выбора оптимальной аппаратной базы для их реализации. Так как, при разработке системы телеметрии основным блоком при обработке (распознавании символов), предложенного информационного пакета на приемной стороне является коррелятор (при кодовом разделении для распознавания одного символа требуется один коррелятор), то выбор аппаратной базы необходимо производить по критерию возможности создания на выбранной базе необходимого количества корреляторов с заданными условиями (скорость вычисления, рабочее соотношение сигнал/шум, возможность работы в синхронном и/или асинхронном режимах). При реализации системы телеметрии с использованием предложенного пакета, необходимо чтобы приемник мог в реальном времени асинхронно независимо определять до 64 символов. При реализации системы навигации (как независимого модуля) с использованием ШПС-ФМ, необходимо чтобы приемник мог в реальном времени синхронно/асинхронно независимо определять до 8 синхро-символов[1]. Представленные на рынке микропроцессорные системы можно разделить на три группы: системы программируемой логики (FPGA, CPLD), цифровые сигнальные процессоры (DSP) микроконтроллеры. В данной работе в качестве аппаратной базы предлагается использовать системы программируемой логики FPGA. Основными производителями данного класса микропроцессорных средств являются фирмы Xilinx и Altera. Параметры предлагаемых микросхем этих фирм близки по производительности, логической емкости, используемым специальным модулям (сумматоры-умножители, блоки памяти) и энергопотреблению (при условии рассмотрения устройств одного поколения). На рис. 6-7 приведены функциональные схемы корреляторов для одного канала, с использованием блоков FPGA Virtex-4 (XtremeDSP, LUT, блоки быстрой памяти) [5]. XtremeDSP блоки представляют собой конвейерную структуру умножения/накопления с возможностью как подключения/отключения различных частей внутри блока, так подключение XtremeDSP между собой для расширения.

Недостатками метода «обычной корреляции», представленного на рис. 6, для реализации в автономных подводных системах являются: большой объем используемой памяти (в памяти хранится маска всего сигнала) и большое число многоразрядных умножителей и накоплением, которые возрастают пропорционально числу каналов обработки.

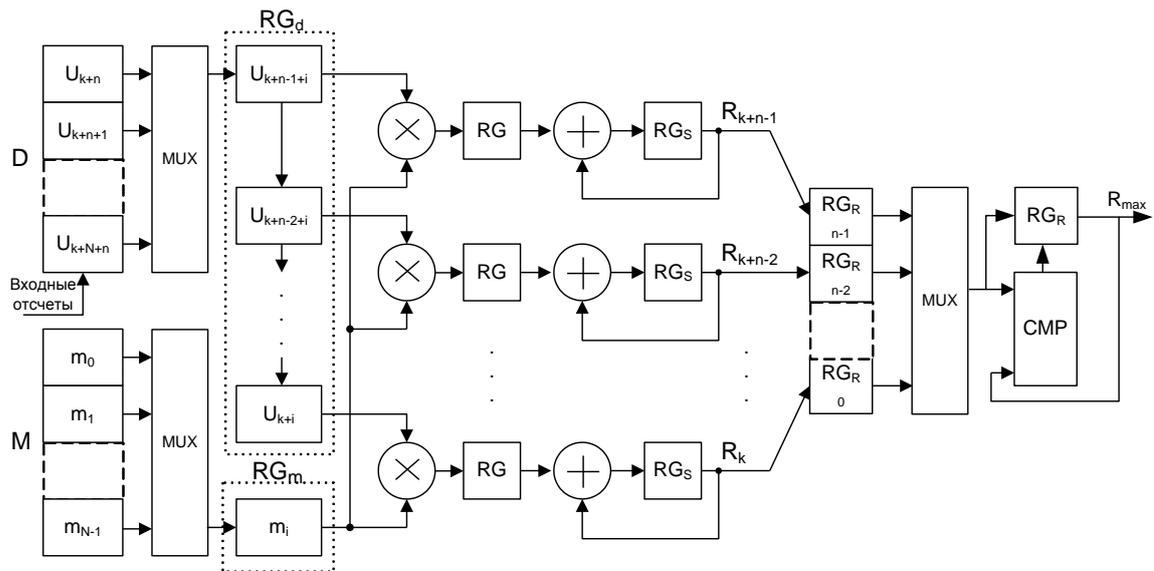


Рис. 6. Схема обычного коррелятора с конвейерной структурой

Схема на рис. 7, реализующая метод обработки «посимвольной корреляции», имеет ряд преимуществ, а именно: требуется меньше аппаратных ресурсов (умножителей, памяти и логических блоков) для своей организации, причем число занимаемых ресурсов не увеличивается пропорционально числу каналов; в памяти хранятся только маска одного символа (экономия по памяти в сотни раз); позволяет организовать асинхронный прием без использования дополнительных алгоритмов обработки [6]; позволяет вести оценку качества и процент потерь при приеме в реальном масштабе времени; дает возможность организации многоабонентной системы с разделением каналов без каких либо дополнительных блоков, а также позволяет фильтровать высоко мощные импульсные помехи, так как влияние помехи локализуется в границах одного символа и не распространяется на всю получаемое значение корреляционной функции.

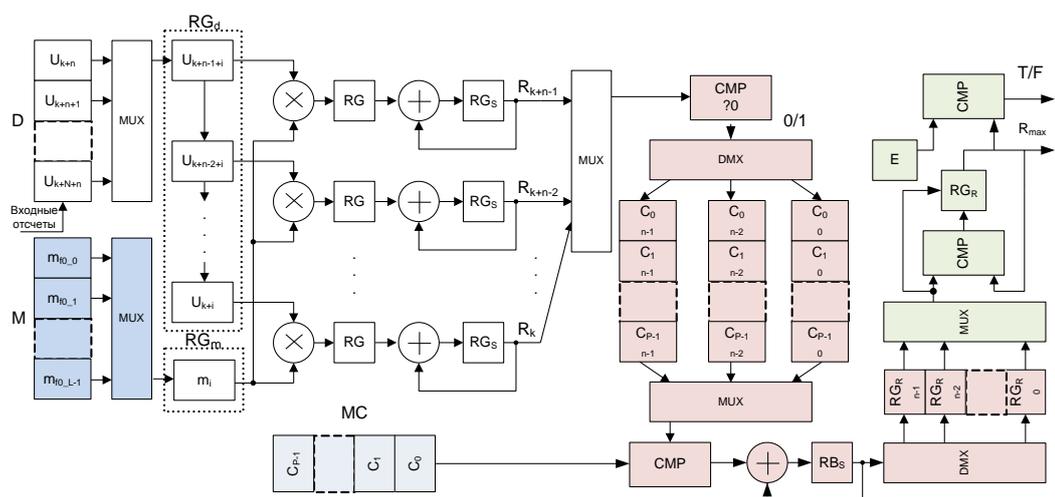


Рис. 7. Схема посимвольный коррелятора с конвейерной структурой

Важной особенностью схемы на рис. 7 (для «посимвольной корреляции») является то, что при увеличении числа распознаваемых символов не увеличивается число используемых сумматоров-умножителей. Увеличивается пропорционально числу каналов, только объем используемой под бинарные маски памяти. При реализации пикового детектора так же можно использовать упрощенную схему на рис. 7.

Каждый из методов обрабатывался схемой модифицированного параллельно-конвейерного коррелятора. Использование параллельно-конвейерной схемы позволяет рассчитать одновременно несколько значений корреляционной функции, что увеличивает скорость выполнения данной операции и точность детектирования ШПС [7].

Предложенные в данной работе методы и средства приема гидроакустического сигнала типа ШПС-ФМ позволяют повысить надежность телекоммуникационного обеспечения подводных роботов, а также увеличить помехоустойчивость и дальность действия систем. Представлена аппаратная реализация гидроакустических систем телеметрии и навигации на базе матрицы FPGA. Это позволило провести полнофункциональную реализацию разработанных алгоритмов на современной эффективной аппаратной базе. Основные параметры систем: вероятность детектирования не менее 95% при отношении сигнал/шум выше -15 дБ, скорость передачи до 200 бит/с при ширине полосы частот 500 Гц и центральной частоте 12 кГц, число возможных каналов обработки до 64, ожидаемая дальность действия до 15 км, относительная точность определения наклонной дальности не менее 0,25%. Основные преимущества представленной системы: использование кодового разделения и простота переконфигурирования системы при сохранении массогабаритных и энергетических показателей.

## Литература

1. Автономные подводные роботы. Системы и технологии. / Под общ. ред. акад. М.Д. Агеева. – М.: Наука, 2007. – 398 с.
2. Бурдинский И.Н., Карабанов И.В., Линник М.А., Миронов А.С. Гидроакустическая телекоммуникационная система подводного робота / XVIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. 3-10 мая, Россия, 2011.– Санкт-Петербург. – С. 251-264.
3. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
4. Linnik M.A., Karabanov I.V., Mironov A.S., Burdinskiy I.N. Acoustic communication system for underwater vehicle telecommunication / The First Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (6-9 September, 2010, FEBRAS). – Vladivostok, 2010. – С. 317-320.
5. Возможности FPGA фирмы Xilinx в задачах цифровой обработки сигналов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.kit-.ru/articles/plis/2007\\_5\\_68.php](http://www.kit-.ru/articles/plis/2007_5_68.php)
6. Virtex-4 Family Overview [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.xilinx.com/support/documentation/data\\_sheets/ds112.pdf](http://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds112.pdf)
7. Linnik M.A., Karabanov I.V., Burdinskiy I.N. Threshold Methods of Sonar Pseudonoise Phase-shift Signal Detection / The First Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (Russia Pacific Computer 2010) 6-9 September, 2010 Russian Academy of Sciences, Far Eastern Branch. – Владивосток, 2010. – С. 404-408.

# МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПРИВЕДЕНИЯ ОБЪЕКТА К ИСТОЧНИКУ СИГНАЛА

**Ф.В. Безручко, И.Н. Бурдинский**

Тихоокеанский государственный университет  
680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136, тел./факс: (4212) 22-43-56,  
e-mail: FBezruchko@mail.khstu.ru, igor\_burdinsky@mail.ru

В работе представлена модель системы экстремального регулирования для решения задачи приведения автономного подводного аппарата (АПА) к источнику гидроакустического (ГА) сигнала. В качестве входных данных используются относительное время распространения ГА сигнала и скорость движения аппарата. Приведено аналитическое описание регулировочной характеристики объекта и выявлены особенности ее поведения в зависимости от расстояния до источника сигнала. Предложен критерий для оценки потенциальной возможности приведения АПА к маяку в присутствии возмущающих воздействий на систему.

## **Введение**

Современные требования к возможностям подводных роботов при проведении работ в Океане заставляют искать все более совершенные алгоритмы и решения для организации пространственного движения, позиционирования в заданной области и приведения подводного аппарата по сигналу маяка. Алгоритмы для приведения АПА по сигналу маяка могут использоваться по окончании основной миссии робота и его возвращению к обеспечивающему судну (ОС). Особую важность такое решение приобретает при проведении работ подо льдом, когда всплытие аппарата возможно только в полынье в непосредственной близости от ОС. Одним из возможных решений задачи приведения является использование инерциальной навигационной системы. Главными ее недостатками, как правило, являются техническая сложность системы в целом, а также алгоритмическая и вычислительная сложность комплексирования входных данных и компенсации накапливающихся ошибок. Альтернативным решением является применение гидроакустических систем позиционирования, основанных на принципе измерения времени распространения звуковых волн от стационарного маяка (или нескольких маяков) до подводного аппарата, оснащенного гидрофоном. Здесь также имеется масса трудностей с определением расстояния до источника сигнала (акустический шум, многолучевое распространение и интерференция, эффект Доплера, неточное значение скорости звука, принятое в расчетах и т. д.). Тем не менее, акустические навигационные системы находят широкое применение и являются основными для современных АПА.

## **Постановка задачи**

Движительно-рулевой комплекс позволяет управлять скоростью  $v \in [0, v_{MAX}]$  и направлением движения  $\varphi \in [-\pi, \pi]$  АПА. Предполагаем, что скорость распространения сигнала  $v_s$  в океане намного больше скорости движения аппарата и эффектом Доплера можно пренебречь. Задача приведения АПА к маяку состоит в следующем. Находясь в некоторой удаленной точке, АПА должен прийти в окрестность излучающего маяка. Передатчик маяка и приемник аппарата синхронизированы, и период излучения  $T_H$  (навигационный интервал) известен. Исходными данными являются интервалы времени  $\tau_i$  от известного момента времени излучения сигнала маяком до момента времени регистрации этого сигнала приемником подводного аппарата.

Существуют несколько методов приведения автономного объекта к некоторому источнику сигнала или поля. В отдельный класс можно отнести методы решения большого спектра задач навигации по одному маяку, основанные на счислении пути, пройденного АПА за несколько последовательных интервалов времени. Основная идея этих методов описана в [1], в [2-5] приведены схожие решения с отличиями в математическом аппарате, способе фильтрации данных и начальной инициализации. В [7] сделана попытка решения задачи приведения автономного объекта к источнику непрерывного поля, обладающего единственным экстремумом в точке расположения источника. В реализации алгоритма авторы рассматривают очень общий случай некоторого поля (например, акустическое поле сигнала), которое может быть распределено как угодно неравномерно по всем направлениям вокруг источника. А движение к источнику связано с постоянным «рысканием» чувствительного элемента, что отрицательно сказывается на эффективности расходования энергии. Далее предлагается решение, основанное на вычислении разницы двух последовательных времен распространения сигнала  $\tau$ .

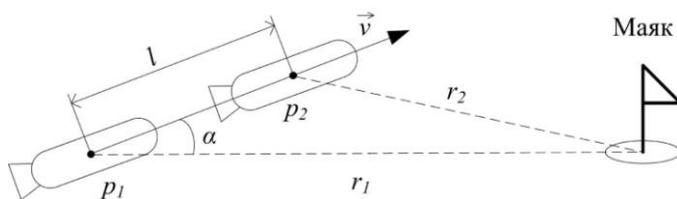


Рис. 1. Движение аппарата относительно маяка

Пусть аппарат находится в точке  $p_1$  на некотором расстоянии  $r_1$  от маяка (рис. 1), где  $\alpha$  – угол пеленга на маяк. В точке  $p_1$  аппарат принимает сигнал от маяка, и имеет место время распространения сигнала  $\tau_1$ . Через промежуток времени  $T_H$ , АПА, следуя

со скоростью  $v$ , переместиться в точку  $p_2$ , до которой сигнал распространяется за время  $\tau_2$ . Рассмотрим крайние соотношения между  $\tau_1$  и  $\tau_2$  в зависимости от угла  $\alpha$ :

- $\alpha = 0$  – движение прямым курсом на маяк, т.е.  $\tau_1 > \tau_2$  и  $\tau_{i-1} - \tau_i \rightarrow \max$ ;
- $\alpha = \pm\pi/2$  – аппарат движется по окружности вокруг маяка, т.е.  $\tau_1 = \tau_2$ ;
- $\alpha = \pm\pi$  – движение строго от маяка, т.е.  $\tau_1 < \tau_2$  и  $\tau_{i-1} - \tau_i \rightarrow \min$ .

Подобную зависимость нужно распространить для любого угла  $\alpha$  на отрезке  $[-\pi, \pi]$ . Полученная зависимость  $\Delta\tau = (\tau_{i-1} - \tau_i)$  от угла  $\alpha$  будет иметь экстремальный характер и ее можно использовать как регулировочную характеристику с целевой функцией  $\Delta\tau \rightarrow \max$ .

### Решение задачи поиска и поддержания курса

В теории автоматического регулирования для решения задачи поиска и поддержания неизвестного максимального значения регулируемой величины применяются системы

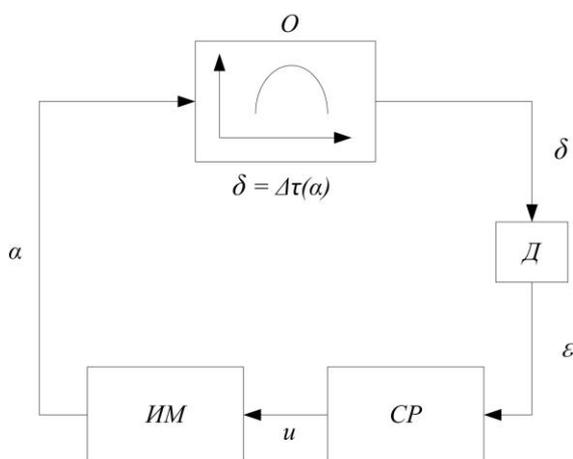


Рис. 2. СЭР с измерением производной

экстремального регулирования (СЭР) [8]. На рис. 2 приведена структурная схема СЭР. Данные о разнице времени распространения сигнала  $\delta = \Delta\tau(\alpha)$  с выхода объекта  $O$  поступают на дифференцирующее звено  $D$ . Затем, производная  $\varepsilon = d\delta/dt$  подается на логическое устройство СЭР – сигнум-реле  $CP$ . Сигнум-реле следит за пересечением объектом управления точки экстремума регулировочной характеристики, и при обнаружении этого пересечения, меняет знак воздействия  $u$  на исполнительный механизм  $ИМ$ . Исполнительным механизмом в данном случае выступает движительно-рулевой комплекс, в результате действий которого АПА осуществляет маневр и приобретает новое значение пеленга на маяк  $\alpha$ .

Пусть объект регулирования  $O$  имеет характеристику, показанную на рис. 3 (слева).

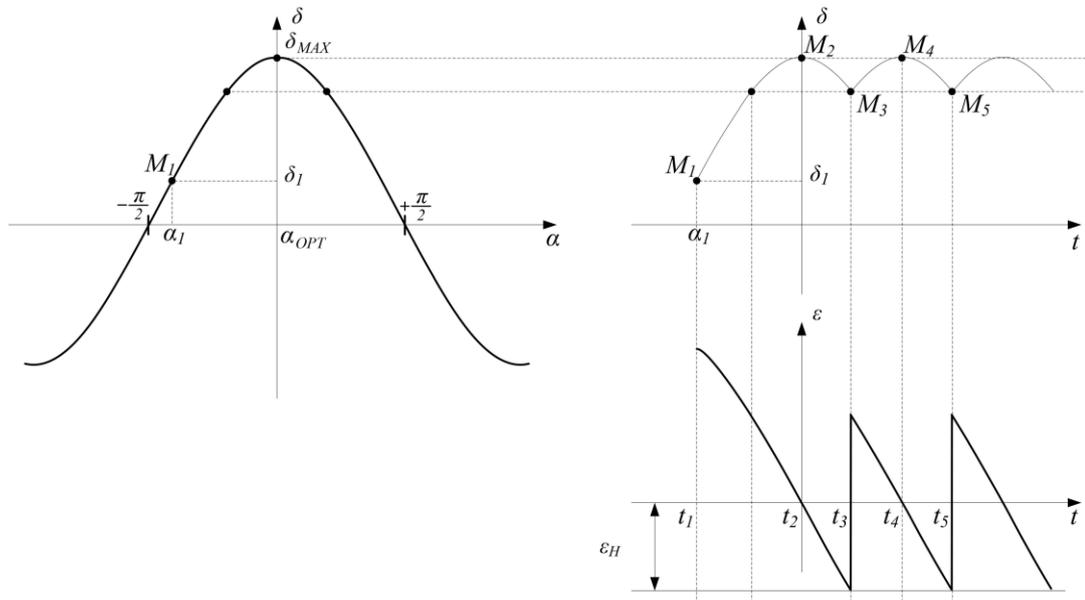


Рис. 3. Поиск экстремума в СЭР с измерением производной

Состояние СЭР в момент включения определяется значениями входа  $\alpha_1$  и выхода  $\delta_1$  – точка  $M_1$  на регулировочной характеристике. Предположим, что экстремальный регулятор после включения его в работу в момент времени  $t_1$  изменяет вход  $\alpha$  в сторону увеличения. При этом выход  $\delta$  объекта будет изменяться в соответствии с регулировочной характеристикой, а величина  $\varepsilon$  при движении от точки  $M_1$  к  $M_2$  уменьшается. В момент времени  $t_2$  выход объекта достигнет экстремума  $\delta_{MAX}$ , а  $\varepsilon$  будет стремиться к нулю. За счет нечувствительности  $CP$  система будет продолжать движение, удаляясь от экстремума. При этом  $\varepsilon$  изменит знак и станет отрицательной. В момент  $t_3$ , когда величина  $\varepsilon$ , оставаясь отрицательной, достигнет зоны нечувствительности  $\varepsilon_H$ , произойдет реверс исполнительного механизма и входное значение  $\alpha$  начнет уменьшаться. Выход объекта начнет снова приближаться к экстремуму, а  $\varepsilon$  станет положительной при движении от точки  $M_3$  к  $M_4$ . В момент времени  $t_4$  система снова достигнет экстремума, и цикл повторится.

При рассмотрении работы регулятора все выходные значения объекта регулирования были больше нуля, т.е. все точки  $M_i$  регулировочной характеристики находились выше оси абсцисс (вектор скорости подводного аппарата направлен в сектор маяка  $\alpha \in (-\pi/2, \pi/2)$ ). Если же объект управления начнет движение в сектор, противоположный положению маяка, представленный регулятор перестает выполнять свою функцию. Действительно, помимо локального экстремума характеристики в точке  $\alpha = \alpha_{OPT}$  (рис. 3), существует еще точка, в которой производная выходного сигнала равна нулю:  $\alpha = \pm\pi$ . Как отмечалось выше, эта точка соответствует движению аппарата строго от маяка. Таким образом, при выходе объекта в отрицательную область регулировочной характеристики, экстремальный регулятор будет стремиться вывести АПА на пеленг  $\alpha = \pm\pi$  относительно маяка. Для разрешения этой ситуации можно предложить самый простой вариант – отключать экстремальный регулятор при выходе объекта регулирования в отрицательную область характеристики и совершать маневр с фиксированным углом  $ИМ$  до тех пор, пока АПА не окажется направлен в сектор маяка.

На рис. 3 изображено лишь общее, качественное представление регулировочной характеристики. Попытаемся получить для нее аналитическое выражение и рассмотрим ее поведение во время приведения АПА к маяку.

Обозначим за  $l$  расстояние между точками  $p_{i-1}$  и  $p_i$ . Приближение АПА к маяку  $\Delta r$  можно определить, применив теорему косинусов:

$$\Delta r_i = r_{i-1} - r_i = r_{i-1} - \sqrt{r_{i-1}^2 + l^2 - 2 \cdot r_{i-1} \cdot l \cdot \cos \alpha} . \quad (1)$$

Введем обозначение  $\rho_{i-1} = r_{i-1}/l$  – безразмерное расстояние до маяка при постоянном  $l > 0$ . Перепишем соотношение (1) в безразмерной форме:

$$\Delta \rho_i = \rho_{i-1} - \sqrt{\rho_{i-1}^2 + 1 - 2 \cdot \rho_{i-1} \cdot \cos \alpha} . \quad (2)$$

Параметр  $\rho$  связывает абсолютные значения перемещения  $l$  и расстояния до маяка  $r$  и показывает, что вид регулировочной характеристики при постоянстве скорости распространения сигнала  $v_s$  зависит от их соотношения (а не от абсолютных значений):

$$\Delta \rho_i = \frac{v_s}{l} \tau_{i-1} - \frac{v_s}{l} \tau_i = \frac{v_s}{l} \Delta \tau_i \quad \text{или} \quad \Delta \tau_i = \frac{l}{v_s} \Delta \rho_i .$$

Таким образом, зависимость  $\Delta \tau_i(\alpha)$  будет иметь характер аналогичный (2), отличаясь только на коэффициент.

При приближении к маяку (сокращении безразмерного расстояния  $\rho$ ) форма кривой регулировочной характеристики будет меняться (рис. 4). Предельные зависимости при  $\rho_{i-1} \gg 1$  и  $\rho_{i-1} \rightarrow 1$ :  $\lim_{\rho_{i-1} \rightarrow \infty} \Delta \rho_i = \cos \alpha$ ,  $\lim_{\rho_{i-1} \rightarrow 1} \Delta \rho_i = 1 - \sqrt{2 - 2 \cdot \cos \alpha}$ .

Изменение формы зависимости  $\delta(\alpha)$  может отрицательно сказываться на качестве работы регулятора в непосредственной близости от источника сигнала. Возможным решением, приводящим к сохранению формы кривой регулировочной характеристики во

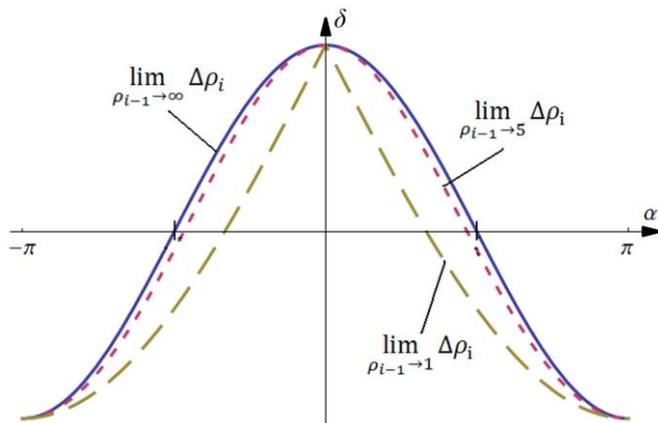


Рис. 4. Изменение формы регулировочной характеристики

время всего процесса приведения в синхронной системе, является управление скоростью поступательного движения аппарата согласно закону:

$$v_i = \frac{\tau_i}{\tau_{i-1}} v_{i-1} . \quad (3)$$

В этом случае значение  $\rho$  остается постоянным.

Обозначим за  $\hat{r}$  – измеренное значение расстояния, а за  $\xi_r$  – суммарную ошибку его определения. Тогда  $\hat{r} = r + \xi_r$ . Рассмотрим предельное значение ошибки определения дальности, при которой еще возможно

правильное определение сектора местонахождения маяка (рис. 5).

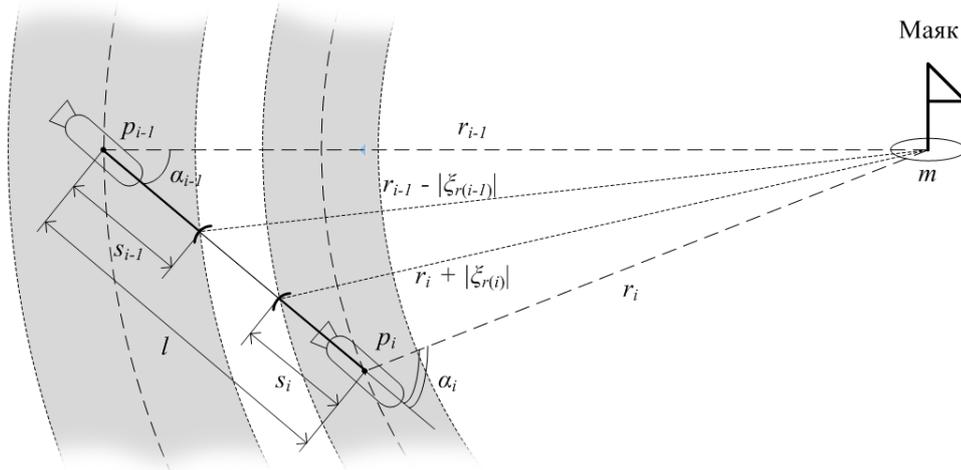


Рис. 5. Движение в сектор маяка в присутствии шума в акустических данных

Будем рассматривать прямолинейное движение в сектор маяка ( $\alpha \in (-\pi/2, +\pi/2)$ ). Пусть, в точке  $p_{i-1}$  значение ошибки определения расстояния до маяка отрицательно ( $\xi_{r(i-1)} = -|\xi_{r(i-1)}|$ ), а в точке  $p_i$  - положительно ( $\xi_{r(i)} = |\xi_{r(i)}|$ ). Из рисунка видно, что для правильного определения факта приближения или отдаления объекта относительно маяка за два последовательных шага алгоритма необходимо, чтобы выполнялось условие:

$$s_{i-1} + s_i < l. \quad (4)$$

Рассмотрим случай, при котором  $s_{i-1} + s_i = l$  и уже невозможно правильно определить сектор местоположения маяка. Решив несложную геометрическую задачу, получаем выражения для  $s_{i-1}$  и  $s_i$  для данного случая:

$$s_{i-1} = r_{i-1} \cdot \left( \cos \alpha_{i-1} - \sqrt{\left(1 - \frac{|\xi_{r(i-1)}|}{r_{i-1}}\right)^2 - \sin^2 \alpha_{i-1}} \right), \quad s_i = r_i \cdot \left( \sqrt{\left(1 + \frac{|\xi_{r(i)}|}{r_i}\right)^2 - \sin^2 \alpha_i} - \cos \alpha_i \right). \quad (5)$$

Обозначим за  $\xi_{\tau(i)}$  - суммарную ошибку определения  $\tau_i$ . Заменяем под корнем  $\xi_{r(i)} = \xi_{\tau(i)} \cdot v_{s(i)}$  и  $r_i = \tau_i \cdot v_{s(i)}$ . Из (4) и (5) в безразмерном виде получим:

$$\frac{s_{i-1}}{l} + \frac{s_i}{l} < 1, \quad (6)$$

где

$$\frac{s_{i-1}}{l} = \rho_{i-1} \cdot \left( \cos \alpha_{i-1} - \sqrt{\left(1 - \frac{|\xi_{\tau(i-1)}|}{\tau_{i-1}}\right)^2 - \sin^2 \alpha_{i-1}} \right), \quad \frac{s_i}{l} = \rho_i \cdot \left( \sqrt{\left(1 + \frac{|\xi_{\tau(i)}|}{\tau_i}\right)^2 - \sin^2 \alpha_i} - \cos \alpha_i \right).$$

Неравенство (6) служит критерием правильного определения сектора местоположения опорного маяка на каждом шаге алгоритма.

Используя ряд допущений, можно получить соотношение для оценки потенциальной возможности приведения объекта к источнику сигнала при заданном начальном значении  $\rho$  с использованием описанного алгоритма. Определим значение ошибки  $\xi_{\tau}$  через время  $\tau$ :

$$\xi_{\tau(i)} = e_i \cdot \tau_i. \quad (7)$$

Пусть объект навигации движется строго на маяк и  $\alpha_{i-1} = \alpha_i = 0$ . Предположим также, что  $e_{i-1} = e_i = e_{MAX}$ . Тогда из (6) и (7) следует:  $\rho_{i-1} \cdot |e_{MAX}| + \rho_i \cdot |e_{MAX}| < 1$ . При  $i = 1$  и  $\rho_i \gg 1$  можно принять  $\rho_{i-1} \approx \rho_i = \rho_0$ . И в результате получим оценочное соотношение:

$$\rho_0 < \frac{1}{2|e_{MAX}|}.$$

Неравенство (8) можно использовать для оценки максимального расстояния до маяка, на котором еще возможно правильное определение его сектора местоположения при заданном значении  $e_{MAX}$ .

### Заключение

Используя принципы позиционирования по акустическим данным и информацию об относительной скорости АПА, представлена модель СЭР для решение задачи приведения подводного аппарата к источнику гидроакустического сигнала. В настоящее время ведется работа над динамической моделью движения подводного аппарата для построения более полной модели СЭР, учитывающей инерционные свойства объекта приведения.

### Литература

1. Mikael Bliksted Larsen. Synthetic Long Baseline Navigation of Underwater Vehicles // OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. – 2000. – Vol.3. – P. 2043-2050.
2. Вассоу Р., Жувенел В., Креуз В. Homing and navigation using one transponder // ICRA2002 IEEE, International Conference on Robotics and Automation. – 2002. – Vol.4. – P. 4004-4009.
3. Cara E. G. LaPointe. Virtual Long Baseline (VLBL) Autonomous Vehicle Navigation Using a Single Transponder // Requirements for the Degrees of Naval Engineer and Master of Science in Ocean Systems Management at the Massachusetts Institute of Technology. – 2006.
4. Scherbatyuk A.Ph. The AUV Positioning Using Ranges from One Transponder LBL // OCEANS '95 MTS/IEEE. Challenges of Our Changing Global Environment. Conference Proceedings. – 1995. – Vol. 3. – P. 1620-1623.
5. Павин А.М. Автоматическое приведение автономного подводного робота к гидроакустическому маяку // Подводные исследования и робототехника. 2008. №1(5). С. 32-38.
6. Hartsfield J.Carl. Single Transponder Range Only Navigation Geometry (STRONG) Applied to REMUS Autonomous Under Water Vehicles // Requirements for the Degrees of Master of Science at the Massachusetts Institute of Technology and Woods Hole Oceanographic Institution. – 2005.
7. Zhang C., Siranosian A., Krstic M. Extremum seeking for moderately unstable systems and for autonomous vehicle target tracking without position measurements // Automatic. 2007. Vol.43, №10. P. 1832-1839.
8. Либерзон Л.М., Родов А.Б. Системы экстремального регулирования // Библиотека по автоматике, вып. 154: под ред. В.В. Казакевича. – М.-Л.: Энергия, 1965. – С. 34-40.

## СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

**А.Н. Кропотов, А.А Макашов, М.Ю. Артюхов, В.М. Плясунов, Е.И. Сахарова**

Научно-исследовательский институт специального машиностроения  
Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана  
105005, Москва, Госпитальный пер., 10, тел.: (499) 2636114, факс: (499) 2636115,  
e-mail: sm42@sm.bmstu.ru

В докладе рассматриваются принципы построения систем обработки телевизионной информации, основанных на алгоритмах цифровой обработки видеоизображений, решающих задачи: локальной навигации подводных аппаратов, динамического позиционирования у объекта работ и построения единого масштабированного фотоплана донной поверхности.

Расширение и усложнение подводно-технических работ у дна или объекта работ сделало актуальной задачу повышения точностных характеристик систем управления подводных аппаратов (ПА). Основная проблема – отсутствие точных измерителей локальных перемещений подводных аппаратов. Попытки использовать для реализации в подводных аппаратах информацию о скорости перемещения от абсолютных гидроакустических лагов или о линейных ускорениях от устройств инерциальной навигации не обеспечивают требуемую точность. Поэтому актуальны разработки малогабаритных, дешевых, высокоточных систем, в условиях невозможности применения систем типа GPS, слабой контрастности окружающей обстановки, переменной освещенности среды.

Одним из способов решения этой задачи является разработка вычислительно эффективных, робастных алгоритмов определения линейных, угловых и скоростных параметров перемещения обитаемых и необитаемых подводных аппаратов на основе цифровой обработки видеоизображений донной поверхности.

Системы обработки телевизионной информации (СОТИ) могут решать следующие задачи:

- реализация локальной навигации подводного аппарата в придонном режиме плавания;
- реализация режима динамического позиционирования подводного аппарата возле объекта работ;
- создание единого масштабированного фотоплана донной поверхности;
- автоматизация посадки (стыковки) с подводной лодкой и/или донными объектами при спасательных операциях, доставке людей и грузов.

Основным условием применения СОТИ является наличие устойчивого телевизионного контакта видеодатчика подводного аппарата с донной поверхностью или объектом работ.

При разработке алгоритма видеонавигации сделано допущение, что поверхность в поле зрения камеры представляет собой плоскость, расположенную перпендикулярно оптической оси камеры.

Изображения, получаемые с видеокамер, проходят предварительную обработку, в частности, устраняются дисторсии, вносимые видеокамерами и предварительно программно компенсируются технологические погрешности расположения камер. Для обеспечения возможности работы в реальном времени используются изображения разрешением 320×240 пикс.

Алгоритм видеонавигации можно разделить на две относительно независимые задачи:

- вычисление линейных и угловых перемещений в рамках четырехкомпонентной модели, при этом углы крена и дифферента ПА предполагаются малыми;

- вычисление расстояния до опорной поверхности.

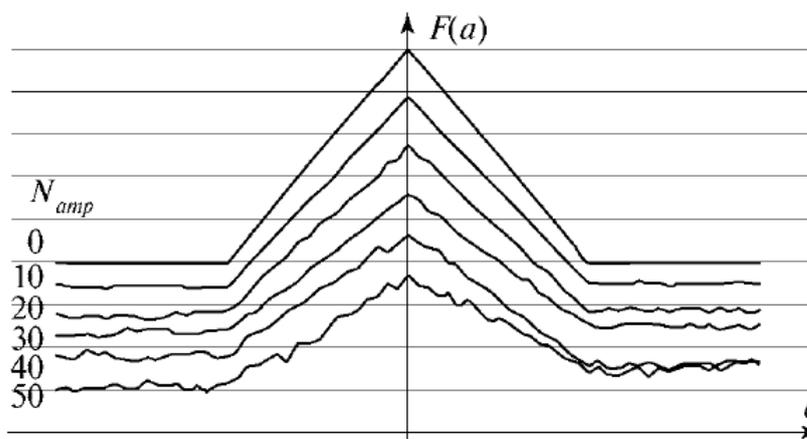
Для вычисления линейных и угловых перемещений используется модификация метода Лукаса-Канаде [1], представляющего собой один из методов оценивания оптического потока. Алгоритм вычисления перемещений работает в два этапа. На первом этапе, на некотором кадре, используемом в качестве опорного, выделяются яркостные неоднородности, представляющие собой квадратные ячейки размера  $csize \times csize$ , где  $csize = 4 \dots 32$  пиксел, обладающие достаточной контрастностью. Затем данные неоднородности ищутся на текущем кадре и определяются их смещения. Традиционно, для этой цели применяются методы, основанные на анализе функции взаимной корреляции изображений, являющемся чрезвычайно вычислительноемкой задачей. Поэтому, использовано приближение корреляционной функции с помощью функционала схожести (1):

$$F(a, b) = \sum_{x-n}^{x+n} \sum_{y-m}^{y+m} f(x, y, a, b) \quad (1),$$

$$f(x, y, a, b) = |Video(x + a, y + b) - Sample(x, y)| \quad (2),$$

где  $Video(x, y)$  – яркость текущего кадра в точке  $(x, y)$ ;  $Sample(x, y)$  — яркость опорного кадра в точке  $(x, y)$ ;  $m, n = csize / 2$  – половина размера ячейки по соответствующей координате, пиксел.

Очевидно, что в случае отсутствия шумов и геометрических искажений функционал (1) будет равен нулю в точке, совпадающей с максимумом корреляционной функции. Однако, из-за наличия в реальном изображении различных шумов и искажений  $F(a, b) = c > 0$  в точке минимума. На рис. 1 представлен вид функционала схожести для одномерного случая, когда изображения искажены гауссовским шумом различной амплитуды,  $N_{amp}$ .



**Рис. 1.** Вид функционала схожести для одномерного случая, при искажении изображений гауссовским шумом

В основе алгоритма лежит аппроксимация двухмерного функционала схожести конусом, что позволяет осуществлять более простой итерационный поиск его вершины, используя в качестве начального приближения ее положения прогноз, основанный на допущении об инерционности подводного аппарата в условиях водной среды.

В случае если средняя вычисленная величина межкадровых смещений (в пикселах) превышает определенный порог, опорный кадр обновляется, заменяясь текущим, иначе опорный кадр сохраняется, что позволяет избежать статической ошибки ухода измерений.

На втором этапе, межкадровые смещения яркостных неоднородностей интерпретируются как трехмерное движение видеокamеры по трем линейным координатам:  $\Delta X_k, \Delta Y_k, \Delta Z_k$  (в системе координат скрепленной с камерой) и  $\Delta \varphi_k$  – углу поворота камеры относительно оси  $Z_k$ , перпендикулярной плоскости кадра.

Для каждого объекта (яркостной неоднородности) можно записать 2 уравнения:

$$\begin{cases} \Delta x_i = \left( \frac{\Delta X_{\theta}}{Z_{\theta}} + x_i \cos \theta_{\theta} + y_i \sin \theta_{\theta} \right) \frac{Z_{\theta} + \Delta Z_{\theta}}{Z_{\theta}} \\ \Delta y_i = \left( \frac{\Delta Y_{\theta}}{Z_{\theta}} + x_i \sin \theta_{\theta} - y_i \cos \theta_{\theta} \right) \frac{Z_{\theta} + \Delta Z_{\theta}}{Z_{\theta}} \end{cases}, i = 1..N; \quad (3),$$

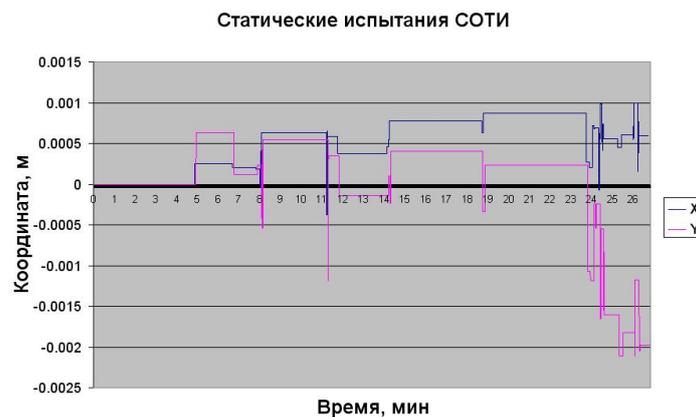
где  $\Delta X_{\theta}, \Delta Y_{\theta}, \Delta Z_{\theta}$  – перемещение камеры в связанной с ней системе координат,  $\theta_{\theta}$  – поворот камеры вокруг оси, перпендикулярной плоскости кадра,  $x_i, y_i$  – экранные координаты объектов на опорном кадре,  $\Delta x_i, \Delta y_i$  – экранные межкадровые смещения объектов,  $Z_{\theta}$  – расстояние до опорной поверхности.

Таким образом, получаем переопределенную систему уравнений с четырьмя неизвестными,  $\Delta X_{\theta}, \Delta Y_{\theta}, \Delta Z_{\theta}, \Delta \theta_{\theta}$  и числом уравнений, равным удвоенному числу выделенных яркостных неоднородностей. Она решается методом наименьших квадратов, находится величина перемещений камеры, которая пересчитывается как движение ПА.

Второй задачей алгоритма видеонавигации является вычисление отстояния ПА от дна, для чего применен метод параллакса, использующий изображения, получаемые с двух видеокамер, образующих стереопару. Также предусмотрена возможность комплексирования с внешним эхолотом подводного аппарата.

Данный алгоритм локальной навигации позволяет определять три линейные координаты, курсовой угол, линейные скорости и отстояние ПА от дна в режиме реального времени.

Особенностью данного типа навигационных алгоритмов является отсутствие уходов измеренных координат с течением времени, так как интегрирование по времени не производится. На рис. 2 представлен результат статических испытаний СОТИ в лабораторных условиях, когда видеодатчик закреплялся неподвижно, и осуществлялось документирование выдаваемых СОТИ линейных координат X и Y.



Пример конструктивного воплощения СОТИ в рамках обитаемого подводного аппарата (ОПА) «ПРИЗ» приведен на рис. 3. [3]. Конструктивно СОТИ подразделяется на забортную и бортовую части. Забортная часть представляет собой 2 видеодатчика, представленных на рис 4, и представляющих собой стереопару, оснащенную светодиодными светильниками. Кормовой видеодатчик направлен вертикально вниз, и служит для целей видеонавигации.



Рис. 3. Общий вид ПА с забортной частью СОТИ

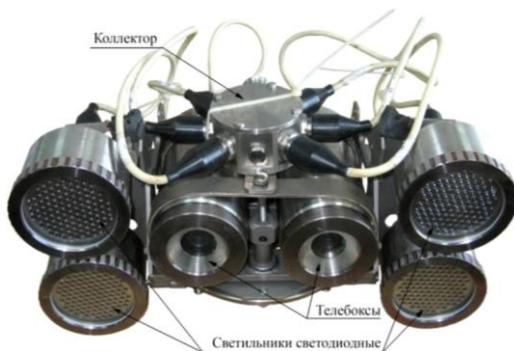


Рис. 4. Видеодатчик СОТИ

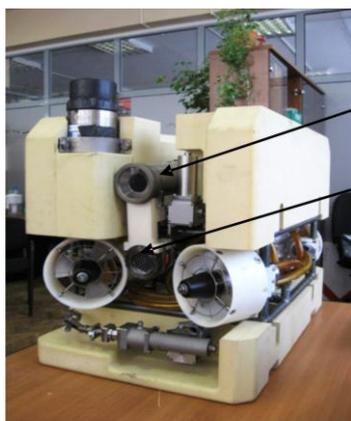


Рис. 5. Бортовая часть СОТИ

Носовой видеодатчик направлен на камеру присоса, и служит для решения задачи автоматизированной стыковки. Бортовая часть СОТИ, приведенная на рис. 5, построена на основе промышленных ЭВМ, и обеспечивает работу алгоритма видеонавигации в режиме реального времени с частотой не ниже 7 Гц.

Для малых обзорных необитаемых телеуправляемых подводных аппаратов, особенностью которых является более высокая динамика ПА и большие значения углов крена и дифферента ПА, был разработан алгоритм видеонавигации, адаптированный для целей динамического позиционирования (видеостабилизации) таких ПА.

Пример конструктивного воплощения системы видеостабилизации в рамках малого телеуправляемого обзорного подводного аппарата приведен на рис. 6. Вычислительный модуль системы видеостабилизации (рис. 7) размещен на корабле-носителе, в пульте управления ПА.



Поворотная видеокамера  
(используется системой  
видеостабилизации)

Светодиодный светильник

**Рис. 6.** Внешний вид малого телеуправляемого аппарата



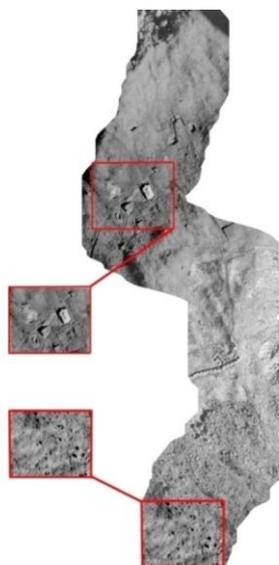
**Рис. 7.** Вычислительный модуль системы видеостабилизации

Особенностью алгоритмов видеостабилизации является компенсация угла поворота видеокамеры, а так же возможность реализации режима динамического позиционирования, когда опорная (наблюдаемая поверхность) представляет собой вертикальную стену.

Описанные выше алгоритмы видеонавигации также могут применяться для составления фотопланов поверхности, над которой движется подводный аппарат, в режиме постобработки записанного видео. Начальное отстояние ПА от дна принимается равным единице, и счисление осуществляется не в метрических, а в пиксельных координатах, т. е. становится возможным определение расположения последовательности кадров относительно первого кадра. При этом проблема сходимости алгоритма при значительных смещениях решается использованием исходного изображения в нескольких различных масштабах (используется методика, описанная в [2]). Примеры построения фотопланов приведены на рис. 8 (видеозапись с подводного аппарата) и рис. 9 (аэрофотосъемка с летательного аппарата).



**Рис. 8.** Фотоплан донной поверхности



**Рис. 9.** Фотоплан земной поверхности по результатам аэрофотосъемки

Разработанные образцы СОТИ успешно прошли государственные испытания в реальных морских условиях. В настоящее время системы обработки телевизионной информации обладают следующими точностными характеристиками:

- диапазон допустимых линейных скоростей ПА - 0...3 узлов. Диапазон допустимых угловых скоростей поворота ПА по курсу: 0-40 °/с;
- погрешность определения линейных и угловых перемещений ПА относительно грунта не более 1,5%, диапазон измерений не ограничен;
- измерение линейных скоростей движения ПА (две компоненты) относительно грунта с погрешностью не более 20 мм/с;
- измерение угловой скорости поворота ПА вокруг оси зрения телебоксов в связанной с ПА системой координат, погрешность измерения не более 0,2 °/с;
- измерение отстояния ПА от грунта с погрешностью не более 1%. Диапазон измерения отстояния 1 м ...  $0,5 \times Z_b$  [м] ;
- величина статического ухода линейных координат не более 2 см/час.

Разработанные системы обработки телевизионной информации позволяют повысить эффективность подводно-технических работ обитаемых и необитаемых подводных аппаратов. Предложенные алгоритмы носят универсальный характер и могут успешно применяться на других типах летательных и/или наземных мобильных аппаратах оснащенных системами технического зрения.

## Литература

1. Lucas B., Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision // Proceedings of Imaging Understanding Workshop. 1981. P. 121-130
2. Zokai S., Wolberg G. Image Registration Using Log-Polar Mappings for Recovery of Large-Scale Similarity and Projective Transformation // IEEE Trans. on Image Processing. Oct. 2005. Vol. 14, №10.
3. Артюхов М.Ю., Кропотов А.Н., Макашов А. А., Сахарова Е.И. Опыт создания системы локальной видеонавигации для подводных аппаратов // Техническое зрение в системах управления мобильными объектами – 2010: Труды научно-технической конференции-семинара. – Таруса, 2010. – С. 230.

## ОБРАБОТКА ТРАЕКТОРНОГО СИГНАЛА МНОГОКАНАЛЬНОГО ГБО С ЦЕЛЬЮ СИНТЕЗИРОВАНИЯ АПЕРТУРЫ

**А.Л. Агеев, Г.А. Игумнов, В.Б. Костоусов**

Институт математики и механики УрО РАН  
620990, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 16, тел./факс: (343) 374-25-81,  
e-mail: vkost@imm.uran.ru

**И.Б. Агафонов, В.В. Золотарев**

Институт проблем морских технологий ДВО РАН  
690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел./факс: (423) 2432416,  
e-mail: lab32imtp@marine.febras.ru

Рассматривается задача синтеза апертуры антенны многоканального гидролокатора бокового обзора. Описывается алгоритм синтеза, который базируется на использовании закона изменения фазы отраженного сигнала при приближенно известном относительном движении фазового центра антенны и наблюдаемой сцены. Представлены результаты обработки данных экспериментов, полученных в морских условиях с помощью разработанного аппаратно-программного комплекса «Синтез» для когерентного многоканального сбора и накопления данных.

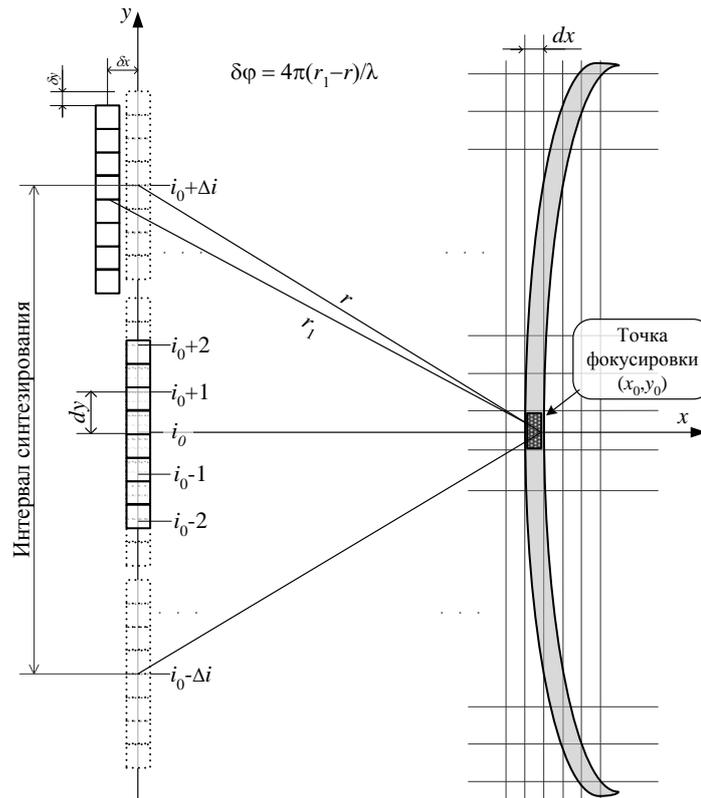
В докладе рассматривается задача обработки эхо-сигнала многоканального гидролокатора бокового обзора (ГБО) с синтезированной апертурой антенны [1]. Относительно недавно (см. [2,3]) в литературе появилось описание гидролокаторов и методики обработки эхолокационных данных, позволяющие даже для небольших и относительно дешевых гидролокаторов различать небольшие объекты на расстояниях в сотни метров, что, несомненно, является революцией в этой области. Здесь алгоритм синтеза апертуры антенны базируется на использовании закона изменения фазы отраженного сигнала при известном относительном движении наблюдаемой цели и фазового центра антенны (ФЦА) [2-5].

В ИПМТ ДВО РАН в 2010 году был изготовлен макетный образец многофункционального комплекса «Синтез», назначение которого состоит в отработке и тестировании в морских условиях перспективных гидролокационных систем, в частности, ГБО с синтезированной апертурой. В данном случае комплекс оснащен низкочастотным (75-85 кГц) ГБО с 8-канальной приемной антенной. Антенна состоит из восьми ячеек длиной 0.076 м с расстоянием между фазовыми центрами ячеек  $d=0.078$  м. Ширина диаграммы направленности каждой приемной ячейки в горизонтальной плоскости составляет  $\Theta \approx 15^\circ$  при длине волны  $\lambda=0.02$  м. Подробное описание устройства комплекса и результатов первых натурных испытаний приведены в [4]. Примечательной и уникальной особенностью комплекса является возможность сохранения многоканальной информации в самом первичном виде, почти не искаженном какой-либо обработкой. В [4] описаны этапы первичной обработки исходного высокочастотного эхо-сигнала: ЛЧМ-сжатие и амплитудное выравнивание по дальности. В конечном счете, с помощью преобразования Гильберта из строк реального сигнала можно построить матрицу  $S$  комплексной огибающей траекторного сигнала. Ниже в докладе обсуждается алгоритм обработки этой матрицы с целью синтеза изображения.

Заметим, что в современной литературе (см. [2, 3]) основное внимание уделяется алгоритмам, работающим в реальном времени. Эти алгоритмы используют частотное

представление траекторного сигнала и быстрое преобразование Фурье. Нас здесь интересуют не столько эффективная бортовая реализация, которая будет возможна на следующих этапах работы, сколько выяснение главных проблем синтезирования аперттуры в конкретных аппаратных условиях и поиск способов их преодоления. Поэтому здесь описывается алгоритм, работающий в исходном пространстве сигнала, хотя вычислительно затратный, зато логически более простой. Он предназначен для работы в лабораторных условиях с эхо-сигналом, заданным во временной области, переведенным в плоскость  $(x,y)$ .

Рассмотрим модель измеренных данных, получаемых на основе многоканального траекторного сигнала [6]. На плоскости введем декартову систему координат  $(x,y)$  и равномерные сетки  $x_k = x_{\min} + k dx$ ,  $k = 0, 1, \dots, K$ ,  $y_i = y_{\min} + i dy$ ,  $i = 0, 1, \dots, N$  (характерные размеры:  $dx \approx 0.01$  м,  $dy \approx 0.13$  м) (см. рис. 1).



**Рис. 1.** Схема синтезирования одного отсчета (на рисунке – это точка фокусировки) выходного изображения с компенсацией малых траекторных нестабильностей. Здесь восьмиканальная приемная антенна на интервале синтезирования движется вдоль оси  $y$  с шагом  $dy$  ( $i$  – индекс позиции антенны), формируя по восемь строк комплексных отсчетов траекторного сигнала  $s_{ikm}$  ( $m=1, \dots, 8$ ;  $k$  – номер отсчета по дальности). В каждой строке отсчеты по оси  $x$  идут с шагом  $dx$ . При формировании соседних групп отсчетов эхо-сигнала вдоль направления движения АНПА возникают траекторные нестабильности  $(\delta x, \delta y)$ , которые приводят к возникновению фазовой ошибки  $\delta\phi = 4\pi(r_1 - r)/\lambda$  в опорной функции алгоритма синтезирования. Задача алгоритма состоит в оценке этой ошибки

Считаем, что гидролокатор движется с равномерной скоростью (примерно 1 м/сек) вдоль оси  $y$  и в точках  $y_i$  происходит излучение эхо-сигнала и прием отклика. Для каждого из 8-ми приемных каналов ( $m$ -номер канала) отклик представляет собой строку, состоящую из комплексных чисел  $(s_{1im}, s_{2im}, \dots, s_{kim})$ . В действительности, конечно, измерение отклика происходит при движении локатора между точками  $y_i$  и  $y_{i+1}$  и измеряется функция, зависящая от времени, но здесь этот эффект «второго порядка» не учитывается. Таким образом, измеренными эхолокационными данными являются восемь поэлементно совмещенных  $K \times N$ -матриц  $S_m$ , состоящих из комплексных чисел  $s_{kim}$ .

В [6] была построена математическая модель эхолокационного сигнала и поставлена задача *синтезирования* или *восстановления* эхолокационного изображения по траекторному сигналу, как математическая задача обращения линейного уравнения первого рода, которая относится к классу неустойчивых к возмущениям задач. Необходимость преодоления траекторных нестабильностей делает эту задачу неклассической с точки зрения теории обратных некорректных задач, придавая ей помимо большой практической важности и значительный теоретический интерес.

В докладе обсуждается алгоритм восстановления изображения по траекторному сигналу, который работает однотипно для каждой точки изображения, называемой в этом случае *точкой фокусировки*. В общем виде алгоритм представляется как свертка [6] комплексного траекторного сигнала  $s$ , взятого вдоль «линии размытия точки» (на рис.1 она показана в виде закрашенной полоски-дуги), и комплекснозначной опорной функции  $h(\tau)$ , формируемой по траекторным измерениям навигационной системы АНПА. Опорная функция имеет вид:

$$h(\tau) = R(\tau)e^{j\left(\frac{4\pi}{\lambda}\rho(\tau)\right)},$$

где  $\rho(\tau)$  – «прогнозируемый» и восстанавливаемый по траекторному сигналу закон изменения дальности до точки фокусировки;  $R(\tau)$  – весовая функция (в расчетах пока принималась константой),  $\lambda$  – длина волны,  $j$  – мнимая единица.

Основная проблема синтезирующего алгоритма – это определение прогнозируемой дальности  $\rho(\tau)$  с точностью не хуже  $\lambda/8$ . Такую точность нельзя обеспечить только навигационными средствами носителя. Здесь должна использоваться многоуровневая система, включающая не менее трех уровней обработки [2-4]. На первом – самом грубом уровне производится учет навигационных данных – координат носителя и его угловой ориентации. На втором, среднем по точности уровне, производится корреляционная обработка траекторного сигнала для уточнения дальности до точки фокусировки. Наконец, на заключительной стадии, называемой «автофокусировкой», производится уточнение фазы опорной функции.

Ниже предлагается алгоритм синтезирования с компенсацией малых траекторных нестабильностей величиной, не более длины волны  $\lambda$ . Его, таким образом, можно отнести к методам автофокусировки.

#### **Алгоритм синтезирования с компенсацией малых траекторных нестабильностей**

Для каждой точки фокусировки  $(x_0, y_0)$  ( $x_0 = k_0 \cdot dx$ ,  $y_0 = i_0 \cdot dy$ ) выполняется следующее.

1) Определяем длину  $L$  интервала синтезирования на дальности  $x_0$ :  $L = \alpha \cdot (x_0 - x_{\min}) \cdot \Theta$ , где  $x_{\min} = D/2 \cdot \text{tg}(\pi/2 - \Theta/2)$ ,  $\alpha = 0.6 \div 0.8$ ,  $D = 8d$  – суммарная апертура приемной антенны, состоящая из восьми ячеек размером  $d$ ,  $\Theta$  – ширина диаграммы направленности одной приемной ячейки.

2) Примем за начало локальной системы координат центр интервала синтезирования, где расположен ФЦА суммарной приемной антенны в «нулевом» относительно точки фокусировки положении, как показано на рисунке 1. В пределах интервала синтезирования рассмотрим положение ФЦА на расстоянии  $\Delta i \cdot dy$  от начала координат. Для каждого такого положения для компенсации фазового сдвига относительно нулевого положения вычисляется поправка  $\delta\varphi^*$  следующим способом.

Фазовая поправка  $\delta\varphi^*$  ищется из условия минимизации функции  $F(\delta\varphi)$ :

$$F(\delta\varphi) = \left\| \sum_{m=1}^8 \left( e^{j\delta\varphi} a_{i_1 k_1 m} - a_{i_0 k_0 m} \right) \right\|^2,$$

где  $\|\cdot\|$  – модуль комплексного числа,

$$a_{i_0 k_0 m} = s_{i_0 k_0 m} e^{j\frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{(k_0 \cdot dx)^2 + (m-4)^2 d^2}}, \quad a_{i_1 k_1 m} = s_{i_1 k_1 m} e^{j\frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{(k_0 \cdot dx)^2 + (\Delta i \cdot dy + (m-4)d)^2}}.$$

В результате минимизации  $F(\delta\varphi)$  находим поправку  $\delta\varphi^* = \arctg(-\frac{q}{p})$ , где

$$p = \left( \sum_{m=1}^8 X_m^0 \right) \left( \sum_{m=1}^8 X_m^1 \right) + \left( \sum_{m=1}^8 Y_m^0 \right) \left( \sum_{m=1}^8 Y_m^1 \right), \quad q = \left( \sum_{m=1}^8 X_m^0 \right) \left( \sum_{m=1}^8 Y_m^1 \right) - \left( \sum_{m=1}^8 Y_m^0 \right) \left( \sum_{m=1}^8 X_m^1 \right),$$

символами  $X$  и  $Y$  с индексами обозначены действительные и мнимые части комплексных чисел:

$$a_{i_0 k_0 m} = X_m^0 + jY_m^0, \quad a_{i_k m} = X_m^1 + jY_m^1.$$

3) Вычисляем значение синтезированного изображения в точке  $(x_0, y_0)$  с учетом найденных поправок:

$$I(x_0, y_0) = \sum_l \sum_{m=1}^8 \left( s_{(i_0 + \Delta i_l, k(\Delta i_l))} e^{j \left( \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{(k_0 \cdot dx)^2 + (\Delta i_l \cdot dy + (m-4)d)^2} + \delta\varphi_l^* \right)} \right),$$

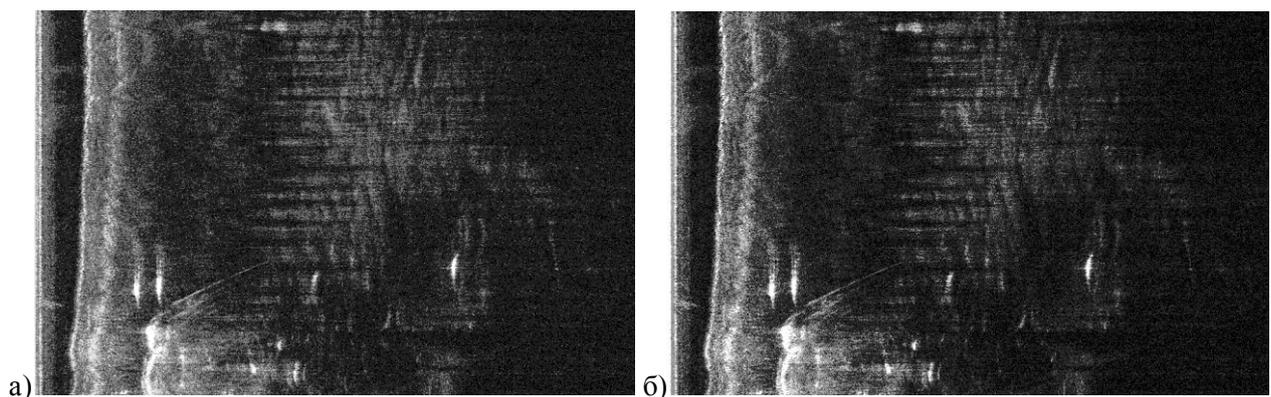
где  $k(\Delta i_l) = \left[ \frac{1}{dx} \sqrt{(k_0 \cdot dx)^2 + (\Delta i_l \cdot dy)^2} \right]$  и внешнее суммирование проводится по всем строкам интервала синтезирования ( $l$  – индекс строки),  $\Delta i_l$  – смещение (задается в дискретах по оси  $y$ )  $l$ -й строки относительно центра,  $\delta\varphi_l^*$  – фазовая поправка (см. выше),  $[\cdot]$  – операция округления. Для «нулевой» строки полагаем  $\Delta i_0 = 0$ ,  $\delta\varphi_0^* = 0$ .

4) Для повышения устойчивости синтезирования дополнительно суммируем близкие точки фокусировки, в которых уровень полезного сигнала значителен.

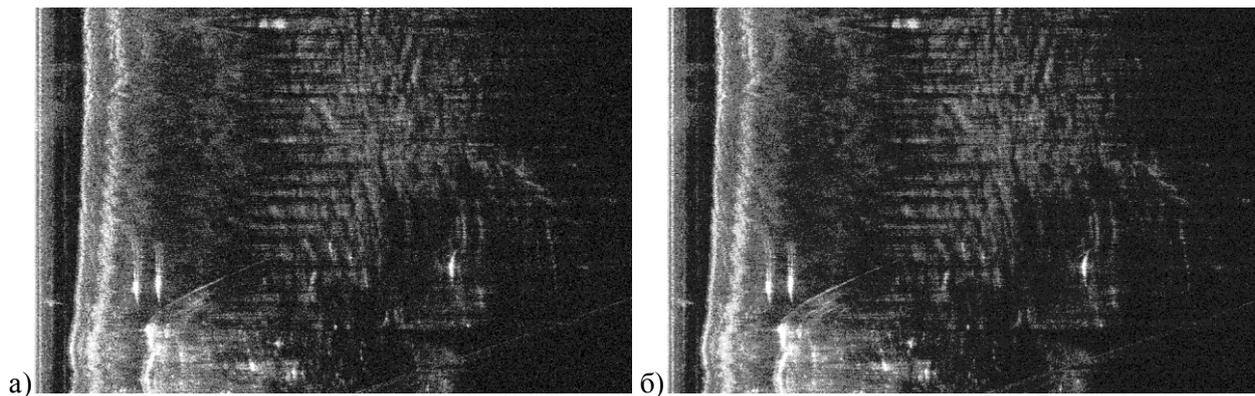
Алгоритм был успешно опробован на модельных данных и подтвердил свою работоспособность при наличии траекторных отклонений в пределах одной длины волны  $\lambda$ .

**Обработка экспериментальных данных.** К сожалению, предложенный алгоритм не дает существенного повышения качества изображения на реальных данных морского эксперимента [4]. Здесь, по-видимому, как и следует из литературы [2-4] для получения эффекта не обойтись без предварительной компенсации больших траекторных отклонений.

Однако проведенные дополнительно к работе [4] численные эксперименты над упомянутыми реальными данными подтвердили наличие «межстрочной» полезной фазовой информации как между каналами в одной посылке, так и между соседними строками одного канала. Этот факт является хорошим стимулом для дальнейшей разработки алгоритма синтезирования. Рис. 2, 3 поясняют содержание и результаты экспериментов.



**Рис. 2.** Подтверждение наличия полезной фазовой информации для синтезирования между строками одного канала: а) фрагмент исходного (после ЛЧМ-сжатия) ГБО-изображения одного (первого) канала; б) результат синфазного суммирования пяти соседних строк исходного изображения первого канала, в котором помимо общего уменьшения шума также наблюдается на мелких объектах эффект «фокусировки»



**Рис. 3.** Подтверждение наличия полезной фазовой информации для синтезирования между каналами: а) фрагмент поэлементного синфазного суммирования исходных ГБО-изображений восьми каналов; б) результат динамической «перезафокусировки по дальности» восьми каналов. Здесь на малых дальностях заметен эффект «фокусировки» на мелких ярких объектах

**Выводы.** Во-первых, в докладе предложен алгоритм синтезирования с компенсацией малых траекторных искажений. Алгоритм работает в исходном пространстве комплексной огибающей траекторного сигнала, имеет простую логику, хотя и вычислительно затратный. Алгоритм успешно прошел апробацию на модельных данных. Во-вторых, результаты дополнительной обработки экспериментальных данных, полученных с помощью макета многоканального комплекса «Синтез» подтвердили наличие «межстрочной» полезной фазовой информации как между каналами в одной посылке, так и между соседними строками одного канала. Этот факт является хорошим стимулом для дальнейшего развития алгоритма синтезирования и его применения к данным натуральных экспериментов, получаемых в ИПМТ ДВО РАН.

**Благодарности.** Работа поддержана программой фундаментальных исследований УРО РАН «Исследование новых задач математической физики и создание алгоритмов их решения» (проект, совместный с ИПМТ ДВО РАН) и грантами РФФИ № 09-01-00523 и № 09-01-00053.

## Литература

1. Золотарев В.В. Гидролокаторы с синтезированной апертурой для автономного подводного робота // Подводные исследования и робототехника. 2007. №1(3). С.12-20.
2. Bonifant W.W.Jr. Interferometric Synthetic Aperture Sonar Processing: a thesis presented to the Academic Faculty In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science in Electrical Engineering. Georgia Inst. of Tech. 1999.
3. Callow H.J. Signal Processing for Synthetic Aperture Sonar Image Enhancement: a thesis presented for the degree of Doctor of Philosophy in Electrical and Electronic Engineering at the Univ. of Canterbury, Christchurch, New Zealand. 2003.
4. Костоусов А.В., Костоусов В.Б. Моделирование ГБО с синтезированной апертурой // Подводные исследования и робототехника. №2(6). 2008. С. 16-29.
5. Агафонов И.Б., Золотарев В.В., Мадисон Е.А. Анализ применимости первичных гидролокационных данных для синтезирования апертуры антенн // Подводные исследования и робототехника. 2011. №1(11). С. 32-40.
6. Агеев А.Л., Костоусов В.Б., Агафонов И.Б., Золотарев В.В. Моделирование и обработка траекторного сигнала гидролокатора с синтезированной апертурой // Технические проблемы освоения Мирового океана: мат-лы 3-й науч.-техн. конф. Владивосток: ИПМТ ДВО РАН, 2009. С. 351-355.

# О РЕЗУЛЬТАТАХ НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО НАКОПЛЕНИЮ И АНАЛИЗУ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ СИНТЕЗИРОВАНИЯ ГИДРОЛОКАЦИОННЫХ АПЕРТУР

**И.Б. Агафонов, В.В. Золотарев, Е.А. Мадисон**

Учреждение Российской академии наук Институт проблем морских технологий  
Дальневосточного отделения РАН  
690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а

Описана структура экспериментального комплекса «Синтез», разработанного для накопления многоканальных данных, необходимых для отработки алгоритмов синтезирования гидролокационных апертур. Приведены оценки качества полученных первичных экспериментальных данных. Выполнен анализ их применимости для реализации принципа синтезирования. Перечислены задачи по усовершенствованию аппаратуры, методик и алгоритмов.

## **Цель эксперимента и постановка задачи**

В ИПМТ ДВО РАН разработан и изготовлен многофункциональный макетный комплекс «Синтез», предназначенный для сбора в условиях натурального морского эксперимента многоканальных данных, необходимых для отработки перспективных гидролокационных устройств различного назначения. В 2010-2011 гг. антенная система этого комплекса использовалась в варианте низкочастотного гидролокатора бокового обзора (ГБО) с синтезированной апертурой (СА).

Метод СА [1, 2] базируется на использовании сложных алгоритмов, весьма чувствительных к качеству первичных гидролокационных и навигационных данных. Отработка алгоритмов на базе реальных данных, – процесс трудоемкий и продолжительный, а при работе в море еще и весьма затратный. Накопив некоторый набор первичных гидролокационных данных, эти затраты можно сократить, перенеся часть исследовательских и отладочных работ с морских полигонов в лабораторию, тем самым сделав их независимыми от сезона и наличия обеспечивающего судна.

При разработке комплекса «Синтез» основополагающим требованием было сохранение многоканальной информации в первичном, «сыром» виде, по возможности еще не искаженном какой-либо обработкой. При этом собственно процесс СА переносится на стадию постобработки. Такое временное решение не позволяет получить сиюминутный конечный результат. Но на начальном этапе проектирования такой подход удобен, т.к. позволяет при минимальном вмешательстве в первоначальную структуру эхосигналов гибко изменять алгоритмы постобработки без опасения за потерю достоверности данных, что могло бы произойти, если обработка предшествует накоплению.

## **Структура макетного комплекса «Синтез»**

Структура комплекса показана на рис. 1. Особенностью его конструктивного исполнения является использование в качестве жесткой базовой платформы для размещения антенн комплекса подводного буксируемого модуля гидролокатора EdgeTech 4200-FSL. Локатор EdgeTech использовался в эксперименте в качестве контрольного прибора, причем данные его датчиков глубины, курса, дифферента и крена «привязывались» к многоканальной эхо-информации комплекса «Синтез».

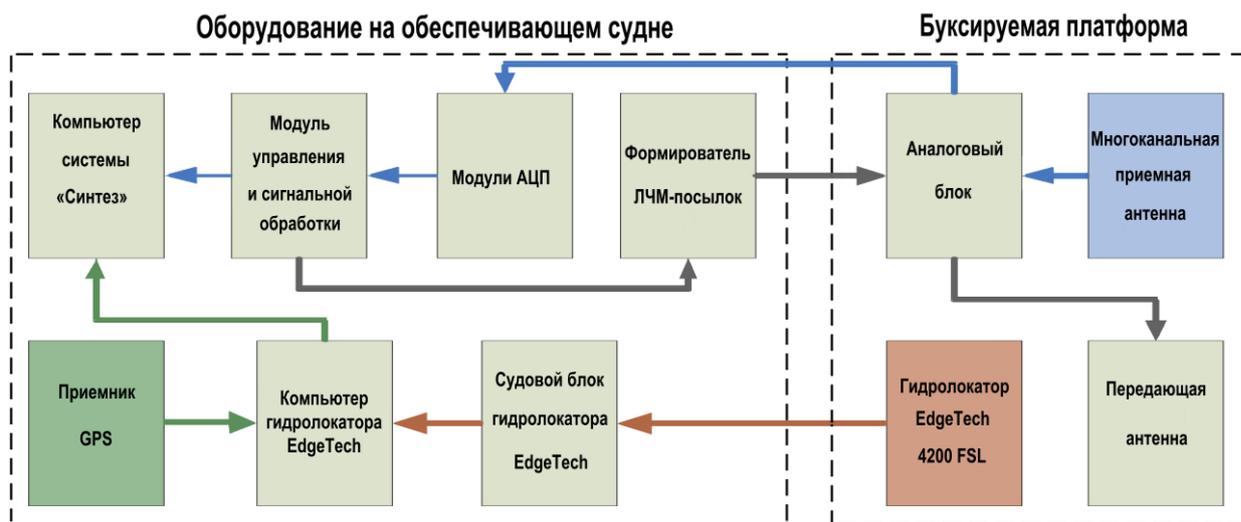


Рис. 1. Структура макетного комплекса «Синтез»

### Требования к основным узлам комплекса

Важнейшим узлом комплекса является 8-канальная приемная антенна, выполненная в виде линейной фазированной решетки. К ней предъявлялись следующие требования:

- идентичность диаграмм направленности (ДН) всех приемных секций и их соответствие по азимуту и вертикали соответствующим значениям ДН антенны передающей;
- идентичность и равномерность частотно- фазовых характеристик приемных секций;
- минимальный уровень проникновения сигналов между каналами и максимальная помехоустойчивость к воздействию внешних электрических и акустических помех;

Жесткие требования по идентичности характеристик предъявлялись и к многоканальному усилительному тракту. Выполненный на современной элементной базе, он обладал высокой стабильностью и фазовыми искажениями, не превышающими  $0,1^\circ$  в рабочей полосе частот. Использование единого для всех каналов управляющего напряжения временной автоматической регулировки усиления (ВАРУ) обеспечивало идентичность законов изменения коэффициентов усиления во времени.

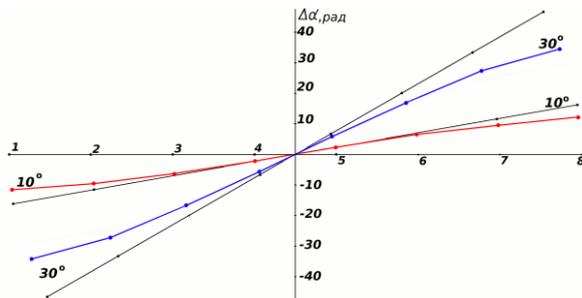
В комплексе «Синтез» реализована современная тенденция к повышению точности цифровой обработки и минимизации аналоговых узлов приемного тракта путем повышения разрядности цифрового представления эхо-информации. Для оцифровки использовались 24-разрядные  $\Sigma$ - $\Delta$ -АЦП серии Danville Signal dspstak. Частота оцифровки  $f_{samp} = 192$  кГц в 19 раз превышала ширину спектра эхосигналов и более чем вдвое – рабочую частоту. Благодаря характерному для  $\Sigma$ - $\Delta$ -АЦП свойству подавлять до 80 дБ частоты, лежащие выше частоты  $0,5 \cdot f_{samp}$ , перед АЦП не потребовалась дополнительная фильтрация.

В модуле управления и сигнальной обработки Danville Signal dspstak используется 32-разрядный процессор с архитектурой SHARC, управление которым осуществляется судовым компьютером. Оцифрованная эхо-информация с выхода модуля пересылается на компьютер через интерфейс USB 2.0 со скоростью потока до 5 Мбайт/с. Кроме того судовым компьютером используется для накопления оцифрованной гидролокационной и навигационной информации и оперативного отображения обстановки на экране.

Точность формирования ЛЧМ-посылок и, как следствие, эффективность ЛЧМ-сжатия существенно повышены благодаря применению специализированных микросхем прямого цифрового синтеза (DDS). Параметры ЛЧМ-обработки задаются с клавиатуры компьютера.

Лабораторные испытания, выполненные перед началом морского эксперимента, показали, что основные электронные узлы по показателям когерентности удовлетворяют типовым требованиям к аппаратуре цифрового синтеза апертуры [3].

Серьезные проблемы выявились при измерении фазовых характеристик многоканальной приемной антенны. На рис. 2 показаны результаты ее обмера в опытовом бассейне. Сферический фронт от «точечного» источника для наглядности был пересчитан в плоский. Черными прямыми линиями показаны расчетные графики идеализированных фазовых задержек  $\Delta\alpha$  на геометрических центрах каждой из 8 приемных секций линейной приемной решетки для углов поворота антенны относительно направления падающей волны  $10^\circ$  и  $30^\circ$ . Оцифровка по горизонтальной оси соответствует номерам элементов решетки при отсутствии поворота. Синими и красными линиями и точками показаны реальные фазовые задержки для каждой секции при названных значениях угла поворота.



**Рис. 2.** Результаты обмера 8-канальной приемной антенны в опытовом бассейне

Этот эффект может быть учтен при постобработке, но это потребует дополнительных ресурсных затрат.

Возможной причиной несоответствия идеализированных и реальных характеристик приемной антенны может быть особенность ее конструкции. Фронтальная металлическая диафрагма, разделяющая внутренний объем антенны от внешней среды, создает заметную акустическую связь между приемными секциями. При этом акустическое воздействие от края антенны, повернутого ближе к источнику звука, распространяясь по диафрагме, опережает приход основной, водной волны, падающей на более удаленные приемные

### Результаты натурных экспериментов и обработка данных

В ходе экспериментов было накоплено свыше 17 гигабайт «сырых» данных и первоочередная задача, предшествующая постобработке, свелась к оцениванию их качества на предмет применимости для СА. Оценки использовались также для проверки точности работы аппаратных узлов и эффективности примененных алгоритмов. На основе оценок выработаны требования по усовершенствованию комплекса, методик его использования, технологий визуализации и накопления скоростного потока многоканальных данных;

На качество гидролокационных данных влияние оказывали, прежде всего, погрешности буксировки подводной платформы с антеннами и особенности распространения звука в неоднородной морской среде. Особого учета требовало несоответствие фактических характеристик приемной антенны перечисленным жестким требованиям, необходимым для реализации синтезирования. Первоочередные виды постобработки включали процедуры, позволяющие оценить полученные «сырые» данные, на предмет их когерентности, как характеристики, существенной для реализуемости СА. При этом интерес представляла как кратковременная когерентность на интервалах времени  $\Delta t$ , не превышающих периода зондирования  $T$  ( $100 \div 300$  мс), так и долговременная – на интервалах  $\Delta t \gg T$ .

Оценочные задачи постобработки решались с помощью специально разработанных программ «ПО постобработки». Основная их особенность – наличие собственного языка сценариев (скриптов), позволяющего легко изменять последовательность и параметры обработки без изменения кода программы, что очень удобно на стадии отработки алгоритмов.

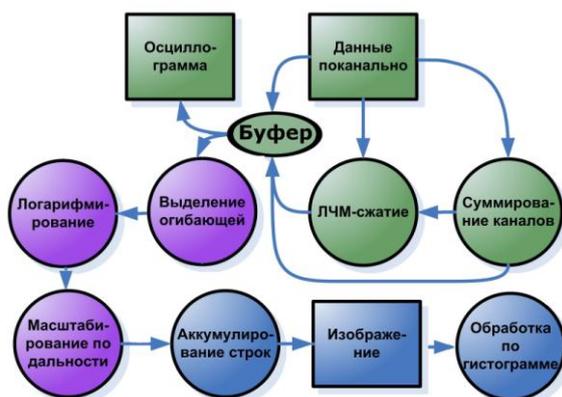


Рис. 3. Схема постобработки многоканальных гидролокационных данных

Общая схема постобработки изображена на рис. 3. Зеленым цветом отмечен блок обработки исходных данных, фиолетовым – блок формирования видеосигнала, синим – блок обработки изображений. Как видно на схеме, в блоке обработки исходных данных существуют различные варианты прохождения сигналов. В текущей конфигурации ПО постобработки на выходе этого блока можно получить «сырые» данные для каждого из каналов, результаты ЛЧМ-сжатия для каждого из каналов, синфазного суммирования всех каналов и ЛЧМ-сжатия суммы каналов. Обработанный сигнал может быть просмотрен в виде осциллограммы или направлен далее для формирования видеосигнала строки и изображения.

**ЛЧМ-сжатие.** На выходе формирователя ЛЧМ-посылок генерируется зондирующий импульс, имеющий в дискретном представлении вид:

$$s(i) = \sin\left(2\pi f_0 t(i) + \frac{1}{2} \mu t(i)^2\right), \quad \mu = \frac{f_1 - f_0}{\tau} \quad (1)$$

$$N = \tau \cdot f_{\text{samp}}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N, \quad t(i) = i / f_{\text{samp}},$$

где  $\mu$  – скорость изменения частоты,  $f_0$  и  $f_1$  – начальная и конечная частоты импульса,  $\tau$  – длительность импульса,  $N$  – число отсчетов на импульс,  $f_{\text{samp}}$  – частота дискретизации

Согласованный фильтр, определяемый как  $h(i) = s(N - i)$ , взвешивался окном Ханна

$$W(n) = 0.5 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right), \quad (2)$$

ЛЧМ-сжатие выполняется путем свертки  $y(i) = x(i) * h_w(i)$ , где  $x(i)$  – входной сигнал

На рис. 4 проиллюстрирован результат ЛЧМ-сжатия эхосигнала одного из каналов.

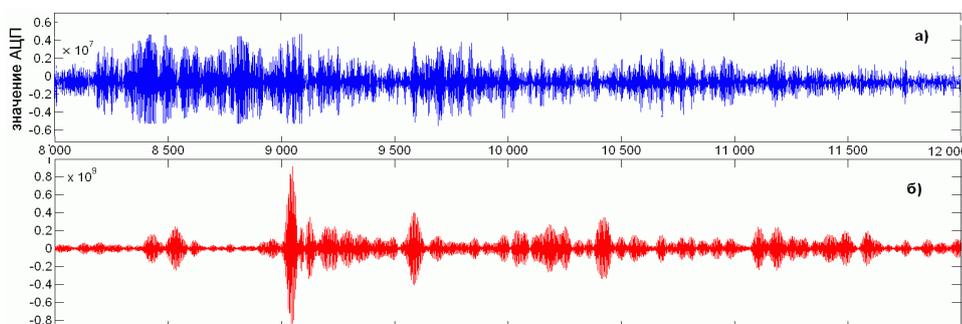


Рис. 4. Результат ЛЧМ-обработки: а) первичный сигнал, б) сигнал, после ЛЧМ-сжатия

**Суммирование каналов.** ДН линейной антенной решетки из 8 элементов с фокусировкой «на бесконечность» формируется путем синфазного сложения сигналов всех

каналов  $x_k(i)$  Вывод о степени когерентности сигналов в разных каналах на интервалах времени  $\Delta t \leq T$  устанавливается по степени сходства результатов обзора целей такой синфазной решеткой с результатами традиционного ГБО-обзора с «веерообразной» ДН физической антенны.

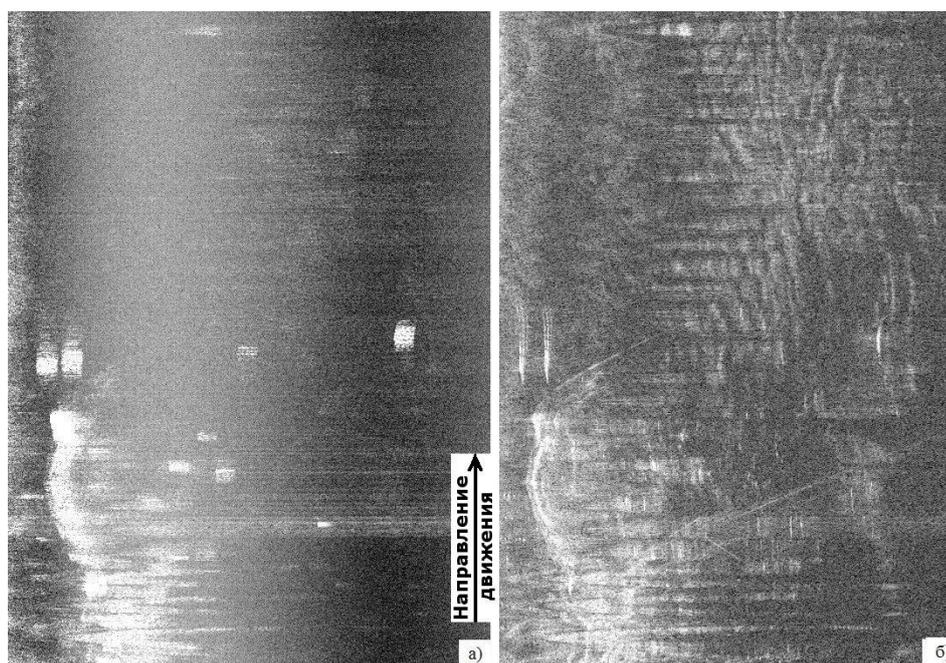
**Масштабирование.** Для приведения большого числа отсчетов в исходной «скан-строке» к значениям, приемлемым для отображения на мониторе, использовалось масштабирование с помощью эффективного алгоритма Карла-Фанта.

**Аккумуляция** представляет собой процедуру формирования эхограммы из скан-строк

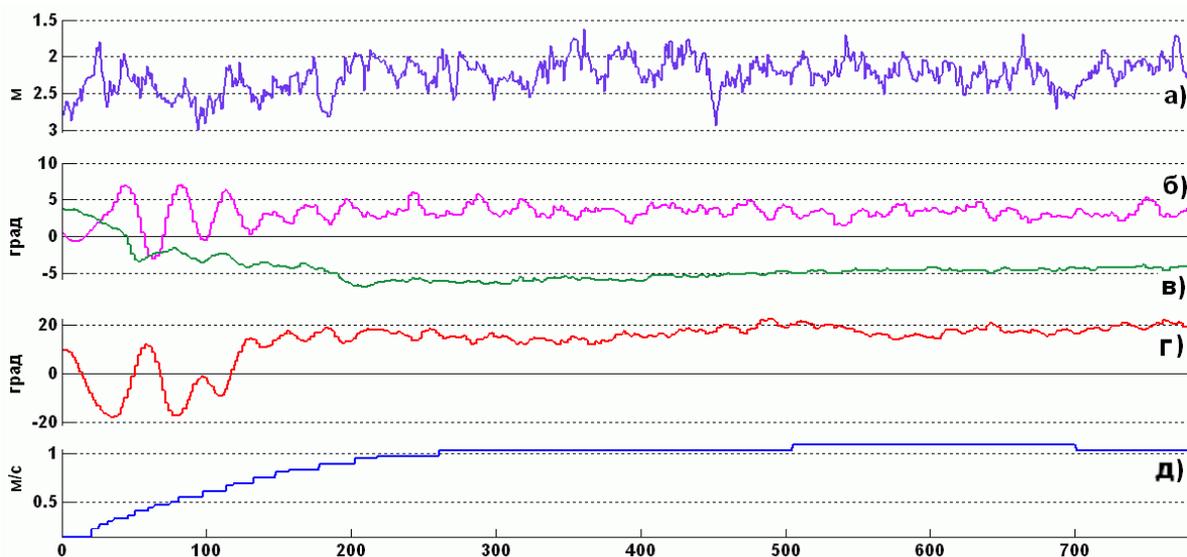
**Логарифмирование.** Операция логарифмирования эхосигналов, типовая при визуализации гидролокационных изображений, ввиду нелинейности не может предшествовать линейной обработке, в которой важна фазовая структура сигнала. Поэтому она, в сочетании с *гистограммной обработкой*, используется только в качестве завершающей процедуры непосредственно перед отображением для улучшения визуального восприятия на одной эхограмме одновременно как сильных, так и слабых целей.

**Гистограммная обработка** используется для коррекции контраста и устранения нежелательной постоянной составляющей, проявляющейся после логарифмирования в виде вуали.

На рис. 5 показаны эхограммы участка дна до и после применения описанных видов постобработки, а на рис. 6 приведены графики навигационных данных, соответствующие прохождению этого участка. В начале галса на графиках отчетливо видны сильные колебания навигационных параметров. Отмечена связь между поведением навигационных параметров, качеством эхо-изображений и эффективностью примененных видов обработки.

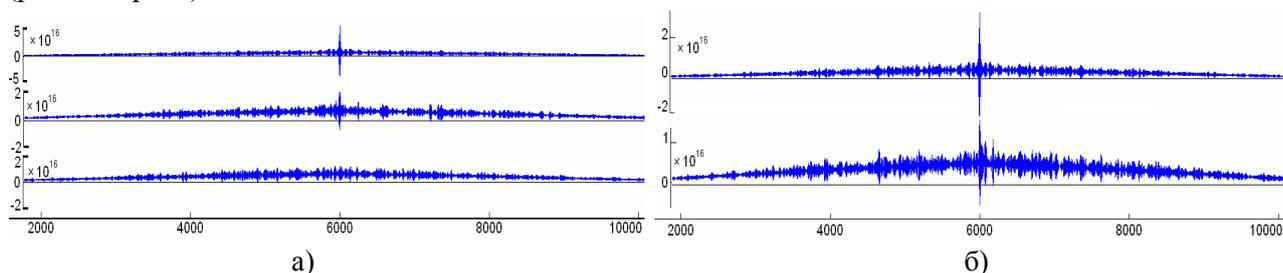


**Рис. 5.** Пример постобработки: на эхограмме участка дна «а» представлены «сырые» данные 1-го канала, на эхограмме «б» – результат ЛЧМ-сжатия суммы всех каналов

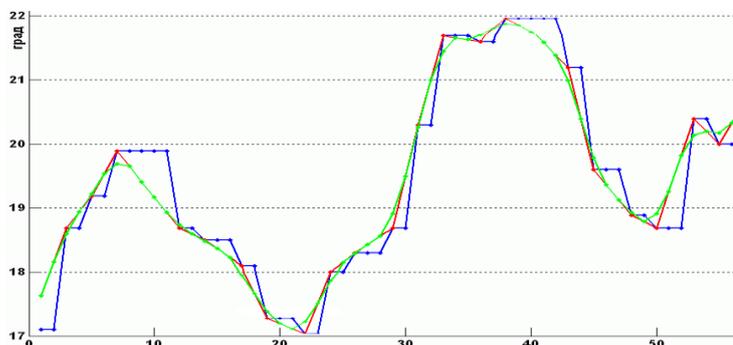


**Рис. 6.** Графики навигационных данных, соответствующих проходу участка дна (см. рис. 5): а) заглубление антенны, б) крен, в) дифферент, г) курс, д) скорость

Корреляционный анализ эхо-информации близких циклов зондирования показал, что уже на 2-х, 3-х метровых циклах зондирования эхосигналы теряют связь со своим предыдущим состоянием (см. рис. 7 слева). В то же время, когерентность эхосигналов разных каналов (вплоть до 8-го) в пределах одного периода зондирования оставалась высокой (рис. 7 справа).



**Рис. 7.** Образцы результатов корреляционного анализа эхосигналов. «а» – На разных циклах зондирования. Верхний график – автокорреляционная функция (АКФ) 1-го канала на  $i$ -м цикле зондирования, ниже – взаимные корреляционные функции (ВКФ) этого эхосигнала с эхосигналами 1-го канала, выбранными на 2-м, и 4-м циклах зондирования. «б» – На одном цикле зондирования. Сверху – АКФ эхосигнала 1-го канала, внизу – ВКФ эхосигналов 1-го и 8-го каналов



**Рис. 8.** Пример обработки данных датчика курса (временной масштаб увеличен относительно рис. 6). Синий цвет – необработанные данные, красный – результат линейной интерполяции, зеленый – результат низкочастотной фильтрации

Наличие навигационных данных позволяет ввести в эхосигналы компенсационные поправки, обусловленные траекторными возмущениями в движении антенны. Точность поправок может быть повышена предобработкой навигационных данных. На рис. 8 показаны результаты такой предобработки на примере показаний курсового датчика. Аналогичной предобработке подвергались и данные остальных датчиков. Существенным поводом для ее выполнения является несоответствие между частотой обновления показаний датчиков и более высокой частотой их считывания. Предобработка сводилась к интерполяции данных, а затем к их низкочастотной фильтрации. Использование фильтрованных навигационных данных для вычисления фазовых компенсационных поправок представляется корректным в предположении, что они в большей степени соответствуют реальному угловому и линейному перемещению в воде массивной буксируемой платформы, нежели данные первичные. Критерием справедливости этого предположения должно стать повышение (еще до применения микронавигационных алгоритмов) разрешающей способности обзора при формировании виртуальных апертур хотя бы на 3-4-х циклах зондирования путем когерентного сложения эхосигналов. Для этого необходимо перейти от построчной обработки данных к обработке блочной со скользящим окном из  $n$  строк. Первым этапом блочной обработки будет фазовая коррекция сигналов по данным навигационных датчиков, вторым – уточняющая коррекция на базе микронавигационных алгоритмов.

### **Выводы**

1. Натурные испытания рабочего макета многоканального гидролокационного комплекса «Синтез» показали его работоспособность при эксплуатационно-технических характеристиках, приемлемых для эффективного сбора первичных эхолокационных данных.

2. На интервалах, сравнимых с длительностью зондирующей посылки, временная и межканальная когерентность эхо-сигналов достаточна для практической реализации простых методов обработки. Точность ряда решений, например, ЛЧМ-сжатия, близка к теоретическому пределу. Отработанные технические решения планируется использовать и в других гидролокационных устройствах реального времени.

3. Для повышения качества перемещения антенн в реальных морских условиях целесообразна адаптация комплекса «Синтез» к работе в составе АНПА.

4. Необходимы дополнительные исследования по вводу компенсационных поправок в эхосигналы на базе предварительно обработанных данных от навигационных датчиков.

5. С целью снижения межканального акустического влияния требуется доработка многоканальной приемной антенны.

### **Литература**

1. Bonifant W.W.Jr. Interferometric Synthetic Aperture Sonar Processing: A Thesis Presented to The Academic Faculty In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science in Electrical Engineering. Georgia Inst. of Tech. 1999.
2. Агеев А.Л., Костоусов В.Б., Агафонов И.Б., Золотарев В.В. Моделирование и обработка траекторного сигнала гидролокатора с синтезированной апертурой. В материалах III Всероссийской науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения Мирового океана» Владивосток, 2009. С. 351-355.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ  
ТОМОГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
АДАПТИВНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ  
В УСЛОВИЯХ МЕЛКОЙ ВОДЫ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ИНФОРМАЦИОННОГО  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С АВТОНОМНЫМИ ПОДВОДНЫМИ АППАРАТАМИ**

**В.Н. Кравченко<sup>1</sup>, А.И. Хилько<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ОАО «НИИ «Атолл», г. Дубна,

<sup>2</sup> ИПФ РАН, г. Н.Новгород

В докладе обсуждаются результаты экспериментальных исследований согласованного со средой возбуждения и приема высококогерентных ВЧ гидроакустических полей в мелком гидроакустическом волноводе с глубинами  $5 \div 20$  метров в условиях летней гидрологии с прогретой на глубину порядка 0,5 м поверхностью и с неровным дном для решения задач контроля действий и управления маломерными подводными объектами, в том числе автономными подводными роботами. Измерения осуществлялись с использованием моностатической томографической схемы наблюдения в диапазоне частот 4-10 кГц. Зондирующие ВЧ гидроакустические (ГА) импульсы возбуждались направленными излучающими фазированными антенными решетками (ФАР), прием акустических сигналов осуществлялся вертикальной и горизонтальной приемными ФАР.

Как показали натурные измерения, излучаемые решеткой зондирующие ГА сигналы в условиях рассматриваемого эксперимента обладают достаточно высокой пространственной и временной когерентностью. Для обеспечения эффективного ГА наблюдения необходимо таким образом настроить излучающие и приемные элементы системы наблюдения, что бы возбуждать и принимать преимущественно высоко когерентные компоненты ГА поля, что можно обеспечить лишь согласованной с волноводом и условиями наблюдения фильтрацией, например, в рассматриваемых экспериментальных условиях, выделением водных компонент и ослаблением реверберации, уровень которой в условиях измерений превышал уровень полезных сигналов на  $30 \div 40$  дБ. Поскольку когерентность сигналов внутри пачки зондирующих сигналов в целом оказалась высокой, был использован адаптивный алгоритм эффективного подавления стационарных реверберационных помех на одном интервале зондирования. Алгоритм подавления стационарной реверберационной компоненты заключался в вычитании из каждого парциального импульса пачки зондирующих сигналов среднего значения, полученного по 6-ти парциальным импульсам на каждом интервале временной выборки, и согласованной фильтрации. Когерентность наблюдаемых сигналов позволила подавить реверберацию на 30-40 дБ.

После адаптивной пространственно-временной фильтрации сигналов, стационаризации поля помех и обнаружения отметок от движущихся целей осуществлялось траекторное накопление и трассовая обработка поля обнаруженных отметок, позволившие сопровождать маломерные движущиеся объекты на дальностях не менее 30-50 глубин гидроакустического волновода.

Показано, что задача информационного взаимодействия с подводными роботами автоматами может быть решена в выбранном диапазоне частот с использованием томографических гидроакустических принципов наблюдения на дальностях не менее 50-80 глубин гидроакустического волновода.

## ВОЗМОЖНОСТЬ ОЦЕНКИ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МОРСКОГО ДНА С ПОМОЩЬЮ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРОФИЛОГРАФА

**Г.В. Солдатов, С.П. Тарасов**

Технологический институт Южного федерального университета в г. Таганроге (ТТИ ЮФУ)  
347928, Таганрог, Ростовская обл., Некрасовский пер., 44, тел./факс: (8634) 310-635  
e-mail: tarasov@fep.tsure.ru

В работе рассмотрены методы, позволяющие определять структуру и характеристики морских донных осадков дистанционным способом. Для реализации предложенных методов необходима гидроакустическая система с высокой направленностью низкочастотного луча, обеспечивающая высокую разрешающую способность. Применение параметрической излучающей антенны позволяет с достаточной точностью определить основные характеристики придонных осадочных структур предложенными методами. Небольшие массогабаритные характеристики антенны накачки параметрического излучателя дают возможность установить гидроакустическую систему на автономном подводном аппарате.

Перспективным направлением в изучении структуры морского дна, особенно глубоководных районов, является использование подводных аппаратов и роботов, оснащенных гидроакустической техникой. Это позволяет приблизиться к объекту изучения и, тем самым, провести более детальные исследования свойств морского донного грунта и структуры придонных слоев. В соответствии с возрастающими требованиями гидроакустическая аппаратура, предназначенная для исследования морского дна, должна не только фиксировать с высоким разрешением структуру и рельеф дна, но и обеспечивать получение сведений о свойствах, физических характеристиках и составе донных осадков.

В сейсморазведочных работах для определения типов донных осадков применяют ряд стандартных методов, таких как методы преломленных и отраженных волн. В качестве источников акустических колебаний в морской среде используют мощные всенаправленные источники ударных волн, такие как бумер, спаркер. Перспективным направлением для решения задач исследования донных осадочных структур является использование методов нелинейной гидроакустики, реализуемых с помощью так называемых параметрических систем [1].

Высокая направленность параметрических антенн при излучении низких, хорошо проникающих в морской донный грунт частот, позволяет добиться хорошего разрешения и за счет этого получить детальную информацию об изучаемом участке. Благодаря широкополосности параметрического профилографа имеется возможность получить данные о рассеянии сигналов от придонных слоев на нескольких рабочих частотах. При этом «озвученный» объем на разных частотах одинаков благодаря свойству постоянства характеристики направленности в широком частотном диапазоне [1, 2].

Методы распознавания донных осадков и оценки их свойств или характеристик могут быть основаны как на физической модели отражения, преломления, рефракции волн в слоистой среде, так и на выделении статистических параметров из акустических сигналов.

Для определения типа донных осадков необходимо знать их физические характеристики, такие как плотность, скорость звука и др. Акустический импеданс приповерхностного слоя донных осадков можно определить по амплитудным коэффициентам отражения. Методика основана на эмпирически установленной зависимости импеданса от коэффициента отражения и литологии морских осадков. По коэффициенту отражения

$$R = (\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1) / (\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1)$$

от границы вода-дно и импедансу морской воды  $z_1 = \rho_1 c_1$  можно вычислить импеданс в поверхностном слое морских осадков:

$$z_2 = \rho_2 c_2 = \rho_1 c_1 (I+R)/(I-R).$$

Поскольку по коэффициенту отражения акустических волн можно фактически определить лишь произведение плотности на скорость звука, то задача сводится к измерению скорости звука в донных осадках дистанционным методом.

В данной работе, по существу, рассматриваются методы определения скорости звука в морских донных осадках с помощью параметрического профилографа.

Рассмотрим два плоских слоя, лежащих на полубесконечной среде (рис. 1). Толщины слоев обозначим  $H_1$  и  $H_2$ , скорости волн в них:  $C_1$  и  $C_2$ , а скорость в нижележащем пространстве  $C_3$ . В точке 1 устанавливается излучатель, приемники располагаются в точках 1 и 2.

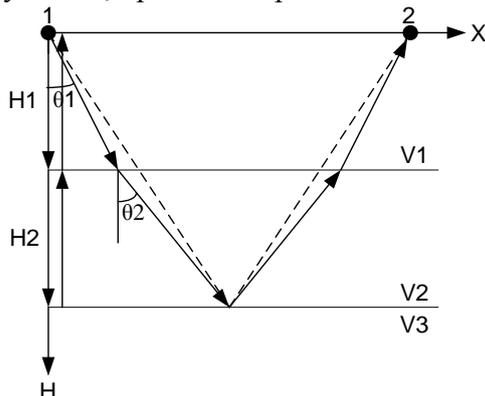


Рис. 1. Геометрическая иллюстрация метода

Если бы луч сквозь слои распространялся по кратчайшей траектории (пунктирные линии на рис. 1), годограф  $T(x)$  соответствующей волны представлял бы собой гиперболу, как и в случае одного слоя. На самом деле траектория луча не прямолинейна, а согласно принципу Ферма, удовлетворяет требованию минимальности времени (стрелки на рис. 1). Поэтому истинная зависимость  $T$  от  $X$  совпадает только в начале координат, расхождение увеличивается с расстоянием. Данная методика имеет ограничения применимости. Во-первых, горизонтальное расстояние  $X$  должно быть много меньше толщины слоев, тогда углы  $\theta_1$  и  $\theta_2$  будут примерно равны, следовательно, теоретическая и истинная траектории будут различаться незначительно. Во-вторых, толщина слоя  $H_2$  не должна быть много меньше  $H_1$ . Если  $H_1 \gg H_2$ , то на траекторию луча сильное влияние оказывает вертикальное распределение скорости звука в первом слое. Если отношение мощностей слоев превышает 15, точность данного метода становится недостаточной для определения физических характеристик донных осадков [3].

Уравнение годографа для волны, траектория которой показана пунктирной линией на рис. 1, имеет вид [4]:

$$T^2(x) = T^2(0) + \frac{1}{c_{\text{эф}}^2} \cdot X^2, \quad (1)$$

где  $H_{\text{эф}}$  – эффективная мощность слоя от поверхности до полупространства,  $C_{\text{эф}}$  – эффективная скорость звука.

Величина  $C_{\text{эф}}$  связана с мощностями и пластовыми скоростями исследуемой слоистой среды соотношением [4]:

$$c_{\text{эф}} = \sqrt{c_1^2 \cdot \frac{T_1(x)}{T(x)} + c_2^2 \cdot \frac{T_2(x)}{T(x)}}, \quad (2)$$

где  $T_1(X)$  – время, за которое сигнал пройдет сквозь первый слой;  $T_2(X)$  – время, за которое сигнал пройдет сквозь второй слой;  $T(X) = T_1(X) + T_2(X)$  – время пробега волны от поверхности до нижней границы раздела и обратно к приемнику в точке 2.

Соотношения между  $T_1(X)$ ,  $T_2(X)$  и  $T(X)$  легко найти из подобных треугольников:

$$\frac{T_1(x)}{T(x)} = \frac{T_1(0)}{T(0)} = K; \quad (3)$$

$$T_1(X) = \frac{T(X)}{K}; \quad (4)$$

$$T_2(X) = T(X) - T_1(X). \quad (5)$$

Измерив с помощью луча параметрической антенны, направленного вертикально вниз, мощность слоя  $H_2$ , можно определить скорость звука во втором слое из уравнения:

$$c_2 = \frac{2H_2}{T_2(0)}. \quad (6)$$

Методика определения мощности слоя морских донных осадков и скорости звука в нем на практике заключается в следующем. Для того, чтобы определить  $T_1(0)$  и  $T(0)$  ось излучателя необходимо установить перпендикулярно поверхности дна и зафиксировать время прихода отраженных от границ раздела сигналов. Далее, ось излучателя поворачивается в направлении приемника 2 до тех пор, пока не будет получен сигнал от нижней границы раздела на приемнике 2. Теперь можно определить время  $T(X)$  и измерить расстояние от излучателя до приемника ( $X$ ). Полученные данные подставляются в выражение (1) для определения  $C_{эф}$ . Времена пробега волны  $T_1(X)$  и  $T_2(X)$  определяются из выражений (3-5). Для определения скорости звука в донном грунте ( $C_2$ ) подставим полученные значения в выражение (2). Скорость звука через мощность слоя осадков может быть определена по формуле (6).

Предлагаемая методика позволяет сравнительно простым способом определить мощность и скорость звука в слое морских донных осадков. Однако исследование тонких слоев невозможно данным методом из-за ограничений, описанных выше.

В этом случае можно использовать другой метод определения скорости в однородном слое, залегающем в разрезе произвольного строения, а также толщины этого слоя. Этот метод не требует предварительных знаний о среде, находящейся над исследуемым слоем [1].

Траектория луча характеризуется фиксированным лучевым параметром  $p$ , получаемым из закона Снеллиуса:

$$p = \frac{\sin\theta(z, p)}{c(z)}, \quad (7)$$

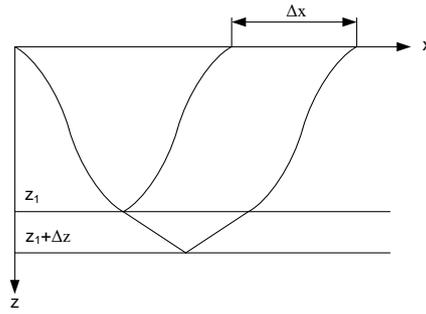
где  $z$  – глубина;  $c(z)$  – профиль скорости звука;  $\theta(z, p)$  – угол между лучом, характеризуемым параметром  $p$ , и вертикалью на глубине  $z$ .

Время распространения  $t$  и горизонтальное расстояние  $x$ , соответствующие траектории луча с параметром  $p$ , можно определить через интегралы по траектории луча. На практике величины  $t$  и  $x$  известны для некоторой области значений  $p$ , поэтому полученные уравнения должны быть решены относительно профиля скорости  $c(z)$ .

Рассмотрим однородный слой, ограниченный горизонтальными отражающими границами на глубинах  $z_1$  и  $z_1 + \Delta z$  (рис. 2); скорость звука внутри слоя обозначим  $c_1$ .

Скорость звука над исследуемым слоем зависит только от глубины. Задание лучевого параметра  $p$  полностью определяет ход лучей, отраженных от каждой из границ. В данном случае пара отраженных лучей связана с одним и тем же значением  $p$ .

Действительно, над границей слоя с координатой  $z_1$  оба луча всюду параллельны друг другу.



**Рис. 2.** Геометрическая иллюстрация метода

Разности времен пробега  $\Delta t$  и горизонтальных расстояний  $\Delta x$ , пройденных этими двумя лучами, определяются из уравнений:

$$\Delta t(p) = 2 \int_{z_1}^{z_1+\Delta z} c^{-1} (1 - p^2 c^2)^{-1/2} dz, \quad (8)$$

$$\Delta x(p) = 2 \int_{z_1}^{z_1+\Delta z} p c (1 - p^2 c^2)^{1/2} dz, \quad (9)$$

в которых множитель 2 введен для учета полного пути отраженного луча. Если внутри слоя скорость  $c_1$  постоянна, интегралы берутся непосредственно.

Тогда толщина слоя  $\Delta z$  и скорость звука в слое  $c_1$  определяются по формулам:

$$c_1 = \sqrt{\frac{1}{p} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t}}, \quad (10)$$

$$\Delta z = \frac{1}{2} \cdot c_1 \cdot \Delta t \cdot \sqrt{1 - p^2 c^2} \quad (11)$$

где  $\Delta x$  – расстояние между приходом отраженных лучей от верхней и от нижней границы слоя,  $\Delta t$  – время между приходом отраженных лучей от верхней границы слоя.

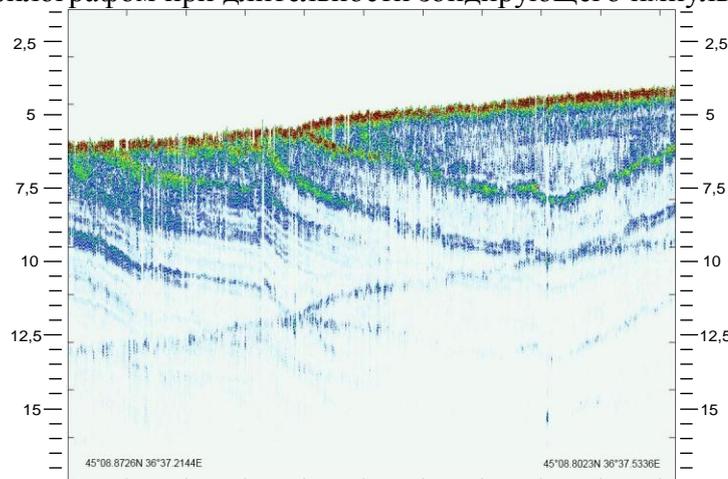
Из выражения видно, что благодаря выбору определенных лучей, структура среды, находящейся над рассматриваемым слоем, из рассмотрения исключается.

Для реализации данных рассмотренных методов, как видим, необходима антенна с высокой направленностью низкочастотного луча, отсутствием бокового поля, и возможностью электронного или механического сканирования характеристики направленности. Для точного определения времен пробега нужно обеспечить высокую разрешающую способность по дальности. Такие возможности предоставляются при использовании параметрической антенны за счет излучения линейно-частотно-модулированных (ЛЧМ) сигналов, либо за счет излучения сверхкоротких импульсов. Такая, достаточно малогабаритная антенна, может быть размещена на борту подводного аппарата или робота.

Точность определения скорости звука в донных осадках данным методом зависит от угла наклона антенны, от ширины характеристики направленности, от соотношения скорости звука в осадках и в водном слое. На относительную погрешность определения разности времен прихода лучей  $\Delta t$  оказывает влияние зондирующий сигнал и расстояние, которое сигнал проходит в исследуемой среде. Чем больше это расстояние, тем, соответственно, меньше относительная погрешность. Относительная погрешность определения расстояния прихода лучей от границ слоя растет с уменьшением расстояния между отраженными от границ раздела лучами, а также – с увеличением ширины характеристики направленности антенны. Таким образом, на точность определения скорости звука в морских осадках будет влиять как структура и характеристики морского дна, так и

параметры гидроакустической системы и ориентация характеристик направленности антенны в пространстве.

На рис. 3 представлена профилограмма участка дна и придонных осадков Черного моря, полученная профилографом при длительности зондирующего импульса 2 мс.



**Рис. 3.** Профилограмма структуры верхнего слоя донных осадков

Начальная частота рабочего линейно-частотно-модулированного сигнала (разностного сигнала параметрической антенны) равнялась 7 кГц. Девиация частоты составляла 8 кГц. Параметрическая антенна излучала сигналы накачки в диапазоне частот 130-150 кГц. Диапазон разностных частот составлял 7-20 кГц, ширина характеристики направленности по давлению на уровне минус 3 дБ составляла 3° и была практически постоянна на всех разностных частотах. Уровень бокового поля не превышал -40 дБ. Анализ профилограммы показывает, что использованные параметры обеспечили разрешающую способность по дальности не хуже 10-15 см, что существенно для разрешения тонкой структуры верхнего слоя донных осадков, определения их физических характеристик, поиска объектов, находящихся в верхнем слое осадков. Увеличение длительности импульса без изменения мощности приведет к увеличению дистанции зондирования слоев, а увеличение девиации частоты – к увеличению разрешающей способности профилографа по дальности.

Таким образом, применение параметрического профилографа позволяет осуществить приведенные выше методы оценки физических свойств донных осадков благодаря достоинствам параметрической антенны в широкополосности, высокой направленности и свойству постоянства характеристики направленности в широком частотном диапазоне.

Использование технологий гидроакустических исследований с помощью параметрического профилографа позволяет получить сведения о состоянии морского дна на достаточно больших площадях и значительно сократить время проведения мониторинга.

## Литература

1. Воронин В.А., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Гидроакустические параметрические системы. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004. – 400 с.
2. Воронин В.А., Кузнецов В.П., Мордвинов Б.Г., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Нелинейные и параметрические процессы в акустике океана. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2007. – 448 с.
3. Акустика морских осадков / Под ред. Л. Хэмптона. – М.: Мир, 1977. – 533 с.
4. Хмелевской В.К., Горбачев Ю.И., Калинин А.В., Попов М.Г., Селиверстов Н.И., Шевнин В.А. Геофизические методы исследований. Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004. – 232 с.

# ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ НА ПОДВОДНЫХ ФОТОИЗОБРАЖЕНИЯХ

**А.М. Павин**

Институт проблем морских технологий ДВО РАН  
690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел./факс: (4232) 432416,  
e-mail: pavin@bk.ru

В работе рассматривается задача распознавания объектов на фотоснимках морского дна, полученных автономным или телеуправляемым необитаемым подводным аппаратом. В качестве шаблона распознавания может выступать любой объект искусственного или естественного происхождения (в том числе – фрагмент ранее полученного изображения) однозначно определяемый контурами своих границ. Для обнаружения искомого объекта предложено использовать перебор небольших отрезков границ предметов на изображении с последующим увеличением значений ячеек в накопителе (аналогичном накопителю Хафа). Эксперименты по обработке реальных снимков морского дна подтвердили эффективность представленного алгоритма при решении задачи распознавания подводного маркера прямоугольной формы, белого фала и определения смещения аппарата по последовательности кадров.

## **Введение**

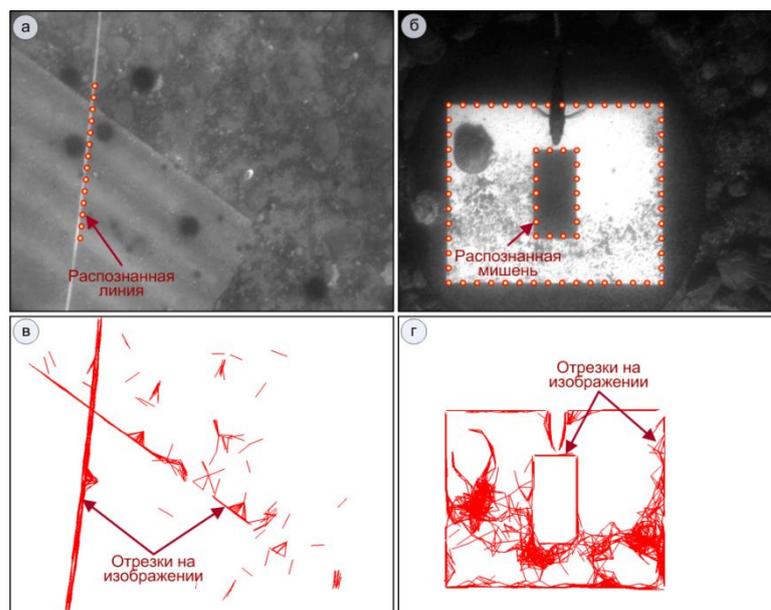
Распознавание фотоизображений морского дна находит применение во многих прикладных задачах связанных с управлением и навигацией телеуправляемых или автономных необитаемых подводных аппаратов (ТНПА, АНПА). К таким задачам можно отнести: маневрирование вблизи подводных сооружений, обследования подводных коммуникаций [1], подводная стыковка с использованием визуальных ориентиров [2], счисление траектории по фотоснимкам [3], позиционирование над заданным фрагментом дна, сшивка изображений, подсчет морских гидробионтов и другие. Для всех перечисленных задач объект распознавания может иметь произвольную геометрическую форму (например, различные ориентиры-маркеры для проведения стыковки) или вообще оставаться неизвестным до выполнения миссии (как в случае с определением смещения относительно грунта, где объектом распознавания является ранее сделанный фотоснимок).

В рассматриваемом алгоритме предполагается, что искомый объект однозначно определяется формой своих границ. При этом на распознаваемом снимке контуры предметов могут быть зашумлены, с прерывистыми или нечеткими границами, что является следствием съемки в условиях мутной воды, заиленности, а также при наличии посторонних предметов, водорослей и морских организмов. Кроме того, необходимым требованием к алгоритму распознавания является возможность его функционирования на борту подводного аппарата в условиях реального времени при обеспечении непрерывной обработки снимков с периодом 1~2 секунды/кадр (период съемки телевизионной системы с применением фотовспышки).

## **Предварительная обработка изображения**

Для уменьшения переборных операций алгоритма распознавания и сглаживания шумов на исходном изображении производится предварительная обработка фотоснимка. Данная процедура состоит из трех шагов: 1) масштабирование исходного кадра телевизионной системы; 2) выделение границ объектов с применением карты градиентов; 3) поиск на карте градиентов наиболее контрастных отрезков принадлежащих границам объектов (отрезки интереса). Суть первого этапа заключается в объединении соседних пикселей путем смешивания их яркостей. В результате, из исходного снимка размером порядка 1000

пикселей по ширине формируется изображение около 300 пикселей с плавными переходами яркостей от точки к точке.



**Рис. 1.** Подводные фотоснимки, полученные подводным аппаратом *TSL*: а) с белым фалом; б) с прямоугольным маркером; в) найденные границы объектов на изображении с фалом; г) найденные границы объектов на изображении с маркером

Обнаружить точки, принадлежащие границам объектов на фотоснимке (рис. 1, а, 1, б) можно с помощью операторов Собела, Превита или Щарра [4]. Каждый из этих операторов определяет градиент яркости в каждой точке изображения и позволяет грубо оценить направление границ (перпендикуляр к градиенту). Среди множества точек принадлежащих границам объектов выбирается порядка тысячи наиболее контрастных для последующего использования. Чтобы выбрать минимальный порог применения точки, достаточно построить гистограмму распределения модулей градиентов (количество точек обладающих соответствующей контрастностью). После того как выбрано необходимое количество точек-претендентов, исследуется окрестность в направлении перпендикуляра градиента для обнаружения второй точки, принадлежащей границе объекта. Среди множества полученных отрезков выбираются те, у которых величины градиентов максимальны и направления примерно совпадают (рис. 1, в, 1, г). Эти отрезки считаются принадлежащими контурам предметов и используются в дальнейшем для распознавания шаблонного объекта. Как показали эксперименты в большинстве случаев достаточно менее десяти тысяч отрезков выделенных на границах объектов для надежной идентификации фигур типа «линия» или «прямоугольник».

### Определение параметров распознаваемого объекта

Распознать некоторый объект на изображении – это значит установить факт его наличия и некоторый набор параметров, таких как местоположение на фотокадре, поворот и масштаб относительно шаблона. Обозначим за  $dx$ ;  $dy$  – искомые координаты (смещение) распознаваемого объекта,  $\rho$  и  $\varphi$  – его масштаб и поворот. Тогда координаты любых точек на шаблоне  $[x'; y']$  связаны с координатами тех же точек на изображении  $[x''; y'']$  следующей зависимостью:

$$\begin{cases} x'' = dx + x' \rho \cos \varphi + y' \rho \sin \varphi \\ y'' = dy - x' \rho \sin \varphi + y' \rho \cos \varphi \end{cases} \quad (1)$$

Значения смещений  $dx$  и  $dy$  в уравнении (1) однозначно определяются, если известен масштаб  $\rho$  и поворот  $\varphi$  распознаваемого снимка относительно шаблона, а также определены координаты одной и той же точки в обеих системах координат. В некоторых случаях параметры  $\rho$  и  $\varphi$  могут быть известны или вычислены по данным других сенсорных устройств, (например, если объект расположен вертикально и известно расстояние до него по акустическим эхолотам). Также, при определении смещения аппарата по последовательности фотокадров,  $\varphi$  равно изменению курса между двумя съемками, а  $\rho$  – пропорционально изменению высоты над грунтом. А в случае последовательной съемки с небольшой временной задержкой (1~2 сек) при прямолинейном движении аппарата данные величины можно принять за константы ( $\varphi=0^0$ ,  $\rho=1$ ). Если ориентация снимка неизвестна, то для определения всех его параметров ( $dx$ ,  $dy$ ,  $\rho$  и  $\varphi$ ) необходима система из четырех уравнений. Данную систему можно получить из системы (1), зная координаты отрезков принадлежащих контурам объектов на шаблоне  $[x'_1; y'_1]$ ,  $[x'_2; y'_2]$  и изображении  $[x''_1; y''_1]$ ,  $[x''_2; y''_2]$ :

$$\begin{cases} x''_1 = dx + x'_1 \rho \cos \varphi + y'_1 \rho \sin \varphi \\ x''_2 = dx + x'_2 \rho \cos \varphi + y'_2 \rho \sin \varphi \\ y''_1 = dy - x'_1 \rho \sin \varphi + y'_1 \rho \cos \varphi \\ y''_2 = dy - x'_2 \rho \sin \varphi + y'_2 \rho \cos \varphi \end{cases} \quad (2)$$

Система (2) несложно решается относительно  $\rho^* \cos(\varphi)$  и  $\rho^* \sin(\varphi)$  если в левую часть вынести  $dx$ ,  $dy$  и попарно приравнять первое уравнение со вторым и третье с четвертым. Таким образом, приходим к следующей системе из двух уравнений с двумя неизвестными:

$$\begin{cases} (x'_1 - x'_2) \rho \cos \varphi + (y'_1 - y'_2) \rho \sin \varphi = (x''_1 - x''_2) \\ (y'_1 - y'_2) \rho \cos \varphi - (x'_1 - x'_2) \rho \sin \varphi = (y''_1 - y''_2) \end{cases} \quad (3)$$

Обозначив разности координат отрезков  $(x'_1 - x'_2) = A$ ,  $(y'_1 - y'_2) = B$ ,  $(x''_1 - x''_2) = C$ ,  $(y''_1 - y''_2) = D$  получим следующее решение относительно  $\rho^* \cos(\varphi)$  и  $\rho^* \sin(\varphi)$ :

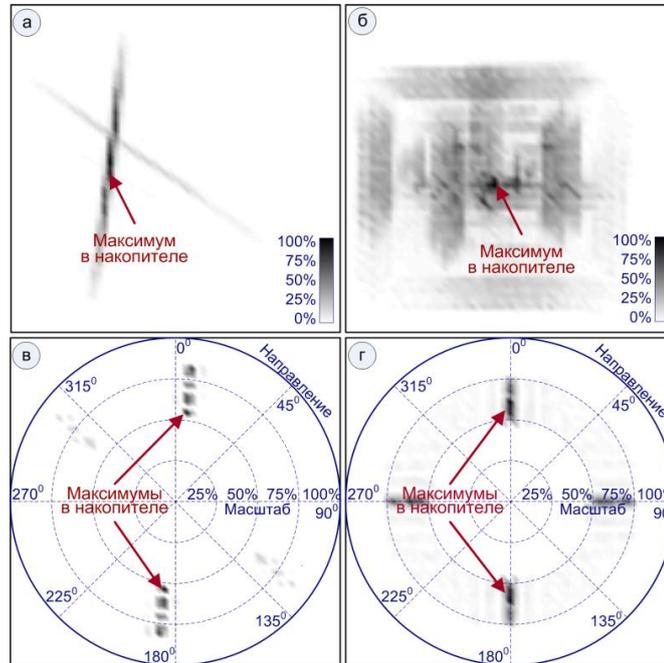
$$\begin{cases} \rho \cos \varphi = -(AC + BD) / (A^2 + B^2) \\ \rho \sin \varphi = -(BC - AD) / (A^2 + B^2) \end{cases} \quad (4)$$

Таким образом, для решения задачи распознавания достаточно знать координаты любой точки шаблона на изображении, если масштаб и поворот снимка известны; или координаты любого отрезка, если масштаб и поворот не определены. Поскольку заранее нет соответствия ключевых точек/отрезков на шаблоне и распознаваемом кадре, то можно перебрать все возможные соответствия, определяя по формулам (1) и (4) необходимые параметры. Очевидно, что если искомый объект действительно присутствует на фотографии, то для разных участков его границ параметры  $dx$ ,  $dy$ ,  $\rho$  и  $\varphi$  должны быть одинаковы. Поэтому для распознавания достаточно создать накопитель аналогичный накопителю Хафа [4] и во время перебора «отрезков интереса» увеличивать ячейку с координатами  $[dx, dy, \rho, \varphi]$ . Ячейка в которой после перебора будет максимальное значение, соответствует координатам распознанного объекта, и чем больше значение в данной ячейке, тем выше вероятность, что искомая фигура присутствует на изображении.

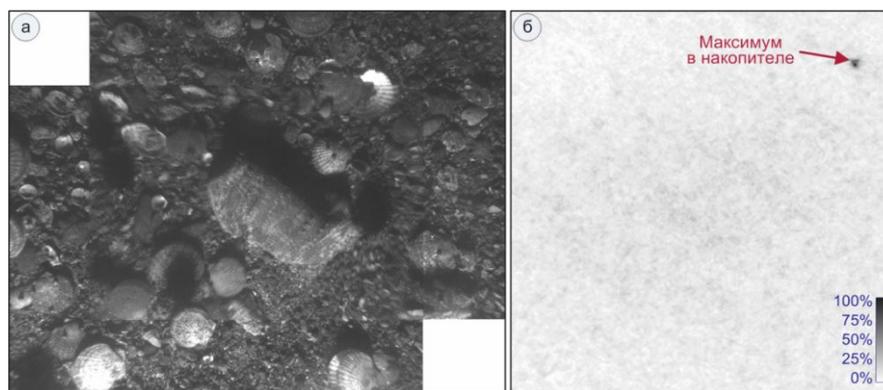
### Результаты обработки снимков морского дна

Проверка работоспособности алгоритма производилась на реальных фотоснимках полученных подводными аппаратами ИПМТ ДВО РАН. Примеры исходных изображений с распознанным белым фалом и прямоугольным маркером приведены на рис. 1, а и 1, б

соответственно. При проведении экспериментов предполагалось, что местоположение, направление и масштаб объектов не известен, т.е. вычисляется алгоритмом распознавания. Можно видеть, что в обоих случаях успешно выделяется как белый фал, так и контрастный маркер. Причем во втором случае маркер распознается, даже не смотря на явное прерывание контура из-за попавшей в кадр рыбы.



**Рис. 2.** Состояние накопителей в плоскости смещения (а, б) и масштаба-поворота (в, г) во время обнаружения белого фала (а, в) и прямоугольного маркера (б, г)



**Рис. 3.** Результаты определения смещения АНПА по фотоснимкам: а) совмещенная последовательность двух кадров; б) состояние накопителя

Для оценки надежности алгоритма можно проанализировать состояние накопителя во время распознавания объекта. Если в накопителе имеется явно выраженный максимум, соответствующий параметрам искомой фигуры и его значение в разы превышает величины в других ячейках, то можно говорить о надежной идентификации искомого объекта. К сожалению, отобразить на плоскости все значения накопителя с четырьмя степенями свободы проблематично. Однако можно выбрать максимальные значения, соответствующие плоскости смещения  $dx-dy$  (рис. 2, а, б) и плоскости масштаба-поворота  $\rho-\varphi$  (рис. 2, в, г).

Рассмотрим подробно состояние накопителей во время распознавания белого фала (рис. 2, а и 2, в). Можно видеть, что местоположению фала соответствует темная полоса

(максимальные значения) в пространстве смещения (рис. 2, *а*) и такие же области в пространстве масштаба-поворота определяющие направление (рис. 2, *б*). Также можно наблюдать небольшие локальные максимумы, выделяющие посторонний объект – кромку шифера похожую на прямую линию (рис. 1, *а*). Следует отметить одно преимущество алгоритма – во время его работы образуется относительно мало белого шума в других ячейках накопителя, например, в сравнении с преобразованием Хафа. Данный факт объясняется использованием не всех контрастных точек изображения (и перебором для них всех возможных направлений объекта), а только отрезков соответствующих границам предметов. На рис. 3 представлены результаты расчета смещения АНПА по фотоизображениям. Можно видеть, что в накопителе (рис. 3, *б*) имеется явно выраженный максимум, соответствующий перемещению аппарата за период съемки.

### **Заключение**

Разработан алгоритм, позволяющий определить факт наличия и координаты эталонного объекта (заданного своими границами) на фотоизображении морского дна. К достоинствам алгоритма следует отнести низкую ресурсоемкость, т.к. производится всего два цикла перебора по ключевым точкам (или отрезкам) шаблона и распознаваемого снимка. Данная особенность позволяет использовать алгоритм на борту АНПА в режиме реального времени и обрабатывать не менее одного кадра в секунду для распознавания объектов и/или определения траектории аппарата. Результаты постобработки реальных изображений морского дна позволяют с уверенностью говорить о возможности применения алгоритма для решения задач навигации и управления АНПА. Дальнейшее направление работ видится в интеграции алгоритма в систему технического зрения подводных роботов и проведении морских испытаний. К перспективам развития можно отнести использование цветовой составляющей фотоизображений и применение данного алгоритма для обнаружения объектов на гидроакустических снимках.

В заключении автор выражает признательность коллегам из ИПМТ ДВО РАН: Воронцову А.В. – за многочисленные обсуждения, исходные данные и изготовление макета подводного маркера; Инзарцеву А.В. и Киселеву Л.В. – за ценные замечания, дополнения и помощь при подготовке работы к печати. А также другим, сотрудникам ИПМТ ДВО РАН причастным к разработке аппаратов и морским испытаниям, чей вклад, так или иначе, был использован в данной работе.

### **Литература**

1. Инзарцев А.В., Павин А.М. Интегрированная система технического зрения и управления АНПА для поиска и обследования протяженных кабельных линий // Подводные исследования и робототехника. 2007. №2(4). С. 15-20.
2. Воронцов А.В., Кушнерик А.А., Щербатюк А.Ф. Некоторые алгоритмы приведения малого АНПА к донной станции в ближней зоне на основе обработки визуальной информации // Материалы третьей всероссийской научно-технической конференции «Технические проблемы освоения мирового океана». Владивосток, 22-25 сентября, 2009. С. 399–404.
3. Борейко А.А., Воронцов А.В., Кушнерик А.А., Щербатюк А.Ф. Алгоритм обработки видеоизображений для решения некоторых задач управления и навигации автономных необитаемых подводных аппаратов // Подводные исследования и робототехника. 2010. №1(9). С. 29–39.
4. Павин А.М. Идентификация подводных протяженных объектов на акустических снимках гидролокатора бокового обзора // Приборы. 2009. №12. С. 43-50.

БАЗА ДАННЫХ ПУБЛИКАЦИЙ, СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТОК  
В ОБЛАСТИ МОБИЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ «СТАЙНОГО» ПРИМЕНЕНИЯ  
(АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР)

**И.Е. Бурдун, А.Р. Бубин**

ООО «ИНТЕЛОНИКА»

630009, Новосибирск, ул. Никитина, 15-76, тел./факс: (383) 2662092,

e-mail: info@intelonics.com

Поведение мобильных роботов «стайного» применения строится на основе принципов этологии и самоорганизации, заимствованных из живой природы (модель К. Рейнольдса). Сформирована база данных электронных публикаций, насчитывающая более 3000 документов, в области разработок и приложений мобильной робототехники «стайного» применения подводного, воздушного, надводного и поверхностного классов. Представлена краткая характеристика современного состояния разработок, научно-технологических достижений и проблем в указанной области. Дана оценка направлений и пределов применения мобильных роботов, проектируемых для использования в форме «стай» в гражданской, специальной и военной сферах.

Постановка задачи. Мобильные роботы группового применения призваны заменить человеко-машинные системы и одиночных роботов при выполнении трудоемких, масштабных, однообразных или утомительных работ<sup>1</sup>, а также работ, которые опасны для здоровья или жизни человека-оператора. Роботы «стайного» поведения образуют подмножество мобильной робототехники группового применения и отличаются способностью самостоятельно организовывать движение в локальном пространстве и, как следствие, более надежно решать поставленные задачи в сложных и непредвиденных условиях.

Предмет настоящего исследования включает вопросы создания и анализа базы данных открытых электронных публикаций в области разработок и приложений систем малой мобильной робототехники «стайного» применения основных классов. Цели исследования: формирование базы данных первоисточников информации по предмету; оценка современного состояния дел, научно-технологических достижений и проблем, существующих в данной области; прогнозирование тенденций развития, перспективных приложений и пределов применения систем малой мобильной робототехники, проектируемых для использования в форме «стай» в трех основных сферах деятельности. Ниже следует краткий обзор некоторых основных результатов данного исследования.

Рабочие определения. В современной научно-технической литературе используются следующие аббревиатуры названий основных классов мобильной робототехники на русском и английском языках: НПА – UUV (необитаемый подводный аппарат – Unmanned Underwater Vehicle); БНА – USV (безоператорный надводный аппарат – Unmanned Surface Vehicle); БЛА – UAV (беспилотный летательный аппарат – Unmanned Aerial Vehicle); БСА – UGV (безоператорный сухопутный аппарат – Unmanned Ground Vehicle); UXV – БХА (безоператорный аппарат любого класса – Unmanned Generic Vehicle). Известны и другие, близкие по семантике сокращения, например: АНПА, БПЛА, ДПЛА, ДУЛА, ROV, UCASV, AUV, ASV. Стая роботов класса UXV – это группа высокоавтономных мобильных роботов, которые действуют сообща для выполнения некоторой работы и поведение которых адаптируется к текущей ситуации (самоорганизуется) на основе принципов этологии, заимствованных из живой природы, – с учетом специфики задания, команд внешнего

---

<sup>1</sup> Заданий, задач, операций, «миссий».

оператора, тактических целей, ограничений, наблюдаемого состояния (роботов, группы, внешней среды), запаса ресурсов, императивов поведения – с минимумом вмешательства оператора в процесс управления, для повышения эффективности, устойчивости («робастности») и безопасности применения в сложных или заранее неизвестных условиях эксплуатации. Стайные роботы должны иметь небольшие размеры, унифицированную модульную конструкцию, надежную силовую установку и оснащаться специальным комплектом бортовых систем – для мультиспектрального наблюдения локального пространства, обмена информацией (между членами стаи и с внешним оператором), настройки на выполнение заданных функций в стае (посредством полезной нагрузки и др.), управления движением и оборудованием полезной нагрузки, обеспечения безопасности и др. Гетерогенная стая состоит из роботов разных классов, например: UUV и USV; UAV и UGV; UUV, USV и UAV.

О работе по созданию баз данных. В компании «ИНТЕЛЮНИКА» ведется систематическая работа по формированию, поддержке и анализу баз данных открытых электронных публикаций в области мобильной робототехники. По состоянию на 1.08.2011 г., общее количество публикаций в указанной области, зарегистрированных в базах данных компании, превышает 12 000. Цель работы – создание информационно-аналитической основы для научного сопровождения процессов жизненного цикла мобильных робототехнических систем. Это процессы исследования, анализа, формирования и прогнозирования рынка, создания инновационного бизнеса, разработки концепций и программ развития, поиска, отбора и создания новых технологий, проектирования, постройки, испытаний, оценки и внедрения новых образцов робототехнических и человеко-машинных систем.

Характеристика базы данных. Представляемая база данных содержит сведения об электронных публикациях в области малой мобильной робототехники стайного применения. Имя файла-носителя базы – UXV\_Swarms\_v01.accdb. Версия базы данных и дата последнего обновления – v.1, 1.08.2011. Таблицы базы данных сформированы в системе MS Access 2007 и имеют типовую структуру, которая аналогична структуре других баз, созданных в компании [1]. Тематика публикаций, занесенных в базу данных, включает, в том числе: концепции, программы, методы, технологии, образцы, нерешенные проблемы, риски, ограничения, новые возможности, процессы применения и рынки приложений мобильных роботов стайного поведения. Основные виды электронных публикаций (единиц информации), представленные в базе данных: статья, презентация, лекция, отчет о НИР, диссертация, монография, обзор, библиографический список, брошюра, программа или план работ, видеоролик, программное обеспечение и др. В базе представлены все классы мобильных роботов – UUV, USV, UAV, UGV, UXV. Количество электронных публикаций, зарегистрированных в каталоге базы, равно 3006. Общий объем библиотеки электронных публикаций составляет 1,96 Гбайт. Общее количество страниц текстовых документов в собранных публикациях – более 40000. Часть публикаций – это видеоматериалы.

Далее приводится краткий обзор некоторых ключевых тем и результатов анализа материалов базы данных, которые могут представлять интерес для специалистов по мобильной робототехнике группового применения.

Примеры стай. О роли стайного поведения. Ниже следуют примеры, взятые из живой природы и человеческого сообщества, которые объединяет понятие «стая». Примеры природных стай: волчья стая, львиный прайд, стадо антилоп, семейство сурикат, стая акул, косяк сельди, стая чаек, осинный рой, комариная «туча», полчище саранчи, колония муравьев. Примеры искусственных стай: поток автомобилей в час «пик», отряд партизан, конница Чингисхана, поток пассажиров на станции метро, банда хулиганов, современные морские пираты, террористы, армада самолетов-бомбардировщиков или «стая» подводных лодок времен Второй мировой войны, флэшмоб, толпа людей в ситуации паники или ярости. Стаи

отличаются многообразием форм и видов. Стереотипы стайного поведения в живой природе оттачивались тысячелетиями. У стаи каждого вида имеются определенные цели и ограничения существования, среда обитания, класс решаемых задач, численность, этология (зоопсихология), динамика, язык «общения», способы организации взаимодействия. Численность природных стай, как правило, обратно пропорциональна размеру особи и варьируется от нескольких единиц до нескольких миллионов единиц. В форме стай существуют как хищники, так и потенциальные жертвы. У последних особи, которые в силу обстоятельств находятся ближе к хищникам, либо физически оказываются более слабыми, вынужденно становятся жертвами, но тем самым спасают остальных. Благодаря возможности изменения численности и стереотипов поведения стайные системы являются эффективным инструментом борьбы за существование или доминирование, выполнения трудоемких работ, достижения других важных целей в сложных условиях. В частности, известно, что противостоять стайной атаке, особенно – в одиночку или даже подготовленной группе с централизованным управлением, весьма сложно.

Функции внутри стаи четко распределены и автоматически перераспределяются в зависимости от ситуации. Например, в колонии муравьев есть «разведчики», «рабочие», «надсмотрщики», «воины». Для транспортировки тяжелого груза муравьи действуют сообща, а встретив на пути, например, преграду, могут образовывать временный «мост» из сцепленных особей для безопасного прохода основной массы колонистов. Аналогично, динамическая сцепка стаи подводных или сухопутных роботов в виде сети (при помощи тросовых связей) может, например, использоваться для транспортировки тяжелого груза, в качестве ограждения или силовой конструкции другого назначения. Стайное поведение автомашин на многополосном шоссе в городе в «час пик» – не только источник «пробок» на дорогах, но и эффективный способ их устранения. Знание законов и мониторинг «стайного поведения» толпы хулиганов, может помочь силовым структурам более эффективно справляться с массовыми беспорядками. В целом, исследования показывают, что имитация стайных принципов в перспективной робототехнике группового применения позволяет максимально полно использовать закон перехода количества в качество и преимущества адаптивного группового поведения во всех без исключения сферах приложений.

Принципы самоорганизации движения. У природных стай есть несколько важных свойств. Это самоорганизация движения, подчинение интересов одного интересам группы, однородность состава и небольшие размеры участников, развитый информационный обмен, хорошая наблюдаемость локального пространства, непостоянство численности, допустимость утраты и приобретения участников и, как правило, отсутствие вожака или централизованного (внешнего) управления. Стая характеризуется сложным, непредсказуемым поведением, которое подчиняется общей цели и внешне выглядит как интеллектуальное, как бы синхронизированное извне массовое действие. Однако, такое поведение стаи является всего лишь результатом множества локальных взаимодействий ее участников во времени и пространстве на основе трех базовых этологических принципов: (1) «не сталкиваться», (2) «выравнивать скорости» и (3) «держаться вместе». Последовательное применение этих правил в локальном пространстве робота на очередном шаге движения стаи дает, соответственно, три целевых вектора заданной скорости движения и три целевых вектора углового положения робота. Дополнительные целевые векторы скорости и пространственного положения определяются выполняемым заданием (командой внешнего оператора), стереотипами и императивами поведения робота. Результирующие целевые векторы вычисляются как взвешенные суммы вышеперечисленных векторов в зависимости от расстояния между роботами и других характеристик стаи. Эти векторы представляют собой целевое состояние для реализации на очередном шаге при помощи органов управления скоростью движения и пространственным положением мобильного робота.

Модель К. Рейнольдса. Стайное движение и его основные свойства хорошо поддаются моделированию. Наиболее известной и простой является математическая модель самоорганизации движения сообщества виртуальных динамических объектов – «бойдов», разработанная К. Рейнольдсом [2]. Данная модель позволяет реализовать – без централизованного управления и с малыми затратами вычислительных ресурсов – базовые принципы стайного поведения (1) – (3) в искусственных сообществах. Каждый шаг стайного поведения состоит из следующих действий: автономное наблюдение локального пространства вокруг робота независимо от внешнего оператора; автономное реагирование на изменение ситуации в локальном пространстве согласно трем принципам, описанным выше; взаимодействие каждого робота – с соседями, препятствиями, объектом работы – в локальном пространстве (на «микроскопическом» уровне); динамическая суперпозиция локальных взаимодействий членов стаи во времени и пространстве для коллективного выполнения работы (на «макроскопическом» уровне). В частности, на основе модели К. Рейнольдса разработана обобщенная математическая модель и библиотека базовых стереотипов «стайного» поведения мобильных роботов [3], которые представляются полезными для рассматриваемых приложений.

Преимущества малой размерности мобильных роботов. Исследования показывают, что небольшие геометрические размеры роботов являются одним из ключевых свойств стайных систем. Малая размерность позволяет значительно снизить стоимость производства и цену одного робота, повысить надежность конструкции, рассматривать роботы фактически как расходный материал при групповом использовании. Исследования показывают, что широкое внедрение малоразмерных роботов стайного применения обеспечивает ряд преимуществ по сравнению с использованием человеко-машинных систем или дистанционно-управляемых роботов. Это снижение эксплуатационных затрат, возможность развертывания вложенных систем мобильных роботов методом «матрешки», повышение безопасности для персонала и окружающей среды, возможность массового исследования ранее недоступных мест (подо льдом, на дне, в котловинах, вблизи сложного рельефа и др.), расширение географии и зоны работ, повышение устойчивости к неблагоприятным климатическим условиям, в том числе – к многофакторным, возможность выполнения принципиально новых видов работ.

Отмечается, в частности, что в задачах поиска или установки объектов на дне, обследования подводного пространства преимущества от использования стай малоразмерных роботов включают: повышение точности координатной привязки и производительности работ; повышение устойчивости группы к сбоям измерительного оборудования полезной нагрузки у отдельных роботов; возможность составления более точных «портретов» событий и процессов как функции времени и пространственных координат; ослабление влияния ошибок измерений на результаты; повышение уровня синхронизации работ.

Императивы поведения. В действиях робота важную роль играют императивы поведения. Императивы или «аксиомы» поведения – это базовые этические и юридические правила, которые имеют наивысший приоритет для выполнения роботом в любой ситуации – с позиций безусловного обеспечения безопасности людей, непричинения вреда природе, чужому имуществу или техническому состоянию робота. Императивы поведения в определенной степени можно рассматривать как аналоги известных законов робототехники А.Азимова. В этой связи уместно отметить исследования по разработке законодательной базы, системы императивов и ограничений поведения для мобильных роботов. В частности, активно изучаются вопросы юридического обоснования возможности эксплуатации автономных и полуавтономных мобильных роботов гражданского назначения классов UAV и UGV в едином пространстве вместе с человеко-машинными системами и людьми. Не менее актуальным является вопрос юридического обоснования боевых операций, которые ведут некоторые страны посредством

авиационных роботов военного и специального назначения в воздушном пространстве других стран без уведомления правительств последних.

Преимущества роботов стайного применения. Концепция стайного поведения имеет ряд преимуществ по сравнению с концепцией группового применения роботов на основе принципов централизованного управления. Преимущества следующие: снижение уровня требований к «бортовому интеллекту» и многофункциональности роботов; унификация платформы, модульность конструкции, массовость производства, невысокая цена, возможность использования роботов в качестве расходного материала; взаимозаменяемость модулей полезной нагрузки; способность к динамической адаптации, более высокая надежность функционирования в сложных и неизвестных условиях внешней среды; робастность и масштабируемость приложений (нечувствительность к выходу из строя отдельных роботов или увеличению численности группы в процессе выполнения работы); меньшие затраты вычислительных ресурсов на управление; меньшая нагрузка на каналы связи и внешнего оператора; более высокий уровень и интуитивный характер внешнего управления.

Прогноз развития обеспечивающих технологий (класс UAV). Согласно некоторым исследованиям [4], стайная модель представляет собой десятый – высший – уровень развития перспективных технологий группового применения авиационных роботов военного и специального назначения (рис. 1). Однако, по оценке других исследователей, для достижения полной автономизации применения роботов в форме стай еще предстоит решить ряд концептуальных и технологических задач. Ожидаемые сроки создания экспериментальных образцов БЛА для оснащения высокоавтономных стайных систем: 2010-2015 гг. (оптимистический прогноз) или 2015-2020 гг. (сдержанный прогноз). Аналогичные прогнозы с поправкой на сроки существуют и для мобильных роботов других классов.



Рис. 1. Тенденции развития свойств автономизации управления авиационными мобильными роботами военного и специального назначения США (на основе [4])

Недостатки и проблемы развития стайных систем. Анализ публикаций из базы данных показывает, что применительно к мобильной робототехнике стайные модели поведения имеют ряд недостатков, которые требуют дополнительных фундаментальных и прикладных исследований и опытных разработок. Прежде всего, это непредсказуемость и трудности интерпретации движения – как отдельных роботов, так и стаи в целом – для внешнего оператора или наблюдателя. Также возможна неустойчивость (хаотичность) коллективного движения роботов при определенных значениях параметров настройки стайной модели и

внешней среды. Указанный недостаток объясняется высоким уровнем сложности, нелинейностью и нестационарностью стайных систем. Некоторые аналитики, тем не менее, рассматривают управляемую хаотичность и непредсказуемость движения стай роботов как весьма ценное преимущество в военных и специальных приложениях.

В области стайной робототехники также имеется ряд недостаточно изученных научных и технологических проблем. К ним относятся: дефицит концепций применения групповой робототехники в гражданской, специальной и военной сферах; несовершенство методов автономной координации движения и принятия решений в стае для некоторых приложений; трудности идентификации состояния внешней среды (это общая проблема для одиночных мобильных роботов и человеко-машинных систем); методы определения соответствия характеристик стайных робототехнических систем установленным требованиям (ввиду отсутствия нормативного базиса и ограниченности спектра ожидаемых условий эксплуатации, которые могут быть воспроизведены на этапе испытаний); средства наблюдения локального пространства робота и идентификации препятствий в различных физических средах; способы дублирования наблюдения локального пространства в разных поддиапазонах электромагнитного спектра; методы распознавания динамических образов и синтеза обобщенной картины наблюдения на основе информации, получаемой от разнородных датчиков; способы планирования и перепланирования задания, распределения и перераспределения функций в стае; эффективный «язык общения» роботов в стае, способы гарантированного обмена информацией; обеспечение надежности исполнительных механизмов и силовой установки; способы поиска источников энергии и автономной дозаправки (подзарядки) роботов в ходе применения; характеристики сменного оборудования полезной нагрузки (вес, габариты, модульность, унификация интерфейса, энергопотребление, номенклатура и др.); методы организации человеко-машинного интерфейса высокого уровня; методы избежания столкновений; способы противодействия робототехническим стаям.

Ограничения стайной модели. Как и всякая техническая концепция, модель стайной робототехники имеет свои принципиальные ограничения. К ним, в частности, относятся: физические ограничения, накладываемые на допустимые параметры движения и управления мобильных аппаратов с шестью степенями свободы, характерные для основных физических сред (воздушное пространство, подводное пространство, водная поверхность, твердая поверхность и др.). Вторая часть ограничений обусловлена использованием принципов самоорганизации и включает в себя: наблюдаемость локального пространства в условиях помех, динамические характеристики подвижных препятствий и объектов, размер свободного пространства для движения, ограничения используемых способов связи и др.

Спектр практических приложений. Концептуальные исследования и результаты опытных разработок показывают, что стайная робототехника имеет высокий потенциал практических приложений. Согласно оценкам экспертов, спектр перспективных приложений мобильной робототехники стайного применения объективно широк.

Спектр гражданских работ варьируется от задач контроля потоков автотранспорта, диагностики состояния протяженных объектов промышленной и энергетической инфраструктуры, сбора и переработки мусора, мониторинга удаленных территорий и акваторий, разработки и добычи полезных ископаемых под землей, круглосуточной помощи инвалидам и престарелым – и до выполнения работ в лесном, сельском и рыбном хозяйстве. В частности, для подводной среды гражданские приложения мобильных роботов стайного применения включают: исследование океана; разведку и добычу полезных ископаемых (редкоземельных металлов, углеводородов и др.) на континентальном шельфе и др.; сбор и сортировку океанского мусора; управление косяками рыбы при промышленном лове; монтаж и обслуживание подводных коммуникаций; сбор урожая на дне моря; множество других задач.

Спектр специальных задач для стайной робототехники включает: охрану общественного порядка, стратегических объектов и государственной границы; автоматический поиск и тушение лесных пожаров, борьбу с нашествиями саранчи; поиск и спасение терпящих бедствие людей и грузов; доставку срочных грузов и обеспечение связи в чрезвычайных ситуациях; подъем и буксировку затонувших морских и воздушных судов; сбор масштабных разливов нефти при авариях на подводных скважинах; выявление и пресечение браконьерства, каналов контрабанды, наркотрафика; распределенный мониторинг и документирование фактов незаконной экономической деятельности; защиту морского судоходства от пиратов и др.

Некоторые примеры военных задач: массированные стайные атаки стратегических целей (подводных и надводных боевых кораблей, транспортных конвоев, объектов береговой инфраструктуры и т.п.); стайную защиту стратегических целей от стайных атак боевых мобильных роботов различных классов; минирование и разминирование территорий и акваторий; поиск, уничтожение и защиту подводных коммуникаций; охрану, разведку и блокирование работы портов, военных баз и др.; массированные наступательные и оборонительные операции в сложных условиях – мегаполисы, пересеченный рельеф местности, плотные боевые порядки противника (в том числе – стайные системы) и др.; патрулирование больших территорий и акваторий после захвата.

Заключение. Мобильная робототехника стайного применения – важная и актуальная область научных исследований и опытных разработок, которые имеют высокий потенциал практических приложений во всех рассмотренных сферах деятельности. Вместе с тем, ряд технологий, которые составляют основу мобильной робототехники стайного применения, нуждаются в дальнейшем развитии и экспериментальном подтверждении. Использование разработанной базы данных позволяет повысить эффективность реализации начальных – наиболее ответственных – этапов жизненного цикла робототехнических систем группового применения. В частности, на основе материалов представленной базы данных могут быть выполнены следующие работы: разработка научных прогнозов развития методов, технологий и образцов мобильной робототехники стайного применения в заданных классах и сегментах приложений; анализ рисков, разработка концепций и программ развития мобильной робототехники группового применения; аналитические исследования по специальным проблемам; информационно-аналитическое обеспечение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и испытательно-оценочных работ.

## Литература

1. Бурдун И.Е., Бубин А.Р. База данных электронных первоисточников информации о разработках и приложениях малой мобильной робототехники подводного и надводного классов // Сб. трудов Всероссийской научно-технической конференции «Научное и техническое обеспечение исследований и освоения шельфа Северного Ледовитого океана», 9-13 августа 2010 года, СибГУТИ. – Новосибирск, 2010. – С. 150-154.
2. Reynolds, C.W. Flocks, Herds, and Schools: a Distributed Behavioural Model // Computer Graphics. – 1987. – Vol. 21, No. 4. – P. 25-34.
3. Бурдун И.Е., Бубин А.Р. Метод самоорганизации стайного поведения малых мобильных роботов гражданского и специального назначения для арктических приложений // Сб. трудов Всероссийской научно-технической конференции «Научное и техническое обеспечение исследований и освоения шельфа Северного Ледовитого океана», 9-13 августа 2010 года, СибГУТИ. – Новосибирск, 2010. – С. 141-149.
4. Air Warfare. OSD UAV Roadmap 2002-2027 // Office of the Secretary of Defense (Acquisition, Technology, & Logistics). USA. December 2002.

## ПРОГРАММНАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АНПА

**Л.А. Наумов, А.И. Боровик, Н.В. Баль**

Институт проблем морских технологий ДВО РАН  
690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел./факс: (423) 2432416,  
e-mail: alexey@borovik.me

Рассматриваются вопросы создания программного обеспечения системы управления (СУ) автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) на базе программной платформы. Описываются некоторые существующие программные платформы и используемые в них технологии организации связи компонентов. Описываются особенности создаваемой программной платформы, предназначенной для системы управления АНПА. Приводится пример архитектуры СУ АНПА, построенной на описываемой платформе.

Одним из важнейших компонентов АНПА, как и любого другого робота, является система управления – комплекс программ и драйверов оборудования, обеспечивающий автономную работу аппарата и выполнение им поставленного задания. В настоящее время используются различные модели архитектуры систем управления автономными роботами. В частности, в АНПА, разработанных в ИПМТ ДВО РАН, используется трехуровневая модель разумного поведения (Rational Behavior Model) с элементами расслоенного управления на исполняющем уровне [1].

Программы, входящие в состав СУ АНПА, могут выполняться под управлением различных операционных систем, как на бортовых компьютерах робота, объединенных в локальную вычислительную сеть, так и на удаленных компьютерах, размещенных на сопровождающем судне или береговой базе [2]. В таких условиях одной из первых задач, которые приходится решать при создании СУ, является задача транспорта данных между компонентами системы. Данная задача традиционно решается при помощи промежуточного программного обеспечения (ППО, middleware), являющегося прослойкой между конкретной операционной системой и прикладными программами. ППО исполняет роль среды, обеспечивающей унифицированный доступ к компонентам СУ, средства адресации и транспорт сообщений. Использование ППО позволяет добиться модульности системы, облегчает и организует процесс написания программ системы управления.

С учетом специфики АНПА (автономная работа, плохой канал связи с внешними компонентами СУ, высокая вероятность аппаратных сбоев, низкая производительность используемых в ЛВС одноплатных компьютеров) можно выделить следующие базовые требования к программной платформе системы управления:

- модульность (возможность независимого добавления и изменения отдельных компонентов СУ);
- стабильность (ошибки, возникающие в одних компонентах, не должны приводить к выходу из строя других);
- низкая ресурсоемкость;
- малое время отклика (данные от сенсоров, участвующих в управлении движением, должны доставляться программам-регуляторам с минимальными задержками).

В настоящий момент существует промежуточное программное обеспечение как общего (предназначенного для связи разнородных программ между собой), так и специального назначения. К наиболее известному ППО общего назначения относятся: IPC [3], ICE [4], CORBA [5]. Под ППО специального назначения понимаются программные платформы (framework), специально предназначенные для решения задач робототехники. Программные

платформы, как правило, не только реализуют транспортные функции, но и предоставляют унифицированные средства для задания настроек, эмулирующие комплексы, вспомогательные программы для отладки алгоритмов и так далее. Наиболее известные программные платформы: CARMEN [6], Orca [7], Microsoft Robotics Developer Studio [8], Player [9], MOOS-IvP [10]. Программные платформы могут использовать стороннее ППО (CARMEN использует IPC, Orca – ICE, MSRS – CCR) или реализовывать собственные транспортные механизмы (Player).

Существует несколько технологий организации связи компонентов СУ: **клиент-серверная**, **пиринговая (одноранговая)** и **гибридная**.

В рамках **клиент-серверной** технологии связь между компонентами системы осуществляется посредством выделенной программы-сервера, которая всегда должна находиться в сети. Каждый компонент системы должен иметь доступ к серверу. К плюсам данной технологии относится простота реализации, высокая скорость нахождения компонентами необходимых для работы данных, а также возможность прозрачного накопления данных (сервер может дублировать все пересылаемые через него сообщения в единую базу данных). К минусам – низкая надежность (выход из строя сервера приводит к неработоспособности всей сети) и высокая нагрузка на транспортные механизмы ОС (сеть, сокет), так как каждое сообщение от источника до получателя транспортируется минимум два раза. Данную технологию использует большая часть существующих платформ: CARMEN, Orca, MOOS-IvP. Немного иначе реализована данная технология в платформе Player: все компоненты системы разделяются на серверные (драйверы оборудования, некоторые полезные алгоритмы) и клиентские (пользовательские программы управления). Серверные компоненты выполняются в отдельных потоках программы-сервера (которых может быть несколько и которые могут связываться между собой), клиентские же представляют собой отдельные программы, использующие специальные библиотеки для общения с сервером [11]. Применение подобной технологии, с одной стороны, позволяет увеличить надежность системы за счет возможности использования нескольких серверов. С другой стороны, ухудшается стабильность – программный сбой, произошедший в одном из компонентов, приводит к краху выполняющего его сервера вместе со всеми остальными работающими на нем компонентами. Кроме того, усложняется общая архитектура СУ, особенно в случае автономного робота, так как требуется на этапе проектирования разделять программы на две категории (серверные и клиентские), что не всегда оправданно.

**Пиринговая** (или **одноранговая**) технология основана на организации сети равноправных компонентов. Все компоненты системы связываются друг с другом независимо. К плюсам данной технологии относится высокая надежность работы (любые компоненты могут аварийно завершаться и запускаться вновь, при этом работа остальных программ СУ не будет нарушена) и малое время отклика системы (данные от источников к потребителям передаются напрямую, минуя сервер). К недостаткам технологии можно отнести сложный процесс настройки сети и избыточную нагрузку на транспортные механизмы источников данных (сообщения должны быть отправлены всем потребителям, что может затормозить процесс рассылки). Одноранговая технология реализована в ППО IPC.

**Гибридная** технология основана на организации частично децентрализованных сетей. В гибридной сети присутствует выделенный сервер (или несколько), осуществляющий синхронизацию и координацию работы компонентов. Компоненты-потребители данных находят компоненты-источники посредством обращения к серверу, после чего устанавливают друг с другом прямое соединение и работают по принципу пиринговой сети. Данная технология совмещает скорость и удобство настройки централизованных (клиент-серверных) сетей и надежность децентрализованных. В децентрализованной сети сервер может брать на себя ответственность по доставке сообщений потребителям, которые по каким-либо причинам не могут установить прямое соединение с источниками. Таким

образом, клиент-серверную и одноранговую технологии организации сети компонентов можно рассматривать как частные случаи гибридной.

Нами разрабатывается платформа RCE (Robot Components Engine) для системы управления АНПА, основанная на гибридной технологии организации сети. Гибридная технология выбрана как наиболее удовлетворяющая предъявленным требованиям. В разрабатываемой платформе вводится понятие **роли** компонента системы управления. Каждый компонент может выполнять одну из следующих ролей:

- чистый клиент (поддерживает только одно активное соединение с сервером, по которому передает исходящие и получает входящие сообщения);
- пиринговый клиент (запрашивает у сервера список потребителей данных, после чего устанавливает с ними прямое соединение);
- адресующий сервер (хранит сведения о текущей топологии сети и связывает пиринговые клиенты-источники и пиринговые клиенты-потребители данных между собой);
- передающий сервер (выполняет роль адресующего сервера для пиринговых клиентов и передает данные для чистых клиентов).

Любой компонент системы управления может выполнять одну из описанных ролей, независимо от его основного назначения. Все транспортные функции выполняются в отдельном программном потоке, независимо от потоков, выполняющих «полезную нагрузку» компонента. Настройка роли компонента может осуществляться как в коде компонента, так и посредством конфигурационного файла, тем самым позволяя организовывать сети любой топологии на основе уже написанных компонентов, без необходимости вносить в них какие-либо изменения. В рамках платформы RCE возможно как создание отдельных программ-серверов, выполняющих определенный функционал (запись всех циркулирующих сообщений в базу данных, слежение за работой и перезапуск других компонентов), так и передачу серверных функций любым компонентам системы.

Разрабатываемая платформа имеет ряд ключевых особенностей, отличающих ее от аналогичных продуктов:

- гибкость настройки сети. Благодаря использованию гибридной технологии, платформа RCE позволяет организовать сети практически любой структуры, как клиент-серверные с выделенным сервером, так и полностью гибридные;
- прозрачная конфигурируемость. Роль каждого компонента может быть задана на этапе запуска посредством конфигурационного файла, тем самым позволяя организовывать сети различной структуры на основе уже написанных компонентов;
- динамическая подписка на сообщения. Компонент может динамически подписываться на получение и отписываться от получения определенных сообщений;
- поддержка симуляции. Все компоненты получают текущее время посредством вызова специальных функций ядра платформы. Посредством передачи специальных системных сообщений эмулятор может ускорить или замедлить течение времени для компонентов, работающих в условиях симуляции;
- простое описание собственных структур передачи данных. В RCE сообщения передаются в виде объектов определенных программистом C++ классов. Объекты могут содержать данные любых типов, в том числе динамических и определенных программистом. Классы для передачи данных описываются посредством стандартных средств языка C++, от программиста не требуется изучения отдельного макроязыка описания (как в Player, CARMEN и Orca);
- удобство использования платформы. RCE предоставляет программисту небольшое количество удобных функций взаимодействия с платформой, выполняя все транспортные функции в отдельных потоках;

- безопасность использования. Благодаря использованию языка С++ возможность критической ошибки при работе с платформой, не выявляемой на этапе компиляции, сведена к минимуму.

В рамках проекта **RCE** планируется создание полноценной среды симуляции. Среда симуляции может быть выполнена как адресующий сервер, передающий компонентам СУ данные от эмулируемых источников, а также поправочные коэффициенты для симуляции времени.

Рассмотрим пример архитектуры СУ, которую планируется построить на основе разработанной программной платформы. Все программы, участвующие в управлении движением и задании параметров работы оборудования АНПА, размещены по трем уровням – **стратегическому, тактическому и исполняющему**. Эти программы реализованы как пиринговые клиенты, способные поддерживать связь друг с другом в условиях отсутствия сервера. Взаимодействие программ управления движением между собой и доступ к функциям оборудования робота осуществляется при помощи обслуживающих программ.

К обслуживающим программам относятся драйверы оборудования (реализованные как пиринговые или чистые клиенты, в зависимости от расчетной скорости работы) и выделенные транспортные серверы программной платформы. Серверов может быть несколько, они полностью дублируют друг друга и поддерживают актуальными сведения о текущей структуре сети. В случае аварийного завершения работы одного из серверов (например, в случае критических аппаратных ошибок записи на диск), все компоненты автоматически переключаются на использование запасного, в то время как основной сервер перезапускается. На серверы также возложена функция записи журнала событий системы в БД.

Программы исполняющего уровня решают задачи движения АНПА в заданном направлении или к заданной цели с обходом локальных препятствий, позиционирования аппарата в локальной системе координат, обеспечения контроля над работой аппаратной части робота и т.п.

На тактическом уровне решается задача навигации АНПА (прокладки маршрута по карте с учетом особенностей местности и рельефа), а также выполнения некоторых сложных работ (отслеживание кабеля, приведение к стыковочному модулю и т.п.).

Программы стратегического уровня системы управления определяют цели запуска, последовательность действий и режимы работы АНПА.

Иерархия программ, входящих в систему управления АНПА, представлена на рис. 1.



Рис. 1. Иерархия программ СУ АНПА

Бортовая сеть АНПА состоит из нескольких компьютеров, объединенных в сеть. Каждый компьютер контролирует работу определенного набора оборудования и участвует в выполнении общей миссии. Все бортовые устройства подключены к общему последовательному каналу связи, к которому также подключены и все компьютеры АНПА. В результате каждый компьютер робота имеет доступ ко всем устройствам [2]. В качестве примера рассмотрим бортовую сеть, состоящую из трех компьютеров, роли которых распределены следующим образом:

- 1) главный компьютер (компьютер Автопилота) – обеспечивает достижение целей миссии, работу основных драйверов и служебных программ;

- 2) компьютер телевизионной системы – обеспечивает работу драйверов фото- и видеоаппаратуры, а также служебных программ обработки изображений и распознавания образов;

3) компьютер системы акустического зрения – обеспечивает работу ГБО и профилографа, а также служебных программ обработки акустических изображений.

Пример реализации бортовой сети с использованием RCE изображен на рис. 2.

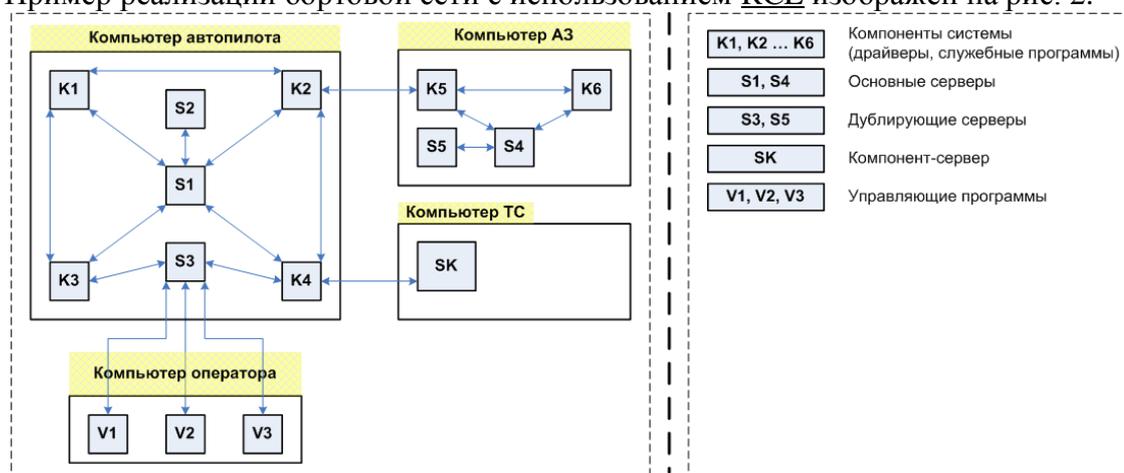


Рис. 2. Пример реализации бортовой сети

Разработанная архитектура позволяет сбалансировать нагрузку на компьютеры бортовой сети и, в случае выхода из строя любого из них, перераспределить компоненты системы таким образом, чтобы полностью сохранить изначальную функциональность.

Разработанная программная платформа и формируемая на ее базе архитектура системы управления предполагается к внедрению в одном из проектов ИПМТ.

## Литература

1. Инзарцев А., Львов О. Бортовые вычислительные сети автономных подводных роботов // Современные технологии автоматизации. 2005. №2. С. 68-74
2. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др.; под общ. ред. М.Д. Агеева. Автономные подводные роботы: системы и технологии. – М.: Наука, 2005.
3. Inter Process Communication (IPC) [Электронный ресурс] / IPC. – Режим доступа: <http://www.cs.cmu.edu/~ipc/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.
4. The Internet Communications Engine [Электронный ресурс] / ZeroC, Inc. – Режим доступа: <http://www.zeroc.com/ice.html>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.
5. The official CORBA standard from the OMG group [Электронный ресурс] / OMG group. – Режим доступа: <http://www.omg.org/spec/CORBA/3.1/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.
6. Carmen Robot Navigation Toolkit [Электронный ресурс] / CARMEN-Team. – Режим доступа: <http://carmen.sourceforge.net/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.
7. Orca: Components for Robotics [Электронный ресурс] / Orca Robotics; Web-мастер Tobias Kaupp. – Режим доступа: <http://orca-robotics.sourceforge.net/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.
8. Microsoft Robotics Developer Studio [Электронный ресурс] / Microsoft. – Режим доступа: <http://www.microsoft.com/robotics/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.
9. Player [Электронный ресурс] / The Player Project. – Режим доступа: <http://playerstage.sourceforge.net/index.php?src=player>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.
10. MOOS-IvP [Электронный ресурс] / MOOS-IvP. – Режим доступа: <http://oceanai.mit.edu/moos-ivp/pmwiki/pmwiki.php>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.
11. Brian Gerkey, Richard T. Vaughan and Andrew Howard. «The Player/Stage Project: Tools for Multi-Robot and Distributed Sensor Systems». In Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2003). P. 317-323, Coimbra, Portugal, June 2003.

## ОБ ИНФОРМАЦИОННОМ ОБМЕНЕ В ГРУППЕ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ

**В.Г. Арсентьев<sup>1</sup>, И.Е. Бурдун<sup>2</sup>, Г.И. Криволапов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики  
630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86, тел./факс: (383) 269-83-42,  
e-mail: krivolapov@sibsutis.ru

<sup>2</sup> ООО «ИНТЕЛОНИКА»  
630009, Новосибирск, ул. Никитина, 15-76, тел./факс: (383) 266-20-92,  
e-mail: info@intelonics.com

Рассматривается обобщенная структура информационного обмена в группе подводных роботов. Оцениваются основные ограничения и целевые (желаемые) параметры, необходимые для построения подсистемы обмена.

Замена человеко-машинных систем мобильными роботами открывает новые возможности для более эффективного выполнения работ, которые потенциально опасны для здоровья или жизни человека-оператора, однообразных или утомительных работ, а также логически или физически сложных работ [1]. Наибольший полезный эффект от использования мобильной робототехники достигается, если роботы действуют сообща, в форме группы (в том числе – гетерогенной), обладают высокой степенью автономности (не нуждаются в частом вмешательстве внешнего оператора в управление), могут самостоятельно координировать свое положение и действия в группе [2].

Учитывая многообразие и изменчивость ожидаемых условий эксплуатации, каждый робот и группа в целом должны обладать свойством адаптивности поведения в зависимости от ситуации: целей, ограничений и императивов поведения, текущего состояния (роботов, группы, эксплуатационной среды), команд внешнего управления. Для обеспечения экономичности, надежности и многофункциональности применения также важно, чтобы роботы группового применения имели небольшие размеры, модульную конструкцию и высокую степень унификации бортовых подсистем (в том числе – сменных комплектов полезной нагрузки), открытую библиотеку стереотипов группового поведения и возможность изменения состава группы в ходе выполнения задания.

Свойство адаптивности поведения для групп роботов любой численности можно обеспечить путем имитации принципов этологии и самоорганизации движения, заимствованных у живой природы. Наиболее известной является модель самоорганизации движения сообщества виртуальных динамических объектов – «бойдов», разработанная К. Рейнольдсом [3]. Данная модель позволяет реализовать в искусственных системах – без централизованного управления и с малыми затратами вычислительных ресурсов – базовые принципы стайного поведения, которые успешно используются стаями живых существ (рыб, птиц, млекопитающих, насекомых, микроорганизмов и др.). Численность природных стай может составлять от  $10^1$  до  $10^7$  единиц, в зависимости от вида.

Для успешной реализации адаптивной модели поведения в группе мобильных роботов на основе принципов этологии необходимо иметь средства наблюдения локального пространства, а также средства связи (информационного обмена) роботов в группе.

Введем некоторые базовые понятия. Стая – это группа  $\{R_1, \dots, R_i, \dots, R_N\}$  роботов  $R_i$ ,  $i = 1, \dots, N$ , действующих совместно, поведение которых самоорганизуется в зависимости от ситуации (текущих целей и ограничений, воли оператора, состояния внешней среды, технического состояния роботов, других факторов) для повышения эффективности,

безопасности и устойчивости выполнения заданной работы («миссии»). В ходе выполнения задания численность стаи может изменяться (вследствие потерь, неисправностей, разбиения, пополнения и др.), то есть  $N = f(t)$ . Наблюдаемое локальное пространство или локальная окрестность  $\Omega(R_i)$  робота  $R_i$  (рис. 1) – это часть геометрического пространства вокруг робота, имеющая форму сферы, эллипсоида, конуса или другой более сложной конфигурации [1], которая может наблюдаться роботом при помощи собственных средств наблюдения, средств наблюдения других роботов и внешних по отношению к стае измерительных систем. Цель наблюдения – локализация в  $\Omega(R_i)$  других роботов – членов стаи, а также сторонних объектов, в том числе препятствий, могущих повлиять на движение робота или функционирование полезной нагрузки.

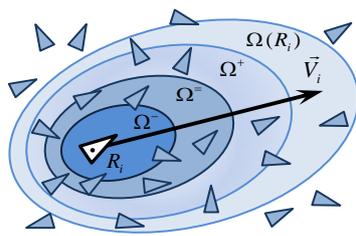


Рис. 1. Характерные области локального пространства робота

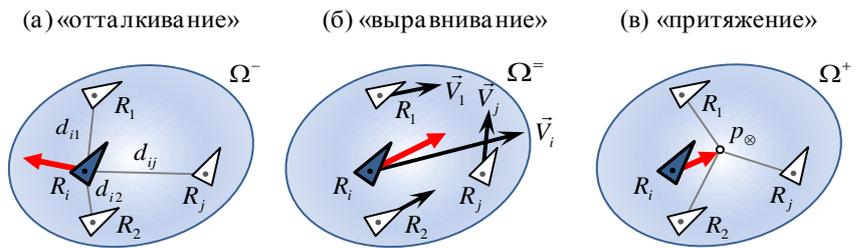


Рис. 2. Принципы самоорганизации движения мобильных роботов (модель К. Рейнольдса [3])

Кластер – это часть стаи  $\{R_1, \dots, R_i, \dots, R_N\}$ , выделенная по какому-либо признаку в определенный момент времени. Например, кластер может быть образован из роботов, оснащенных однотипной полезной нагрузкой. При функциональном разбиении некоторая стая, например, может включать следующие кластеры: роботы-наблюдатели, роботы-охранники, транспортные роботы. Стая может иметь или не иметь лидера [1].

Поступательное движение робота  $R_i$  описывается в нормальной земной системе координат ( $NED$ ) вектором скорости  $\vec{V}_i$  и радиус-вектором положения робота  $\vec{p}_i$  в системе ( $NED$ ),  $p_i = (x_g, y_g, z_g)^T$ . Расстояние  $r_{i\otimes}$  от робота  $R_i$  до «центра стаи»,  $p_{\otimes}(x_g, y_g, z_g)$ ,

вычисляется по формуле:  $r_{i\otimes} = \sqrt{(x_{gi} - x_{g\otimes})^2 + (y_{gi} - y_{g\otimes})^2 + (z_{gi} - z_{g\otimes})^2}$ , где

$$x_{g\otimes} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ig}, \quad y_{g\otimes} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_{ig}, \quad z_{g\otimes} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_{ig}.$$

Характеристика  $r_{i\otimes}$  применима и для любого подмножества стаи – локальной окрестности  $\Omega(R_i)$ , кластера и др. Существуют и другие характеристики поведения стаи и отдельных роботов, связанные с решением задач наблюдения, связи и управления, в том числе: радиус, объем, «момент инерции», средняя скорость, степень поляризации, сжимаемость, растяжимость, фрактальная размерность траекторий, связность и др.

Локальная окрестность  $\Omega(R_i)$  имеет три вложенные зоны (рис. 1),  $\Omega^-$ ,  $\Omega^=$  и  $\Omega^+$ , которые в модели К. Рейнольдса определяются, соответственно, как зона отталкивания  $\Omega^-$ , зона выравнивания  $\Omega^=$  и зона притяжения  $\Omega^+$  робота  $R_i$ , где  $\Omega^- \subset \Omega^= \subset \Omega^+ \subset \Omega(R_i)$ . Самоорганизация «стаинового» движения робота  $R_i$  из  $\{R_1, \dots, R_i, \dots, R_N\}$  – есть результат суперпозиции во времени и пространстве следующих трех принципов [1, 3] (рис. 2): (1)

«Отталкивание»:  $(\forall R_j)(R_j \in \Omega^-(R_i) \Rightarrow (d_{ij} \geq d_{\min}))$  – соблюдать безопасную дистанцию, где  $d_{\min}$  – минимально допустимое расстояние от  $R_i$  до соседей  $R_j$  и препятствий,  $d_{ij} = \sqrt{(x_{gi} - x_{gj})^2 + (y_{gi} - y_{gj})^2 + (z_{gi} - z_{gj})^2}$ ,  $i \neq j$ ,  $i, j = 1, \dots, N(\Omega(R_i))$ .

(2) «Выравнивание»:  $(\forall R_j)(R_j \in \Omega^-(R_i) \Rightarrow \vec{V}_i \rightarrow \vec{V}_{\otimes})$  – придерживаться средней скорости движения  $\vec{V}_{\otimes}$  соседей робота  $R_i$  по стае, которые образуют локальную окрестность  $\Omega(R_i)$  в момент времени  $t$ , где  $i, j = 1, \dots, N(\Omega(R_i))$ ,  $i \neq j$ .

(3) «Притяжение»:  $(\forall R_j)(R_j \in \Omega^+(R_i) \Rightarrow \vec{p}_i \rightarrow \vec{p}_{\otimes})$  – стремиться занять положение, близкое к центру стаи  $\vec{p}_{\otimes}$  окрестности  $\Omega(R_i)$ , где  $\vec{p}_{\otimes} = \sum_{j=1}^{N(\Omega(R_i))} \vec{p}_j \cdot [N(\Omega(R_i))]^{-1}$ ,  $i \neq j$ .

Входными данными алгоритма, реализующего правила (1) – (3), являются: текущее время; шаг реализации стайного поведения; векторы состояния (робота, полезной нагрузки, локального пространства, кластера, стаи и др.); задание, выполняемое стаей; используемый стереотип стайного поведения [1]; текущие цели, ограничения и императивы поведения робота. Выходные данные алгоритма – это обновленные векторы состояния и управления робота и стаи.

Последовательность шагов алгоритма: организовать цикл наблюдения роботом локального пространства на очередном шаге; принять и обработать сообщения внешнего оператора, лидера стаи, кластера и соседних роботов, если имеются; опросить бортовые средства наблюдения локального пространства; определить тип и состояние объектов, обнаруженных в локальном пространстве; вычислить расстояния до объектов и скорости их перемещения; составить и отослать сообщение о неопознанных или опасных объектах; разбить подмножество объектов, находящихся в локальном пространстве, на три зоны: отталкивание, выравнивание, притяжение; вычислить характеристики локального пространства и каждой зоны; вычислить векторы-слагаемые управляющих сил и моментов робота для правил (1) – (3) – см. рис. 2; вычислить векторы управляющей силы и управляющего момента, необходимые для реализации стереотипа стайного поведения или команды внешнего оператора; вычислить результирующие векторы управляющей силы и управляющего момента как взвешенные суммы управляющих сил и моментов, полученных выше; вычислить управляющие воздействия для реализации результирующих векторов управляющей силы и управляющего момента на очередном шаге поведения; приложить управляющие воздействия к исполнительным механизмам робота; оценить векторы состояния; обновить состояние внутренней памяти данных робота; сформировать и отослать сообщения с обновленными параметрами обмена остальным членам стаи и оператору.

Динамические характеристики стаи (длительность выполнения шагов алгоритма самоорганизации) в значительной мере определяются затратами времени на информационный обмен между роботами. Так как при организации информационного обмена в стае подводных роботов следует ориентироваться на применение гидроакустических сигналов, то в силу относительной узкополостности гидроакустического канала связь внутри группы и с внешними объектами (оператором) должна осуществляться пакетами с применением кодовых методов разделения информации. Для этого всем роботам в группе присваиваются индивидуальные адреса (номера); адреса передаются в составе заголовка соответствующего информационного пакета.

Затраты времени на передачу информационного пакета  $t_{ij}$  между роботами на

расстояние  $d_{ij}$  не могут быть меньше величины  $t_{ij} = \frac{d_{ij}}{c} + T_{ij}$ , где  $c$  – скорость звука в воде;

а  $T_{ij}$  – длительность передаваемого по каналу связи информационного пакета. Для повышения динамических характеристик стаи необходимо уменьшать длительность информационных пакетов, которыми осуществляется обмен между роботами.

Уменьшение длительности передаваемых пакетов может осуществляться двумя способами. Во-первых, для передачи пакетов применять сигналы с основанием больше двух. Однако при этом ухудшаются энергетические показатели передачи и возрастает сложность приемных устройств. Во-вторых, сократить объем данных, передаваемых в информационных пакетах, в частности уменьшить или вообще исключить из состава пакета передаваемого роботом данные о его навигационных параметрах (координатах, курсе, скорости и т.д.). Такая навигационная информация может выделяться абонентом, которому адресован пакет, на основе соответствующей обработки сигналов информационных пакетов, которые в этом случае играют роль навигационных сигналов.

Для реализации подобной возможности в стае (кластере) один из роботов должен выполнять функции лидера  $R_L$ . Робот-лидер должен иметь большие возможности с рядовыми роботами стаи по организации обмена информацией с любым из роботов стаи, диаграмма направленности его антенны должна покрывать все локальное пространство  $\Omega(R_i)$ ; лидер должен иметь в своем составе навигационную систему, например, с ультракороткой базой, позволяющую на основе дополнительной обработки принимаемого информационного пакета, определять направление на источник сигнала и расстояние до него. Вычислительные возможности лидера должны позволять по определенным направлению и расстоянию до робота  $R_i$  определять его положение  $\vec{p}_i$ , вектор скорости  $\vec{V}_i$  относительно центра стаи, которые вместе с сигналами управления, корректирующими курс, скорость и задание, передаются назад этому роботу. Так как диаграмма направленности антенны робота-лидера  $R_L$  покрывает все локальное пространство, то пакет, передаваемый роботу  $R_i$ , принимается остальными роботами стаи, что позволяет остальным роботам стаи зарегистрировать навигационные характеристики робота  $R_i$ . После ряда обменов сигналами робота-лидера  $R_L$  с другими роботами стаи их взаимное положение в локальном пространстве  $\Omega(R_i)$  становится определенным, что позволяет организовать все три указанных выше принципа самоорганизации движения роботов в группе.

Суммарные затраты времени на один цикл информационного обмена робота-лидера со всеми остальными роботами стаи (кластера)  $t_\Omega$  оцениваются величиной

$$t_\Omega = \sum_{i=1}^{N-1} \left( 2 \frac{d_{Li}}{c} + T_{Li} + T_{iL} \right), \quad \text{где } d_{Li} - \text{расстояние между лидером и роботом } R_i;$$

$T_{Li}$  – длительность информационного пакета, передаваемого от робота-лидера роботу  $R_i$ ;

$T_{iL}$  – длительность информационного пакета, передаваемого от робота  $R_i$  роботу-лидеру.

Обмен информацией между оператором и стаей также целесообразно осуществлять через робота-лидера.

## Литература

1. Бурдун И.Е., Бубин А.Р. Метод самоорганизации стайного поведения малых мобильных роботов гражданского и специального назначения для арктических приложений // Научное и техническое обеспечение исследований и освоения шельфа Северного Ледовитого океана: сб. трудов Всероссийской научно-технической конференции, 9-13 августа 2010 года. СибГУТИ, Новосибирск, 2010. – С. 141-149.
2. Бурдун И.Е., Бубин А.Р. База данных публикаций, состояние и перспективы разработок в области мобильной робототехники «стайного» применения (аналитический обзор) // Научное и техническое обеспечение исследований и освоения шельфа Северного Ледовитого океана: сб. трудов Всероссийской научно-технической конференции, 9-13 августа 2010 года. СибГУТИ, Новосибирск, 2010. – С. 150-154.
3. Reynolds, C.W. Flocks, Herds, and Schools: a Distributed Behavioural Model // Computer Graphics. 1987. Vol. 21, №4. P. 25-34.

## ПОДХОД К ПЛАНИРОВАНИЮ ДИНАМИЧЕСКИХ МУЛЬТИОБЪЕКТНЫХ МИССИЙ ДЛЯ ГРУПП АНПА НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

**И.В. Бычков, М.Ю. Кензин, Н.Н. Максимкин**

Институт динамики систем и теории управления СО РАН  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134, а/я 292, тел.: (3952)427100, e-mail: mnn@icc.ru

**Л.В. Киселев**

Институт проблем морских технологий ДВО РАН  
690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел./факс: (4232) 432416,  
e-mail: kiselev@marine.febras.ru

В докладе рассматривается задача планирования маршрута группы автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) для выполнения динамической мультиобъектной исследовательской миссии. На движение группы накладывается ряд ограничений, связанных, в первую очередь, с необходимостью обеспечения регулярной связи между аппаратами. Задача решается на полном взвешенном графе, который накладывается на трехмерную карту рельефа дна. Генетический алгоритм, модифицированный для решения маршрутных задач, распределяет цели между АНПА и выбирает порядок их обхода, стараясь максимизировать заданную целевую функцию. Осуществлена программная реализация подхода, проведены тестовые расчеты.

Широкомасштабные обзорно-поисковые и обследовательские подводные работы целесообразно выполнять группой взаимосвязанных автономных необитаемых подводных аппаратов. При большом количестве объектов (целей), необходимых для исследования, возникает задача их распределения между аппаратами группы и нахождения рационального порядка обхода маршрута для каждого АНПА при действующих ограничениях.

В нашем случае решение задачи ищется при следующих предположениях:

- множество целей задается их координатами, каждая цель имеет относительное значение своего приоритета;
- каждый аппарат имеет свои точки начала и планируемого завершения миссии, а также емкость своего аккумулятора;
- аппараты в группе идентичны между собой по функциональным возможностям и имеют на борту средства связи и передачи данных внутри группы;
- гидроакустический канал связи действует на ограниченном расстоянии и при отсутствии препятствия между АНПА.

На действия группы накладывается ряд ограничений: длина маршрутов аппаратов ограничена энергоемкостью их аккумуляторов, в процессе выполнения миссии каждый аппарат должен быть в состоянии связаться с любым другим аппаратом из группы напрямую или через другие АНПА из группы. Кроме того, условия выполнения миссии могут изменяться в реальном времени, что приводит к необходимости перепланирования маршрута в новых условиях. К числу изменений, требующих корректировки маршрута, следует отнести:

- изменение значений приоритета у целей;
- добавление новых, отказ от старых целей;
- появление новых данных о рельефе;
- непредвиденное изменение заряда аккумулятора и/или координат точек завершения миссии у одного или нескольких АНПА;
- выхода из строя отдельных АНПА или расширения группы новыми аппаратами.

Математическая постановка задачи и ее решение в плоском варианте представлены в статье [1]. В настоящем докладе рассматривается трехмерный случай с новыми эвристиками в генетическом алгоритме, повышающими эффективность его работы.

В хромосому вида  $r = ((r_{11}, r_{12}, \dots, r_{1l_1}), \dots, (r_{k1}, r_{k2}, \dots, r_{kl_k}))$  был добавлен префикс  $(l_1, \dots, l_k)$ , отвечающий за количество целей в маршруте каждого аппарата. Здесь  $r_{ij}$  – индекс вершины, соответствующей  $j$ -ой цели  $i$ -ого аппарата (любая вершина входит в маршрут не более одного раза),  $k$  – количество аппаратов в группе,  $l_i$  – количество целей в маршруте для  $i$ -ого аппарата. Приспособленность особи производится модифицированной по сравнению с [1] целевой функцией:

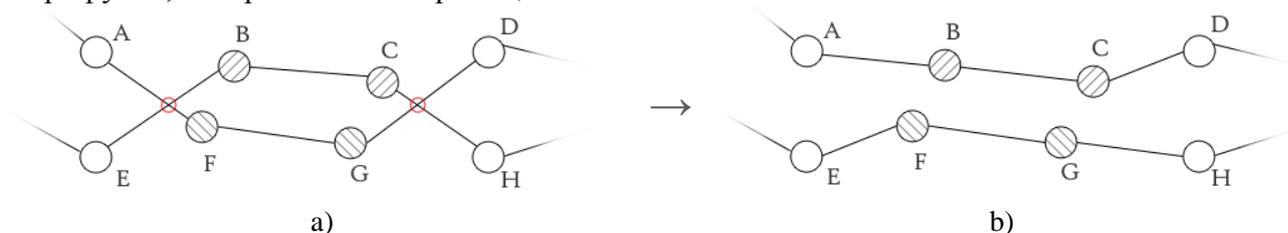
$$F(r) = c_1 \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{l_k} p_{r_{ij}} + c_2 \sum_{i=1}^k e_i,$$

где  $e_i$  – остаток энергии  $i$ -го аппарата по завершению миссии,  $c_1, c_2$  – нормирующие коэффициенты,  $c_1 \gg c_2$ .

Для уменьшения числа пересечений внутри маршрута предложены два дополнительных направленных оператора инверсии. Здесь под направленностью оператора подразумевает его применение не для случайных хромосом, а только для тех, в которых при построении соответствующего им маршрута были найдены пересечения.

Первый, оператор блочной инверсии, исключает пересечения между маршрутами двух разных аппаратов. В том случае, если траектории двух АНПА пересекаются друг с другом более чем один раз, оператор блочной инверсии выбирает случайным образом две точки пересечений. После этого он переставляет местами блоки вершин, лежащих между этими точками у первого и второго АНПА соответственно.

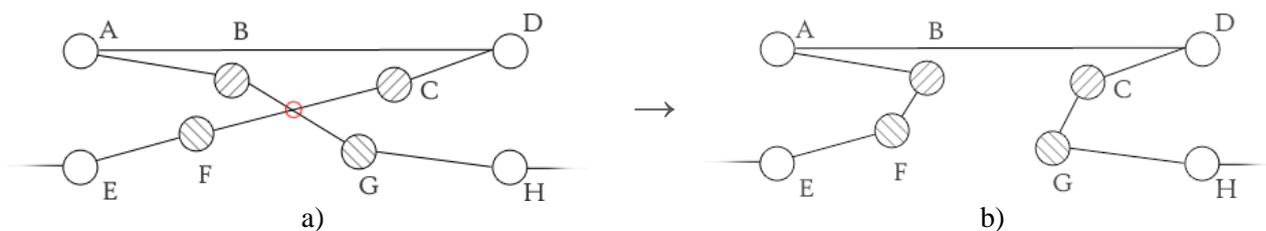
На рис. 1 изображен пример работы описанного оператора. Так, имея на рис. 1, *a* хромосому вида  $((\dots, A, F, G, D, \dots)(\dots, E, B, C, H, \dots))$  оператор меняет местами 2 блока вершин между пересечениями в порядке их прохождения аппаратами:  $\{F, G\}$  и  $\{B, C\}$ . Результирующая хромосома имеет вид  $((\dots, A, B, C, D, \dots)(\dots, E, F, G, H, \dots))$  и отвечает маршрутам, изображенным на рис. 1, *b*.



**Рис.1.** Работа оператора блочной инверсии

Оператор обратной инверсии, в свою очередь, отвечает за исключение самопересечений отдельными аппаратами своих же траекторий. Оператор выбирает случайную точку самопересечения, после чего разворачивает весь блок вершин, по которым проходит аппарат внутри выбранной «петли».

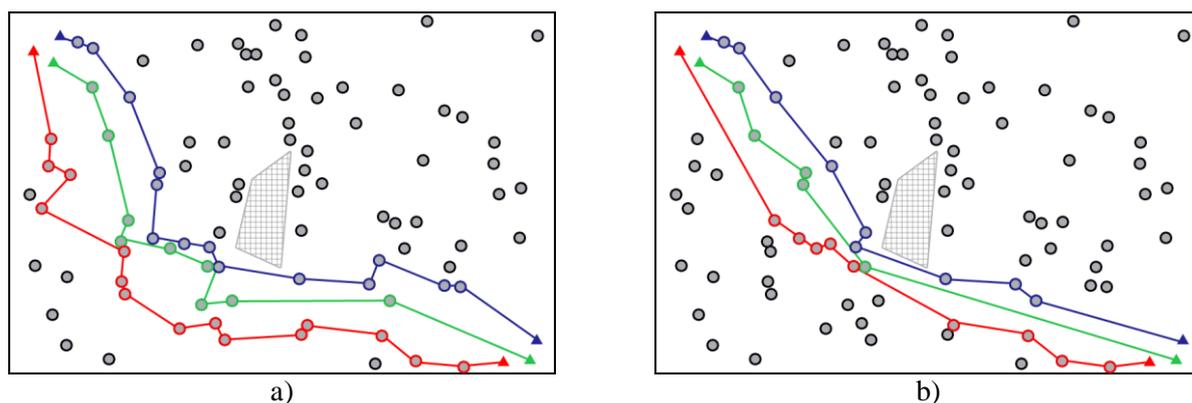
Работа оператора обратной инверсии схематично представлена на рис. 2. Из хромосомы  $(\dots, E, F, C, D, A, B, G, H, \dots)$  на рис. 2, *a* оператором вычленяется и инвертируется блок  $\{C, D, A, B\}$ . Маршрут на рис. 2, *b* отвечает итоговой хромосоме  $(\dots, E, F, B, A, D, C, G, H, \dots)$ .



**Рис. 2.** Работа оператора обратной инверсии

Учет дополнительного ограничения по связи выводит задачу из чисто графовой постановки. Предлагается введенный выше граф наложить на трехмерную карту рельефа дна. Ребра графа в этом случае будут представлять собой траектории аппаратов между целями, маршрут отдельного аппарата – ломаную ограниченной длины с вычисленным направлением обхода. Модификация разработанного ранее генетического алгоритма из [1] была адаптирована для работы на трехмерном рельефе: маршруты аппаратов при перемещении между целями просчитываются при помощи модификации алгоритма  $A^*$ , позволяющей учитывать ограничения на передвижение аппаратов в пространстве, разработан алгоритм определения наличия связи внутри группы, разграничены сущности препятствия и запретной зоны. Так как некоторые цели исследования невозможно задать в виде одной пары координат (например, протяженные объекты), добавлена возможность планирования маршрутов части аппаратов «вокруг» фиксированного маршрута одного или нескольких АНПА.

В связи с возможностью выхода АНПА из строя во время выполнения миссии, принимаемое в [1] ограничение по связи может оказаться недостаточным, если выходящий из строя аппарат является связующим между двумя подгруппами АНПА из группы. В этом случае предлагается ввести понятие уровня коммуникационной безопасности (КБ) группы. Маршрут группы аппаратов имеет  $i$ -ый уровень КБ, если через каждый заданный промежуток времени сеть АНПА образует связный граф с учетом только тех ребер, веса которых не превышают значение радиуса действия связи  $R_{cs}$ , а удаление любых  $i$  вершин из которого не ведет к увеличению количества компонент связи. Критерием недопустимости маршрута  $i$ -го уровня КБ будет являться отсутствие возможности установки связи по крайней мере одним аппаратом хотя бы в один из моментов выхода на связь в случае выхода из строя не более чем  $i$  аппаратов.



**Рис. 3.** Маршруты группы из трех АНПА на заданном множестве целей:  
а – с нулевым уровнем КБ; б – с первым уровнем КБ

Стоит заметить, что жесткие ограничения на связь являются причиной значительного понижения эффективности оператора скрещивания. В некоторых случаях вклад этого оператора в рост целевой функции настолько мал, что в качестве одной из модификаций ГА для решения поставленной задачи предлагается исключение оператора скрещивания из работы алгоритма. В этом случае из-за отсутствия обмена данными между хромосомами

отпадает надобность в использовании принципа островов, а сам алгоритм приобретает черты оптимизационного алгоритма типа «hill climbing». Подробное исследование такого алгоритма планируется провести в дальнейших работах.

Представленную в работе часть системы управления, ответственную за нахождение наилучшего возможного маршрута в некоторых конкретных условиях, в итоге можно представить в виде блок-схемы, изображенной на рис. 4. Здесь зеленым цветом помечены начальные и завершающие действия работы модуля, блоки белого цвета отвечают за действия, связанные с расчетами на трехмерной карте рельефа дна, блоки желтого – за генерацию допустимых маршрутов, а голубым цветом помечены блоки, относящиеся непосредственно к работе генетического алгоритма.



Рис. 4. Блок-схема работы модуля планирования маршрутов на основе ГА

В качестве программной реализации данного подхода, была разработана моделирующая система со следующими функциональными возможностями:

- настройка ограничений движения АНПА (длина маршрута, обеспечение связи);
- учет ограничений на движение аппаратов на трехмерном рельефе;
- введение запретных для движения и установки связи зон;
- выбор параметров ГА (длина хромосом, размер популяции, количество островов);
- симуляция выполнения группой миссии по построенному маршруту.

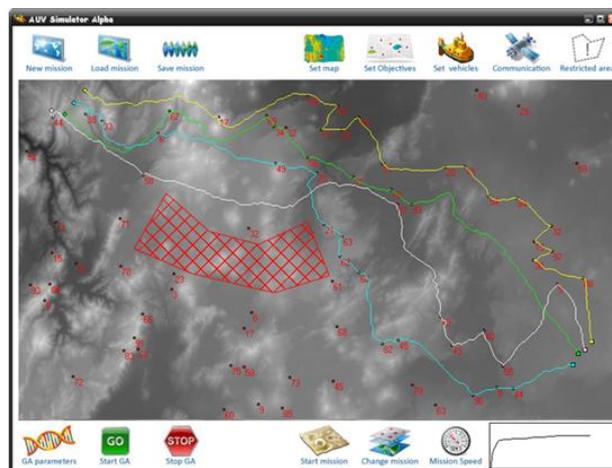
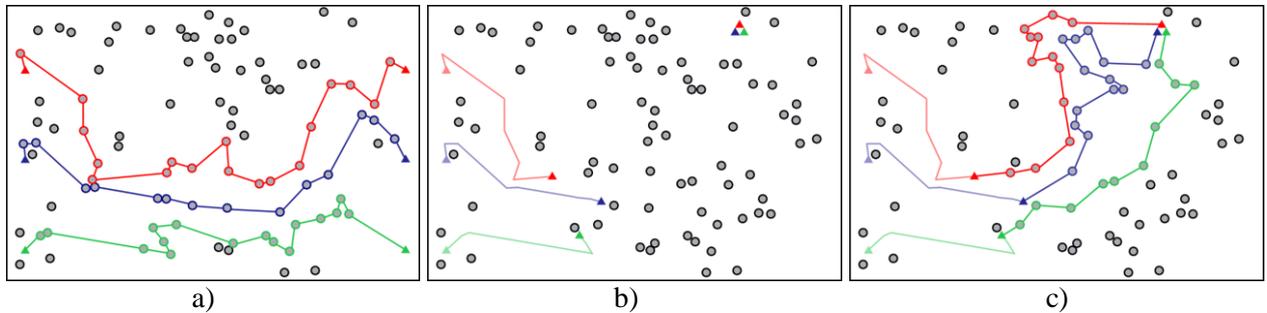


Рис. 5. Пример построенного маршрута группы АНПА в окне программы-симулятора

Тестовый пример выполнения группой из трех АНПА миссии с динамическими условиями схематически изображен на рис. 6. При прохождении по заранее построенному маршруту (рис. 6, а), аппаратам в определенный момент времени (рис. 6, б) были переданы новые координаты точек завершения миссии, что немедленно повлекло за собой перепланирование маршрута в новых условиях (рис. 6, с).



**Рис. 6.** Выполнение группой АНПА динамической миссии

Рассмотренная в докладе модификация генетического алгоритма, представленного в [1], новые эвристики и механизмы адаптации для учета формы рельефа дна позволяют не только повысить эффективность работы всего алгоритма, но и учитывать новые факторы динамики, обусловленные неопределенностью и изменчивостью подводной среды.

Работа выполнена при поддержке Президиума СО РАН (проект №45) гранта РФФИ (проект 08-08-92208ГФЕН-а, проект 11-07-00655-а).

## Литература

1. Бычков И.В., Кензин М.Ю., Максимкин Н.Н., Хмельнов А.Е., Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Ситуационное управление группировкой автономных подводных роботов на основе генетических алгоритмов // Подводные исследования и робототехника. 2009. №2/8. С. 34-43.
2. Wu X., Zeng Z., Zhu J., Allen R. GA-based path planning for multiple AUVs // International Journal of Control, Vol. 80, No. 7. July 2007. P. 1180-1185.
3. Moura A., Rijo R., Silva P., Crespo S., A multi-objective genetic algorithm applied to autonomous underwater vehicles for sewage outfall plume dispersion observations // Applied Soft Computing, 10 (2010). P. 1119-1126.
4. Tin C., Robust Multi-UAV Planning in Dynamic and Uncertain Environments // The University of Hong Kong, 2002.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДВИЖУЩИХСЯ ГРУППИРОВОК АВТОНОМНЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

**Р.И. Козлов, Н.Н. Максимкин, С.А. Ульянов**

Институт динамики систем и теории управления СО РАН  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова 134, а/я 292, тел. (3952) 427100, e-mail: mnn@icc.ru

**Л.В. Киселев**

Институт проблем морских технологий ДВО РАН  
690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел./факс: (423) 2432416,  
e-mail: kiselev@marine.febras.ru

В докладе для задачи управления конфигурациями группировок автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) рассматривается математическая формализация, включающая общую динамическую модель формаций движущихся объектов с децентрализованным управлением и определение понятия их устойчивости. Для анализа введенного свойства используются условия диссипативности многокомпонентных систем, основанные на построении вектор-функций Ляпунова. Представлены сведения о пакете прикладных программ для исследования динамики нелинейных систем с неопределенностями и результаты его применения к модели управления группой АНПА.

При выполнении групповых миссий АНПА одна из важных задач состоит в управлении конфигурацией группы (относительного расположения объектов в пространстве), поддержании конфигурации при маневрировании, а также перемещением группы по предписанным траекториям или при выборе оптимального маршрута следования. Важной проблемой управления группами АНПА является обеспечение устойчивости конфигураций при наличии навигационных и динамических ошибок и ограничений на ресурсы управления [1, 2].

Одним из возможных способов обеспечения устойчивости конфигурации группового движения является управление по принципу «лидер-ведомый», когда все объекты связаны попарно этим отношением. Ведомые управляют своим движением на основе измерения (или другой доступной информации) параметров собственного движения, а также движения своего лидера (лидеров). Задача состоит в обеспечении (с определенной точностью) заданных навигационных и динамических параметров, определяющих желаемую конфигурацию группировки. Один из объектов не является ведомым ни в одной паре, так что он есть лидер всей формации и задает ее движение в целом. Его маневры, ограниченные некоторыми пределами, являются причиной непрерывного нарушения желаемой конфигурации, которое отрабатывают ведомые. Необходимо также устранить или уменьшить начальные отклонения от желаемой конфигурации аппаратов за ограниченный промежуток времени.

В предположении, что отношения «лидер-ведомый» являются односторонними (граф отношений «лидер-ведомый» не содержит замкнутых контуров), в докладе рассматривается общая математическая модель формаций с децентрализованным управлением [3]. Дается строгое определение желаемой динамики в виде свойств внутренней робастной устойчивости или диссипативности конфигураций, которые в отличие от большинства известных постановок задач устойчивости формаций, ориентированных в основном на линейные модели, учитывают неполноту измерения параметров собственного и взаимного движения объектов, погрешности, ограниченность управления и измерителей, неопределенности объектов и внешние возмущения.

В качестве «инструмента» анализа диссипативности и синтеза стабилизирующих управлений, гарантирующих нужное качество исследуемых систем, используется метод векторных функций Ляпунова (ВФЛ) [4-6]. С использованием результатов этих работ и результатов по качественной теории квазимоноотонных дифференциальных уравнений [7], получен новый конструктивный критерий наличия свойства диссипативности для многокомпонентных систем с каскадной структурой связей подсистем. Данный подход может быть использован и для нахождения количественных оценок показателей диссипативности, в том числе оценок точности.

Для широкого класса непрерывных и непрерывно-дискретных управляемых систем процедуры анализа свойства диссипативности реализованы в программном пакете ВФЛ-РЕДУКТОР [8-9]. Он распространяется на системы с типовыми и полиномиально или монотонно ограниченными нелинейностями и неопределенностями в описаниях объектов, исполнительных органов и измерителей, постоянно действующими возмущениями.

Комплекс ВФЛ-РЕДУКТОР позволяет исследовать нелинейные системы, возмущенное движение которых (вместе с наблюдателями состояния и возмущений, динамикой регулятора и элементов системы управления) описывается дифференциальными уравнениями вида

$$(J + \Delta J(t, x))\dot{x} = (A + \Delta A(t, x))x + (B + \Delta B(t, x))u + GF(t, x, u) + H\Phi(t, x, u), \quad x \in R^n, \quad (1)$$

$$u = \varphi(\cdot, \sigma) \in R^m, \quad \sigma = C\psi(\cdot, \eta) \in R^m, \quad \eta = Dx \in R^l, \quad x = x(t). \quad (2)$$

Здесь  $\Delta J(\cdot)$ ,  $\Delta A(\cdot)$ ,  $\Delta B(\cdot)$ ,  $F(\cdot)$ ,  $\Phi(\cdot)$  – функции, задающие неопределенности и нелинейности объекта, внешние и другие возмущения, для которых предполагаются известными лишь ограничения  $|J^{-1}\Delta J(\cdot)| \leq J^0$ ,  $|\Delta A(\cdot)| \leq A^0$ ,  $|\Delta B(\cdot)| \leq B^0$ ,  $|F(\cdot)| \leq U(|\theta|) \in R^p$ ,  $\theta = \Theta x \in R^q$ ,  $|\Phi(\cdot)| \leq \Phi^0 \in R^r$  (неравенства между матрицами (векторами), модули понимаются как поэлементные);  $J, A, B, G, H, C, D, J^0, A^0, B^0, \Theta, \Phi^0$  – постоянные матрицы и векторы соответствующих размерностей;  $U$  – неубывающая, полунепрерывная сверху функция,  $U(0) = 0$ . Функции  $\varphi(\cdot)$ ,  $\psi(\cdot)$  задают характеристики исполнительных органов и измерителей с учетом их нелинейностей, погрешностей, неопределенности, нестабильности, ограниченности сигналов (и др.) и считаются функциями класса  $SN$  [5], содержащего многие типовые нелинейности, нелинейности стандартного или расширенного секторов абсолютной устойчивости и определяемого соотношениями

$$\min \left\{ K_\sigma (\sigma - \sigma^0) - K_\sigma^0 |\sigma|; K_\sigma \bar{\sigma} \right\} \leq \varphi(\cdot, \sigma) \leq \max \left\{ K_\sigma (\sigma + \sigma^0) + K_\sigma^0 |\sigma|; -K_\sigma \bar{\sigma} \right\} \quad (0 \leq \sigma^0 < \bar{\sigma} \leq \infty).$$

В случае цифрового управления, наряду с непрерывным объектом (1), в котором управление  $u = u_k$  кусочно-постоянно при  $t \in T_k = [t_k, t_{k+1})$ ,  $t_{k+1} - t_k = h > 0$  ( $h$  – шаг управления),  $k = 0, 1, 2, \dots$ ,  $u_k = \varphi(\cdot, \sigma_k) \in R^m$ ,  $\sigma_k = Cz_k \in R^m$ , структура системы включает дискретный (динамический) регулятор, описываемый разностным уравнением

$$z_{k+1} = A_d z_k + B_d u_{dk} + \sum_{i=1}^{\mu} C_d^i \psi_i(\cdot, \eta_{ik}) + H_d \Phi_{dk}(\cdot), \quad z_k \in R^{n_d}, \quad u_{dk} = \varphi_d(\cdot, \sigma_{dk}) \in R^{m_d}, \quad (3)$$

$$\sigma_{dk} = \sum_{i=1}^{\mu} C_{d\eta}^i \psi_i(\cdot, \eta_{ik}) + C_{dz} z_k \in R^{m_d}, \quad \eta_{ik} = D_i x_{ik} \in R^{l_i}, \quad x_{ik} = x(t_{k_i}), \quad t_{k_i} = t_k + \tau_i, \quad \tau_i \leq h.$$

Здесь  $i = \overline{1, \mu}$ ,  $\mu \geq 1$  – количество дискретных измерений, используемых на такте управления (глубина памяти),  $t_{k_i}$  – моменты этих измерений (с учетом возможных запаздываний в обработке измерений);  $\varphi_d(\cdot) \in SN$ ,  $\psi_i(\cdot) \in SN$ ;  $|\Phi_{dk}(\cdot)| \leq \Phi_d^0 \in R^{r_d}$ ;  $A_d, B_d, H_d, C_{d\eta}^i, C_{dz}, C_d^i, D_i, \Phi_d^0$  – постоянные матрицы и векторы соответствующих размерностей.

К особенностям системы (1)-(3) можно отнести учет возможных запаздываний в обработке измерений и использование нескольких измерений, полученных на текущем такте управления, при формировании управления на следующем такте.

Для систем (1)-(2) и (1)-(3) пакет программ ВФЛ-РЕДУКТОР позволяет решать следующие задачи: исследование на наличие свойства устойчивости (диссипативности), вычисление количественных оценок основных прямых показателей динамического качества (предельной точности стабилизации, областей притяжения, диссипативности и достижимости, максимальных отклонений, времени регулирования до заданной точности и др.), а также синтез параметров, обеспечивающих наилучшие (заданные) характеристики систем.

В основе пакета лежит метод исследования нелинейных динамических систем в классе сублинейных ВФЛ типа «модуль линейных форм» (векторная норма). Для построения ВФЛ и соответствующих им систем сравнения (СС), проверки нужных динамических свойств и нахождения оценок применяются модификации алгоритмов, изложенных в работах [5,10,11].

Пакет ВФЛ-РЕДУКТОР применен в исследовании модели децентрализованного автономного (без обмена информацией) управления группировкой движущихся подводных роботов со структурой связей, имеющей вид дерева. Лидер группировки задает ее движение в целом и может совершать заранее не известные остальным членам группы маневры. Ведомые управляют своим вектором скорости так, чтобы удерживать заданную дистанцию до своего лидера и угол относительно него (угол пеленга).

Упрощенная математическая модель динамики группировки может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned}\dot{\varphi}_i &= \omega_i, \\ \dot{s}_i &= v_{i_j} \cos(\varphi_{i_j} - \varphi_i + \delta_i) - v_i \cos \delta_i, \\ s_i \dot{\delta}_i &= s_i \omega_i + v_i \sin \delta_i - v_{i_j} \sin(\varphi_{i_j} - \varphi_i + \delta_i), \\ m_i \dot{v}_i &= u_i + r_i + p_i, \\ J_i \dot{\omega}_i &= u_i^\varphi + r_i^\varphi + p_i^\varphi; \quad i = \overline{1, N},\end{aligned}$$

где  $v_i$  – абсолютная скорость центра масс  $i$ -го объекта,  $\varphi_i$  – угол между направлением вектора скорости и осью абсцисс,  $\omega_i$  – угловая скорость,  $\delta_i$  – угол между вектором скорости и направлением на центр масс лидера (пеленг),  $s_i$  – расстояние между центрами масс объекта и его лидера (дистанция)  $m_i, J_i$  – масса и момент инерции  $i$ -го объекта,  $u_i, u_i^\varphi$  – линейное и угловое управления (тяга и момент);  $r_i = r_i(v_i, \dots)$ ,  $r_i^\varphi = r_i^\varphi(\omega_i, v_i, \dots)$  – силы сопротивления движению;  $p_i(\dots), p_i^\varphi(\dots)$  – силы и моменты, рассматриваемые как возмущения (многоточием обозначена совокупность переменных, включая  $t$ , от которых могут зависеть названные величины),  $i_j \in \overline{0, i-1}$  – индекс лидера  $i$ -того объекта. В желаемой конфигурации группы  $s_i = s_i^*$ ,  $\delta_i = \delta_i^*$ , где  $s_i^*, \delta_i^*$  – заданные номинальные (желаемые) значения дистанций и углов пеленга.

Предполагается, что каждый объект может измерять параметры собственного движения:  $v_i, \varphi_i, \omega_i$ . Измерение относительного движения каждого члена группы является неполным – измеряются только  $s_i, \delta_i$ . Управление строится с использованием измерителей дистанций и углов пеленга, а также наблюдателей первого порядка для получения оценок скоростей (неполнота измерений). Рассмотрены варианты как с непрерывным, так и дискретным управлением.

Задача исследования диссипативности состоит в оценке допустимой области начальных состояний, оценке предельной области (точности стабилизации группировки); иначе это может быть

оценка достижимости требуемой точности при заданном уровне допустимых возмущений и неопределенностей либо синтеза параметров (коэффициентов обратной связи, параметров наблюдателей), обеспечивающих нужные или наилучшие оценки и т.д.

С помощью пакета программ «ВФЛ-РЕДУКТОР» для модельной группировки «малых» АНПА с некоторыми заданными конструктивными и динамическими параметрами были проведены численные расчеты по оценке устойчивости групповых конфигураций, имеющих вид «шеренги».

Конфигурации такого типа естественным образом могут быть использованы при решении обзорно-поисковых и обследовательских задач группой подводных роботов. Традиционно эти задачи решаются путем покрытия исследуемой области акватории сетью траекторий и многократного прохождения группы заданными галсами. В работе не рассматривается задача формирования траекторий, а исследуются лишь вопросы сохранения конфигурации группы при движении галсами.

Наибольшую трудность вызывает задача управления группой в случае формирования (выстраивания) конфигурации, когда требуется уменьшить значительные начальные отклонения по дистанции и углу пеленга, а также в случае выполнения сложных маневров, например, таких, как разворот. Для каждого из случаев был выполнен синтез параметров управления и проведено численное моделирование полученной системы стабилизации. На рис. 1 представлен вариант полученных моделированием траекторий движения АНПА при формировании конфигурации «шеренга». Предполагается, что лидер формации  $A$  движется прямолинейно с постоянной скоростью; лидером для аппарата  $B$  является аппарат  $A$ , а лидером для  $C$  –  $B$ .

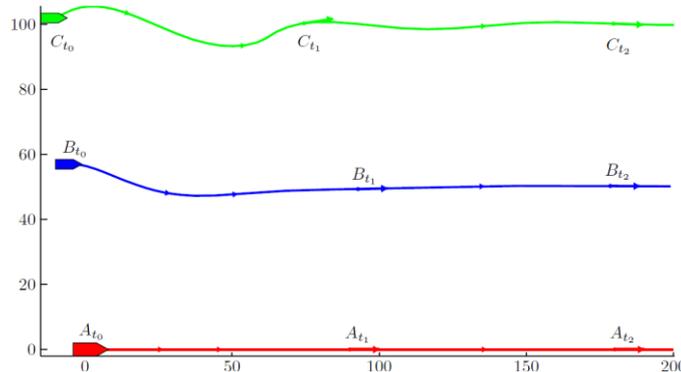


Рис. 1. Траектории движения группы АНПА при формировании конфигурации типа «шеренга»

Вариант траекторий движения АНПА в шеренге при развороте представлен на рис. 2. Соответствующие графики отклонений по дистанции и углу пеленга для ведомых  $B$  и  $C$  на участке перехода от прямолинейного движения к развороту представлены на рис. 3.

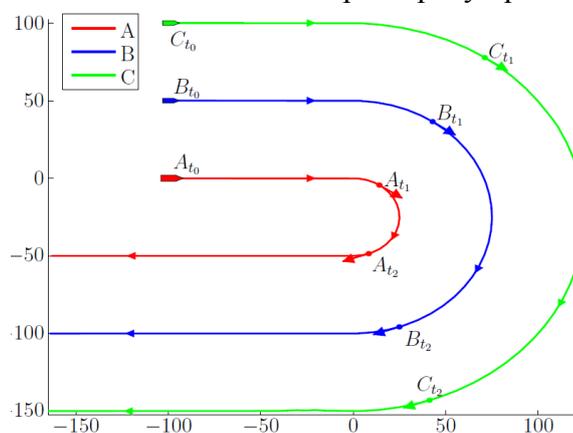
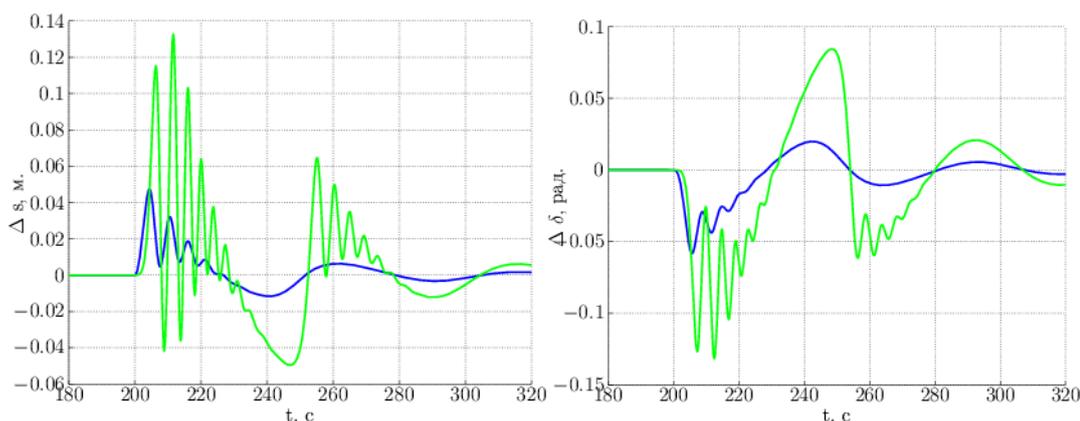


Рис. 2. Траектории движения группы АНПА при развороте



**Рис. 3.** Графики отклонений по дистанции и углу пеленга при развороте

Работа выполнена при поддержке Президиума СО РАН (проект №45) гранта РФФИ (проект 08-08-92208ГФЕН-а).

## Литература

1. Casalino G., Aicardi M., Bicchi A., Balestrino A. Closed loop Steering and Patch-Following for Underactuated Marine Vehicles: a Simple Lyapunov Function based Approach // IEEE Robotics and Automation Magazine. 2005. № 2(1). P. 27-35.
2. Lapierre L., Soetanto D. Nonlinear Patch-Following Control of an AUV // Ocean Engineering. 2007. № 34. P. 1734-1744.
3. Козлов Р.И., Максимкин Н.Н., Киселев Л.В., Ульянов С.А. Устойчивость конфигураций группового движения автономных подводных роботов в условиях неопределенности // Подводные исследования и робототехника. 2010. № 1(9). С. 40-46.
4. Воронов А.А., Матросов В.М. (ред.) Метод векторных функций Ляпунова в теории устойчивости. – М.: Наука, 1987. – 312 с.
5. Матросов В.М., Козлов Р.И., Матросова Н.И. Теория устойчивости многокомпонентных нелинейных систем. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 184 с.
6. Васильев С.Н. Метод редукции и качественный анализ динамических систем, I-II // Изв. РАН. Сер. Теория и системы управления. 2006. 1. С. 21–29; 2. С. 5–17.
7. Козлов Р.И. Теория систем сравнения в методе векторных функций Ляпунова. Новосибирск: Наука, 2001. – 137 с.
8. Козлов Р.И., Ульянов С.А., Хмельнов А.Е. Программный модуль для качественного исследования непрерывно-дискретных динамических систем ВФЛ-РЕДУКТОР-НД. Свид-во об офиц. регистрации программы для ЭВМ \No~2007613833 от 07.09.2007.
9. Козлов Р.И., Ульянов С.А., Хмельнов А.Е. Программный модуль для качественного исследования непрерывных динамических систем ВФЛ-РЕДУКТОР-Н. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ \No~2007613832 от 07.09.2007.
10. Козлов Р.И., Бурносков С.В. Исследование динамики нелинейных систем с неопределенностями и возмущениями методом ВФЛ // Известия РАН. Техническая кибернетика, 1994. № 4. С. 56-63; № 6. С. 117-125.
11. Козлов Р.И., Козлова О.Р. Исследование устойчивости нелинейных непрерывно-дискретных моделей экономической динамики методом ВФЛ // Известия РАН. Теория и системы управления. 2009. №2. С. 104-113; №3. С. 41-50.

# СУПЕРВИЗОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОЙ АНПА КАК ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНОЙ СИСТЕМОЙ\*

**Н.Н. Максимкин, Н.В. Нагул**

Институт динамики систем и теории управления СО РАН  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134, тел./факс: (3952) 453005,  
e-mail: sapling@icc.ru

Проблема управления группой АНПА при исследовании акватории значительных размеров рассматривается как задача супервизорного управления дискретно-событийной системой. Обсуждаются алгоритмы, позволяющие достичь равномерного распределения АНПА по областям в условиях децентрализованного управления, и их свойства.

Поведение группы автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) при исследовании некоторой акватории можно представить как функционирование *дискретно-событийной системы* [1, 2]. Дискретно-событийные системы (ДСС) – это модели динамических систем, в которых изменение состояния системы происходит вследствие возникновения некоторых событий через (как правило, нерегулярные) промежутки времени. В качестве событий выступают, например, перемещения аппарата из одной области акватории в другую, смена курса, обнаружение того или иного объекта в исследуемой области, выход из строя части оборудования АНПА и т.п. Более формально, (логической) дискретно-событийной системой называется [3] пятерка

$$G = ( X, E, \{ f_e \}_{e \in E}, g, E_v ).$$

Здесь  $X$  – множество состояний системы;  $E$  – множество событий, элементы которого обозначаются буквой  $e$  с некоторым индексом;  $g : X \rightarrow 2^E \setminus \{\emptyset\}$  – так называемая *функция возможностей*:  $g(x)$  есть множество событий, которые могут произойти, если система находится в состоянии  $x \in X$ . Описание логических ДСС не содержит времени в привычном смысле, как, например, системы дифференциальных уравнений. Однако некоторым аналогом временной переменной является счетчик, показывающий, сколько событий уже произошло и, следовательно, сколько раз менялись состояния:  $x_k \in X$  представляет собой состояние ДСС в момент «времени»  $k \in N$ , где  $N$  – натуральный ряд.

Для каждого  $e \in E$  вводится оператор  $f_e : X \rightarrow X$ , описывающий перевод системы из одного состояния в другое в результате реализации события  $e$ . Значение  $f_e(x)$  определено только тогда, когда  $e \in g(x)$ . Если в момент  $k$  происходит событие  $e_k \in E$  (при условии, что  $e_k \in g(x_k)$ ), то следующее состояние  $x_{k+1}$  задается применением оператора  $f_{e_k}$ , т.е.  $x_{k+1} = f_{e_k}(x_k)$ .

Любая последовательность  $\mathbf{x} = \{x_0, x_1, x_2, \dots\} \in X^N$  такая, что для всех  $k$   $x_{k+1} = f_{e_k}(x_k)$ , где  $e_k \in g(x_k)$ , называется *траекторией состояний (фазовой траекторией)*. *Событийной траекторией* называется последовательность  $\mathbf{e} = \{e_0, e_1, e_2, \dots\} \in E^N$ , для которой существует траектория состояний  $\mathbf{x} \in X^N$  (где для всех  $k$   $e_k \in g(x_k)$  и  $x_{k+1} = f_{e_k}(x_k)$ ). Следовательно, каждому начальному состоянию  $x_0$  и каждой событийной траектории  $\mathbf{e}$ ,

---

\* Работа поддержана совместным интеграционным проектом №45 СО РАН.

такой, что  $e_0 \in g(x_0)$ , определяющей порядок применения операторов  $f_{e_k}$ , соответствует единственная фазовая траектория (но, в общем случае, не наоборот). Множество всех событийных траекторий обозначается буквой  $E$ ,  $E \subset E^N$ . Через  $E_v \subset E \subset E^N$  обозначим множество *действительных событийных траекторий*, т.е. таких, которые физически возможны в системе. Таким образом, даже если  $x_k \in X$  и  $e_k \in g(x_k)$ , событие  $e_k$  может произойти, только если оно лежит на действительной событийной траектории.

Как правило, при функционировании ДСС некоторые последовательности событий являются нежелательными. Для их исключения, т.е. удовлетворения набору ограничений на поведение ДСС (также называемого спецификацией), необходимо ею управлять. Целями управления при этом могут выступать обеспечение живучести, безопасности, предотвращение блокирования системы, а также другие ее свойства. Для обеспечения управления ДСС часто используется получившее сейчас широкое распространение автоматическое (т.е. не предполагающее участия человека-оператора) *супервизорное управление*, предложенное в [4], а затем развитое многими авторами. Сущность супервизора можно наглядно продемонстрировать на примере ДСС, моделирующей в виде конечного автомата, в каждом состоянии которого существуют несколько вариантов переходов. Автомат является *объектом* управления. *Супервизор* реализуется автоматом, переходы которого определены однозначно. Автоматы имеют единый алфавит выходных символов, разделяемых на управляемые и неуправляемые. Автомат объекта генерирует язык в этом алфавите, автомат супервизора принимает язык, генерируемый объектом. Для того чтобы замкнутая система объект-супервизор удовлетворяла наложенным спецификациям, состояние супервизора определяет те управляемые символы языка объекта (т.е. события), которым будет разрешено возникнуть.

Супервизорное управление позволяет решать разнообразные задачи, но в контексте группового управления АНПА можно отметить такие постановки, как координирование совместных действий аппаратов разного назначения, например, аппаратов, осуществляющих координацию, и аппаратов, непосредственно проводящих исследовательские работы.

Для исследования группой АНПА акватории значительных размеров, как правило, оказывается необходимым разделить ее на несколько *областей*. Предположим, что в акватории расположены некоторые объекты, способные отдавать АНПА управляющие сигналы, – *координаторы*. В качестве таких координаторов могут выступать специализированные подводные аппараты, донные буи (маяки), надводные аппараты, корабли и пр. Координаторы закрепляются за областями так, чтобы иметь возможность регулировать в них число АНПА, отдавая аппаратам команды переместиться из одной области в другую. В [1] предлагается каждой области и координаторам приписывать номера таким образом, чтобы координатор с номером  $i$  мог перемещать АНПА из области  $i$  в область  $i+1$ ,  $i = \overline{1, N-1}$ , где  $N$  – общее число областей. Координатор  $N$  перемещает АНПА из области  $N$  в область  $1$ . Сеть «область-координатор» формирует ориентированное кольцо, причем число координаторов и областей совпадает (рис. 1). Такая топология обладает рядом существенных недостатков. Например, в случае необходимости выровнять число аппаратов в областях с номерами  $1$  и  $N$ , необходимо провести «лишние» аппараты по всем областям с номерами  $2, \dots, N-1$ , вместо того чтобы сразу направить аппараты из области  $1$  в область  $N$ . Кроме того, равное число координаторов и областей зачастую нереализуемо на практике.

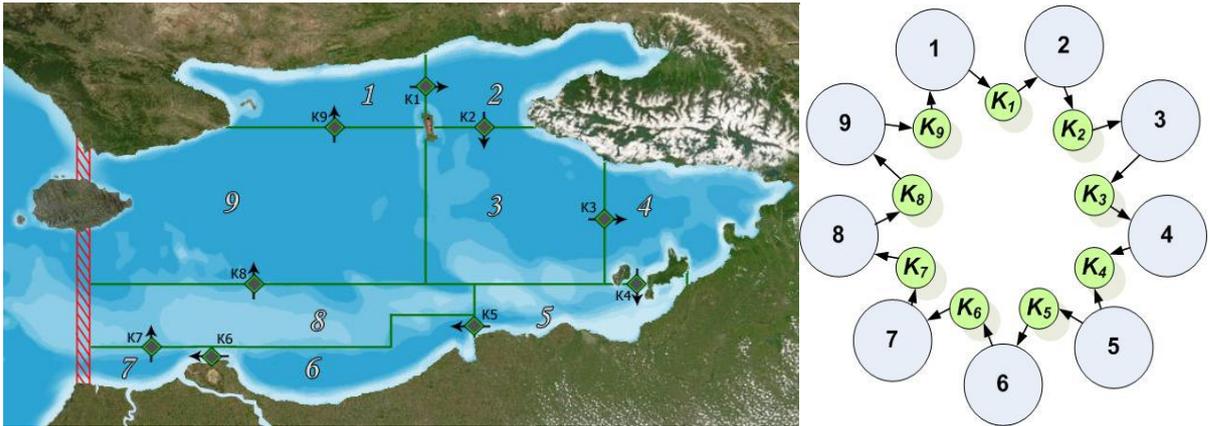


Рис. 1. Число координаторов совпадает с числом областей

Для решения этой проблемы в [2] предложен алгоритм, опирающийся на возможность использования «коротких» путей в кольце, образуемом областями (рис. 2). Пусть  $A = \{1, \dots, N_a\}$  – совокупность всех областей, где  $N_a$  – их общее число. Области будем обозначать переменными  $a$ .  $C = \{1, \dots, N_c\}$  – совокупность координаторов,  $N_c$  – их количество, координаторы обозначаются буквами  $c$ . Обозначим через  $C(a)$  координатора, обладающего правом перемещать АНПА из области  $a$ . Для каждого  $a$  он определен единственным образом. Обозначим  $S(c) \subset A$  множество областей, из которых  $C(a)$  может удалять АНПА, т.е.  $S(c) = \{a \in A : C(a) = c\}$ . Обозначим через  $D(c)$  множество областей, в которые координатор  $c$  может добавлять АНПА,  $D(c) = \{a \in A : C(a-1) = c\}$ , т.е. если координатор может удалять АНПА из области  $a$ , то он может добавлять АНПА в область  $a+1$ .

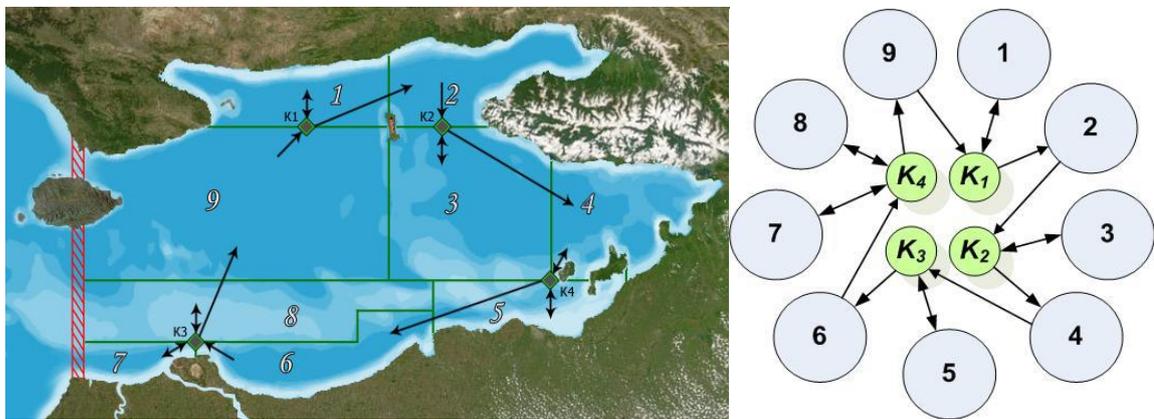


Рис. 2. Число координаторов меньше числа областей. Возможны сокращения путей в кольце, образуемом областями

Особенностью задачи является тот факт, что в распоряжении каждого координатора имеются лишь приблизительные оценки числа аппаратов в контролируемых им областях. Эти оценки, как правило, отличаются от реальных значений, поскольку сеансы связи координатора с аппаратами разнесены во времени, другие координаторы обладают возможностью изменять число АНПА в соответствующих областях, а непосредственная связь между координаторами отсутствует. Поэтому в рассматриваемой системе будем рассматривать два типа событий: перемещение координаторами аппаратов из одной области в другую и изменение оценок координаторами числа аппаратов в соответствующих областях.

Пусть  $e_c^{\alpha a \rightarrow a^*}$  обозначает частичное событие, состоящее в перемещении координатором  $c = C(a)$   $\alpha$  аппаратов из области  $a$  в область  $a^*$ ;  $e_c^{\beta a}$  – обнаружение координатором  $c$  в области  $a$  присутствия  $\beta$  аппаратов, ранее не внесенных им в список подчиненных ему аппаратов;  $e_c^{\gamma a}$  – обнаружение координатором  $c$  в области  $a$  отсутствия  $\gamma$  аппаратов, находящихся в списке подчиненных ему аппаратов.

Тогда множество событийных траекторий  $E$  определяется как объединение нижеследующих множеств за вычетом пустого множества:

$$P(\{e_c^{\alpha a \rightarrow a^*} : \alpha \in N, c = \overline{1, N_C}, a \in S(c)\}),$$

$$P(\{e_c^{\beta a} : \beta \in N, c = \overline{1, N_C}, a \in S(c)\}),$$

$$P(\{e_c^{\gamma a} : \gamma \in N, c = \overline{1, N_C}, a \in S(c)\}),$$

где  $P(A)$  – множество всех подмножеств множества  $A$ .

Сеть координаторов представляет собой распределенный супервизор, состояния которого описываются вектором  $x_c(k) = [\tilde{x}_{a_1}^{c_1}(k), \dots, \tilde{x}_{a_j}^{c_j}(k)]^T$ , где  $\tilde{x}_a^c(k)$  – оценка координатором  $c$  числа АНПА в области  $a$  в момент «времени»  $k$ , и эта переменная определена тогда и только тогда, когда  $c \in C(a) \cup C(a-1)$ . Фактическое число аппаратов в каждой из областей считаем состоянием объекта управления в теории супервизорного управления:  $x_p(k) = [x_1(k), \dots, x_{N_a}(k)]^T$ . Состояние замкнутой системы объект-супервизор описывается вектором  $x(k) = [x_p^T(k), x_c^T(k)]^T$ , а  $X = N^{|x|}$  – множество состояний системы. Для топологии с равным числом областей и координаторов  $X = N^{3N_C}$ . Будем считать, что первоначально все координаторы располагают точными сведениями о количестве АНПА в подчиненных им областях.

Функция возможностей  $g : X \rightarrow 2^E \setminus \{\emptyset\}$  определяется следующим образом: если  $e(k) \in g(x)$ , то:

а) для каждого  $e_c^{\alpha a \rightarrow a^*} \in e(k)$  должны быть выполнены следующие условия:

- координатор  $c = C(a)$  перемещает АНПА из области  $a$  в область  $a^*$ , которая выбирается из принципа  $\tilde{x}_{a^*}^c(k) = \min_{a' \in D(c)} \tilde{x}_{a'}^c(k)$ ;

- в случае  $a^* \neq a+1$ :

• если  $\tilde{x}_a^c(k) \leq \tilde{x}_{a^*}^c(k) + 2$ , то  $\alpha = 0$ ;

• если  $\tilde{x}_a^c(k) \geq \tilde{x}_{a^*}^c(k) + 1$ , то  $1 \leq \alpha < \lfloor \frac{\tilde{x}_a^c(k) - \tilde{x}_{a^*}^c(k)}{2} \rfloor$ , где  $\lfloor x \rfloor$  – наибольшее целое число, меньшее или равное  $x$ ;

- в случае  $a^* = a+1$ :

• если  $\tilde{x}_a^c(k) \leq \tilde{x}_{a^*}^c(k)$ , то  $\alpha = 0$ ;

• если  $\tilde{x}_a^c(k) \geq \tilde{x}_{a^*}^c(k) + 1$ , то  $1 \leq \alpha < \lceil \frac{\tilde{x}_a^c(k) - \tilde{x}_{a^*}^c(k)}{2} \rceil$ , где  $\lceil x \rceil$  – наименьшее целое число, большее или равное  $x$ ;

б) каждый координатор перемещает аппараты только один раз за составное событие  $e(k)$ ;

с) для каждого  $e_c^{\beta_a} \in e(k)$  и  $e_c^{\gamma_a} \in e(k)$  должны быть выполнены оценки

$$\beta_a \leq x_a(k) - \tilde{x}_a^c(k), \forall a \in S(c),$$

$$\gamma_a \leq \tilde{x}_a^c(k) - x_a(k), \forall a \in D(c).$$

В качестве  $E_v$  будем рассматривать такие событийные траектории, при которых между сеансами связи всех АНПА с теми координаторами, которым они приписаны, проходит не более чем некоторый конечный отрезок времени  $T$ .

В каждый момент  $k$ , когда происходит событие  $e(k) \in g(x(k))$ , оно меняет состояние системы в соответствии с функцией  $x(k+1) = f(x(k), e(k))$ , определяемой правилами

$$x_a(k+1) = x_a(k) + \alpha_a^+(k) - \alpha_a^-(k),$$

$$\tilde{x}_a^c(k+1) = \tilde{x}_a^c(k) + \alpha_a^+(k) - \alpha_a^-(k) + \beta_a - \gamma_a,$$

где  $\alpha_a^+(k)$  – число АНПА, добавляемых в область  $a$ ,  $\alpha_a^-(k)$  – число АНПА, удаляемых из области  $a$ .

В отличие от работ [1, 2], покажем, как результаты теории устойчивости, адаптированные для ДСС, позволяют исследовать свойства рассмотренной модели. Предположим, что общее число аппаратов в системе остается неизменным. Тогда множество

$$X_I = \{x \in X : x_a \in \{m, m+1\} \text{ для любых } a \in A\},$$

где  $m = \lfloor \frac{L}{N_A} \rfloor$ , инвариантно и описывает равномерное распределение аппаратов по областям.

Обозначим через  $m(k) = \min_{a \in N_A} x_a(k)$  – минимальное число АНПА в каждой области в момент  $k$ . Аналогично, пусть  $M(k) = \max_{a \in N_A} x_a(k)$  – максимальное число АНПА в каждой области в момент  $k$ . Рассмотрим функцию  $V(x(k)) = M(k) - m(k)$ . Можно показать, что  $V(x(k))$  не возрастает с течением времени, и, кроме того, удовлетворяет всем условиям теоремы Э. Мишеля об устойчивости инвариантных множеств ДСС [3], откуда получаем следующую теорему.

**Теорема.** Для описанной модели замкнутое инвариантное множество  $X_I$  устойчиво по Ляпунову относительно  $E_v$ .

Естественным обобщением описанных моделей является назначение областям некоторых приоритетов – величин, определяющих долю от общего числа имеющихся в наличии аппаратов, которую следует направить в ту или иную область. В настоящее время авторами разрабатывается алгоритм перераспределения АНПА по областям, который обеспечивает равномерное распределение при наличии приоритетов областей.

## Литература

1. Moore B.J., Passino K.M. Decentralized Redistribution for Cooperative Patrol // Int. J. Robust Nonlinear Control. 2008. Vol. 18. P. 165-195.
2. Moore B.J., Passino K.M. Distributed Coordination Strategies for Wide-Area Patrol // J. Intell. Robot Syst. 2009. Vol. 56. P. 23-45.
3. Michel A.N., Kainig W.K., Bo H. Qualitative Theory of Dynamical Systems. N.Y.: Marcel Dekker, Inc., 2001. 706 p.
4. Ramadge P.J., Wonham W.M. Supervisory Control of Class of Discrete Event Processes // SIAM J. Control and Optimisation. 1987. №25 (1). P. 206-230.

# ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ ОБСЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ МОРСКОЙ СРЕДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРУППЫ АНПА

**И.Е. Туфанов, А.Ф. Щербатюк**

Институт проблем морских технологий ДВО РАН  
690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а,  
e-mail: scherba@marine.febras.ru

В работе рассмотрен алгоритм, предназначенный для выполнения группой АНПА поиска и оценки размеров локальных неоднородностей в заданной акватории. Особенностью предложенного подхода является то, что он позволяет не только локализовать, но также оценить 3D размеры локальной неоднородности и массу содержащегося в ней растворенного вещества. Приведены результаты моделирования работы алгоритма.

## Введение

Одной из важных задач морского экологического мониторинга является поиск и обследование локальных неоднородностей (ЛН) в толще воды. Такие ЛН могут иметь как естественное происхождение (поле фитопланктона), так и быть вызванными антропогенным влиянием (поле загрязнения). Полагается, что на АНПА установлен датчик, позволяющий регистрировать концентрацию заданного вещества. Если концентрация вещества в некоторой точке превосходит некоторый порог, то предполагается, что эта точка принадлежит ЛН. Задача заключается в локализации ЛН и оценке ее размеров. Данная информация является важной для построения корректных моделей как при планировании рыбопромысловой деятельности в случае фитопланктона, так и при организации контр мероприятий в случае загрязнения водных акваторий.

Задаче обследования ЛН посвящены некоторые исследования и публикации. Например, в докладе [1] сравниваются параметрический и непараметрический подходы для оценки характеристик ЛН. В работах [2] и [3] описаны алгоритмы формирования траектории движения АНПА, позволяющие построить локальную аппроксимацию границы области ЛН или оценить направление распространения шлейфа.

В настоящей работе рассмотрен алгоритм, предназначенный для выполнения группой АНПА поиска и оценки размеров ЛН в заданной акватории. Алгоритм основан на централизованном управлении. При этом предполагается наличие постоянной акустической связи каждого подводного аппарата с центральным узлом, которым может быть как судовой пост оператора, так и один из АНПА. Все АНПА оснащены навигационной системой, обеспечивающей требуемую точность определения местоположения АНПА. Особенностью предложенного подхода является то, что он позволяет не только локализовать, но также оценить 3D размеры ЛН и массу содержащегося в ней растворенного вещества.

## Описание алгоритма

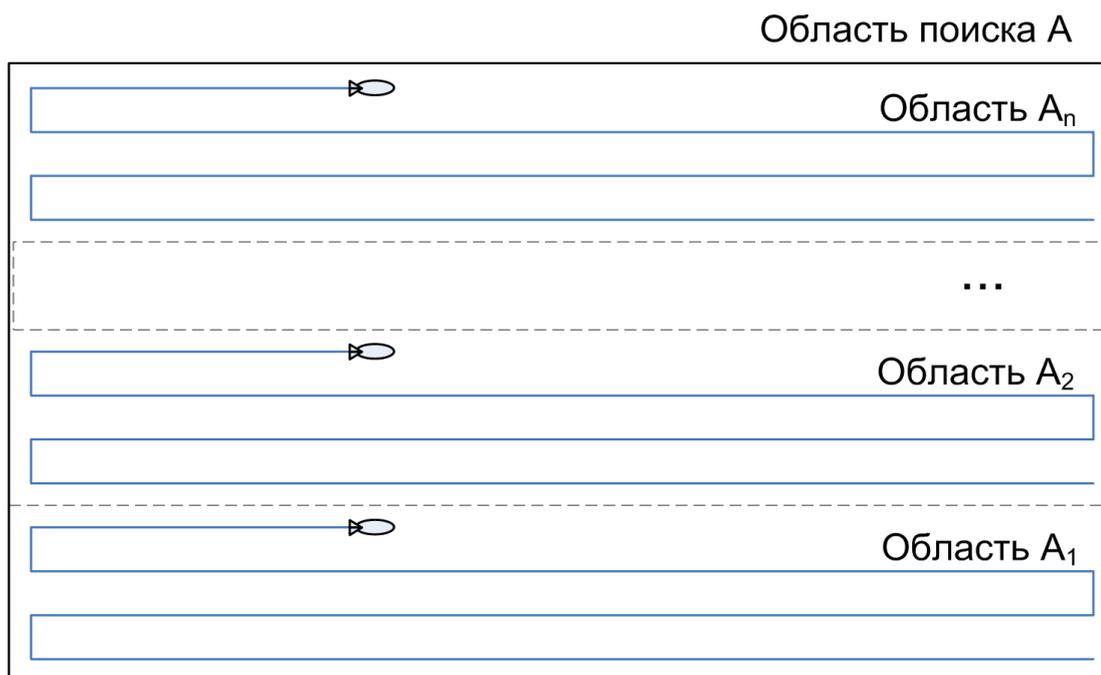
Положим, что задана некоторая прямоугольная область

$$A = \{(x, y) \mid x_1 \leq x \leq x_2, y_1 \leq y \leq y_2\},$$

которую следует обследовать с помощью группы из  $n$  подводных аппаратов на предмет наличия ЛН. Алгоритм обследования включает три этапа.

**Этап 1.** Предварительный осмотр «грубым» меандром. Область  $A$  разбивается на  $n$  частей в соответствии с числом имеющихся АНПА (рис. 1):

$$A_i = \{(x, y) \mid x_1 \leq x \leq x_2, y_1 + \frac{i-1}{n}(y_2 - y_1) \leq y \leq y_1 + \frac{i}{n}(y_2 - y_1)\}.$$



**Рис. 1.** Предварительный осмотр заданной области «грубым» меандром с помощью группы АНПА

Сформированные прямоугольные области распределяются между подводными аппаратами и организуется покрытие каждой области  $A_i$  горизонтальным меандром с шагом  $h$  между галсами. Шаг  $h$  выбирается равным половине размера минимальной области, которая может рассматриваться как ЛН.

**Этап 2.** На основе произведенных всеми подводными аппаратами измерений создается список точек пересечения границ ЛН. В данных точках траектории АНПА пересекают изолинии, соответствующие заданному порогу измеряемого параметра водной среды. На основе данного набора точек грубо формируются связные области ЛН и оценивается их количество. Для уточнения размеров и местоположения, обнаруженные области ЛН распределяются между имеющимися АНПА с учетом минимизации суммарного пройденного всеми АНПА пути.

Используется алгоритм формирования связных областей по набору параллельных сечений областей ЛН траекториями АНПА. Каждый принадлежащий области ЛН отрезок предыдущего параллельного галса меандра (верхний отрезок) сопоставляется с каждым принадлежащим области ЛН отрезком текущего параллельного галса меандра (нижний отрезок). Считается, что два отрезка принадлежат одной области, если выполнено условие:

$$(A_1 - B_2) \cdot (A_2 - B_1) > 0,$$

где  $A_1, B_1$  и  $A_2, B_2$  – левые и правые границы верхнего и нижнего отрезков.

**Этап 3.** Организуется детальное обследование выделенных ЛН с целью уточнения их размеров и местоположения.

В настоящей работе для формирования траектории движения АНПА вдоль границ областей ЛН используется PD-регулятор. Для оконтуривания 3-х мерных областей возможно организовать локализацию границ ЛН на нескольких плоскостях фиксированной глубины. Однако при этом продолжительность операции будет приблизительно линейно возрастать с количеством таких плоскостей. Вместо этого предполагается выполнить оконтуривание ЛН для некоторого наиболее вероятного значения глубины  $d_0$ , которая пересекает интересующие нас области ЛН.

Каждый раз, когда заканчивается двумерное оконтуривание очередной ЛН, следует оценить ее объем и 3D форму. Для этого используется следующая процедура. Предположим,

что в процессе двумерного оконтуривания получена область  $\Omega$ . Затем находится пара наиболее удаленных друг от друга точек границы области  $\Omega$  ( $\mathbf{a}$  и  $\mathbf{b}$ ). Далее производится двумерное оконтуривание в вертикальной плоскости, проходящей через точки  $\mathbf{a}$  и  $\mathbf{b}$ . Таким образом, будет получено сечение искомой трехмерной области двумя перпендикулярными плоскостями.

Оценка объема области ЛН выполняется в системе координат, связанной с ЛН. При этом начало новой системы координат располагается в точке  $\mathbf{a}$ , ось  $OX$  направлена к точке  $\mathbf{b}$ , ось  $OY$  направлена перпендикулярно  $OX$  в горизонтальной плоскости и ось  $OZ$  направлена для получения правой тройки. Обозначим через  $A(x)$ ,  $C(x)$  и  $B(x)$ ,  $D(x)$  расстояния в горизонтальной и вертикальной плоскостях от точки  $(x, 0, 0)$  до границ области  $\Omega$ . Таким образом, перпендикулярная оси  $OX$  плоскость пересекает трехмерную область в четырех точках на удалении  $A(x)$ ,  $B(x)$ ,  $C(x)$  и  $D(x)$  в перечислении по часовой стрелке, если смотреть вдоль оси  $X$ .

Для определения объема ЛН необходимо аппроксимировать площадь фигуры для каждого фиксированного  $x$ , которая пересекается с осями в точках  $A(x)$ ,  $B(x)$ ,  $C(x)$ ,  $D(x)$ . Для этого можно выразить форму сечения функцией, заданной отдельно в каждой четверти в полярных координатах так, чтобы выполнялись условия:

$$\rho_{AB}(x, 0) = A(x), \rho_{AB}(x, \frac{\pi}{2}) = B(x) .$$

Этим условиям удовлетворяет, например, функция:

$$\rho_{AB}(x, \varphi) = \sqrt{A^2(x) \cos^2 \varphi + B^2(x) \sin^2 \varphi} .$$

Аналогично определив  $\rho_{BC}$ ,  $\rho_{CD}$  и  $\rho_{DA}$  получим в итоге аппроксимации для вычисления площадей сечений области ЛН плоскостями, перпендикулярными оси  $OX$ . Для оценки объема области ЛН затем используется численное интегрирование.

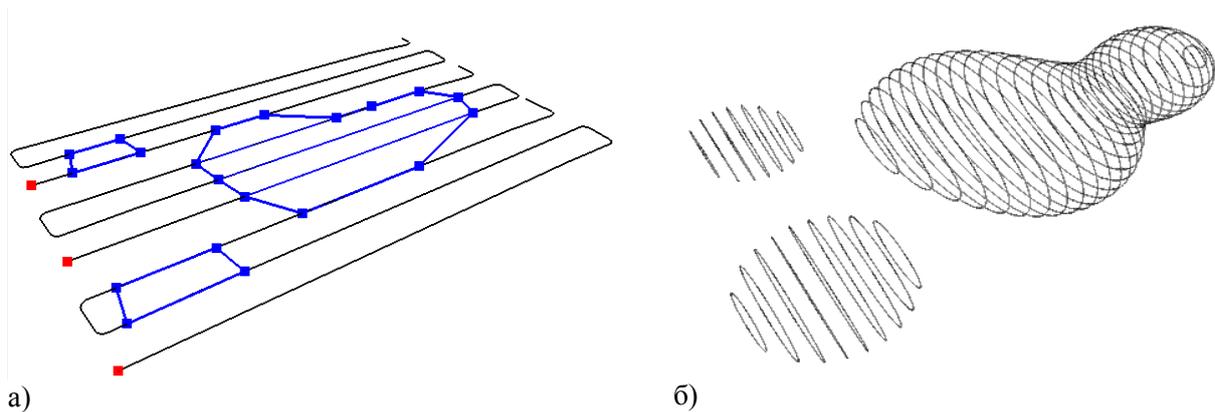
Для оценки количества растворенного в воде вещества подводные аппараты совершают дополнительные сквозные пересечения областей ЛН для оценки распределения концентрации растворенного вещества внутри областей ЛН. На основе полученной аппроксимации функции концентрации растворенного вещества внутри областей ЛН выполняется оценка количества содержащегося в области ЛН вещества также посредством численного интегрирования.

### Результаты компьютерного моделирования

Было произведено компьютерное моделирование описанных выше алгоритмов. Для перемещения аппарата использовалась кинематическая модель с ограниченной линейной скоростью и угловыми скоростями по курсу и дифференту. Для оконтуривания выявленных областей ЛН, как было упомянуто выше, использовался РД-регулятор с предварительно подобранными коэффициентами.

При вычислении объема граница области ЛН аппроксимировалась на основе полученных точек ее пересечения траекторией АНПА, например, с помощью метода МНК или БПФ.

Скалярное поле, которое измеряет датчик АНПА, было задано аналитической формулой. Модель представляет собой единую программу, но в ее структуре выделены следующие компоненты: модель среды, модель аппарата, модель поведения. Таким образом, структура полученной системы позволяет легко ее модифицировать для применения к реальным АНПА.



**Рис. 2.** Визуализация работы алгоритма: а) в результате первых двух шагов группового алгоритма выделено три области ЛН, б) изображение формы ЛН, полученной после третьего шага работы группового алгоритма

Рассмотрим работу модели в объеме, ограниченном параллелепипедом:  
 $\{(x, y, z) : 0 \leq x \leq 700, 0 \leq y \leq 500, 0 \leq z \leq 300\}$ .

В качестве рабочей глубины было выбрано значение  $d_0 = 150$ . Скалярное поле было задано формулой:

$$f(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^5 \frac{\mathbf{p}_i}{\mathbf{q}_i + |\mathbf{a} - \mathbf{v}_i|^2},$$

$$\mathbf{p} = (5000, 5000, 5000, 4000, 5000)^T,$$

$$\mathbf{q} = (5000, 5000, 5000, 5000, 5000)^T,$$

$$\mathbf{v}_1 = \begin{pmatrix} 150 \\ 250 \\ 150 \end{pmatrix}, \mathbf{v}_2 = \begin{pmatrix} 350 \\ 320 \\ 150 \end{pmatrix}, \mathbf{v}_3 = \begin{pmatrix} 400 \\ 200 \\ 150 \end{pmatrix}, \mathbf{v}_4 = \begin{pmatrix} 610 \\ 100 \\ 120 \end{pmatrix}, \mathbf{v}_5 = \begin{pmatrix} 620 \\ 400 \\ 180 \end{pmatrix}.$$

Для оконтуривания областей ЛН использовался порог на уровне 0.7 от максимального значения. Использовалось 3 подводных аппарата. Шаг меандра был принят равным 50.

После предварительного прохода меандром строятся области ЛН, которых оказывается три. Каждой из них назначается для оконтуривания один АНПА. Визуализация работы алгоритма в разных фазах приведена на рис. 2.

Далее была произведена оценка точности полученных объемов областей ЛН. Для вычисления объемов эталонных фигур использовался численный метод трапеций. Объем каждой области ЛН был оценен с точностью до 1%.

Далее исследовалось, насколько точным является метод подсчета объема области по ее сечению двумя перпендикулярными плоскостями. Получаемая ошибка складывается из ошибки оконтуривания (она зависит от траектории, которая получается после сглаживания) и от ошибки самого метода вычисления объема (эта ошибка зависит от выбранных плоскостей сечения и от формы области).

В таблице 1 приведены результаты вычислений объема для разных настроек PD регулятора и для «идеального регулятора». Видно, что ошибка метода для рассматриваемых областей ЛН составляет вплоть до 7%. К ней прибавляется ошибка, возникающая из-за неточного оконтуривания. Суммарная ошибка при недостаточно хорошей настройке регулятора в нашем примере может составлять до 18% (с учетом 1% погрешности для эталонной оценки). Следует отметить, что настоящая модель не учитывает погрешности измерений и навигации.

**Таблица 1.** Оценки объемов областей при различных регуляторах: а)  $K_p=-10, K_d=3$  б)  $K_p=-5, K_d=2$  в) идеальный регулятор

Объем	Ошибка
78680	5.8%
1397752	4.3%
10395393	8.1%

а)

Объем	Ошибка
855399	16.3%
1518798	13.3%
10578384	10.0%

б)

Объем	Ошибка
707162	3.9%
1317802	1.7%
10271969	6.8%

в)

Была произведена оценка точности полученных количеств растворенного в областях ЛН вещества. Количество вещества в каждой эталонной области ЛН было оценено с точностью до 1%.

В таблице 2 приведены результаты вычислений количества вещества для разных настроек PD регулятора. Ошибка метода для рассматриваемых областей ЛН составляет вплоть до 7%. Однако, в отличие от задачи вычисления объема, не наблюдается столь существенной зависимости от параметров регулятора. В рассмотренных примерах ошибка не превосходит 8% (с учетом 1% погрешности для эталонной оценки).

**Таблица 2.** Оценки количества вещества в каждой из областей при различных регуляторах:

а)  $K_p = -10, K_d = 3$  б)  $K_p = -5, K_d = 2$  в) идеальный регулятор

Объем	Ошибка
545901	7.0%
1078022	4.0%
8537268	0.3%

а)

Объем	Ошибка
594595	1.8%
1152021	2.7%
8569914	0.1%

б)

Объем	Ошибка
580610	0.6%
1055810	6.2%
8268555	3.6%

в)

### Выводы

В настоящей работе предложен и исследован алгоритм для локализации и оценки размеров областей ЛН в заданной акватории с помощью группы АНПА. Проведены данные компьютерного моделирования и получены оценки точности найденных объемов.

В дальнейшем предполагается исследовать вопросы повышения производительности за счет оконтуривания одной большой области ЛН несколькими АНПА. Еще один не затронутый вопрос — оптимизация при назначении областей подводным аппаратам. В случае ограниченного количества областей ЛН и АНПА вполне можно обойтись переборными алгоритмами. Наконец, предполагается исследовать возможность использования для решения данной задачи мультиагентных алгоритмов с распределенным управлением.

### Литература

1. Cannel C.J., Stilwell D.J. A comparison of two approaches for adaptive sampling of environmental processes using autonomous underwater vehicles // Proceedings of the Oceans-2005 MTS/IEEE Conference, September 18-23, 2005, Washington, USA. – 2005.
2. Бабак Л.Н., Щербатюк А.Ф. Некоторые методы оценивания состояния водных акваторий с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов // Мехатроника, автоматизация и управление. 2010. №5. С.74-78.
3. Бабак Л.Н., Щербатюк А.Ф. Об одном алгоритме поиска источника подводного шлейфа, основанном на использовании группы АНПА // Сборник трудов электронного научного периодического издания «Управление большими системами», выпуск 30.1 «Сетевые модели в управлении». – М.: ИПУ РАН, 2010. – С. 536–548.

# СИНТЕЗ РОБАСТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БУКСИРУЕМЫМ ПОДВОДНЫМ АППАРАТОМ

**С.А. Гайворонский**

Институт кибернетики Томского политехнического университета  
634004, Томск, ул. Советская, 84/3, тел./факс: (3622) 420588,  
e-mail: saga@tpu.ru

Разработана структура системы управления буксируемым подводным аппаратом, позволяющая демпфировать его колебания в условиях морского волнения. Основу системы составляет контур управления амортизирующей лебедкой, располагающейся на подводном аппарате. Для управления лебедкой предложено использовать робастный ПИИ<sup>2</sup> – регулятор, обеспечивающий сохранение в системе демпфирующих свойств при интервальной неопределенности длины троса и массы аппарата. Работоспособность робастной системы управления подтверждают результаты моделирования.

## Введение

В настоящее время наблюдается активное освоение Мирового океана автономными необитаемыми подводными аппаратами. Однако, согласно [1], при этом остаются актуальными и некоторые практические задачи, решение которых наиболее целесообразно проводить с помощью буксируемых подводных аппаратов (БПА). БПА связаны тросом с судном-носителем, в результате чего характерной особенностью системы «Судно – трос – БПА» являются возникающие в системе под действием морской качки продольные колебания.

Заметим, что БПА в условиях даже небольшого волнения моря могут быть непригодны для выполнения подводных работ. Так, например, при захвате затонувших предметов возможны удары БПА о грунт, взмучивание донных осадков. Наиболее опасным при работе БПА является совпадение частоты продольных колебаний в тросе с частотой морского волнения. Задача управления БПА может осложняться еще и тем, что некоторые физические параметры системы «Судно – трос – БПА» точно неизвестны или способны изменяться в процессе функционирования системы по заранее неизвестным законам в определенных интервалах (параметры троса, параметры приводов лебедок, масса БПА).

В связи с этим представляет интерес задача разработки такой системы управления БПА, которая в условиях морской качки и интервальной неопределенности параметров объекта управления демпфировала бы колебания БПА в режимах спуска-подъема и стабилизации вблизи морского дна.

### 1. Выбор структуры системы управления БПА

Для решения поставленной задачи предложена представленная на рис. 1 структура системы управления БПА с двумя лебедками: грузовой лебедкой (ГЛ), расположенной на судне и предназначенной для спуска-подъема БПА, и амортизирующей лебедкой (АЛ), установленной на БПА [1] и служащей для демпфирования его вертикальных колебаний. На рис. 1 введены следующие обозначения остальных блоков: ЗС – задатчик скорости; ССУ – сравнивающее и суммирующее устройство; ДС – датчик скорости; РЕГ – регулятор.

Система имеет два входа: по управлению – сигналу  $U_{зс}$  напряжения задатчика скорости ГЛ, и по возмущению – сигналу  $V_{кач}$  скорости морской качки. Выходным сигналом является  $V_{бпа}$  – скорость БПА. Внутренние координаты обозначены на рис. 1 следующим образом:  $V_{зл}$ ,  $V_{ал}$  – соответственно линейные скорости грузовой лебедки и амортизирующей лебедки;  $F_n$  – сила натяжения в тросе,  $U_{дс}$  – напряжение датчика скорости БПА.

Для уменьшения отрицательного влияния на работу системы резкого изменения  $V_{эл}$  в блоке ЗС сигнал  $U_{зс}$  формируется в виде, показанном на рис. 2 [1], где  $T$  – время спуска БПА на заданную глубину. Из рис. 2 видно, что ГЛ имеет режимы разгона (интервал времени  $(t_1 - t_2)$ ), работы с постоянной скоростью  $(t_2 - t_3)$  и торможения  $(t_3 - t_4)$ . С момента времени  $t_4$  начинается режим стабилизации положения БПА.

Предложенная структура управления БПА имеет признаки адаптивной системы с сигнальной самонастройкой, где эталонный сигнал  $U_{зс}$  сравнивается с сигналом  $U_{дс}$  и их разность  $\Delta U$  поступает на регулятор контура адаптации. Регулятор в свою очередь управляет исполнительным механизмом (АЛ), сигнал с которого ( $V_{ал}$ ) компенсирует действие  $V_{кач}$ .

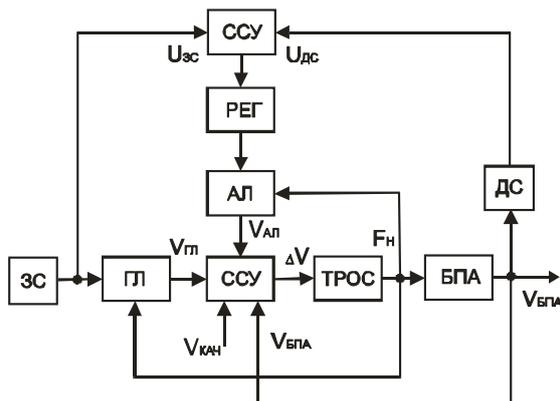


Рис. 1. Структура системы управления БПА с двумя лебедками

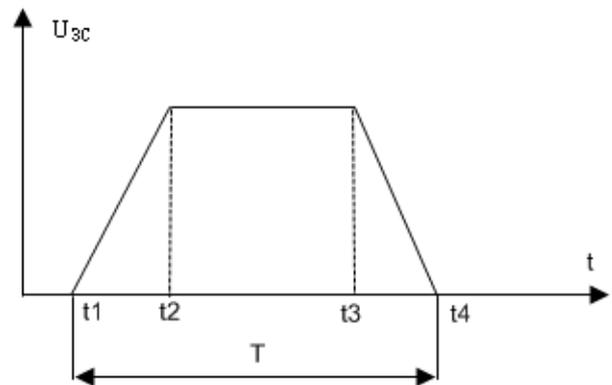


Рис. 2. Сигнал задатчика скорости

В результате математического описания системы управления БПА получена ее модель в виде структурной схемы, приведенной на рис. 3. Система имеет следующие постоянные параметры:  $K_{дс}=0,2\text{Вс/м}$ ;  $K_{м1}=K_{м2}=0,3\text{нм/А}$ ;  $K_{е1}=K_{е2}=1\text{Вс/рад}$ ;  $\alpha=(6 \cdot 10^4/\text{л})\text{нс/м}$ ;  $C=(6 \cdot 10^6/\text{л})\text{н/м}$ ;  $J_1=100\text{кгм}^2$ ;  $J_2=0,5\text{кгм}^2$ ;  $R_1=0,2\text{м}$ ;  $R_2=0,1\text{м}$ ;  $K_{ос}=0,21\text{Вс/рад}$ .

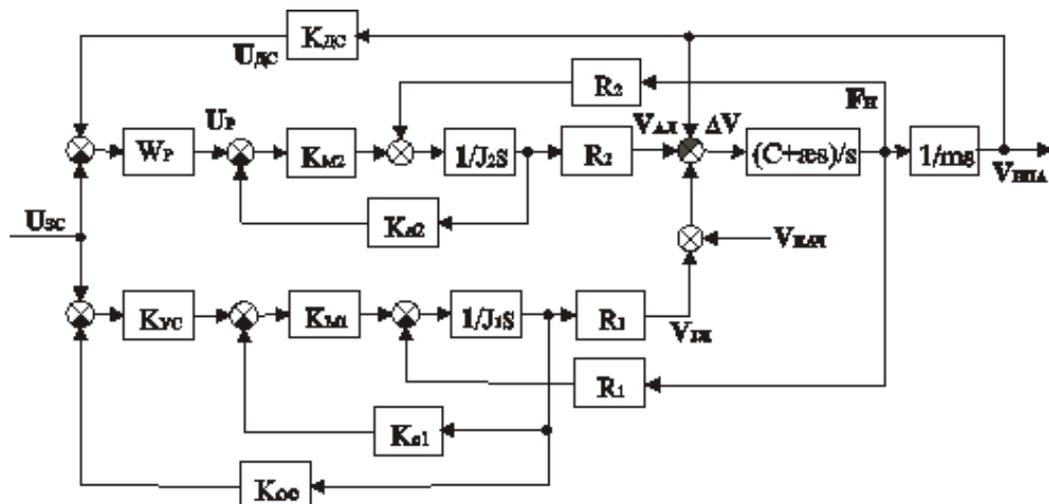


Рис. 3. Структурная схема системы управления БПА

Контур регулирования скорости  $V_{эл}$  имеет типовую структуру, содержащую обратную связь по скорости с коэффициентом  $K_{ос}$  и пропорциональный регулятор скорости  $K_{вс}$ . Задачей этого контура является получение требуемого быстродействия грузовой лебедки в режимах спуска и подъема БПА путем выбора настроек параметров  $K_{вс}$  и  $K_{ос}$ .

При выборе  $W_p$  для регулятора скорости  $V_{эл}$  необходимо учитывать следующее требование: в режимах спуска-подъема БПА и стабилизации его положения при  $V_{кач} \neq 0$

скорость  $V_{\text{бна}}$  должна определяться только сигналом  $U_{\text{зс}}$  (составляющая  $V_{\text{бна}}$  от действия  $V_{\text{кач}}$  должна быть минимальна). То есть, система по возмущению должна иметь астатизм, позволяющий уменьшить влияние  $V_{\text{кач}}$  на  $V_{\text{бна}}$ .

Анализ передаточных функций системы управления БПА по возмущению в установившемся режиме с различными  $W_p$  показал, что в качестве регулятора  $V_{\text{ал}}$  целесообразно использовать ПИИ<sup>2</sup> – регулятор, который обеспечивает в системе астатизм второго порядка. Его передаточная функция имеет вид

$$W_p(s) = \frac{k_0 + k_1 \cdot s + k_2 \cdot s^2}{s^2} \quad (1)$$

Данный регулятор имеет три параметра настройки:  $k_0$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ , значения которых определяют качество переходных процессов в системе.

## 2. Выбор критерия качества процессов управления

В качестве интервальных параметров системы рассматриваются длина  $l$  троса и масса  $m$  подводного аппарата. Пусть  $l$  принадлежит диапазону  $[300; 350]$  м, а  $m$  принимает любые значения из интервала  $[100; 120]$  кг. Запишем характеристический полином системы в следующем виде

$$A(s) = a_6 \cdot s^6 + a_5 \cdot s^5 + a_4 \cdot s^4 + a_3 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0, \quad (2)$$

где  $a_0 = 7777944 \cdot k_0$

$$a_1 = 725779.44 \cdot k_0 + 7777944 \cdot k_1$$

$$a_2 = 77779440 + 6480 \cdot k_0 + 725779.44 \cdot k_1 + 7777944 \cdot k_2$$

$$a_3 = 2595240 \cdot m + 136890194.4 + 6480 \cdot k_1 + 725779.44 \cdot k_2$$

$$a_4 = 246272.4 \cdot m + 12.96 \cdot m \cdot l + 12161124 + 6480 \cdot k_2$$

$$a_5 = 2203.2 \cdot m + 22.69 \cdot m \cdot l + 108000$$

$$a_6 = 1.8 \cdot m \cdot l.$$

Как видно из (2), в коэффициенты полинома линейно входят настройки регулятора и полилинейно входят интервальные параметры системы. Используя правила интервальной арифметики, приведем полином (2) к интервальному виду

$$A(s) = [a_6] \cdot s^6 + [a_5] \cdot s^5 + [a_4] \cdot s^4 + [a_3] \cdot s^3 + [a_2] \cdot s^2 + [a_1] \cdot s + [a_0], \quad (3)$$

где  $[a_0] = 7777944 \cdot k_0$

$$[a_1] = 725779.44 \cdot k_0 + 7777944 \cdot k_1$$

$$[a_2] = 77779440 + 6480 \cdot k_0 + 725779.44 \cdot k_1 + 7777944 \cdot k_2$$

$$[a_3] = [915462194.4 ; 1045224194.4] + 6480 \cdot k_1 + 725779.44 \cdot k_2$$

$$[a_4] = [86431741.2 ; 98900920.08] + 6480 \cdot k_2$$

$$[a_5] = [1449522 ; 1831906.8]$$

$$[a_6] = [54000 ; 75600].$$

Заметим, что в данном полиноме коэффициенты  $a_0$ ,  $a_1$  и  $a_2$  не зависят от интервальных параметров и являются постоянными. В этом случае будем считать, что нижние и верхние пределы у них равны. Интервальные коэффициенты  $a_3$ ,  $a_4$ ,  $a_5$  и  $a_6$  образуют параметрический многогранник  $M$ , вершины  $V_i$  которого определяются крайними значениями коэффициентов.

Дальнейший синтез робастного регулятора системы управления БПА предлагается проводить путем желаемого расположения областей локализации корней интервального полинома (3). Учитывая, что в системе недопустимы колебательные переходные процессы, расположение корней должно соответствовать аperiодическому характеру переходных процессов. Такие переходные процессы предусматривает наличие ближайшего к мнимой оси вещественного корня и удаленность от него остальных (как комплексно-сопряженных, так и вещественных) корней.

В случае интервального полинома желаемый корневой портрет системы при любых значениях интервальных коэффициентов из многогранника  $M$  должен состоять из

мигрирующего внутри отрезка  $[s_1; s_2]$  вещественного корня и некоторой области  $\Gamma$ , где будут находиться области локализации остальных корней. Граница области  $\Gamma$  может быть задана выражением  $s = -\delta(\omega) + j\omega$ . Регулятор, располагающий корни интервального полинома подобным образом, будет придавать системе свойство робастной аperiodичности [2].

### 3. Параметрический синтез робастного регулятора

В основу процедуры параметрического синтеза ПИИ<sup>2</sup> – регулятора, гарантирующего допустимое качество демпфирования колебаний БПА при любых значениях интервальных параметров  $m$  и  $l$ , положим расположение корней полинома (3) в соответствии с требованием аperiodичности переходных процессов в системе.

В [3] доказано, что левой границей  $s_2$  заданного доминирующего отрезка  $[s_1, s_2]$  вещественного корня есть образ вершины  $V_2$ , координатами которой является набор коэффициентов характеристического полинома  $\overline{a_0(k)}, \overline{a_1(k)}, \overline{a_2(k)}, \overline{a_3(k)}, \dots$ , где  $\overline{a_i(k)}$  – минимальное значение  $i$ -го коэффициента,  $\overline{a_i(k)}$  – его максимальное значение,  $\vec{k}$  – вектор настраиваемых параметров регулятора. Вершине  $V_1$  (прообразу правой границы  $s_1$ ) соответствует свой набор  $\overline{a_0(k)}, \overline{a_1(k)}, \overline{a_2(k)}, \overline{a_3(k)}, \dots$ . Подставим координаты  $V_1$  и  $V_2$  в полином (2)

$$A^{V_1}(s_1, \vec{k}) = 0, \quad (4)$$

$$A^{V_2}(s_2, \vec{k}) = 0. \quad (5)$$

Соотношения (4), (5) связывают настройки регулятора с границами отрезка вещественного корня и, следовательно, с интервалом допустимой степени устойчивости. Пусть параметры  $k_0, k_1$  регулятора являются зависимыми, а параметр  $k_2$  свободным. Выразим  $k_0$  из (4) и (5):

$$k_0 = F_1(s_1, k_1, k_2), \quad (6)$$

$$k_0 = F_2(s_2, k_1, k_2). \quad (7)$$

Исключим из рассмотрения  $k_0$ , для чего приравняем правые части выражений (6) и (7). Из полученного выражения легко определить зависимость  $k_1(k_2)$ . Далее, подставляя выражение  $k_1(k_2)$  в (4) или (5), получим зависимость  $k_0(k_2)$ .

Конечной целью проводимых преобразований является получение полинома с одним варьируемым параметром  $k_2$ . Для этого в (3) следует подставить полученные выражения  $k_0(k_2)$  и  $k_1(k_2)$ . После этого (3) примет вид

$$A(s, k_2) = \sum_{i=0}^n [a_i(k_2)] \cdot s^i. \quad (8)$$

Далее, применяя к полиному (8) метод робастного D-разбиения [4] в плоскости параметра  $k_2$ , обеспечим размещение свободных корней полинома (3) в желаемой области  $\Gamma$  для всех значений интервальных коэффициентов из многогранника  $M$ . С этой целью в (8) делаем подстановку границы области  $\Gamma$  локализации свободных корней и пределов интервальных коэффициентов, соответствующих координатам проверочной вершины  $V_i$ .

Заметим, что для определения координат  $V_i$  следует воспользоваться методикой, изложенной в [5]. В результате получаем функции  $k_2^{V_i}(\omega)$ , задающие границы D-разбиения в плоскости параметра  $k_2$  для каждой проверочной вершины. После получения для каждой  $V_i$  интервалов  $k_2$  находится область их пересечения, из которой выбирается искомое значение свободного параметра  $k_2$  и далее по выражениям  $k_0(k_2)$  и  $k_1(k_2)$  рассчитываются значения зависимых параметров  $k_0$  и  $k_1$  регулятора.

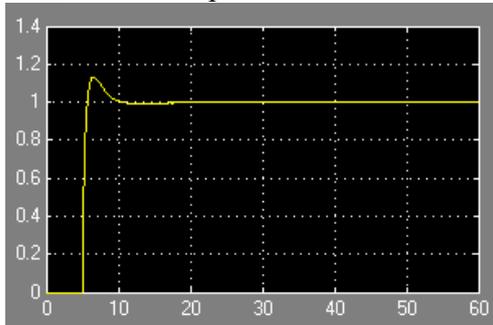
В соответствии с описанной выше процедурой определены настройки робастного ПИИ<sup>2</sup>-регулятора:  $k_0=0,3$ ,  $k_1=2$ ,  $k_2=3$ , обеспечивающие желаемое расположение вещественного корня в отрезке  $[-0,5; -0,3]$  и остальных корней левее вертикальной прямой, проходящей через точку  $(-1; j0)$ .

#### 4. Моделирование процессов управления БПА

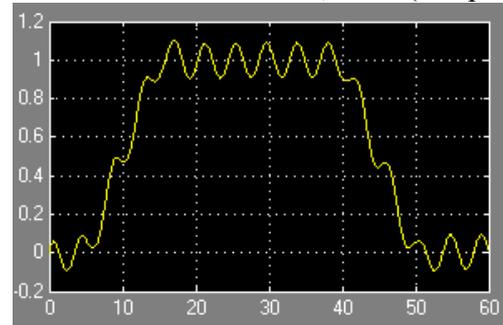
С целью проверки работоспособности системы управления БПА с синтезированным робастным регулятором проведено ее моделирование с помощью пакета Matlab и его приложения Simulink. Результаты моделирования подтверждают правильность расчета настроек регулятора: при ступенчатом сигнале управления переходный процесс имеет апериодический вид (рис. 5) и заканчивается за 7 секунд, что соответствует расположению заданного доминирующего вещественного корня полинома (3).

Проверка функционирования системы в условиях морской качки проводилась при изменении  $V_{кач}$  по гармоническому закону с амплитудой 1 м/с и частотой 1,5 рад/сек. Сигнал  $U_{зс}$  задавался в форме рис. 2, что соответствовало изменению глубины погружения БПА с 300 м до 350 м. Масса БПА при этом менялась от 100 кг до 120 кг.

Моделирование показало, что при всех указанных выше условиях амплитуда колебаний  $V_{бпа}$  от действия морской качки незначительна и максимально составляет 0,1 м/с (см. рис. 6).



**Рис. 5.** Переходный процесс при ступенчатом сигнале управления



**Рис. 6.** Переходный процесс при воздействии морской качки

Таким образом, предложенная система управления БПА и разработанная методика настройки ее робастного ПИИ<sup>2</sup>-регулятора позволяют решать задачу демпфирования колебаний БПА в условиях морского волнения и изменения интервальных параметров системы.

#### Литература

1. Кувшинов Г.Е., Наумов Л.А., Чупина К.В. Влияние морского ветрового волнения на глубоководный привязной объект: монография. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 215 с.
2. Поляк Б.Т., Цыпкин Я.З. Частотные критерии робастной устойчивости и апериодичности линейных систем // Автоматика и телемеханика. 1990. № 9. С. 45–54.
3. Гайворонский С.А., Суходоев М.С. Определение настроек линейных робастных регуляторов, обеспечивающих апериодические переходные процессы в интервальных системах // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 316, № 5. С. 12–16.
4. Петров Н.П., Поляк Б.Т. Робастное D-разбиение // Автоматика и телемеханика. 1991. №11. С. 41–53.
5. Гайворонский С.А., Суходоев М.С., Замятин С.В. Параметрический синтез линейного регулятора интервальной системы с гарантированными корневыми показателями качества // Известия Томского политехнического университета. 2007. Т. 311, № 5. С. 10-13.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО РОБОТА ПРИ ТРАЕКТОРНОМ ОБСЛЕДОВАНИИ АНОМАЛЬНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

**А.В. Медведев**

Институт проблем морских технологий ДВО РАН  
690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел./факс: (423) 2432416, e-mail: auv@list.ru

Рассматриваются вопросы планирования миссий АНПА при автоматизации измерений и картографирования физических полей океана. Траекторное обследование полей основано на поисковом алгоритме с управлением по обобщенным целям (ориентирам). В случае аномального поля задача состоит в оконтуривании области определенного радиуса в зоне поиска и наведении на источник аномалии. С помощью системы компьютерного моделирования исследуются возможные подходы к решению этой и других аналогичных задач.

## **Введение**

Задачи управления движением АНПА традиционно связаны с обследованием рельефа морского дна, поиском и инспекцией объектов в придонном пространстве, измерением параметров физических полей [1, 2]. Разнообразные применения АНПА для решения поисковых и обследовательских задач, топографической съемки и картографирования дна, мониторинга водной среды могут быть рассмотрены с общих позиций. Так, например, задача выбора трассы в условиях сложного рельефа дна является частным случаем более общей задачи траекторного обследования поля рельефа и ориентирования по батиметрической карте. Аналогичная задача возникает при организации траекторного обследования полей, обладающих характерными свойствами: изменчивостью, аномальным уровнем, наличием корреляции в геометрии поля и т.п.

В настоящее время наряду с традиционными способами океанографических измерений все большее применение находят способы траекторных измерений с помощью автономных, телеуправляемых и буксируемых аппаратов. В этом отношении применение АНПА имеет ряд преимуществ, в особенности при выполнении комплексных измерений на больших глубинах и в экстремальных условиях среды.

В статье [2] приведены примеры построения батиметрической карты и карты поля температур, полученные с помощью АНПА «Клавесин» при обследовании участка хребта Ломоносова в Российской полярной экспедиции «Арктика-2007». В данном эксперименте производились батиметрические, гидрологические и другие измерения при следовании по заданному маршруту вблизи дна с привязкой измерений к географическим координатам.

Восстановление карты поля по данным измерений – задача стандартная, хотя и весьма трудоемкая. В упрощенной постановке можно ограничиться построением отдельных реализаций поля, в частности, изолиний или иных сечений. Самостоятельный смысл приобретают три взаимосвязанные задачи: восстановление карты поля после покрытия некоторой области серией галсов с малым шагом, ориентирование по известным элементам карты и организация движения по изолиниям (сечениям) поля. Указанные задачи были объединены одним общим сценарием для непрерывного моделирования и уже рассматривались в статье [8]. В зависимости от природы аномалии и выбора управляющих параметров для ориентирования относительно ее границы, способы решения общей задачи могут различаться.

## Компьютерная модель динамики и управления

В вычислительной модели использовался пакет имитационного моделирования нелинейных систем MATLAB Simulink со следующими инструментами:

- DEE toolbox(решатель систем дифференциальных уравнений);
- StateFlow (инструмент для событийного описания функционирования систем);
- RealTimeWorkShopEmbeddedCode (использование встроенного кода в модели).

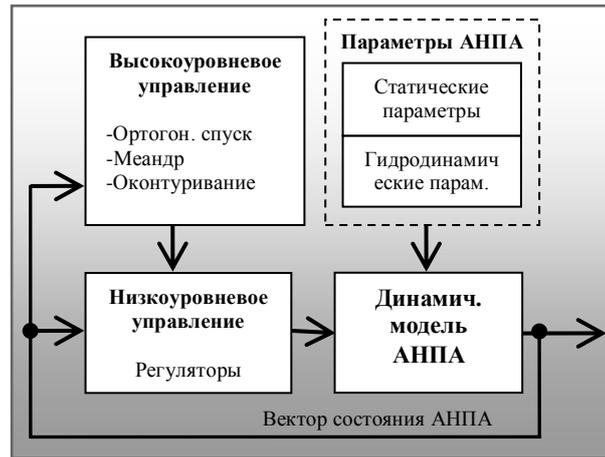


Рис. 1. Обобщенная структурная схема моделирующего стенда

Средствами пакета были реализованы следующие блоки (рис. 1):

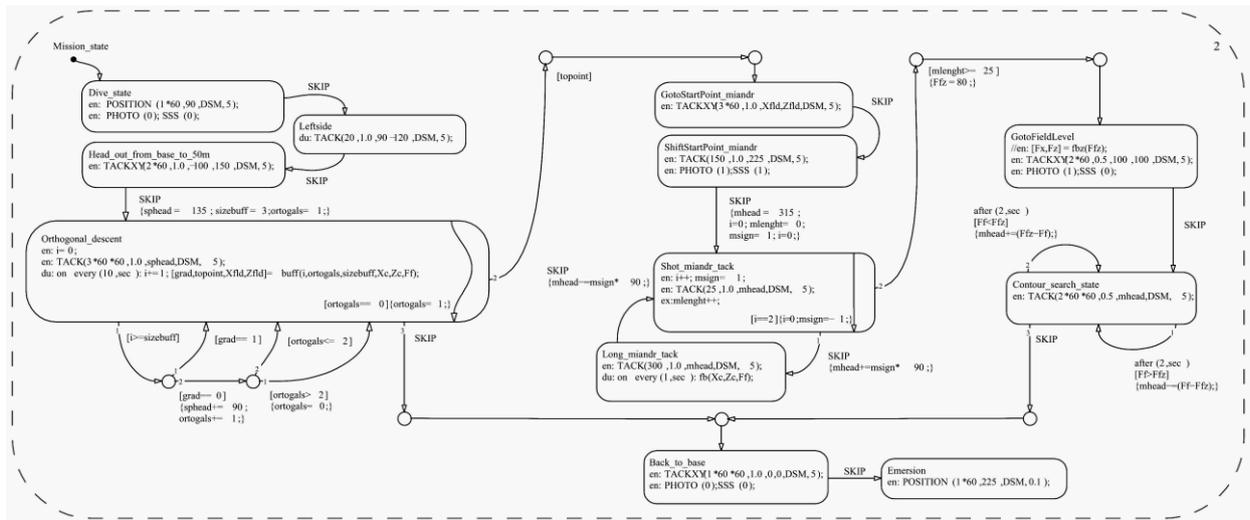
- математическая модель пространственного движения АНПА;
- модель статики и гидродинамики (инерционные силы и силы вязкого сопротивления);
- модель внешних возмущений;
- кинематическая модель движительно-рулевого комплекса;
- низкоуровневые регуляторы (вертикальный, горизонтальный, скоростной)
- алгоритмы инспекции физического поля на координирующем уровне (уровень миссий)

Сценарий поисковой программной миссии включает следующие процессы:

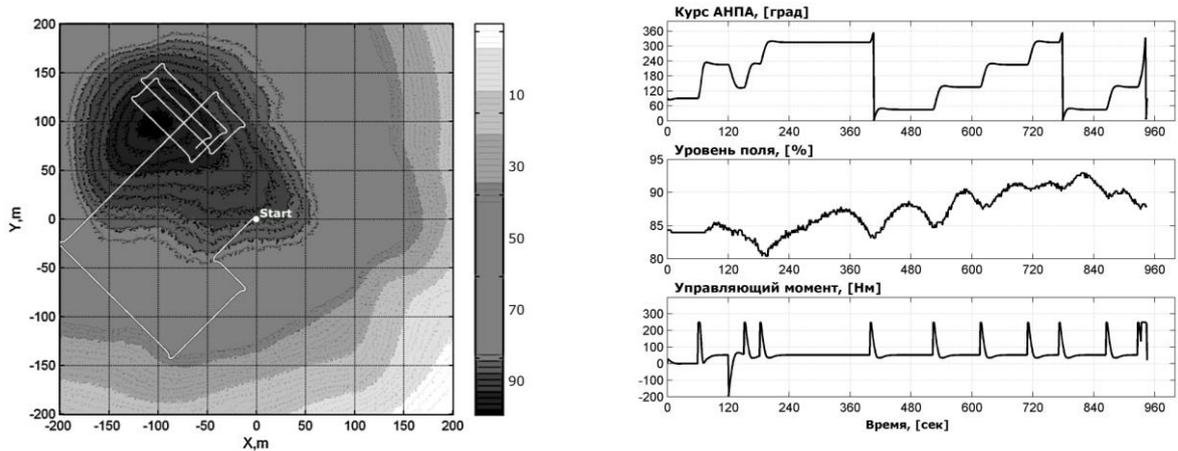
- осуществление поисковых движений методом ортогонального спуска с курсовой коррекцией по изменению знака градиента поля (рис. 3);
- покрытие найденной области сетью прямолинейных траекторий (галсов) типа «меандр» с измерением параметров поля и привязкой их к навигационным данным для последующего восстановления карты поля (рис. 4);
- отслеживанием заданной изолинии, определяющей границу аномалии, путем ориентирования вектора скорости в соответствие с «кривизной» изменения поля или движением по численным координатам, соответствующим заданному уровню поля (рис. 5).

## Результаты моделирования

В модельном представлении рассматривался сценарий из трех перечисленных выше последовательных процессов. В качестве примера была выбрана структура поля, имеющая характер аномалии с экстремумом по уровню и градиенту. Поле представлено битмар-изображением  $400 \times 400$  точек с градацией по уровню яркости точки  $[0 \ 255]$ , что соответствует изменению величины поля в диапазоне  $[0 \ 100]$  условных единиц. Картина поля располагается на квадратной координатной сетке  $[-200 \ 200]$ . Соответственно, шаг изменения (точность) поля 1 метр. Bitmap построена в графическом редакторе Photoshop с использованием инструментов: Radial Gradient и Smudge Tool.



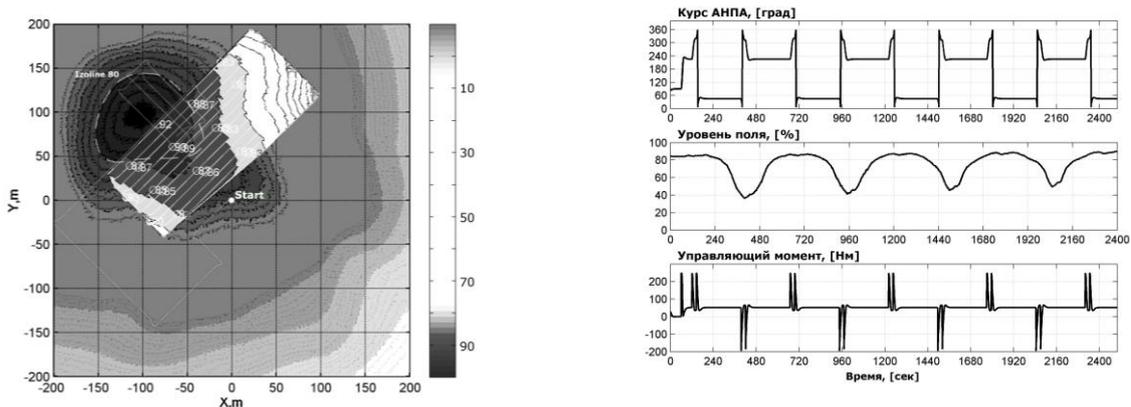
**Рис. 2.** Схема алгоритма выполнения миссии (программа в нотации StateFlow на языке, близком к описанию миссий реального аппарата)



**Рис. 3.** Траектория и параметры движения при поиске аномальной области

Для определения точки экстремума выполнялось поисковое движение с помощью алгоритма ортогонального спуска (рис. 3). В процессе поиска с произвольным начальным направлением и временным шагом 10 с снимается и заносится в буфер текущее значение поля. По нескольким отсчетам (в данном примере по трем) определяется величина градиента поля по текущему направлению. При смене знака градиента происходит поворот на ортогональный галс. В зависимости от пространственной изменчивости поля периодичность получения отсчетов согласуется с текущей скоростью аппарата.

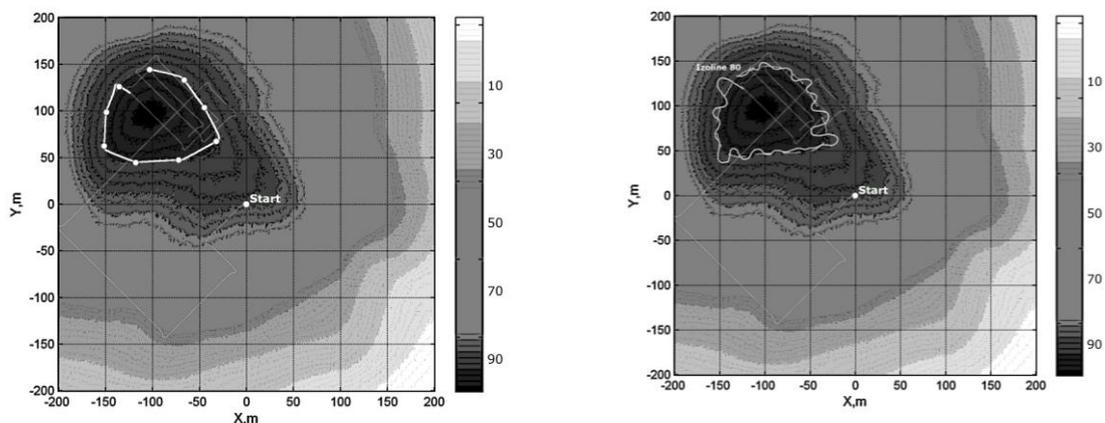
Основной процесс сценария состоял в восстановлении карты поля по сети дискретных измерений, полученных путем покрытия области сетью прямолинейных траекторий (галсов). По измерениям в узлах неравномерной сетки производилась интерполяция с шагом, зависящим от величины градиента поля в узловых точках. На основе полученных данных строились изолинии с заданными значениями уровня поля (рис. 4).



**Рис. 4.** Фрагмент восстановления карты поля и параметры движения «меандром»

Одновременно осуществлялась навигационная привязка измерений с использованием численных координат. В данном примере ширина покрытия составляла 250 м, длина галса 100 м, расстояние между галсами 10 м.

Заключительная процедура поиска состояла в оконтуривании области, принимаемой за аномалию. В качестве границы этой области была взята замкнутая изолиния с заданным значением уровня (изолиния со значением 80) восстановленного поля. В модельном эксперименте рассматривались два варианта движения при оконтуривании аномалии: движение прямолинейными галсами по равномерно распределенным численным координатам на выбранной изолинии и движение с регулированием курса по уровню поля с заданным значением. В первом случае используются координаты восстановленного поля, во втором – координаты неизвестны, и аппарат совершает поисковые движения, отслеживая «в среднем» границу аномальной зоны.

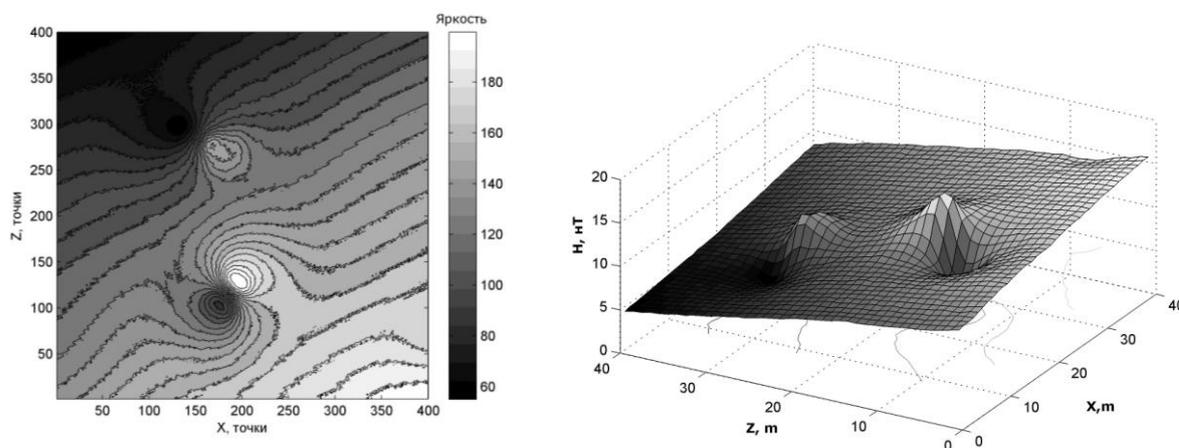


**Рис. 5.** Оконтуривание аномальной зоны путем отслеживания изолинии

Рассмотрим в качестве конкретного примера процедуру восстановления карты магнитной аномалии по данным траекторных измерений. По имеющимся сведениям [4-7] при проведении различного рода магнитных съемок, в том числе, при обследовании мелкомасштабных аномалий довольно эффективно используются системы, снабженные высокочувствительными магнитометрами. Разные варианты такой система использовались на AUV «Aqua Explorer» (AE 1000, AE 2000) и, позднее, на AUV «Hugin» при обследовании кабельных линий, AUV «Bluefin 12», AUV «Remus 600» при поиске донных мин. Магнитометрической системой с однокомпонентным феррозондовым магнитометром был оснащен также АНПА «Л-2» при выполнении поисковых работ в Бискайском заливе.

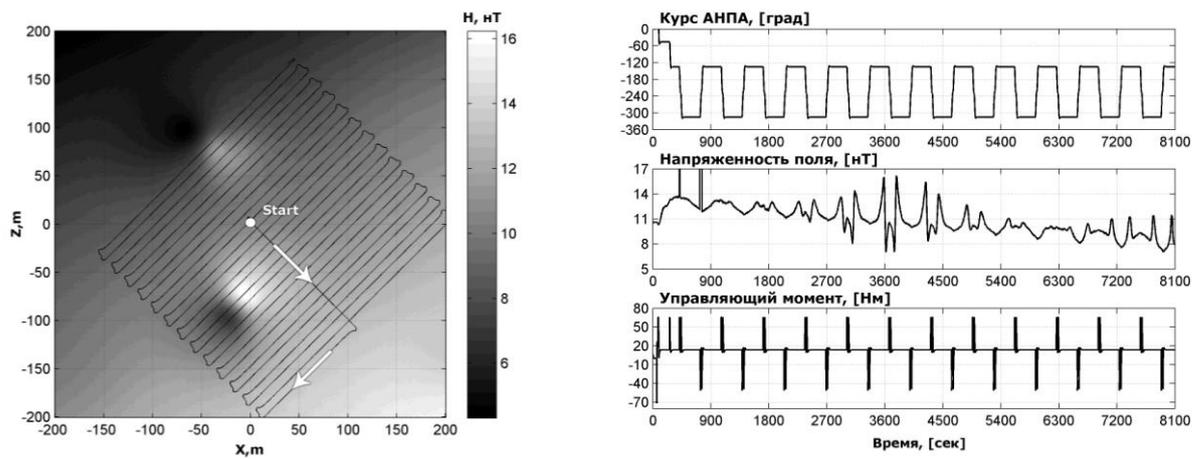
- Магнитное поле можно представить совокупностью векторных и скалярных величин:
- вектором напряженности (силовые линии),
  - вектором градиента к силовым линиям (эквипотенциальные кривые),
  - составляющими вектора напряженности в вертикальной и горизонтальной плоскостях,
  - модулем вектора напряженности (изолинии модуля вектора),
  - направлением и значением градиента,
  - проекции вектора градиента на оси, связанные с аппаратом.

При построении системы поиска по магнитной аномалии оказывается необходимым выделение магнитного контакта на фоне широкополосной помехи. Другими словами, надо определить, что следует понимать под магнитным контактом, и каков должен быть измеритель поля, чтобы он смог почувствовать наличие аномалии с достаточной достоверностью. При идентификации аномалии по сигналам системы обнаружения приходится иметь дело со сложными реализациями поля вдоль траектории аппарата. Сигнал, по которому можно отличить аномалию от «земного шума», как правило, асимметричен, имеет переменную полярность при пересечении аномалии в различных направлениях на различных дистанциях. Качественное отображение этих свойств можно получить, исходя из расчетно-теоретической модели поля. Реальные сигналы отличаются от модельных, прежде всего, наличием региональных градиентов, однако, как утверждается в ряде работ, эти градиенты порождают сигналы «ширина» которых во многих случаях на порядок больше, чем «ширина» сигналов от собственных аномалий. В работах [4-7] имеются примеры снятых локальных аномальных полей и записей реальных сигналов от аномалий, порождаемых объектами различной природы. Так, в работе [6] приведена мелкомасштабная карта аномалии, образованной двумя близко расположенными намагниченными телами (рис. 6). Примем ее в качестве модели для иллюстрации работы алгоритма траекторных измерений.



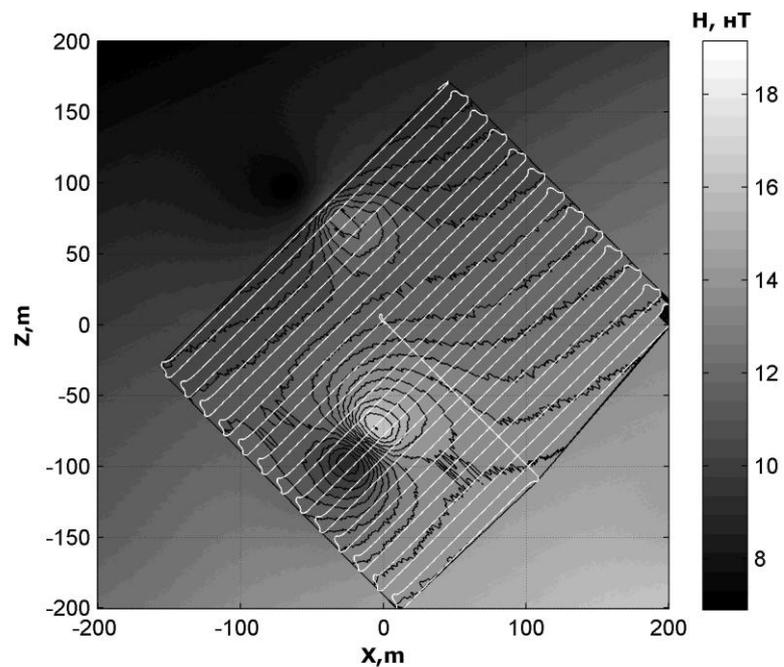
**Рис. 6.** Фрагмент магнитного поля и представление его напряженности

Для проведения вычислительного эксперимента была построена идентичная картина поля в виде bitmap-изображения размером 400×400 точек с градацией по уровню яркости точки (0...255), диапазон яркости был соотнесен с изменением величины напряженности поля (5... 20) нТ. Карта поля располагается на координатной сетке (-200...200) м с шагом изменения 1 м (рис. 7). Bitmap построена в графическом редакторе Photoshop с использованием инструментов: Radial Gradient и Smudge Tool. Цель моделирования заключалась в восстановлении карты неоднородного поля, имеющего несколько экстремумов, по измерениям вдоль траектории вида «меандр» с расстоянием между галсами 20 м.



**Рис. 7.** Фрагмент карты магнитного поля и параметры движения «меандром»

По данным измерений в узлах неравномерной сетки производилась интерполяция и на основе полученных данных строились изолинии с заданными значениями уровня поля (рис. 8).



**Рис. 8.** Изображение восстановленного участка карты поля

Работа выполнялась при частичной поддержке грантов: № 09-II-CO-03-001, № 09-I-ОЭМПУ-08.

## Литература

1. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / Под общей ред. М.Д. Агеева. М.: Наука, 2005. 400 с.
2. Inzartsev A.V., Kiselev L.V., Medvedev A.V., Pavin A.M. Autonomous Underwater Vehicle Motion Control during Bottom Objects and Hard-to-Reach Areas Investigation / In book «Motion Control». InTech, Vienna, Austria, 2010. P.207-228.
3. Киселев Л.В. Управление движением автономного подводного робота при траекторном обследовании физических полей океана // Автоматика и телемеханика. 2009. №4. С.141-148.
4. Breiner Sh. Marine magnetics search geometrics technical report. 1975. №7.
5. Clem T.R., Bono J.T., Davis P.S. and all. Initial Buried Minehunting Demonstration of the Laser Scalar Gradiometer Operating Onboard REMUS 600. IEEE, 2006.
6. Weiss E., Ginzburg B., Tsuriel Ram Cohen and all. High Resolution Marine Magnetic Survey of Shallow Water Littoral Area // Sensors, 2007, 7. P.1697-1712.
7. Никифоров В.М., Бессонова Е.А. Опыт применения магниторазведки для обнаружения ферромагнитных объектов на акватории залива Петра Великого // Подводные исследования и робототехника. 2007. №1(3). С.58-65.
8. Киселев Л.В., Медведев А.В. Модели динамики и алгоритмы управления движением автономного подводного робота при траекторном обследовании аномальных физических полей. Подводные исследования и робототехника. 2011. №1(11). С. 24-31.

# ДЕКОМПОЗИЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ШУМОВЫХ СИГНАЛОВ

**А.В. Вара, К.В. Змеу, В.А. Ковалев, Б.С. Ноткин**

Дальневосточный федеральный университет  
690950, Владивосток, ул. Пушкинская, 10

Институт автоматки и процессов управления ДВО РАН  
690041, Владивосток, ул. Радио, 5,

e-mail: Вара А.В.: varaav@mail.ru; Змеу К.В.: k.zmeu@ieee.org;  
Ковалев В.А.: daria3000@mail.ru; Ноткин Б.С.: boris\_notkin@mail.ru

Рассматривается разработанный на базе существующих и авторских решений системный подход к моделированию и исследованию стационарных шумов в измерительных каналах систем автоматического управления (САУ) с одновременным получением как амплитудных распределений, так и частотных характеристик моделируемого сигнала. В предлагаемом подходе используется разработанный метод автоматического поиска и выделения негармонических периодических составляющих, основанный на разложении Фурье.

## Введение

Необходимость исследования и моделирования шумов возникает во многих областях науки и техники [4, 5, 6], в том числе и при синтезе САУ движением автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), функционирующей при многообразии режимов работы аппарата (движение с переменной скоростью, позиционирование, зависание в точке, маневрирование при преодолении препятствий и пр.) [3]. Наиболее распространенными характеристиками шумов являются частотный спектр, корреляционная функция и распределение амплитуд. В работе именно эти характеристики используются в качестве основных характеристик сигнала шума.

Целью настоящей работы является разработка подхода к моделированию и исследованию стационарных шумов в измерительных каналах САУ с одновременным получением, как амплитудных распределений, так и частотных характеристик исходного сигнала, а также экспорт полученных моделей в среду MATLAB/Simulink.

## Описание подхода

Разложим исходный сигнал шума  $y=(y[1], y[2] \dots y[K])$ , где  $K$  – количество элементов вектора  $y$ , на более простые составляющие. Периодические составляющие обеспечивают получение частотных характеристик моделируемого сигнала, случайная составляющая – распределение амплитуд.

В ходе разложения (декомпозиции) получим модель шума в виде суммы аддитивных составляющих трех видов, которая в непрерывной форме может быть представлена в следующем виде:

$$M(t) = c + \sum_{i=1}^m P_i(t) + N, \quad (1)$$

где  $c$  – константа (сигнал постоянной амплитуды);  $P_i(t)$  – периодические составляющие, заданные формой сигнала на одном периоде,  $m$  – количество периодических составляющих;  $N$  – случайная составляющая, заданная законом распределения амплитуд. Составляющие последовательно выделяются из сигнала в той очередности, в которой они представлены в (1).

**Постоянная составляющая**  $c$  является средним арифметическим от исходного сигнала. После выделения этой составляющей алгоритм работает с сигналом:

$$y_0^*[k] = y[k] - c, \quad k = \overline{1, K} \quad (2)$$

**Периодические составляющие** выделяется в два этапа:

- 1) определение периода  $T_i$  выделяемой составляющей;
- 2) выделение из сигнала составляющей с найденным периодом путем усреднения (применяемым, например, в экономике при выделении сезонных эффектов [6]):

$$P_m^*[l] = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} y_{m-1}^*[j \cdot L + l], \quad (3)$$

где  $\mathbf{P}_m^* = (P_m^*[1], P_m^*[2], \dots, P_m^*[L])$ ,  $L$  – количество элементов вектора  $\mathbf{y}$  на периоде  $T_i$ ;  $n$  – количество периодов на продолжительности сигнала  $\mathbf{y}$  (при  $m > 0$ ,  $y_{m-1}^*$  – текущий сигнал, из которого выделили  $m-1$  составляющих).

В настоящей работе предложен метод автоматического выделения негармонических периодических составляющих, основанный на разложении Фурье. При таком выделении важно оценивать величину периода [5], для чего используется алгоритм, основанный на сравнении и анализе данных автокорреляционной функции и спектра частот.

Периодические составляющие выделяются в зависимости от заданного пользователем порогового уровня  $u$  на спектре частот  $S$  сигнала (рис. 1). Осуществляется поиск периодов  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$  таких, что амплитуда спектра на частотах  $1/T_1, 1/T_2, \dots, 1/T_n$  больше порогового уровня:

$$T = \left\{ T_i \mid S(1/T_i) > u \right\}. \quad (4)$$

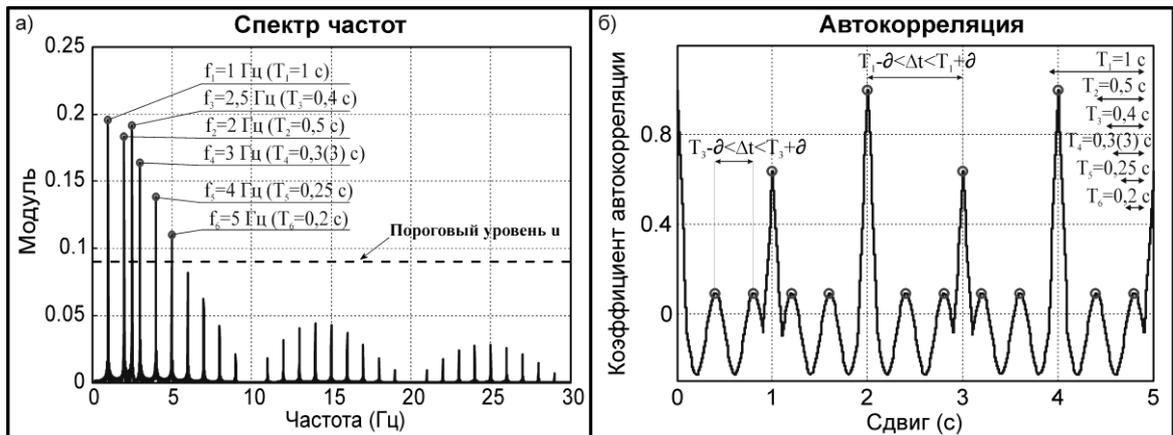
Для упрощения в алгоритме используются лишь периоды на локальных максимумах спектра. Если отсутствуют периоды по (4), то поиск и выделение периодических составляющих не осуществляется и алгоритм переходит к выделению случайной составляющей. Для того чтобы выделяемая из сигнала  $y_{m-1}^*(t)$  периодическая составляющая не включала в себя другие составляющие с меньшими кратными периодами, сначала выделяется составляющая с минимальным периодом  $T_n$ , соответствующим последнему пику на спектре частот. Вместе с тем, известно, что периодические негармонические составляющие сигнала могут привести к появлению кратных пиков на спектре частот этого сигнала [2, 7], из-за чего период, определяемый по последнему пику на спектре, может оказаться «ложным» (рис. 1). В то же время особенностью автокорреляционной функции (АКФ)  $\Phi(\tau)$  сигналов является частое совпадение периодичности ее локальных максимумов с фактической периодичностью составляющих, независимо от их формы [2, 6]. Поэтому для устранения кратных периодов на спектре осуществляется их верификация по данным АКФ  $\Phi(\tau)$  сигнала  $y_{m-1}^*(t)$ . На рисунке 1 представлены характеристики сигнала, являющегося суммой двух периодических составляющих: гармонической составляющей с  $T_3$  и негармонической с  $T_1$  (на рис. 1, а) хорошо видны «ложные» пики на спектре, кратные  $f_1 = 1/T_1$ , обусловленные наличием в сигнале негармонической составляющей).

Верификация периода  $T_i$  начинается с построения автокорреляционной функции  $\Phi(\tau)$  сигнала  $y_m^*(t)$  и поиска на ней локальных максимумов (рис. 1, б). Пусть  $\mathbf{t}_\Phi$  – позиции локальных максимумов АКФ. Требуется проверить совпадение периода  $T_i$  с периодичностью  $\mathbf{t}_\Phi$ , а именно, количество периодов  $T_i, 2T_i, 3T_i, \dots, nT_i$ , где  $n$  – количество периодов на продолжительности сигнала, должно совпадать с количеством локальных максимумов  $\mathbf{t}_\Phi$ ,

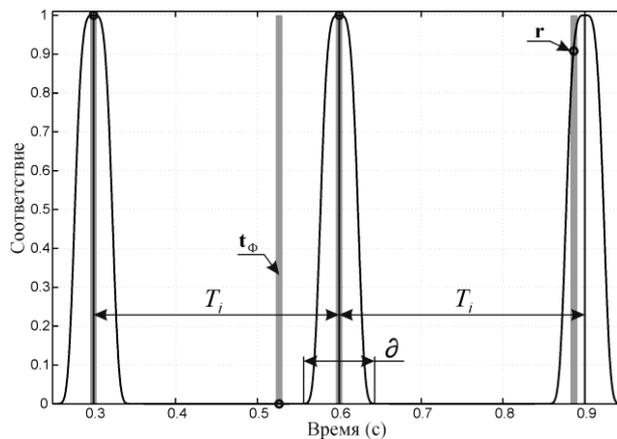
позиции каждого из которых попали в окрестности этих периодов. Окрестность периодов ограничивается допустимой погрешностью  $\partial$ . Введение допустимой погрешности обусловлено дискретностью исходного сигнала, а также другими факторами и смягчает требование точного совпадения периодов  $T_i, 2T_i, \dots, nT_i$  с позициями максимумов  $t_{\Phi}$ . Для количественной оценки степени такого совпадения используется функция Гаусса (рис. 2):

$$r = e^{-\left(1-2\left(\left(\frac{t_{\Phi}}{T_i} - \text{fix}\left(\frac{t_{\Phi}}{T_i}\right) - 0,5\right)\right)^2\right) \cdot w}, \quad (5)$$

где  $\text{fix}$  – округление к меньшему по модулю;  $w = \frac{T_i}{\partial \cdot s}$  – ширина «колокола» функции Гаусса ( $\partial$  – величина допустимой погрешности в интервалах дискретности,  $s$  – интервал дискретности исходного сигнала). При полном совпадении значение  $r$  равно единице.



**Рис. 1.** Поиск периодов, составляющих по спектру и автокорреляционной функции сигнала: а) спектр частот, пороговый уровень и выделенные локальные максимумы спектра на периодах  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_6\}$ ; б) АКФ сигнала и демонстрация периодичности  $\Delta t$  ее локальных максимумов (периодичности прослеживаются с периодами  $T_1, T_3$  с допустимой погрешностью  $\delta$ )



**Рис. 2.** Пример, поясняющий процедуру верификации периода  $T_i=0,3$  с. Полное совпадение ( $r[1], r[3]=1$ ) верифицируемого периода с позициями первого и третьего максимумов  $t_{\Phi}$ , а также четвертого с небольшой погрешностью ( $r[4] \approx 0,9$ )

По величине соответствия  $B = \frac{\sum r}{n}$  в итоге проверяется совпадение количества периодов на продолжительности сигнала с количеством локальных максимумов АКФ в окрестностях этих периодов. При полном совпадении  $B=1$ .

Верификация периода  $T_i$  пройдена, если  $B > k$ , где  $k$  – проверочный коэффициент (экспериментально установлено, что при  $k \approx 0,85$  достигаются наилучшие результаты). Если проверка текущего периода не пройдена, то далее этой процедуре подвергается период  $T_{i-1}$  вплоть до периода  $T_1$ , верификация которого алгоритмом считается пройденной по умолчанию.

После прохождения верификации происходит выделение составляющей  $P_m(t)$  с периодом  $T_i$  путем усреднения из сигнала  $y_{m-1}^*(t)$  по (4) и ее вычитание из сигнала:

$$y_m^*(t) = y_{m-1}^*(t) - P_m(t). \quad (6)$$

Далее цикл повторяется: перестраивается спектр для полученного сигнала, производится поиск периодов по (4), выполняется сравнение с пороговым уровнем и т.д. После выделения периодических составляющих на спектре исчезнут пики на частотах этих составляющих, и если не найдется ни одного периода  $|T| = 0$  по (4), то алгоритм переходит к выделению случайной составляющей.

**Случайная составляющая** –  $N(F(x))$ , где  $N$  – оператор генерирования сигнала составляющей из равномерно распределенного случайного сигнала по инверсной функции распределения амплитуд  $F(x)$  сигнала  $y_m^*(t)$  методом обратного преобразования (рис. 3) [1, 4].

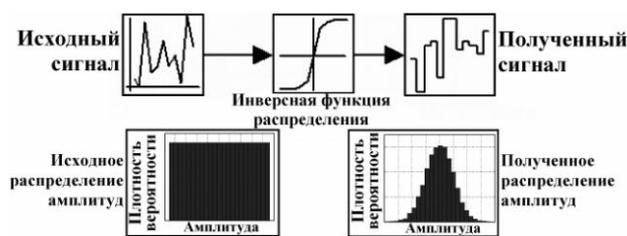


Рис. 3. Метод обратного преобразования

После выделения случайной составляющей процедура построения модели (1) завершена. Блок-схема изложенного алгоритма создания модели изображена на рис. 4.

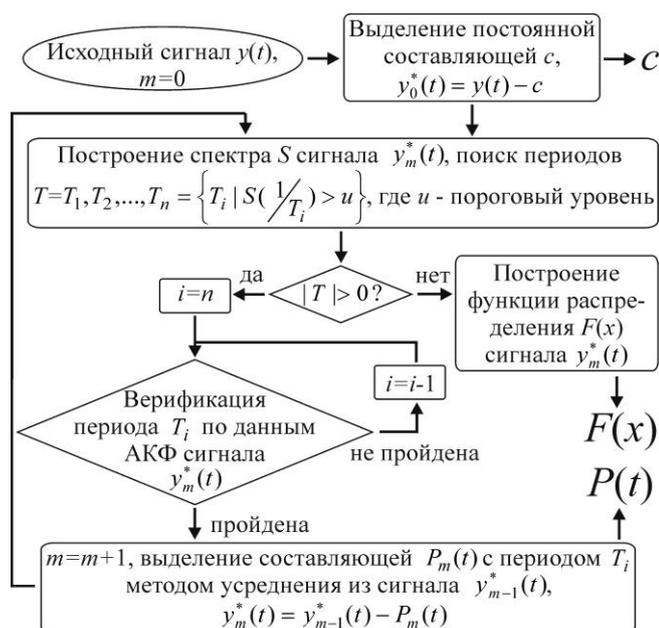


Рис. 4. Блок-схема алгоритма

## Результаты моделирования и реализация алгоритма

Результаты моделирования различных шумов подтверждают работоспособность приведенного алгоритма. Один из них показан на рис. 5. Для сигнала шума тензодатчика был задан пороговый уровень  $u \approx 1 \cdot 10^{-4}$  на спектре (рис. 5). Количество периодических составляющих в полученной модели шума – 21. Две из них с периодами  $T_1 \approx 0.5108$  с и  $T_4 \approx 0.1025$  с (частотами  $f_1 \approx 1.958$  Гц и  $f_4 \approx 9.76$  Гц) представлены на рис. 5.

Отличительной особенностью подхода является получение аддитивных периодических составляющих с возможностью их дальнейшего исследования. Представленный алгоритм реализован в виде приложения в программной среде MATLAB и находится в свободном доступе по адресу <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/32021> и подробнее описано в [8].

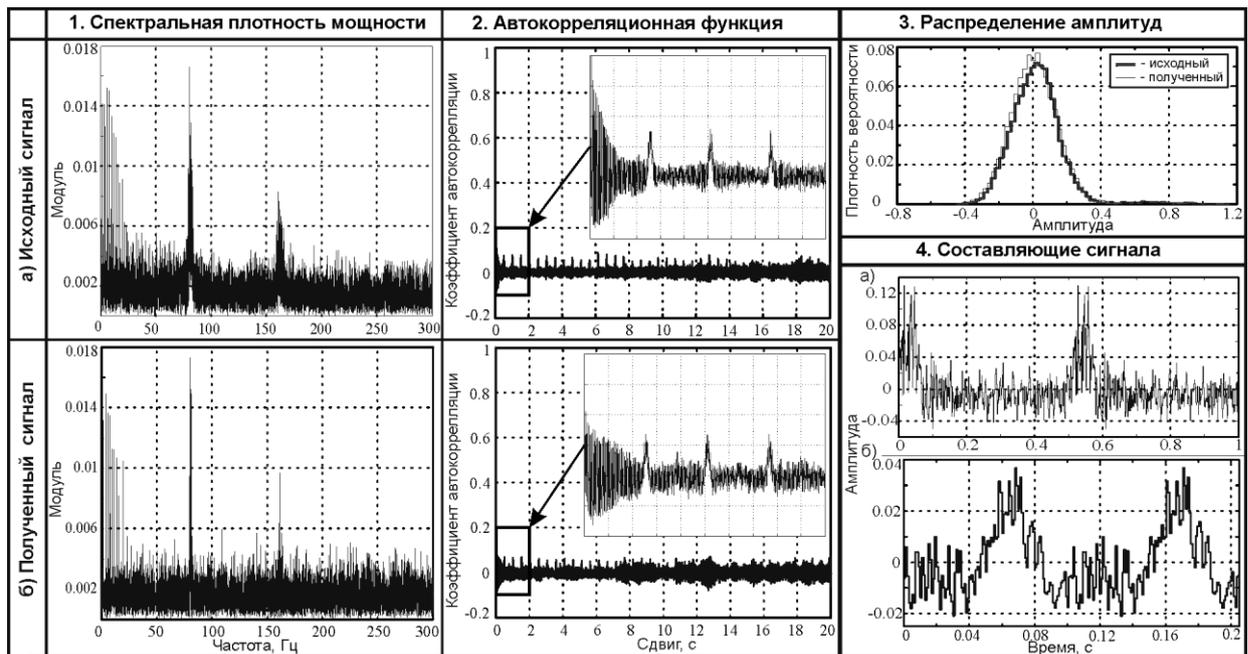


Рис. 5. Результаты моделирования сигнала шума тензодатчика

## Выводы

В ходе данного исследования был разработан подход к моделированию стационарных шумов с различными характеристиками. Моделью шума является сумма аддитивных составляющих, получаемых в результате разложения моделируемого сигнала. В статье описан разработанный и примененный в исследовании способ автоматического выделения негармонических периодических составляющих временного ряда, что представляет отдельный интерес. Среди особенностей важно отметить возможности исследования этих составляющих и анализа их влияния на сигнал шума. Предложенный подход может использоваться для решения задачи исследования и моделирования стационарных шумов в измерительных каналах САУ.

Предложенный алгоритм реализован в виде приложения «SigDecTool», которое упрощает его использование в научных и учебных целях и находится в свободном доступе по адресу <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/32021>.

## Литература

1. Васильев К.К., Служивый М.Н. Математическое моделирование систем связи: [Учеб. пособие] / Ульяновск : УлГТУ, 2008. – 170 с.
2. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: В 2-х томах. Пер. с франц. / М.: Мир, 1983. – Т. 1. 312 с.
3. Киселев Л.В., Матвиенко А.В., Инзарцев Ю.В. О некоторых задачах динамики и управления пространственным движением АНПА // Подводные исследования и робототехника. 2006. № 2. С. 13-26.
4. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Основы моделирования и первич. обраб. данных. [Справ. Изд.] / М.: Финансы и статистика, 1983. – 471 с.
5. Орлов А.И. Прикладная статистика: [Учебник] / М.: Издательство «Экзамен», 2004. – 656 с.
6. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Анализ данных на компьютере : [Учеб. пособие] / М.: Инфра-М, 2003. – 544 с.
7. Харкевич А.А. Спектры и анализ / Москва: Изд-во ЛКИ, 2007. – 236 с.
8. Вара А.В., Змеу К.В., Ковалев В.А., Ноткин Б.С. Приложение для синтеза и анализа шумов в измерительных каналах САУ // Сборник материалов н.к. «Вологдинские чтения». Владивосток, ДВГТУ, 2010. – 230 с.

# СИСТЕМА КЛАССИФИКАЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ АНОМАЛИЙ, РЕАЛИЗОВАННАЯ СРЕДСТВАМИ СУБД РВ EMPRESS

**А.Н. Севрюк**

Институт проблем морских технологий ДВО РАН  
690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел./факс: (423) 243-24-16,  
e-mail: sevryuk@marine.febras.ru

Рассматриваются вопросы организации информационных потоков при кластерном анализе данных произвольной размерности средствами реляционной СУБД. Процессы интеграции системы хранения данных АНПА и системы классификации данных. Рассматриваются вопросы использования технологии СОМ для эксплуатации системы классификации средствами операционных систем семейства Windows.

## **Введение**

В процессе интеллектуального управления идентификация и распознавание объектов внешней среды являются базовыми элементами, определяющими поведение устройства. Таким образом, автоматическая система, способная различать большее число внешних объектов, будет обладать большей гибкостью поведения. Объектами внешней среды могут быть крупные элементы рельефа, скопления гидробионта, аномалии физических полей, искусственные объекты, данные о которых могут быть получены от измерительных систем подводного аппарата. Вопросам локализации измерительных аномалий водной среды в ИПМТ ДВО РАН уделяется большое внимание. Этим вопросам посвящено множество работ, среди которых [1]. Многие работы предлагают эффективные решения частных задач локализации, направленных на изыскание определенных видов измерительных аномалий: трубопроводов, кабелей, источников загрязнений. Среди решений частных задач локализации можно выделить зарубежный опыт, отраженный в работе [2]. Работы [3], [4] и [5] описывают классификационную методiku, которая позволяет решать задачи классификации локализованных измерительных аномалий любой природы. Заявленная в названии доклада система позволит организовать эффективное построение базы эталонных объектов для решения задач локализации в оперативном (в составе СУ АНПА) и апостериорном режиме работы.

## **Цели и задачи классификационного анализа на борту АНПА**

Идентификация измерительных аномалий при использовании подводной техники обладает большим практическим потенциалом в решении следующих задач: подсчета популяций гидробионтов; идентификация загрязнений окружающей среды; идентификация и отслеживание навигационных ориентиров и опасных объектов.

Цель автоматической классификации измерительных аномалий состоит в том, чтобы решать описанные выше задачи в режиме автономного функционирования АНПА. Т.е. с минимальным участием со стороны оператора или при полном его отсутствии.

При этом классификационный анализ должен отвечать следующим требованиям: минимально-возможная ресурсная емкость операций по построению и классификации измерительных аномалий на множестве измерений, возможность коррекции правил классификации аномалий.

## **Базовые понятия системы классификации**

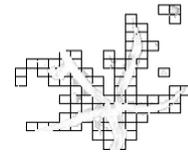
Разработанная система ориентирована на работу с объектами различной топологической размерности и не является специфической. С её помощью можно классифицировать последовательности (размерность 1), объекты ГБО и фото изображений (размерность 3), анализировать комплексированные данные.



а)



б)



в)

**Рис. 1.** Базовые элементы системы классификации на примере фото-изображения: а) изображение; б) объект из точек; в) объект из первичных кластеров

**Расчёт основных характеристик объектов**

Таблица

id	date_on	state	date_off	cl_pid	mode
1417	20110731070108468096	1	20110731070128468096	657	0
1418	20110731070110322812	1	20110731070130322812	657	0
1419	20110731070112065545	1	20110731070132065545	657	0
1420	20110731070113869269	1	20110731070133869269	657	0

**Построение кластеров**

Изображение: 1, Сетка: 1

УДАЛИТЬ РАЗБИЕНИЕ 1

ЗАДАТЬ ОБЪЕКТЫ ДЛЯ РАЗБИЕНИЯ 1

Объекты изображения 1 на сетке 1

Удалить объект

**Слияние объектов**

```

img union_list(
  char *condition_string,
  long img_id,
  double img_delay,
  double img)
{
  select min(id), max(id) from data_objects where ?
  and(=condition_string);

  union_list(
    "img_id = 1",
    1,
    0.000,
    700.0
  )
}
  
```

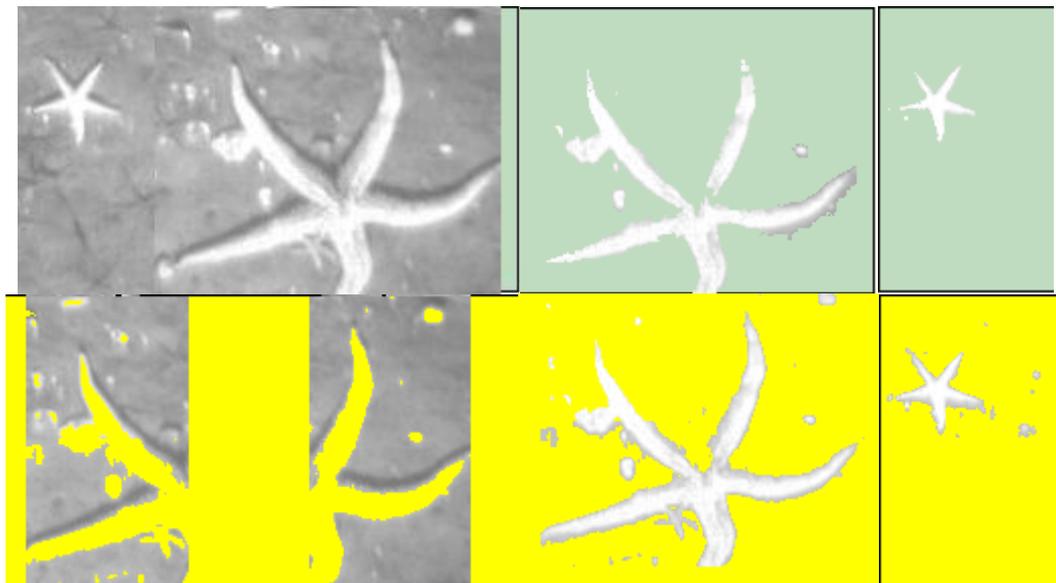
Результат выполнения команды

```

select com_type/CA/са/хехе/BASE/,CALL union_img
  1,
  0.000,
  700.0
)
  
```

17:00:03 Обработка  
17:00:03 Запрос выполнен  
Результат:  
обработано объектов 1906

**Рис. 2.** Некоторые окна графического интерфейса управления



**Рис. 3.** Распознавание и классификация тривиальных объектов

Важно отметить, что измерительные системы робота в ряде случаев отображают объекты внешней среды в топологии отличной от той, в которой этот объект воспринимается человеком.

Базовые термины системы классификации включают следующие определения:

- **измерением (точкой)** в системе классификации считается квантированный набор значений параметров;
- **изображение** совокупность измерений, которая может содержать информацию об исследуемых объектах;
- **первичный кластер** [3] — группа измерений в определенном участке пространства;
- **объект (кластер)** — набор метрически-близких первичных кластеров;
- **класс** — набор однотипных объектов, сгруппированных на основе критерия.

Рассмотрим некоторые из них на примере фрагмента фотоизображения (см. рис. 1). Начиная слева (рис. 1, а) приводится фрагмент фотоизображения, которое можно рассматривать как набор измерений (точек) в трехмерном базисе: вертикальные, горизонтальные координаты и цвет. Далее (рис. 1, б и 1, в) приводится один и тот же фрагмент изображения, сформированный из точек и из первичных кластеров, границы которых показаны сеткой (рис. 1, в).

Для формирования объектов (кластеризации) система использует центроидный метод кластерного анализа. Формирование первичных кластеров на пространстве изображения необходимо для уменьшения комбинаторной емкости (убыстрения) процесса выделения объектов.

Первичные кластеры формируются с использованием многомерной нерегулярной сетки, число ячеек которой определяется числом интервалов на каждой из осей базиса. Точки приписываются кластеру, если их компоненты лежат в границах диапазона ячейки. Номер ячейки вычисляется из компонент точки, что позволяет построить множество предварительных кластеров за один проход по множеству точек исследуемой области.

Более подробно об этом в работах [3-5].

#### **Описание реляционной модели системы классификации**

Эффективным инструментом реализации семантического аппарата являются реляционные СУБД, которые позволяют выстраивать отношения между базовыми объектами системы классификации как между элементами данных и обрабатывать большие объемы исходных данных. В качестве базового инструмента обработки данных в системах управления подводных аппаратов ИПМТ ДВО РАН используется СУБД РВ Empress [6], поскольку удовлетворяет жестким эксплуатационным требованиям системы управления АНПА [7].

Рассмотрим реализацию семантического аппарата на примере основных таблиц базы данных системы классификации

- **таблица точек** содержит информацию о значениях измерений параметров. Ключевые атрибуты таблицы – номер измерения и номер изображения – однозначно определяют принадлежность точки изображению;
- **таблица изображений** содержит информацию об анализируемых изображениях; ключевым атрибутом является идентификатор изображения в системе;
- **таблица разбиений** задает область разбиения изображения на первичные кластеры, для каждого измерения задается минимальное и максимальное значения области определения и число интервалов разбиения (формируется шаг неравномерной сетки). Ключевой атрибут – идентификатор разбиения;
- **таблицы ячеек** – группа зависимых таблиц, формируемая таблицей разбиений. Для каждого разбиения в системе может существовать (отношение  $1..n=[0..1]$ ) своя таблица ячеек, в которой первичный кластер заданного разбиения сопоставляется с точкой. Атрибуты: номер точки и номер ячейки;

- **таблицы первичных кластеров** – аналогичная таблицам ячеек группа зависимых таблиц. Атрибуты: номер ячейки, номинальные и квадратичные координаты центра масс, число точек в первичном кластере;
- **таблица объектов** связывает объекты распознавания и первичные кластеры, определяя какие первичные кластеры, какого изображения и разбиения входят в объект. Атрибуты: идентификаторы объектов, изображений, разбиений и ячеек. Ключевой атрибут – идентификатор объекта. Изначально число объектов равно числу первичных кластеров изображения. В последующих итерациях кластеризации происходит слияние объектов, в результате которого в объект может входить несколько первичных кластеров как с одного, так и из многих изображений (см. рис 1, в);
- **таблица классов** сопоставляет выделенные объекты и их группы, сформированные по принципу сходства. Ключевые атрибуты: идентификаторы объекта и класса.

В настоящий момент для оценки принадлежности объектов к классам используется метрика на основе морфометрических инерциальных критериев [3]. Которые рассматривают объект распознавания как геометрическую конструкцию пространства  $E_n$ , для которой в  $n$ -мерном пространстве существует  $\frac{n}{2} \cdot (n-1)$  проекций. Для каждой проекции такой конструкции рассчитываются ориентация и эксцентриситет эллипсоида инерции. Степень различия объектов определяется как среднее значение отклонений эксцентриситета эллипсоида инерции по проекциям.

Основные преимущества реляционной схемы хранения данных состоит в следующем:

- возможность переопределить принадлежность объектов системы к классам, а отдельных измерений к изображениям и первичным кластерам, что дает широкие возможности коррекции работы системы классификации;
- отсутствие существенных ограничений на размер изображений, объектов и ёмкость классов;
- высокую степень доступности данных внешними приложениями.

Недостатком реализации системы на основе СУБД является существенное снижение производительности процессов сегментации и распознавания по отношению к реализации того же механизма исключительно в ОЗУ.

Использование дополнительных преимуществ выбранной СУБД в контексте системы позволяет:

- выполнять процессы сегментации и распознавания средствами хранимых процедур, что позволяет использовать пакетную обработку данных;
- использование СОМ-технологии для организации процессов обработки данных и визуализации результатов средствами Windows;
- использовать диспетчеризацию команд, для организации параллельного выполнения процедур и уменьшения времени ожидания ответа внешними клиентами.

#### **Интеграция системы классификации и системы хранения данных**

Общая информационная платформа системы хранения данных и системы классификации позволяет выполнять экспорт данных из системы хранения. Путем прямого экспорта из одной базы данных в другую средствами Empress SQL [6]. Также СУБД позволяет осуществлять параллельный импорт данных от измерительных устройств в обе подсистемы.

#### **Инструменты управления системой классификации**

Система классификации предусматривает два режима управления: средствами командной консоли непосредственно на сервере СУБД и средствами графического интерфейса. Интерфейс представляет многооконное приложение для ОС семейства Windows. На главной форме приложения (см. рис. 2) основные действия системы распознавания доступны по кнопкам, каждая из которых открывает форму управления своим действием.

Нужно отметить, что графический интерфейс управляет системой классификации опосредованно – через передачу команд и режима их выполнения серверу, такой подход существенно снижает загрузку сети.

### **Качественная оценка системы классификации**

Рассмотрим работу системы классификации на примере анализа комплексных и тривиальных объектов. К тривиальным объектам следует относить те, изображения которых получают от одного типа устройств. Так фото и ГБО изображения можно считать тривиальными. Анализ таких изображений востребован в задачах поиска маркеров или подсчете гидробионтов. Комплексные изображения получают путем комплексирования данных от разных устройств. В качестве примера комплексирования данных GPS, ЭМИ и фото. Такие изображения можно использовать в задаче автоматизации поиска и классификации областей возмущений магнитных полей на отдельном фото или выделении всех фотографий данной области. На рис. 3 приведены результаты классификации объектов тривиального изображения, выделенных из первичных кластеров разной размерности. При укрупнении кластеров точность классификации может падать (см. второй ряд изображений рис. 3), однако скорость сегментации и распознавания значительно возрастают.

### **Заключение**

Реализованная система распознавания позволяет эффективно локализовывать и классифицировать измерительные аномалии любой природы разной топологической размерности. Важным достоинством системы является возможность коррекции классификации и возможность расширения метрического аппарата. К особенностям системы следует относить относительно низкую скорость обработки данных при сегментации средствами СУБД изображений емкостью более 5000 измерений. Данный недостаток не носит определяющего характера, т.к. производительность системы достаточна, чтобы использовать результаты ее работы в оперативном режиме функционирования на борту АНПА. Реализация системы распознавания на одной платформе с системой хранения данных позволяет производить ускоренный экспорт данных и значительно повышает степень интеграции системы классификации и СУ АНПА.

## **Литература**

1. Инзарцев А.В., Павин А.М. Организация движения АНПА вдоль одномерных протяженных объектов на основе комплексирования информации телевизионной системы и электромагнитного искателя // Материалы научно-технической конференции «Технические проблемы освоения мирового океана», Владивосток, 2-5 октября 2005 г.
2. Charles M. Ciany, William C. Zurawski, Gerald J. Dobeck, Dennis R. Weilert. Real-Time Performance of Fusion Algorithms for Computer Aided Detection and Classification of Bottom Mines in the Littoral Environment // OCEANS'03. P. 1119-1125.
3. Севрюк А.Н. Метод оптимизации кластерного анализа для решения задач локализации подводных объектов // Мехатроника. 2011. № 7.
4. Севрюк А.Н. Автоматическая классификация кластеризованных измерительных аномалий на борту АНПА // Мехатроника. 2011. № 5.
5. Севрюк А.Н. Механизм автоматической классификации кластеризованных измерительных аномалий на борту АНПА // Приборы. 2011. № 5.
6. [www.empress.com](http://www.empress.com)
7. Севрюк А.Н., Инзарцев А.В. Использование СУБД реального времени в системе управления АНПА // Материалы международной научно-технической конференции «Технические проблемы освоения мирового океана», Владивосток, 14-17 сентября 2005 г. С. 27-33.

# НЕКОТОРЫЕ АЛГОРИТМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ АНПА ДЛЯ СЪЕМКИ ПАРАМЕТРОВ ВОДНОЙ СРЕДЫ С ЗАДАННОЙ ТОЧНОСТЬЮ

Н.В. Сураев

Дальневосточный федеральный университет  
690950, Владивосток, ул. Суханова, 8, e-mail: nsuraev@gmail.com

АНПА все чаще применяется для обследования водных акваторий. При оценке параметров водной среды или картографировании дна, когда АНПА движется, например равномерным меандром в разных слоях воды, необходимо обеспечить как можно большую точность измеряемых данных. Однако в случае, когда цель обследования состоит в том, чтобы обнаружить и отразить характерные неоднородности внешней среды, целесообразно использовать адаптивные алгоритмы формирования траектории движения АНПА. В настоящее время большинство миссий АНПА заранее запрограммированы. Во время выполнения длительных миссий важно учитывать ограниченный ресурс автономности аппарата и риск сбора данных с небольшой научной ценностью.

Самыми распространенными задачами решаемыми в настоящее время с помощью автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), являются инспекционные работы. Такие работы чаще всего выполняются с использованием различных систем получения данных: STD зондов, гидролокатора бокового обзора (ГБО), профилографа, фото и видео систем. Возникает необходимость в полном покрытии исследуемой акватории и более точном измерении интересующих областей.

В 1994 Anthony Stentz в своей статье [1] представил алгоритм нахождения оптимальных путей для робота, снабженного сенсорами и картой местности. В статье [2] рассмотрены модели прогнозирования с применением АНПА на основе данных получаемых с многолучевых и оптических изображений (фоторяда). В работе [3] описаны методы картографирования и локализации АНПА, аномальных областей на больших площадях с применением метода DSM. Для высокоточного и полного экологического мониторинга так же применяется комплексный подход с применением спутниковых систем, взятием проб воды и лидар-датчиков[4].

Разработка адаптивных алгоритмов формирования траектории движения подводного аппарата для съемки параметров водной среды с заданной точностью.

В данной работе рассмотрены алгоритмы формирования траекторий движения автономного необитаемого подводного аппарата.

## **Формирование траектории пересекающимися меандрами**

Для покрытия больших площадей чаще всего применяется траектория типа меандр. Одним из способов оценки состояния заданного района обследования является покрытие его равномерно расположенными траекториями (галсами). Галсами меандра являются линии пересечения параллельных плоскостей (рис. 1).

Перекрытие галсами обеспечивает более точное измерение в узлах сетки. В связи с тем, что реальная траектория движения АНПА не совпадает с прямоугольной сеткой и не является прямоугольной, сетка из меандров позволяет полученные измерения в узлах пересечения использовать в различные методы интерполяции данных (рис. 2). Использование сетки меандров обеспечивает более точное измерение в исследуемой области, что способствует в дальнейшем легкому построению карт параметров среды.

Для обеспечения движения АНПА вдоль заданной траектории, необходимо на борту подводного аппарата иметь возможность определять местоположение с высокой точностью и корректировать траекторию АНПА в случае отклонения ее от заданной, например, из-за наличия течения в районе выполнения миссии.

Рассмотрим пример движения подводного аппарата по траектории в виде перпендикулярный меандр (сетку из нескольких меандров).

Предположим, что известно (либо задана) площадь  $S$  акватории, в которой нужно произвести измерения. Движение АНПА будет производиться прямолинейными галсами по всей площади вдоль основной оси – оси абсцисс.

$$S = H \times W, \quad (1)$$

$$L = (H + h) \times n, \quad (2)$$

$$W = h \times (n - 1), \quad (3)$$

где  $H$  – длина галса,  $W$  – ширина,  $h$  – длина мелкого галса,  $L$  – суммарная длина пути,  $S$  – площадь акватории.

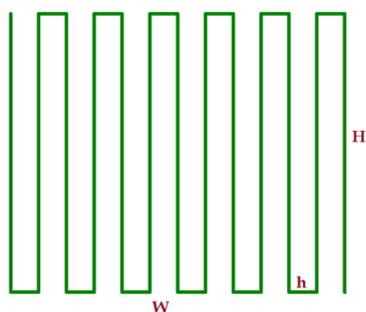


Рис.3. Траектория в виде меандра

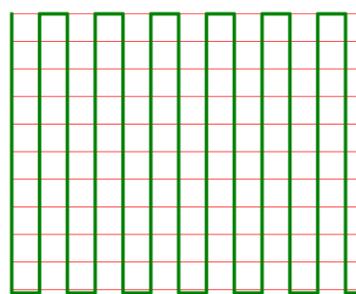


Рис. 4. Сетка из меандров

Чтобы обеспечить съемку без перекрытия, количество галсов рассчитывается пропорционально площади и ширины обзора (видимости датчика, к примеру, видео-фото камера или ГБО).

Рассматриваемая миссия представляет собой первоначальный заданный меандр вдоль оси абсцисс, с постоянным шагом измерения и постоянной скоростью. После прохождения по всей площади, формируется траектория движения вдоль оси ординат (поперечный меандр) от первоначально заданной точки выполнения миссии. Вне зависимости от формы и площади измеряемой неоднородности, точность отображаемых данных зависит только от применяемого шага или частоты измерения прибора.

#### Алгоритм планирования пути на основе адаптивного меандра

Алгоритм основан на вычислении некоторой индикаторной функции, зависящей от ряда параметров, характеризующих некоторое скалярное поле. При резком изменении поля траектория движения не изменяется – уменьшается шаг для того, чтобы измерения производились чаще, до тех пор, пока аппарат не окажется на более гладком участке поля. Предположим (допустим) в заданной водной акватории (области) нужно прецизионно измерить какую либо неоднородность (температуру, концентрацию в-ва.). Предполагаемая акватория для измерения задается в виде прямоугольника.

Расстояние  $h$  между точками измерения будет, определяется выражением с учетом коэффициента изменения, последующий шаг измерения будет, рассчитывается:

$$h_n = h_{n-1} \times r p_n, \quad (4)$$

Концентрация  $K$  в измеряемых точках  $(x, y)$  изменяется, либо постоянна:

$$\Delta K = |K_n - K_{n-1}|, \quad (5)$$

При оценивании измеряемого параметра, используется усреднения измерения по градиенту на некотором промежутке:

$$gr_n = \frac{\Delta K}{h_{n-1}}, \quad (6)$$

$K_n(x_n, y_n)$  – значение измеряемого параметра в точке,  $gr_n$  – градиент,  $rp_n$  – коэффициент изменения шага измерения.

$$rp_n = rp_{n-1} \left( \frac{gr_{n-1}}{gr_n} \right)^2. \quad (7)$$

Значение коэффициента  $rp_{n-1}$  показывает, насколько измеряемый параметр отклоняется от значений в предыдущей точке измерения.

Суммарная длина пройденного пути  $L$  в данном случае будет рассчитываться выражением:

$$L = \sum (H + h). \quad (8)$$

Траектория движения АНПА формируется в виде меандра с постоянным шагом, в

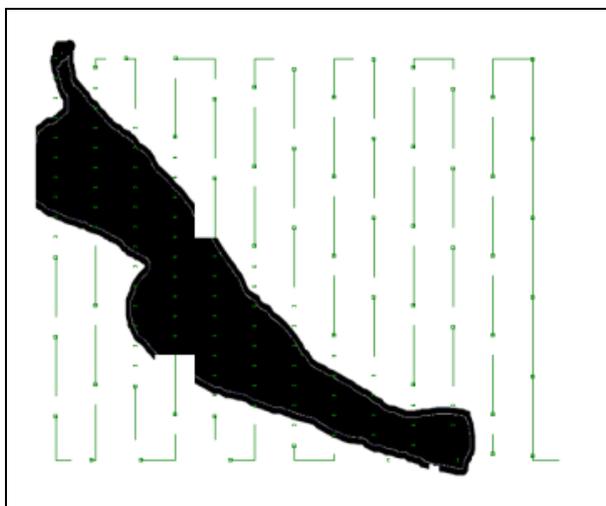


Рис. 5. Неоднородность и траектория движения АНПА с изменением периодичностью съемки

заданной области. Аппарат выполняет несколько параллельных галсов пропорционально общей площади. На рис. 3 изображена неоднородность и траектория движения АНПА.

Когда траектория подводного аппарата пересекает неоднородность, на основе получаемых данных рассчитывается коэффициент изменения шага измерения. При выходе из измеряемой области неоднородности, последующий шаг вне области будет равен предыдущему шагу измерения.

Блок-схема алгоритма формирования траектории движения АНПА в виде меандра с изменяемой периодичностью съемки представлена на рис. 6, а. Работа алгоритма

реализована на языке C++.

На рис. 4 изображен график изменения измеряемого параметра вдоль траектории движения аппарата.

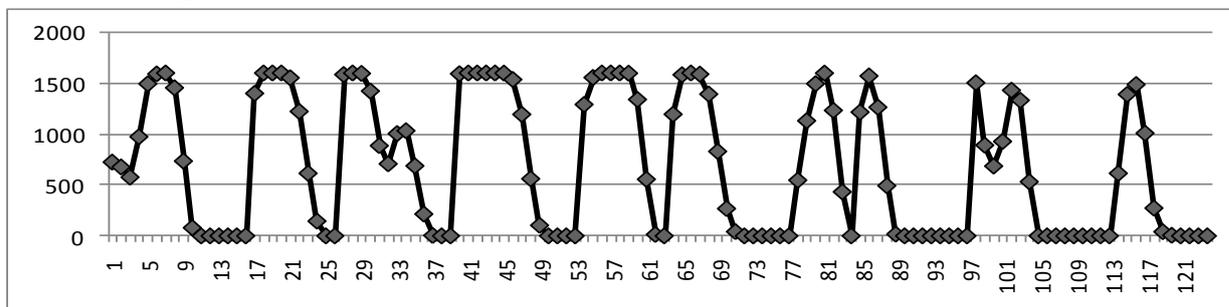


Рис. 6. График изменения параметра вдоль траектории движения АНПА

### Меандр с детализирующей областью

Траектория движения аппарата в каждой точке представляла собой меандр в горизонтальной плоскости, состоящий из прямолинейных мелких галсов. Как и в

предыдущем случае, первоначально АНПА движется по траектории меандром с большим шагом галсом до тех пор, пока не будет обнаружено необходимое изменение исследуемого параметра, после чего дальнейшее движение формируется по мере изменения исследуемого параметра.

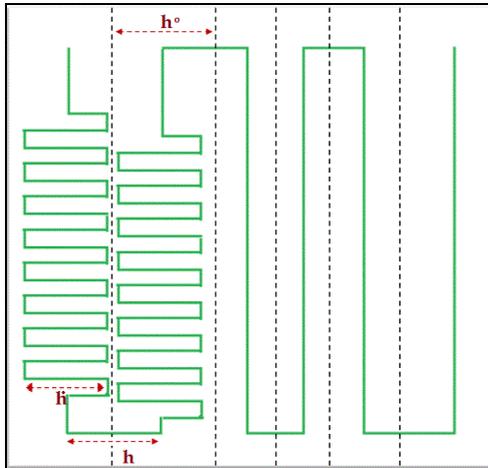


Рис. 5. Меандр с детализирующей областью

Траектория меняется на более мелкий меандр, не выходя за пределы исследуемой области (сектора) с изменяемой частотой измерения.

Траектория движения АНПА изображена на рис. 5. Зададим условие, что ширина меандра с мелким галсом  $\dot{h}$  и ширина области  $h^o$  не должна превышать длину  $h$  – расстояние между основными галсами. Это условие гарантирует, что аппарат побывал во всех областях, и не произойдет пересечение траектории с соседней областью. Во время движения, когда АНПА движется по траектории мелким меандром в секторе, частота измерения зависит от рассчитываемого коэффициента изменения параметра, описанного ранее.

Блок-схема предложенного алгоритма приведена на рис. 6, б.

Шаги алгоритма:

1. Вводятся входные параметры (пороги) при необходимости.
2. Рассчитать количество областей пропорционально количеству галсов в первоначальной траектории.
3. Первоначально АНПА движется меандром с большим шагом галса.
4. Во время движения аппарата в области при измерении оценки, траектория меняется на перпендикулярный меандр с малым шагом галса.
5. При прохождении всей заданной площади акватории или окончании заданного времени миссия прекращается.

### Некоторые выводы

Критериями оценки эффективности траектории можно считать соотношение площади акватории  $S$  и квадратом расстояния  $L^2$ , пройденным аппаратом на покрытие этой площади.

$$\frac{S}{L^2} \text{ – соотношение площади к квадрату пройденному пути.}$$

Из этого соотношения можно будет сделать вывод, насколько эффективно при одинаковых первоначальных условиях, время работы алгоритмов, а так же их эффективность представленных данных.

В процессе моделирования работы алгоритмов исследовалось несколько модельных данных, наиболее часто встречающихся в реальных водных исследованиях, таких как неоднородность в виде шлейфа, и локальная неоднородность в виде пятна.

Предполагается, что:

- скорость движения АНПА постоянна;
- скорость, направление и влияние течения не учитывается;
- бортовая навигационная система обеспечивает достаточную точность локализации аппарата в любое время.

На рис. 7 представлен критерий оценки для каждой траектории.

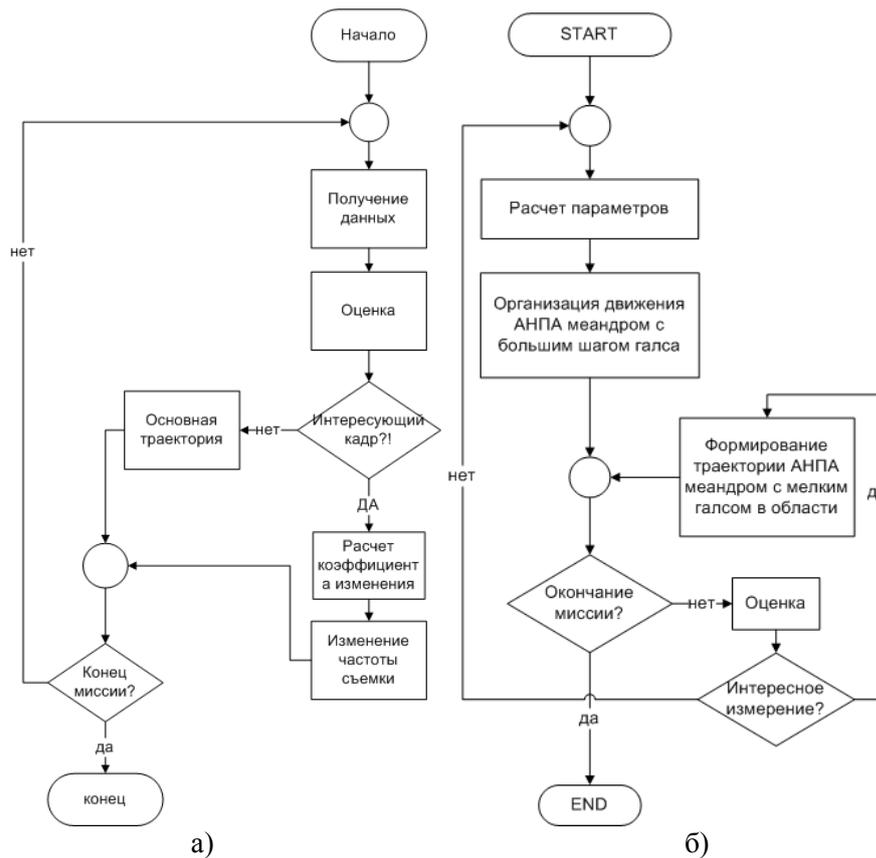


Рис. 6. Блок-схема работы алгоритмов: а) меандра с изменением периодичностью съемки, б) меандр с детализирующей областью

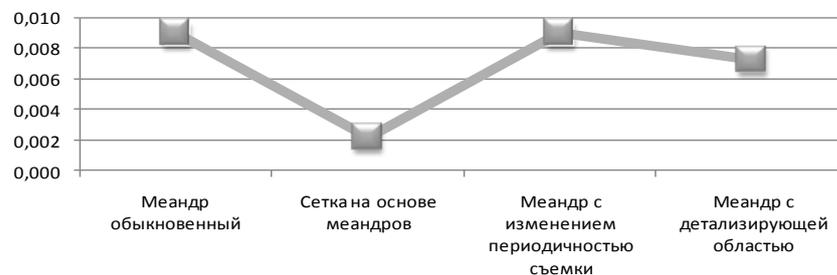


Рис. 7. Соотношение площади к квадрату пройденного пути

Результаты исследования на модельных данных представлены в таблице 1.

Из таблицы полученных результатов моделирования можно сделать несколько выводов.

Покрытие заданной акватории густой сетью меандров чрезвычайно трудоемко. Наиболее перспективным представляется адаптивный метод, при котором на участках, где искомый параметр среды измерения меняется слабо, выполняются измерения с большим шагом, а в местах резких перепадов шаг измерения уменьшается до величины, обеспечивающей требуемую точность съемки.

**Таблица 1**

Тип траектории	Пройденный путь	Количество измерений, шт.		$\frac{S}{L^2}$
		Шлейф	Пятно	
Меандр обыкновенный	5842	146	146	0,008981667
Сетка на основе меандров	11894	280	280	0,002166827
Меандр с изменением периодичностью съемки	5842	124	95	0,008981667
Меандр с детализирующей областью	6505	230	263	0,007244117

Траектория движения типа меандр с изменением периода съемки эффективен, если необходимо произвести качественную фотосъемку неоднородности, придонных объектов или различных типов дна.

Сетка из меандров обеспечивает наибольшее эффективное покрытие больших территорий, поскольку не содержит повторных покрытий. Получаемые измерения в областях, а не в точках, покрытия сетью из меандров позволяют более точно в дальнейшем интерполировать измеренные данные.

Для измерения скалярного поля (изменения концентрации), подходят все четыре траектории.

Немаловажным фактором является количество сделанных измерений, этот фактор стоит учитывать при использовании фото или видеосистемы, в виду ограниченного электропитания АНПА.

Исследованы характеристики алгоритмов с точки зрения точности измерения параметров среды и достоверности результата. В работе показано, что адаптивные алгоритмы обследования позволяют сформировать представление о среде с заданной точностью за более короткое время работы.

## Литература

1. Anthony Stentz, Optimal and Efficient Path Planning for Partially-Known Environments, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 1994.
2. Ahsan N., Williams S.B., Radford B. Predictive Habitat Models from AUV-based Multibeam and Optical Imagery // Proceedings of the OCEAN 2010 MTS/IEEE Conference.
3. Leonard John J., Feder H.J.S., Hollerbach J., Koditschek D. (Eds). A Computationally Efficient Method for Large-Scale Concurrent Mapping and Localization Robotics Research: the Ninth International Symposium, Springer-Verlag, London, 2000.
4. I. Alexanin, V.A. Kachur, T. Yu. Orlova, A. N. Pavlov, P. A. Salyuk. Research Arrangement for Ecological Control of Peter the Great Bay // Proceedings of First Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (Vladivostok, Russia, 6 - 9 September, 2010). P. 264 – 268.

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ АЛГОРИТМОВ ОДНОМАЯКОВОЙ НАВИГАЦИИ АНПА

**Ю.В. Ваулин, А.Ф. Щербатюк**

Институт проблем морских технологий ДВО РАН  
690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел./факс: (423) 2433059,  
e-mail: scherba@marine.febras.ru

**Ф.С. Дубровин**

Дальневосточный федеральный университет  
690950, Владивосток, ул. Суханова, 8,  
e-mail: f\_dubrovin@mail.ru

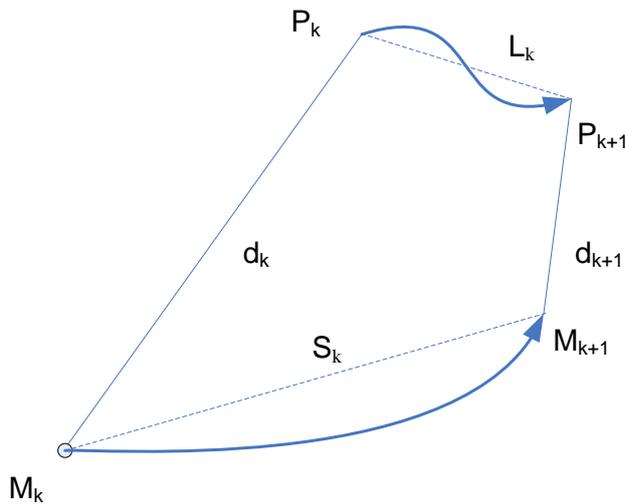
В статье рассмотрена задача определения местоположения АНПА на основе данных от датчиков бортовой навигационной системы и информации о дальности до одного гидроакустического маяка, буксируемого обеспечивающим судном или автономным необитаемым водным (поверхностным) аппаратом. Предложены несколько алгоритмов и приведены результаты моделирования их работы.

При эксплуатации автономных необитаемых подводных аппаратов /АНПА/ одной из важных задач является обеспечение высокой мобильности подводного робототехнического комплекса в целом, включая организацию навигационного обеспечения. Развертывание и сворачивание традиционной гидроакустической навигационной системы /ГАНС/ с длинной базой предполагает установку и координирование маяков-ответчиков /МО/ перед началом работы и подъем их после окончания работы. Данные операции могут занять до нескольких суток, и при этом имеется вероятность утраты МО. Кроме того, дальность действия такой системы обычно не превышает 10 км. При обследовании больших площадей возникает необходимость в многократной переустановке системы, что существенно увеличивает время и стоимость выполнения работ. Системы ГАНС с ультракороткой базой, когда движущийся АНПА сопровождается обеспечивающим судном /ОС/ с буксируемой приемной антенной, не обеспечивают необходимой точности при дальностях между ними более 1 км.

С целью создания мобильного навигационного комплекса для АНПА разрабатываются гидроакустические навигационные системы с синтезированной длинной базой /СДБ ГАНС/, которые в качестве единственного навигационного маяка используют мобильный МО [1-5]. Работа данной навигационной системы основана на использовании модемной акустической связи, которая позволяет синхронно обмениваться пакетами навигационных данных между АНПА и ОС и одновременно измерять время распространения акустического сигнала между ними.

**Итерационный навигационный алгоритм.** Положим, что местоположение АНПА определяется на основе данных от доплеровского лага и датчика курса, входящих в его бортовую навигационную систему. Глубина движения АНПА измеряется с требуемой точностью при помощи датчика давления, и в дальнейшем оцениваться будут только координаты АНПА в горизонтальной плоскости.

Для коррекции накапливающейся ошибки координат АНПА используется ГАНС с одним мобильным МО. На рис. 1 буквами  $M_k$ ,  $P_k$  и  $M_{k+1}$ ,  $P_{k+1}$  обозначены положения буксируемого маяка и подводного аппарата на  $k$ -ом и  $k+1$ -ом тактах работы ГАНС. Положим, что траектория движения АНПА имеет произвольный вид (кривая между точками  $P_k$  и  $P_{k+1}$ ).



**Рис. 1.** Положения мобильного маяка и АНПА на последовательных тактах работы ГАНС

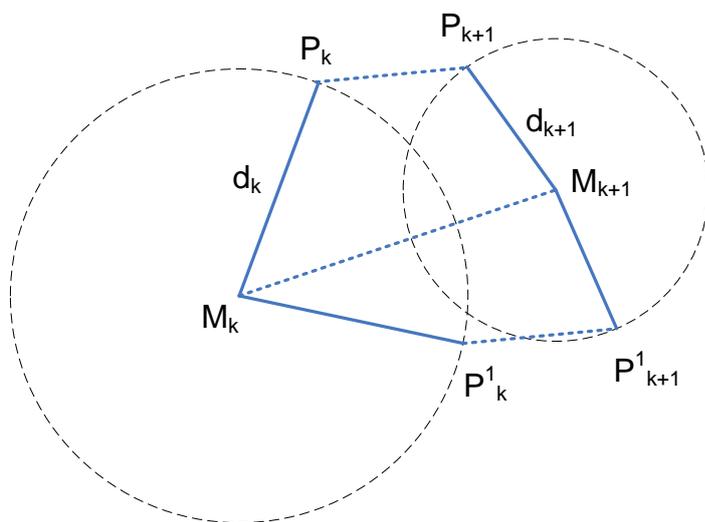
Счисленное перемещение АНПА  $\Delta X_k = [\Delta x_k, \Delta y_k]^T$  между  $k$  и  $k+1$  тактами работы ГАНС определяется в соответствии со следующими выражениями:

$$\Delta x_k = \int_{t_k}^{t_{k+1}} v(t) \cos \varphi(t) dt, \quad \Delta y_k = \int_{t_k}^{t_{k+1}} v(t) \sin \varphi(t) dt, \quad (1)$$

где  $v(t)$  – модуль скорости и  $\varphi(t)$  – курс АНПА.

В общем случае можно записать соотношения, связывающие курс, скорость и дистанции между АНПА и МО, для  $k$  и  $k+1$  тактов работы ГАНС:

$$\begin{aligned} (x_k - x_{bk})^2 + (y_k - y_{bk})^2 &= d_k^2, \\ (x_k + \Delta x_k - x_{bk+1})^2 + (y_k + \Delta y_k - y_{bk+1})^2 &= d_{k+1}^2. \end{aligned}$$



**Рис. 2.** Два решения для двух последовательных тактов ГАНС

подводного аппарата в плоскости  $Oxy$ , когда в качестве исходной информации берется набор измеренных дистанций  $\{d_k, d_{k+n}\}$  для сегмента траектории АНПА из  $n$  последовательных точек  $\{P_k, P_{k+n}\}$  (рис. 3). Для данного сегмента вычисляются прогнозируемые дистанции до мобильного МО  $\{d'_k, d'_{k+n}\}$ . Далее вычисляется

Рассмотрим итерационный алгоритм определения координат  $(x_k, y_k)$  подводного аппарата в плоскости  $Oxy$ . При этом имеется информация о глубине его движения  $z_k$ , скорости  $v(t)$  и курсе  $\varphi(t)$ , а также дальности в дискретные моменты  $k$  ( $k=1, \dots, N$ ) до мобильного маяка  $D_k$ .

Дальности между АНПА и маяком  $d_k^2$  в плоскости  $Oxy$ , определяются в соответствии с выражением:

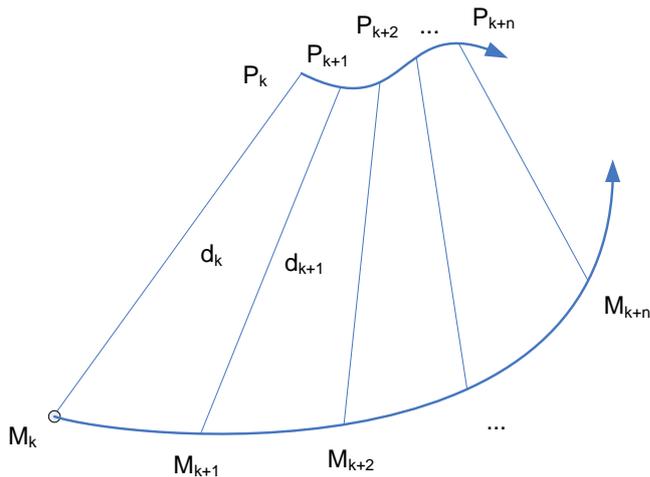
$$d_k^2 = D_k^2 - [z_k - z_{bk}]^2,$$

где  $z_{bk}$  – глубина движения мобильного маяка.

Данная система имеет два решения (см. рис. 2). Предлагаемый алгоритм основан на итерационном определении пар решений для каждой последовательной пары тактов ГАНС и выборе окончательного решения на основе группировки. Неоднозначность устраняется посредством маневрирования мобильного маяка.

Следует отметить, что данный алгоритм не накладывает ограничений на уровень начальных ошибок определения координат АНПА.

**Переборный навигационный алгоритм.** Рассмотрим алгоритм определения координат  $(x_k, y_k)$



**Рис. 3.** Два решения для двух последовательных тактов ГАНС

области поиска определяется исходя из оценки точности БАНС. Перемещение сегмента  $\{P_k, P_{k+n}\}$  в области  $A$  осуществляется с определенным дискретом, в зависимости от требуемой точности. Данный алгоритм также не накладывает ограничений на уровень начальных ошибок определения координат АНПА.

**Навигационный алгоритм на основе расширенного фильтра Калмана.** Ввиду того, что функция измерения дальности до маяка является нелинейной, будем использовать расширенный фильтр Калмана – модификацию фильтра Калмана для случая нелинейной системы. При использовании расширенного фильтра Калмана координаты АНПА и степень точности их оценки описываются при помощи вектора состояния  $X$  и его ковариационной матрицы  $P$ . Введем следующие обозначения:  $\hat{X}_{k-1}$  – полученная на предыдущем шаге оценка вектора состояния;  $\hat{P}_{k-1}$  – ковариационная матрица для оцененного вектора состояния;  $\Delta X_k$  – численный вектор перемещения АНПА;  $\tilde{X}_k$  – обновленный (предсказанный) вектор состояния на текущем шаге;  $\tilde{P}_k$  – ковариационная матрица для предсказанного вектора состояния.

Пусть в момент времени  $t_{k-1}$  подводным аппаратом был получен  $(k-1)$ -ый навигационный сигнал от гидроакустического маяка, и в результате работы алгоритма коррекции численных координат получена оценка местоположения АНПА в горизонтальной плоскости  $\hat{X}_{k-1} = [\hat{x}_{k-1}, \hat{y}_{k-1}]^T$ .

В промежутках времени между моментами получения навигационных сигналов от гидроакустического маяка ССП осуществляет счисление координат АНПА на основе данных от доплеровского лага и датчика курса. К моменту времени  $t_k$  получения подводным аппаратом  $k$ -ого навигационного сигнала численное перемещение АНПА  $\Delta X_k = [\Delta x_k, \Delta y_k]^T$  определяется в соответствии с выражениями (1).

На первом шаге работы фильтра Калмана – этапе экстраполяции – выполняется расчет предсказываемого вектора состояния  $\tilde{X}_k$  и его ковариационной матрицы  $\tilde{P}_k$ . Для этого используются полученные на предыдущем шаге оценки  $\hat{X}_{k-1}$  и  $\hat{P}_{k-1}$ , а также численный вектор перемещения АНПА  $\Delta X_k$  и его ковариационная матрица  $N_k$ . Пересчет выполняется в соответствии со следующими выражениями:

$$\tilde{X}_k = \hat{X}_{k-1} + \Delta X_k, \quad (2)$$

рассогласования между прогнозируемыми дальностями и измеренными дальностями и рассчитывается параметр  $R$ , отражающий рассогласование для сегмента в целом:

$$R = \sum_{i=0}^n |d'_{k+i} - d_{k+i}|.$$

Коррекция сводится к поиску такого расположения сегмента  $\{P_k, P_{k+n}\}$ , при котором параметр  $R$  имел бы минимальное значение. Поиск производится путем перебора в ограниченной области  $A$ . Размер

$$\tilde{P}_k = \hat{P}_{k-1} + N_k. \quad (3)$$

Вторым шагом работы дискретного фильтра Калмана является этап коррекции:

$$\hat{X}_k = \tilde{X}_k + K_k [D_k - d(\tilde{X}_k, z_k)], \quad (4)$$

$$\hat{P}_k = (I - K_k H_k) \tilde{P}_k, \quad (5)$$

где  $D_k$  и  $d(\tilde{X}_k, z_k)$  – измеренная и рассчитанная (ожидаемая) дальности между маяком и АНПА на  $k$ -ом такте работы алгоритма:

$$d(\tilde{X}_k, z_k) = \sqrt{(\tilde{x}_k - x_b)^2 + (\tilde{y}_k - y_b)^2 + (z_k - z_b)^2}, \quad (6)$$

где  $(x_b, y_b, z_b)$  – координаты маяка,  $z_k$  – глубина нахождения АНПА в момент получения  $k$ -го навигационного сигнала,  $K_k$  – оптимальная по Калману матрица коэффициентов усиления. Данная матрица рассчитывается в соответствии со следующим выражением:

$$K_k = \tilde{P}_k H_k^T [H_k \tilde{P}_k H_k^T + R_k]^{-1}, \quad (7)$$

где  $R_k$  – ковариационная матрица ошибок измерений дальностей,  $H_k$  – матрица частных производных (якобиан) функции измерения в точке  $\tilde{X}_k$ :

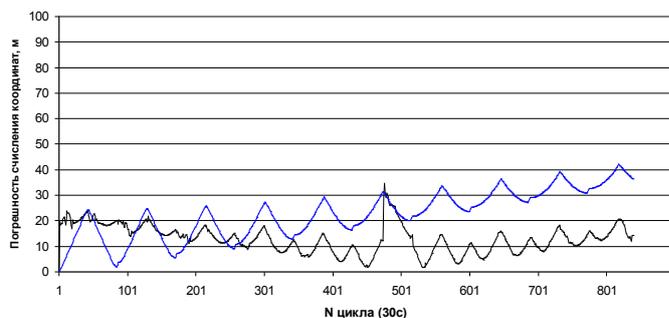
$$H_k = \left[ \frac{\partial d(X, z_k)}{\partial X} \right]_{X=\tilde{X}_k} = \frac{1}{\sqrt{(\tilde{x}_k - x_b)^2 + (\tilde{y}_k - y_b)^2 + (z_k - z_b)^2}} [\tilde{x}_k - x_b \quad \tilde{y}_k - y_b]. \quad (8)$$

В результате двух шагов работы алгоритма формируется текущая апостериорная оценка местоположения АНПА в горизонтальной плоскости  $\hat{X}_k = [\hat{x}_k, \hat{y}_k]^T$ . Следует отметить, что данный алгоритм накладывает ограничений на уровень начальных ошибок определения координат АНПА, так как ковариационная матрица ошибок используется для формирования матрицы коэффициентов усиления, а при большом коэффициенте усиления система становится неустойчивой. С другой стороны, знание ковариационной матрицы ошибок для предсказанного вектора состояния позволяет контролировать сходимость и устойчивость процесса оценивания.

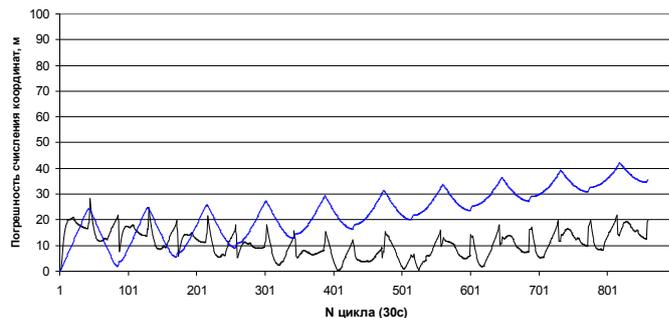
**Некоторые результаты моделирования работы алгоритмов.** Для моделирования рассмотренных алгоритмов была написана программа, включающая в себя упрощенную модель движения АНПА и графическую оболочку, позволяющую задавать траекторию, изменять параметры модели, варьировать величины погрешностей измерений, задавать коэффициенты алгоритмов и визуализировать результаты вычислений.

Для исследования работы итерационного и переборного алгоритмов использовалась модельная траектория в виде меандра. Меандр состоял из 20 параллельных галсов протяженностью 1300 м. Скорость движения АНПА составляла 1 м/с. Параметры навигационной системы АНПА: ошибка измерения курса – 1 град., ошибка измерения скорости – 0.01 м/с., диапазон ошибок измерения дальностей – 5 м.

Моделирование показало, что предложенные переборный и итерационный алгоритмы обеспечивают повышение точности измерения координат АНПА по сравнению с просто счислением и позволяют устранить эффект накопления ошибки счисления (рис. 4, 5). Среднее отклонение координат, вычисленных по данным ГАНС с одним МО, для итерационного алгоритма составило 12,9 м, а для переборного алгоритма – 10,8 м. Однако при этом переборный алгоритм предъявляет более значительные требования к вычислительным ресурсам бортовой системы программного управления АНПА.



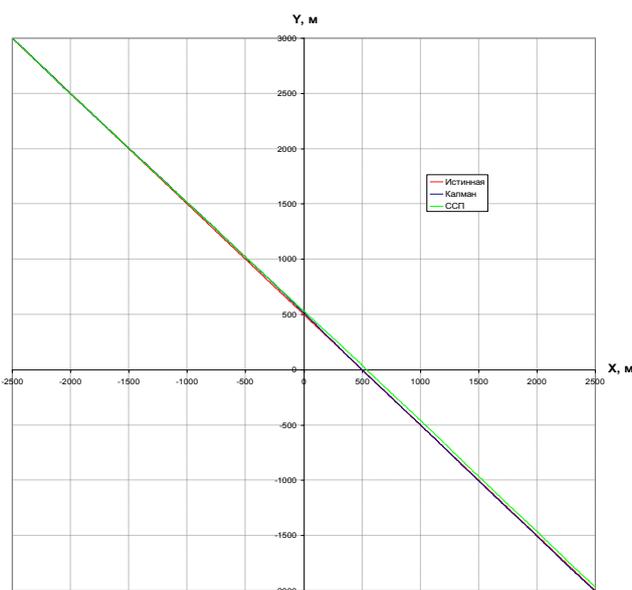
**Рис. 4.** Погрешность измерения координат для итерационного алгоритма



**Рис. 5.** Погрешность измерения координат для переборного алгоритма

зашумлялось нормально распределенной случайной величиной с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением 3 м. Период работы ССП равнялся 0.1 секунд, а период работы ГАНС составлял 10 секунд. Продолжительность миссии была выбрана равной 5000 секунд.

На рис. 6 изображены численная траектория АНПА и траектория, полученная на основе коррекции численных координат при помощи расширенного фильтра Калмана. На рис. 7 приведены графики ошибок, в качестве которых было выбрано рассогласование между истинным положением АНПА и рассчитанным (с помощью обычного счисления пути и с



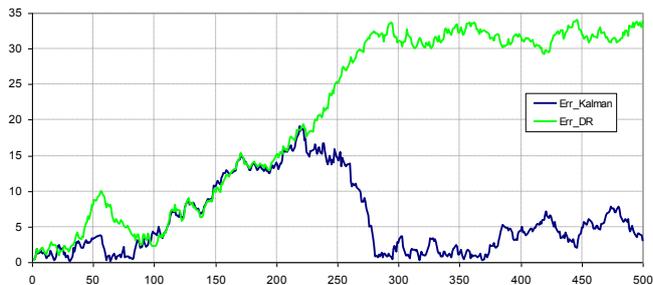
**Рис. 6.** Траектория движения АНПА (модельный эксперимент №1)

помощью описанного алгоритма коррекции). На рис. 8 показаны графики дисперсий ошибок для координат  $x$  и  $y$ , представляющие собой диагональные элементы ковариационной матрицы. Как видно из данных графиков, дисперсия ошибки по координате  $y$  уменьшается примерно с 170 цикла работы ГАНС и вблизи 250 такта достигает минимума, после чего начинает монотонно расти. Аналогичная картина наблюдается и на графике дисперсии ошибки по координате  $x$ : дисперсия уменьшается примерно с 230 цикла работы ГАНС и примерно на 300 такте достигает минимума, после чего также растет.

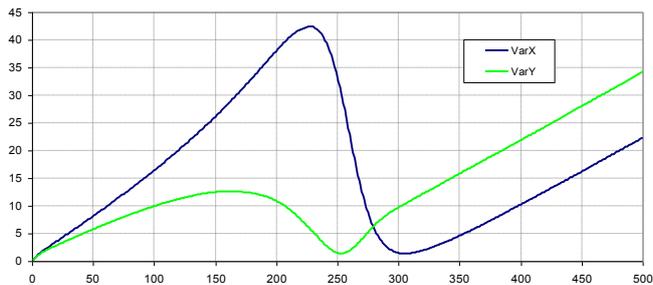
Для моделирования работы алгоритма одномаяковой навигации на основе расширенного фильтра Калмана было использовано несколько траекторий движения подводного аппарата. В модельном эксперименте №1 АНПА двигался прямолинейным галсом из точки с координатами  $(-2500, 3000)$  в точку с координатами  $(2500, 2000)$  с постоянной скоростью  $v = 1,414$  м/с.

Измерения скорости движения АНПА формировались путем введения ошибок измерения скорости вдоль осей  $x$  и  $y$ , которые представляли собой нормально распределенные случайные величины со среднеквадратическими отклонениями 5 см/с и средними значениями 5 мм/с и 1 мм/с, соответственно. Гидроакустический навигационный маяк располагался в точке с координатами  $(0, 0, 0)$ . Расстояние между АНПА и маяком

При сопоставлении данного результата с траекторией движения АНПА видно, что уменьшение дисперсии ошибки



**Рис. 7.** Ошибка в определении местоположения АНПА (модельный эксперимент №1)

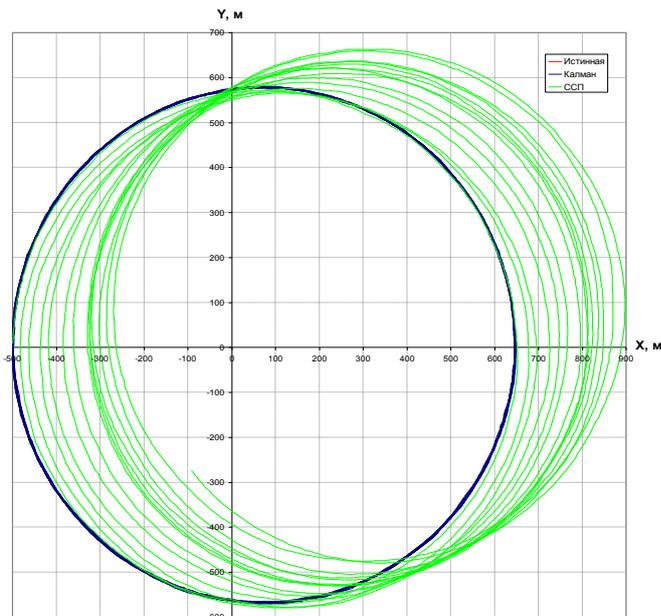


**Рис. 8.** Дисперсии ошибок по координатам  $x$  и  $y$  (модельный эксперимент №1)

параметрах радиус окружности равнялся 573 м, период полного обращения составил 3600 с или 360 циклов работы ГАНС. Продолжительность миссии составляла 5000 циклов работы ГАНС. Остальные параметры моделирования не изменялись.

Из приведенных на рис. 10 графиков следует, что в случае использования алгоритма на основе расширенного фильтра Калмана большую часть времени ошибка определения местоположения АНПА удерживается ниже значения 10 м и лишь изредка достигает величины 14 м, тогда как в случае обычного счисления пути накопленная за моделируемое время ошибка приближается к 300 м.

Из рис. 11 видно, что дисперсии ошибок имеют периодический характер и частота колебания дисперсий совпадает с частотой пересечения осей. В связи с тем,



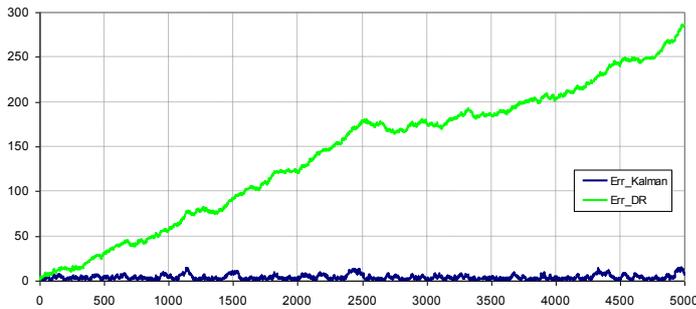
**Рис. 9.** Траектория движения АНПА (модельный эксперимент №2)

по координате  $y$  происходит при движении АНПА вблизи оси  $OY$ , тогда как уменьшение дисперсии ошибки по координате  $x$  происходит при движении АНПА вблизи оси  $OX$ . Данный эффект связан с известным фактом, в соответствии с которым при коррекции местоположения объекта по дальности до точки с известными координатами максимальное уточнение достигается в радиальном по отношению к данной точке направлении.

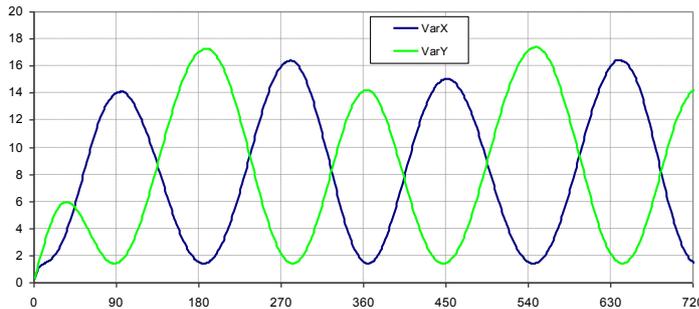
Для исследования данного эффекта был проведен дополнительный модельный эксперимент №2, в котором АНПА двигался по окружности (см. рис. 9) с постоянными маршевой скоростью  $v = 1$  м/с и угловой скоростью  $\omega = 0,1$  град/с. АНПА начинал движение из точки с координатами  $(-500; 0)$ , начальный курс —  $0^\circ$ . При данных

колебания дисперсий совпадает с частотой пересечения осей. В связи с тем, что точность навигации в однопаяковых системах существенно зависит от взаимного расположения АНПА и маяка в моменты работы ГАНС, особое внимание следует уделить организации их совместного движения.

В связи с тем, что участие АНПА в каких-либо вспомогательных маневрах с целью уточнения своего местоположения крайне нежелательно или вообще невозможно, поскольку требует периодических приостановок выполняемой миссии, более предпочтительной является стратегия, когда благоприятная геометрия создается за счет движения буксируемого маяка относительно АНПА. При этом координаты маяка должны определяться с



**Рис. 10.** Ошибка в определении местоположения АНПА (модельный эксперимент №2)



**Рис. 11.** Дисперсии ошибок по координатам  $x$  и  $y$  (модельный эксперимент №2)

достаточно высокой точностью, например, при помощи DGPS.

Для удержания ошибки счисления в требуемых пределах достаточно, чтобы с каждым излучаемым навигационным сигналом азимут на мобильный МО изменялся на 90 градусов. При использовании такой схемы будет происходить поочередное сжатие эллипса ошибки в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Наиболее простым является такое движение буксируемого маяка вокруг АНПА, при котором азимут на маяк изменяется во времени линейно. Рассмотрим случай, когда АНПА движется равномерно и прямолинейно со скоростью  $v$  вдоль оси  $OX$ , а гидроакустический маяк движется относительно АНПА на постоянном горизонтальном удалении  $R$  с постоянной угловой

скоростью  $\omega = 2\pi/T_0$ , описывая, таким образом, вокруг АНПА за время  $T_0$  окружность радиуса  $R$ . Пусть в начальный момент времени АНПА и маяк движутся параллельно. Тогда координаты маяка в произвольный момент времени определяются в соответствии с выражениями:

$$x(t) = R \sin\left(\frac{2\pi}{T_0} t\right) + vt, \quad y(t) = R \cos\left(\frac{2\pi}{T_0} t\right). \quad (9)$$

Одной из наиболее важных характеристик является скорость движения маяка, выражение для которой в данном случае имеет следующий вид:

$$u(t) = \sqrt{v^2 + \left(\frac{2\pi R}{T_0}\right)^2 + \frac{4\pi R}{T_0} v \cos\left(\frac{2\pi}{T_0} t\right)}. \quad (10)$$

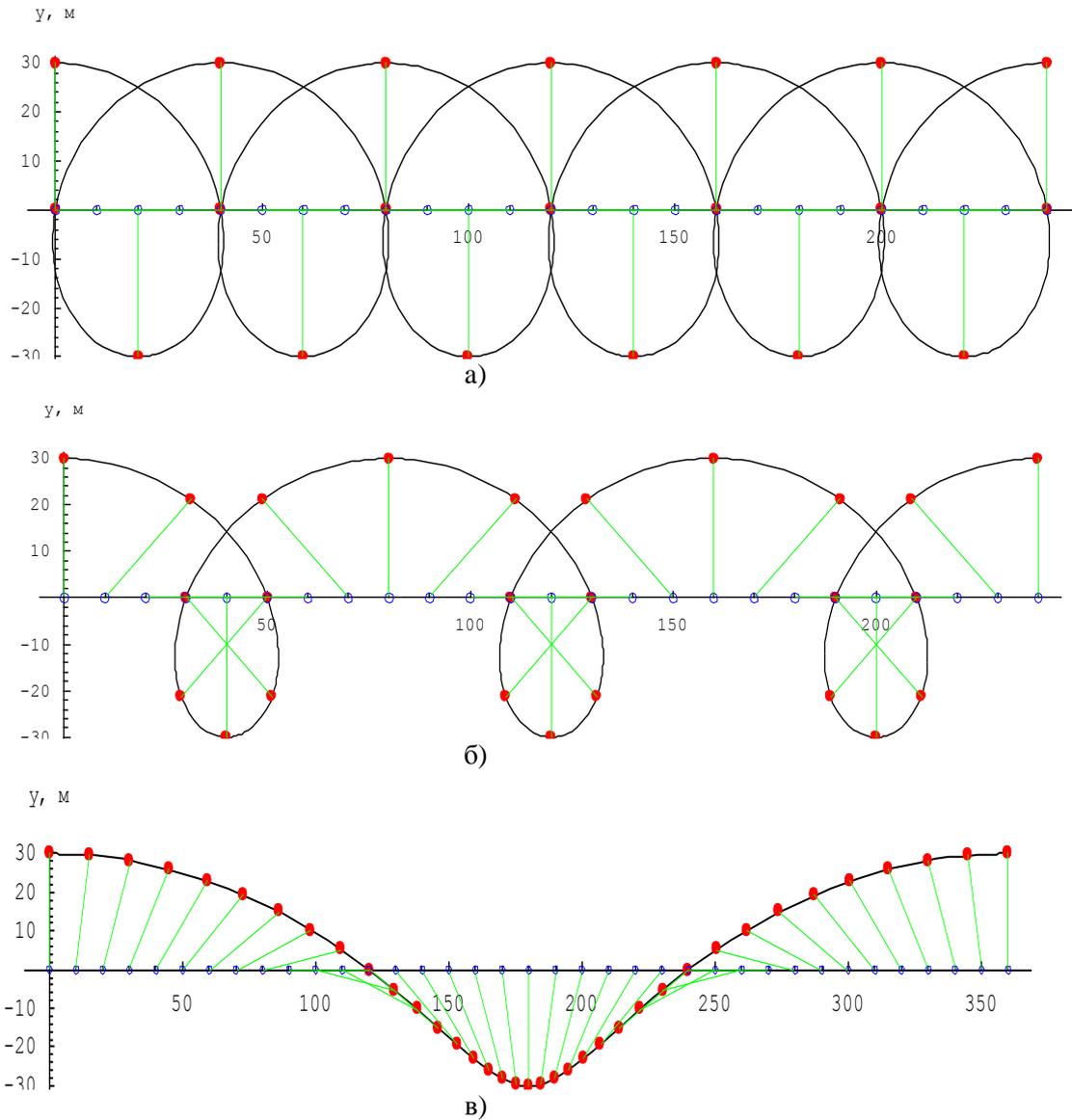
Из данной формулы следует, что скорость движения маяка при такой схеме изменяется во времени в некоторых пределах, ее максимальное и минимальное значения определяются следующими выражениями:

$$u_{\max} = v + \frac{2\pi R}{T_0}, \quad u_{\min} = \left|v - \frac{2\pi R}{T_0}\right|. \quad (11)$$

Интегральной характеристикой может служить средняя скорость движения маяка:

$$\bar{u} = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} u(t) dt. \quad (12)$$

На рис. 12, *a, в* приведены полученные в результате моделирования траектории движения маяка. Скорость движения АНПА составляла 1 м/с, горизонтальная дистанция до маяка  $R = 30$  м. Период работы ГАНС  $T = 10$  с, период обращения  $T_0$  маяка вокруг АНПА равнялся 40, 80 и 360 с, соответственно.



**Рис. 72.** Траектории движения маяка для случая  $T_0 = 4T$  (а),  $T_0 = 8T$  (б),  $T_0 = 36T$  (в)

В таблице 1 приведены рассчитанные по формулам (11)-(12) максимальная, минимальная и средняя скорости движения маяка для рассматриваемых случаев.

**Таблица 1**

Рассматриваемый случай	$u_{\max}$ , м/с	$u_{\min}$ , м/с	$\bar{u}$ , м/с
а) $T_0 = 4T$	5,7	3,7	4,8
б) $T_0 = 8T$	3,4	1,4	2,5
в) $T_0 = 36T$	1,5	0,5	1,1

Последний вариант является наиболее предпочтительным, поскольку в этом случае скорость движения маяка относительно невысока и достаточно медленно изменяется во времени (т.е. в процессе движения не возникает значительных ускорений). При этом траектория движения маяка оказывается гладкой с медленно изменяющимся в небольших пределах курсом. Все это достаточно просто реализуемо на практике.

## **Выводы**

Моделирование подтвердило работоспособность предложенных алгоритмов. Достоинством рассмотренных алгоритмов является то, что на траекторию движения АНПА не накладывается жестких ограничений. Если некоторые точки траектории АНПА будут отбракованы, это не приведет к неработоспособности алгоритмов. Данные алгоритмы в реальных условиях должны работать в комплексе с алгоритмами фильтрации входных данных, позволяющих производить отбраковку ложных данных и позволяющих отключать или ограничивать коррекцию координат по данным ГАНС при неблагоприятном расположении траектории АНПА относительно мобильного маяка.

## **Литература**

1. Scherbatyuk A.Ph. The AUV Positioning Using Ranges from One Transponder LBL. Oceans'95, San-Diego, USA, 1995.
2. Whitcomb L. , Singh H. at al. Recent advances in synchronous-clock one-way-travel-time acoustic navigation. Proceedings of the OCEANS 2006 MTS/IEEE Conference, September 18-21, 2006, Boston, USA, ISBN CD-ROM: 1-4244-0115-1.
3. Ваулин Ю.В., Матвиенко Ю.В., Щербатюк А.Ф. Навигационное обеспечение автономного необитаемого подводного аппарата ММТ-3000. Материалы XIV международной конференции по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, 28-30 мая 2007 г. С. 251-256.
4. Scherbatyuk A.Ph. Algorithms of AUV MMT3000 Positioning Based on Use of Towed Acoustic Transducer. Proceedings of 15th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST07), August 19-22, 2007, Durham, New Hampshire, USA.
5. Hageh O.K. at al. Underwater Transponder Positioning and Navigation of Autonomous Underwater Vehicles. Proceedings of the OCEANS 2009 MTS/IEEE Conference, October 26-29, 2009, Biloxi, USA, ISBN CD-ROM: 978-0-933957-38-1.

# ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ ПРИВЕДЕНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА К ГИДРОАКУСТИЧЕСКОМУ МАЯКУ

Ф.С. Дубровин

Дальневосточный федеральный университет  
690950, Владивосток, ул. Суханова, д. 8  
e-mail: f\_dubrovin@mail.ru

Статья посвящена решению задачи автоматического приведения автономного необитаемого подводного аппарата в заданную окрестность гидроакустического маяка. Предложенный в работе алгоритм состоит из двух частей. Первая часть является общим алгоритмом организации поведения АНПА, позволяющим контролировать процесс приведения и прерывать его в случае возникновения такой необходимости. Вторая часть представляет собой алгоритм определения пеленга на гидроакустический маяк, в основе которого лежит информационно-вероятностный подход. Для локализации маяка используется дальномерная информация от гидроакустической навигационной системы и данные от бортовой системы счисления пути. По мере получения новых данных о расстоянии до маяка выполняется основанный на теореме Байеса пересчет матрицы вероятностей, в результате которого определяется наиболее вероятное положение маяка. В статье приводятся результаты моделирования работы предложенного алгоритма приведения.

## Введение

Выполнение многих задач с помощью автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) связано с их длительным пребыванием под водой. Однако ввиду их относительно невысокой энерговооруженности возникает необходимость в периодической подзарядке бортовых аккумуляторных батарей. Вопрос энергообеспечения АНПА, по-видимому, еще долго будет оставаться актуальным, поэтому для обеспечения возможности продолжительной работы подводный аппарат должен быть способен в автоматическом режиме подходить к стыковочной станции со значительного расстояния и осуществлять стыковку с ней для передачи энергии и информационного обмена.

Известно несколько подходов к реализации приведения и стыковки АНПА с доковыми станциями. Обычно решение данной задачи делится на несколько этапов. Возвращение АНПА к обеспечивающему судну, донной или береговой станции и др. сооружениям, находящимся на значительном удалении, обычно осуществляется акустическими методами [1-3]. При этом для больших дистанций предпочтительны методы приведения на основе дальнометрии, тогда как на дистанциях порядка сотен метров хорошие результаты дает пеленгация гидроакустического маяка при помощи многоэлементных антенн, используемых в навигационных системах с ультракороткой базой. Стыковка же АНПА с доковым устройством обычно осуществляется на основе обработки видео- или гидролокационных изображений и связана с выделением на изображениях хорошо различимых искусственных ориентиров-маркеров [4-6].

В данной статье рассматривается метод приведения АНПА к гидроакустическому маяку, использующий дальномерную информацию и данные бортовой системы счисления пути (ССП). Представлены результаты моделирования работы предлагаемого алгоритма.

## 1. Общий алгоритм организации процесса приведения АНПА к маяку

В процессе выполнения подводным аппаратом миссии возможно возникновение ряда событий, требующих перехода в режим приведения АНПА к гидроакустическому маяку. Такими событиями могут быть, например, снижение заряда бортовых аккумуляторных батарей до определенного уровня, нехватка свободной памяти в бортовом накопителе

данных, окончание миссии, получение от оператора команды телеуправления для приведения к маяку и др. При возникновении одного из таких событий управление передается подпрограмме, реализующей приведение АНПА к маяку.

На рис. 1 представлена общая схема алгоритма организации процесса приведения.

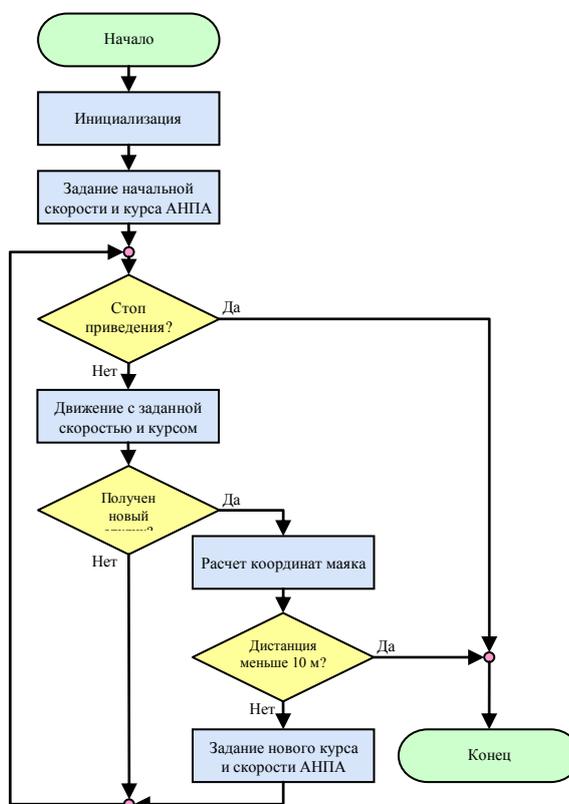


Рис. 1. Общая схема алгоритма организации процесса приведения АНПА к маяку

Рассмотрим шаги данного алгоритма более подробно.

**Инициализация.** На данном этапе происходит выделение оперативной памяти для хранения необходимых структур данных, и задаются начальные значения переменных.

**Задание начальной скорости и курса АНПА.** Поскольку после инициализации отсутствует какая-либо информация о положении маяка, вычислить курс, которым должен двигаться АНПА, не представляется возможным. Для устранения этой неопределенности задаются начальные значения скорости движения и курса.

**«Стоп приведения?»** На данном шаге проверяется ряд условий, препятствующих продолжению процедуры приведения. К ним относятся, например, получение от оператора команды телеуправления о прерывании операции приведения, отсутствие в течение заранее определенного длительного времени откликов от маяка и т.п.

**Движение с заданной скоростью и курсом.** На этом этапе целевые курс и скорость движения АНПА передаются подсистеме управления движением, где при помощи соответствующих регуляторов они интерпретируются в сигналы управления движителями и рулями аппарата.

**«Получен новый отклик?»** На данном шаге проверяется, нет ли у гидроакустической навигационной системы новых дальномерных данных.

**Расчет координат маяка.** Выполняется вычисление предполагаемых координат маяка на основе имеющихся данных дальнометрии и данных бортовой навигационной системы. Кроме того, на данном шаге также производится расчет дистанции от АНПА до

предполагаемой точки расположения маяка, которая в общем случае отличается от измеренной дальности за счет наличия ошибок измерений.

«Дистанция меньше 10 м?» Выполняется проверка условия нахождения АНПА в малой заранее заданной окрестности маяка (в данном случае 10 м). Если дистанция от АНПА до предполагаемой точки расположения маяка меньше заданной границы, процесс приведения считается завершенным.

**Задание нового курса и скорости АНПА.** На данном этапе формируются новые курс и скорость движения АНПА. По мере приближения АНПА к маяку скорость его движения постепенно снижается. Ее значение подбирается таким образом, чтобы за время между двумя последовательными откликами аппарат не успел пройти всю дистанцию до предполагаемого места нахождения маяка. Благодаря этому устраняется ситуация, когда АНПА в промежутках между откликами проходит мимо маяка.

Анализ данного алгоритма показывает, что он обеспечивает устойчивое приведение АНПА к маяку и полностью контролируем (в нем отсутствуют бесконечные циклы, и процесс приведения может быть прерван в случае возникновения такой необходимости).

## **2. Вероятностный метод локализации гидроакустического маяка на основе дальномерной информации и данных системы счисления пути**

Известны методы, в которых пеленг на маяк или его координаты определяются путем максимизации/минимизации некоторого функционала, т.е. в виде решения некоторой экстремальной задачи. В данной работе используется подход, заключающийся в поиске наиболее вероятного положения маяка. В начале процедуры приведения все положения маяка равновероятны. По мере получения каждого нового измерения дальности одни положения маяка оказываются более вероятными, а другие – менее. Для пересчета вероятностей нахождения маяка после выполнения очередного измерения дальности может быть использована формула Байеса.

Для определения пеленга (направления на маяк) доступны:

- данные бортовой навигационной системы на основе счисления пути, представляющие собой текущие координаты АНПА  $(x_v, y_v, z_v)$ ;
- информация от гидроакустической навигационной системы о дальности до маяка, получаемая на основе измерения времени распространения сигналов.

Выражение для наклонной дальности (расстояния) от АНПА до маяка имеет вид:

$$L = \sqrt{(x_b - x_v)^2 + (y_b - y_v)^2 + (z_b - z_v)^2}$$
, где  $(x_b, y_b, z_b)$  – координаты маяка. Поскольку  $z_v$  и  $z_b$  – есть глубина АНПА и маяка, соответственно, значения этих величин могут быть измерены непосредственно, и исходная трехмерная задача сводится к двумерной. Поэтому далее для описания метода приведения будет использоваться горизонтальная дальность, вычисляемая из наклонной дальности путем устранения вертикальной составляющей:

$$R = \sqrt{(x_b - x_v)^2 + (y_b - y_v)^2} = \sqrt{L^2 - (z_b - z_v)^2}.$$

Если бы глубина постановки маяка  $z_b$ , координаты АНПА  $(x_v, y_v, z_v)$  и измерения дальности были абсолютно точными, для однозначного определения координат маяка было бы достаточно всего трех измерений дальностей из различных точек. Однако на практике имеют место ошибки измерений, что необходимо принимать во внимание.

Пусть при получении  $k$ -ого отклика от маяка значение горизонтальной дальности  $\tilde{R}_k$  отличается от истинного значения  $R_k$  на величину ошибки  $\xi_k$ :  $\tilde{R}_k = R_k + \xi_k$ .

Будем считать, что ошибка  $\xi$  измерения горизонтальной дальности до маяка является случайной величиной, распределенной по нормальному закону с нулевым математическим

ожиданием и дисперсией  $\sigma^2$ . Тогда функция плотности вероятности  $p(x)$  случайной величиной  $\xi$  имеет вид:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right].$$

Анализ реальных данных показывает, что такое приближение дает достаточно хорошее описание ошибок измерений, возникающих на практике [7].

Поскольку задача приведения АНПА к маяку сведена к двумерному случаю, пространство решений (возможных координат маяка) представляет собой плоскость. Перейдем к дискретному пространству вероятностей, разбив плоскость на непересекающиеся области, в качестве которых удобно выбрать равные квадраты.

Квадратную область, центр которой имеет координаты  $(x, y)$ , будем в дальнейшем для краткости называть просто квадратом  $(x, y)$ . Припишем каждому квадрату вероятность нахождения в нем маяка. Пусть  $A_{x,y}$  – событие, состоящее в том, что маяк находится в квадрате  $(x, y)$ . Тогда  $P(A_{x,y})$  – вероятность нахождения маяка в квадрате  $(x, y)$ . Пусть также  $B_R$  – событие, состоящее в том, что получено измерение горизонтальной дальности  $R$ , а  $p(B_R)$  – плотность вероятности получения измерения горизонтальной дальности  $R$ .

Определим условные вероятности:

- $p(B_R | A_{x,y})$  – плотность вероятности получения измерения горизонтальной дальности  $R$  при условии, что маяк находится в квадрате  $(x, y)$ ;
- $P(A_{x,y} | B_R)$  – вероятность нахождения маяка в квадрате  $(x, y)$  при условии, что получено измерение горизонтальной дальности  $R$ .

Фактически,  $P(A_{x,y})$  – априорная (доопытная) вероятность нахождения маяка в квадрате  $(x, y)$ , а  $P(A_{x,y} | B_R)$  – апостериорная (послеопытная) вероятность нахождения маяка в квадрате  $(x, y)$  после получения измерения горизонтальной дальности  $R$ .

Связь апостериорной и априорной вероятностей дается формулой Байеса:

$$P(A_{x,y} | B_R) = \frac{P(A_{x,y}) p(B_R | A_{x,y})}{p(B_R)}.$$

В случае малого шага дискретизации  $p(B_R | A_{x,y})$  – есть плотность вероятности принятия ошибкой измерения дальности  $\xi$  значения  $R - \sqrt{(x - x_v)^2 + (y - y_v)^2}$ .

Расчет величины  $p(B_R)$  производится на основе формулы полной вероятности:

$$p(B_R) = \sum_{x,y} P(A_{x,y}) p(B_R | A_{x,y}).$$

Для реализации данного алгоритма на ЭВМ дискретное пространство вероятностей задается в виде двумерного массива (матрицы). Полностью метод определения наиболее вероятного положения маяка выглядит следующим образом:

- все элементы матрицы вероятностей инициализируются равными значениями, определяемыми как единица, деленная на произведение числа столбцов и числа строк;
- при получении нового значения дальности  $R$  до маяка рассчитывается величина  $p(B_R)$ , после чего пересчитывается матрица вероятностей  $P(A_{x,y} | B_R)$ ;
- в пересчитанной матрице разыскивается наибольший элемент. Его положение  $(\hat{x}, \hat{y})$  в матрице – есть координаты квадрата наиболее вероятного нахождения маяка;

– рассчитывается горизонтальная дальность между АНПА и точкой предполагаемого положения маяка и на основании полученного значения принимается решение об ограничении скорости движения АНПА;

– рассчитывается курс на маяк по следующему правилу:

$$\hat{\phi} = \arctan \frac{\hat{y} - y}{\hat{x} - x}; \text{ если } \hat{x} < x, \text{ то } \hat{\phi} = \hat{\phi} + \pi;$$

– выполняется движение заданным курсом с заданной скоростью, пока не будет получен очередной отклик или не возникнет событие прерывания приведения.

### 3. Результаты моделирования работы алгоритма приведения АНПА к маяку

Для оценки работоспособности предложенного метода была написана программа, моделирующая приведение АНПА к маяку на основе описанного алгоритма. На рис. 4 представлены визуализированные результаты работы метода. Измерения дальности зашумлялись нормально распределенной случайной величиной с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением 10 м.

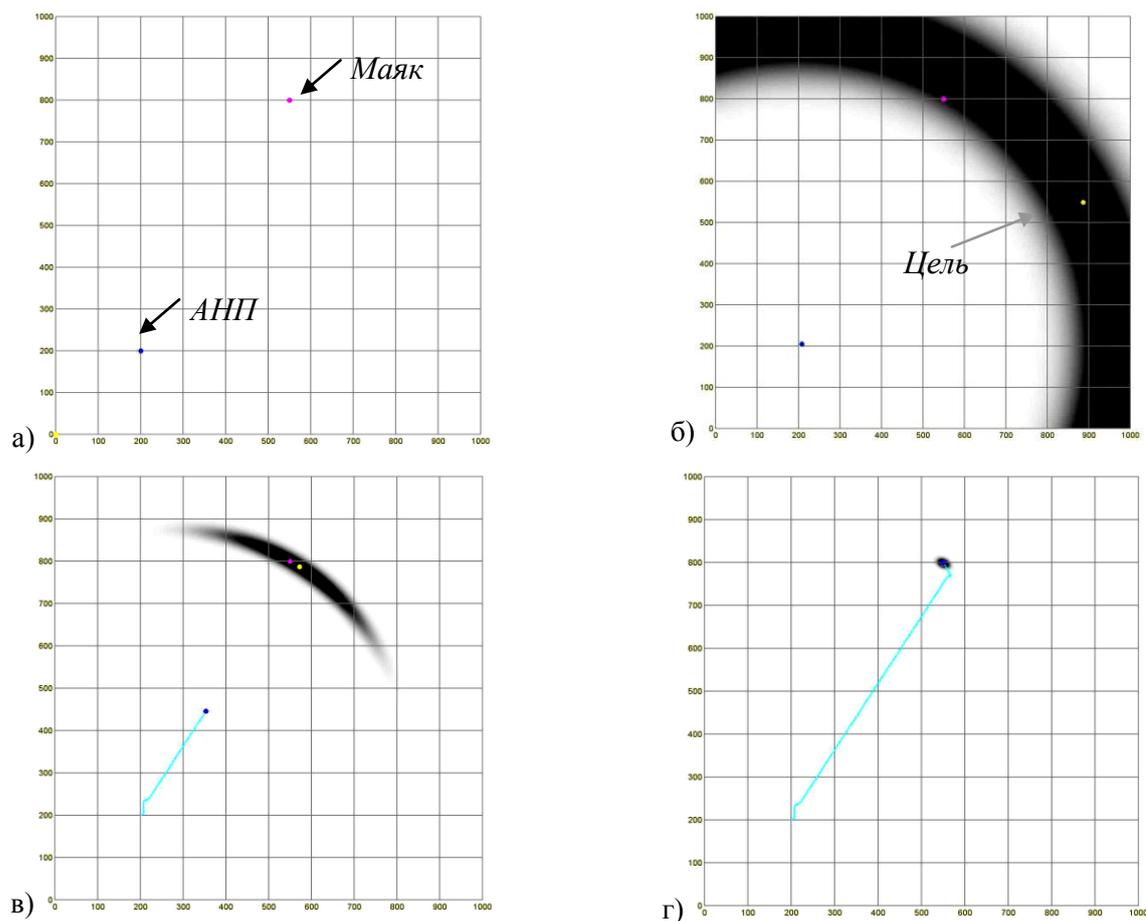


Рис. 2. Результаты моделирования работы алгоритма приведения

На рис. 2, а изображена исходная ситуация перед началом процесса приведения: АНПА расположен в точке с координатами (200; 200), маяк имеет координаты (800; 550).

На рис. 2, б темным поясом представлено пространство вероятностей, пересчитанное после получения первого отклика от маяка. Более темным областям соответствует большая вероятность нахождения маяка. Светлым маркером обозначена цель – точка с приблизительными координатами (550; 890), найденная путем перебора всех элементов матрицы вероятностей и соответствующая наименее вероятному положению маяка. После получения первого отклика наиболее вероятно нахождение маяка на окружности,

проходящей через центр кольцеобразного пояса. Однако из-за дискретизации пространства вероятностей и наличия погрешностей вычисления, обозначенная точка характеризуется несколько большей рассчитанной вероятностью нахождения маяка.

На рис. 2, в видно, что по мере получения новых горизонтальных дальностей область наиболее вероятного положения маяка постепенно уменьшается. При этом точка, соответствующая наивероятнейшему положению маяка, приближается к точке, обозначающей истинное положение маяка. Ломаной линией, построенной путем соединения точек местоположения АНПА через равные промежутки времени, грубо обозначена траектория подводного аппарата. В процессе моделирования максимальная скорость АНПА составляла 1 м/с, а период излучения маяком сигналов составлял 100 с.

Наконец, на рис. 2, г представлен результат приведения АНПА в заданную окрестность маяка. Видно, что траектория АНПА близка к отрезку, соединяющему точки начального положения АНПА и маяка.

### **Заключение**

В данной статье представлен алгоритм, реализующий вероятностный метод локализации гидроакустического маяка на основе дальномерной информации и данных бортовой системы счисления пути. Представленные результаты моделирования работы алгоритма приведения АНПА к маяку подтверждают его работоспособность в условиях близких к реальным (при достаточно высоком уровне ошибок). К недостаткам метода можно отнести ориентированность на работу с неподвижным маяком. В дальнейшем предполагается усовершенствовать данный алгоритм для работы с движущимся маяком.

## **Литература**

1. Allen B., Austin T., Forrester N., Goldsborough R., Kukulya A., Packard G., Purcell M., Stokey R. Autonomous Docking Demonstrations with Enhanced REMUS Technology // Proceedings of the MTS/IEEE OCEANS 2006 Conference, Boston, MA, USA, September 2006.
2. Utley C., Lee H. Signal Processing Algorithms for High-Precision Three-Dimensional Navigation and Guidance of Unmanned Undersea Vehicles (UUV) // Proceedings of the MTS/IEEE OCEANS 2006 Conference, Boston, MA, USA, September 2006.
3. Goede G.M., Norris D. Recovering Unmanned Undersea Vehicles With a Homing and Docking Sonar // Proceedings of the MTS/IEEE OCEANS 2005 Conference, Washington, D.C., USA, September 2005.
4. Inzartsev A.V., Matvienko Yu.V., Pavin A.M., Vaulin Yu.V., Scherbatyuk A.Ph. Algorithms of Autonomous Docking System Operation for Long Term AUV // Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST), Durham, New Hampshire, USA, August 2005.
5. Ваулин Ю.В., Инзарцев А.В., Матвиенко А.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Исследование работы элементов системы приведения автономного необитаемого подводного аппарата // Материалы международной научно-технической конференции «Технические проблемы освоения мирового океана», Владивосток, 14-17 сентября 2005. С. 40-45.
6. Cobb J., Schulz B., Dobeck G. Forward-Looking Sonar Target Tracking and Homing From a Small AUV // Proceedings of the MTS/IEEE OCEANS 2005 Conference, Washington, D.C., USA, September 2005.
7. Павин А.М. Автоматическое приведение автономного подводного робота к гидроакустическому маяку // Подводные исследования и робототехника. 2008. № 1. С. 32-38.

# НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБСЛЕДОВАНИЯ ПОДВОДНОЙ ЧАСТИ СУДНА

**Е.И. Непостаев**

Дальневосточный Федеральный университет  
690950, Владивосток, ул. Суханова, 8

Статья посвящена решению задачи обследования подводной части корпуса судна, используя автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА). Для упрощения задачи, подводная часть судна аппроксимируется полуэллипсоидом.

В работе рассматриваются три способа обхода подводной части корпуса судна, обеспечивающих осмотр всей его площади: движение АНПА по спиральной траектории, по меандру и вдоль границ горизонтальных срезов корпуса судна. Исследован вопрос о том, какую траекторию предпочтительнее использовать в реальных условиях.

Предполагается, что навигация АНПА осуществляется относительно корпуса судна на основе системы счисления пути. При этом встает проблема с накоплением ошибки позиционирования. Для устранения ошибки предполагается использовать визуальные маркеры (реперные точки), координаты которых известны. Исследован вопрос о минимальном количестве реперных точек необходимом для покрытия обследуемой площади без пропусков.

Приводятся и анализируются полученные результаты моделирования.

Осмотр подводной части судна является актуальной задачей. Это необходимо в таких случаях, как оценка технического состояния при плановом ремонте судна, или опасение установки миниатюрных мин и их поиск на обшивке корабля.

В мире в настоящее время уже есть системы, выполняющие эти работы. При этом разработчики стремятся исключить присутствие человека. К примеру, американская система AquaMap компании Desert Star System [1] использует акустические маяки для точного позиционирования осматривающего, будь то человек или подводный аппарат. Другой проект – АНПА Hovering Autonomous Underwater Vehicle (HAUV) американской компании Bluefin Robotics [2], способен обследовать днище судна в автоматическом режиме без помощи человека.

## **Моделирование траекторий для осмотра подводной части корпуса судна**

При осмотре подводной части корпуса судна с помощью АНПА необходимо учитывать, что время работы АНПА ограничено запасом энергии на борту аппарата. В процессе планирования миссии встает задача построения оптимальной траектории для осмотра поверхности днища судна при условии, что вся поверхность должна быть покрыта без пропусков.

Для оценки эффективности той или иной траектории, необходимо их сравнение по какому либо критерию. В качестве критерия можно использовать минимизацию пути, проходимого АНПА за выполнение миссии.

Предположим, что осмотр днища судна производится посредством цифровой камеры. Пусть горизонтальные и вертикальные углы обзора камеры равны, а угол обзора по диагонали равен  $\lambda_{cam}$ . Тогда на плоской поверхности видимая область, которая проецируется на матрицу видеокамеры, имеет форму квадрата со стороной  $b_{frame}$ .

При таких условиях центральная точка в кадре является точкой проекции точки местонахождения камеры на поверхность. При перемещении камеры вдоль поверхности, из

таких точек проекций выстраивается линия. Назовем ее путевой линией. Для решения указанной выше задачи необходимо построить оптимальную путевую линию, при движении по которой область обзора покрыла бы всю осматриваемую площадь.

Конструкция днища судна довольно сложна и для того, чтобы решить общий случай задачи построения траектории осмотра, упростим форму обследуемого объекта - аппроксимируем подводную часть судна полуэллипсоидом с полуосями  $a$ ,  $b$  и  $c$ .

Полуэллипсоид задается следующей зависимостью координат точек поверхности от двух параметров  $u$  и  $v$ :

$$\begin{cases} x = a \cdot \cos u \cdot \cos v \\ y = b \cdot \cos u \cdot \sin v \\ z = c \cdot \sin u \end{cases}, \quad (1)$$

где  $u \in (0; \pi/2)$  и  $v \in (0; 2\pi)$ .

В данной работе сравниваются три способа построения путевой линии. По спирали, вдоль границ горизонтальных срезов и по меандру. Для оценки эффективности этих путевых линий, их длины сравниваются с длиной минимального пути  $l_{\min}$ .

Отношение для оценки длины минимального пути  $l_{\min}$  имеет вид

$$l_{\min} = \frac{S_{\text{halfEllipsoid}}}{b_{\text{frame}}}, \quad (2)$$

где  $S_{\text{halfEllipsoid}}$  – площадь поверхности полуэллипсоида.

Длина стороны видимой области камеры  $b_{\text{frame}}$  составляет:

$$b_{\text{frame}} = \sqrt{2} \cdot h_{\text{cam}} \cdot \operatorname{tg} \frac{\lambda_{\text{cam}}}{2}. \quad (3)$$

Для вычисления площади полуэллипсоида используется следующее приближенное соотношение:

$$S_{\text{halfEllipsoid}}(a, b, c, p) \approx 2\pi \left( \frac{a^p b^p + a^p c^p + a^p c^p}{3} \right)^{\frac{1}{p}}. \quad (4)$$

Параметр  $p$  был определен минимизацией отклонений от теоретической формулы [4] по нескольким эллипсоидам. При  $p = 1.6075$  среднеквадратичное отклонение между показателями составляет 3% от теоретического значения. Это вполне допустимо для технических расчетов.

В статье [5] косвенно доказывается, что для частного случая эллипсоида, сферы, кратчайшей траекторией осмотра ее поверхности является спираль. Естественно предположить, что и в общем случае для эллипсоида кратчайшей траекторией для осмотра будет некая изогнутая спираль. Однако на практике лучше использовать упрощенный вариант траектории осмотра. Это обусловлено технической стороной. Так как при движении подводный аппарат имеет инерцию, он не может мгновенно изменить траекторию движения. Упрощение путевой линии повышает точность отработки траектории передвижения АНПА в реальных условиях.

Для полного покрытия осматриваемой поверхности, путевые линии должны строиться с условием, что наибольшее расстояние между витками должно равняться стороне осматриваемой области  $b_{\text{frame}}$ . Пусть  $L$  – это наибольшая дуга от полюса полуэллипсоида к основанию, проходящая вдоль оси абсцисс. Витки срезов и спирали проходят через точки, делящие дугу  $L$  на равные отрезки  $b_{\text{frame}}$ . Число витков  $n_{\text{srez}}$  и  $n_{\text{spiral}}$  равняется отношению  $L$  к  $b_{\text{frame}}$ . Для меандра при нахождении количества галсов  $n_{\text{meandr}}$  необходимо разделить на  $b_{\text{frame}}$  дугу длиной  $2L$ , проходящую от основания до основания.

Формула вычисления дуги  $L$  имеет вид:  $L = aE(\varepsilon)$ , где  $\varepsilon$  — эксцентриситет эллипса, равен:  $\varepsilon = \frac{\sqrt{a^2 - c^2}}{a}$ . Полагая, что  $\varepsilon = \sin \alpha$ ,  $E(\varepsilon)$  находится по таблице значений эллиптических интегралов второго рода [6].

При построении линии пути по спирали, камера изначально должна пройти у основания по дуге от одной стороны большой оси к другой, после чего путевая линия поднимется по спирали до полюса. При этом спираль пересекает точки, делящие большую дугу на равные части (см. рис. 1, а).

Горизонтальные срезы представляют собой линии пересечения полуэллипсоида параллельными плоскостями. Эти плоскости также параллельны основанию полуэллипсоида. Построение начинается со стороны меньшей оси, на высоте равной половине области осмотра. Переход между срезами происходит по дуге, лежащей на стороне меньшей оси (см. рис. 1, б).

Галсами меандра являются линии пересечения полуэллипсоида параллельными плоскостями, расположенными вертикально относительно основания полуэллипсоида. Галсы направлены вдоль меньшей оси полуэллипсоида. Построение начинается со стороны большей оси, на высоте равной половине области осмотра (см. рис. 1, в).

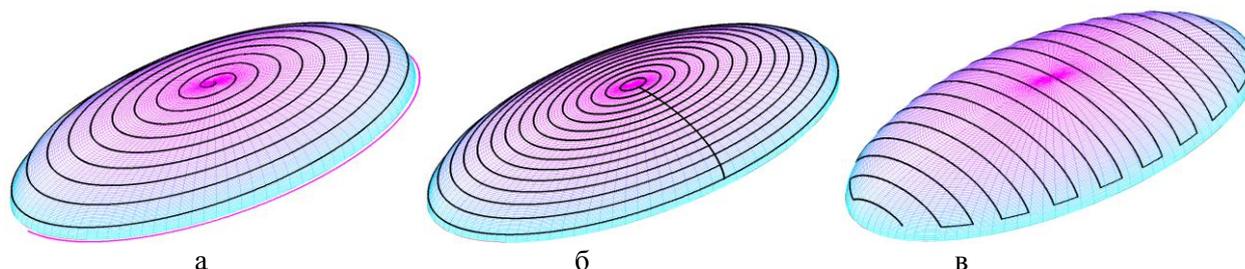


Рис. 1. Три способа построения путевой линии.

### Моделирование навигации по системе счисления пути

Пусть навигация АНПА происходит по системе счисления пути, основывающейся на данных о перемещении, получаемых от доплеровского лага (ДЛ). Навигация происходит посредством отслеживания этих данных с течением времени. Однако в навигационных данных всегда присутствует ошибка, которая накапливается и будет расти неограниченно. Чтобы этого избежать, необходимо периодически сбрасывать ошибку. Для этого предполагается использовать реперные точки – искусственные визуальные маркеры, которые считываются системой технического зрения АНПА.

В статье рассматривается зависимость минимального количества реперных точек от требуемой точности навигации по системе счисления пути.

Результатом осмотра подводной части корпуса судна с помощью АНПА служит фотопанорама отснятой площади. После выполнения миссии, отснятые кадры объединяются. Для этого используются алгоритмы сшивки изображения. Чтобы сшивка двух соседних кадров прошла успешно, перекрытие между ними должно составлять 20-50% [3]. Также необходимо, чтобы масштаб кадров был постоянен. Поэтому осмотр судна необходимо производить на эквидистантном расстоянии от поверхности, а для минимизации площади видимой области, камеру необходимо позиционировать перпендикулярно к поверхности.

Для выполнения требований позиционирования камеры относительно поверхности, предполагается, что камера интегрирована с ДЛ так, что оптическая ось цифровой камеры была всегда параллельна оси симметрии лучей ДЛ.

Предположим, что вертикальная и горизонтальная составляющая вектора передвижения ДЛ измеряется со среднеквадратической ошибкой  $V_{err}$ . Ошибка определения

расстояния от ДЛ до поверхности в накоплении курсовой ошибки участвует мало, поэтому ее не учитывать.

Если считать, что перекрытия осуществляются между близ лежащими кадрами в процессе передвижения камеры вдоль линии пути, то, в идеальном случае, зона перекрытия будет иметь форму прямоугольника высотой  $b_{frame}$  и шириной  $l_p$ , которая равна:

$$l_p = \frac{b_{frame} \cdot p}{100}, \quad (5)$$

где  $p$  – требуемый процент перекрытия между кадрами.

Ввиду того, что  $h_{err}$  в накоплении курсовой ошибки не участвует, область накапливаемой ошибки будет иметь форму круга с радиусом накопленной ошибки  $r_{err}$  и центром в точке с нулевой ошибкой:

$$r_{err} = V_{err} \cdot t, \quad (6)$$

где  $t$  – время, прошедшее от момента когда ошибка была нулевой.

Так как  $r_{err}$  является радиусом круга ошибки, то зона перекрытия должна быть удвоена (рис. 2, а). Это обеспечивает сохранение требуемого перекрытия при максимальном значении допустимой ошибки (рис. 2, б).

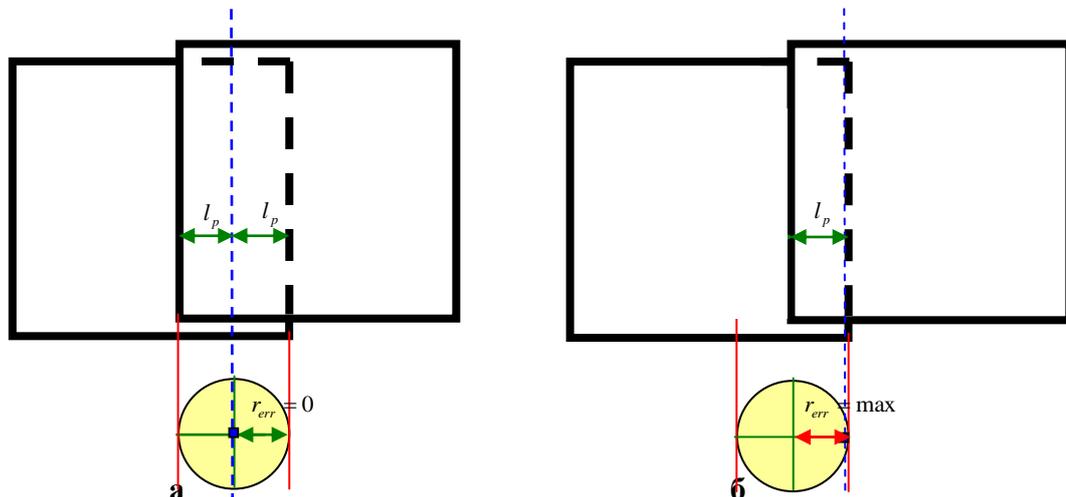


Рис. 2. Зона перекрытия кадров

Учитывая вышеперечисленные условия, расстояние  $l_{frame}$ , через которое должны производиться снимки, рассчитывается как:

$$l_{frame} = b_{frame} - 2 \cdot l_p. \quad (7)$$

Таким образом, чтобы обеспечить точность навигации по системе счисления пути достаточную для сшивки кадров, расстояние  $l_{err}$  между реперными точками находится из соотношения:

$$l_{err} = \frac{V \cdot r_{err}}{V_{err}}. \quad (8)$$

Количество реперных точек  $n$ , необходимое чтобы удерживать ошибку позиционирования в заданных пределах в течении всего пути  $D$ , равно отношению

$$n = \frac{D}{l_{err}}. \quad (9)$$

### Результаты моделирования

Построение траекторий обхода было проведено на двух полуэллипсоидах с размерами полуосей  $a_1 = 1200$  см,  $b_1 = 600$  см,  $c_1 = 300$  см у первого полуэллипсоида и  $a_2 = 1200$  см,  $b_2 = 400$  см  $c_2 = 300$  см у второго полуэллипсоида.

Результаты моделирования сведены в таблицах 1 и 2.

**Таблица 1.** Результаты моделирования для первого полуэллипсоида

Траектория	$n_{srez}, n_{spiral}, n_{meandr}$ (см)	Длина пути (см)	Избыточность пути (%)
Идеальная траектория	60,0	47674,8	0,0
Поперечный меандр	59,8	48846	2,5
Спираль+дуга	61,3	66758	40,0
Горизонтальные срезы	59,8	67354	41,3

**Таблица 2.** Результаты моделирования для второго полуэллипсоида

Траектория	$n_{srez}, n_{spiral}, n_{meandr}$ (см)	Длина пути (см)	Избыточность пути (%)
Идеальная траектория	60,0	35785,2	0
Поперечный меандр	59,8	37621,2	5,1
Спираль+дуга	61,3	61395,7	71,6
Горизонтальные срезы	59,8	61934,2	73,1

Исходя из результатов моделирования, субоптимальной траекторией пути является меандр. Длина пути по спирали сравнима с длиной пути по горизонтальным срезам.

Резкое увеличение избыточности у спирали и горизонтальных срезов обуславливается тем, что длины осей полуэллипсоида разные, поэтому на вытянутой части полуэллипсоида расстояние между витками больше, чем на боковой. Но деление на количество равных частей на вытянутой и боковой сторонах полуэллипсоида одинаково. Поэтому на боковой стороне появляются частые наложения кадров и избыточность пути повышается.

В реальных условиях предпочтительнее использовать такие траектории, у которых преобладает фиксированность при передвижении. При передвижении по спирали и меандру постоянно приходится изменять положение по трем осям. У горизонтальных же срезов изменения при перемещении более фиксированы и они в большей степени подходят для использования в полевых условиях.

Для моделирования навигации по счислению пути была построена виртуальная 3D модель полуэллипсоида, поверхность которого необходимо было осмотреть. Для визуального осмотра была использована виртуальная камера, направленная на поверхность полуэллипсоида согласно описанным в статье требованиям. В качестве путевой линии использовалась траектория «горизонтальные срезы».

Вдоль путевой линии на дистанции  $l_{err}$  друг от друга были расставлены маркеры в виде дочек с определенным цветом. При попадании маркера в область обзора камеры, исходя из положения маркера в кадре, рассчитывалось отклонение от программной траектории. Вычисляемые горизонтальная и вертикальная компоненты отклонения использовались для позиционирования относительно маркера таким образом, чтобы маркер находился в центре кадра камеры. После чего движение продолжалось.

Во время проведения эксперимента, размеры полуосей составляли  $a = 1200$  см,  $b = 600$  см,  $c = 300$  см. Погрешность измерения скорости передвижения ДЛ  $V_{err} = \pm 1$  см/с [7] при скорости передвижения  $V = 1$  м/с. Угол обзора камеры по диагонали  $\lambda_{cam} = 70^\circ$ . Дистанция

от поверхности до камеры  $h_{cam} = 100$  см. Минимальное требуемое перекрытие между кадрами  $p = 20\%$ .

На основе приведенных вводных данных были рассчитаны количество и расстояние между маркерами для программной расстановки и для случая, когда ошибка накапливается до предельного значения без программного сброса ошибки, а ошибка обнуляется только при достижении максимально допустимого значения ошибки. Результаты моделирования сведены в таблице 3.

**Таблица 3**

Способ сброса ошибки	Количество необходимых точек сброса ошибки	Длина линии пути (м)	Дистанции между точками сброса ошибки (м)
Программная расстановка маркеров	33	673	20
Выход ошибки за допустимый предел без программного сброса ошибки	11	673	~61

При моделировании работы системы счисления пути для ошибки навигационной системы равной 1 см/с, программная дистанция между реперными точками составляет 20 метров. При отсутствии программных маркеров, дистанция между точками выхода за допустимый предел ошибки составляет около 61 метра. Программная дистанция рассчитывается исходя из предположения линейного накопления ошибки, что является предельным случаем, но на практике имеет место случайное распределение ошибки. В эксперименте использовалось нормальное распределение.

В дальнейшей работе предполагается использовать дополнительный способ уменьшения ошибки – взаимное расположение кадров в разных слоях. Это позволит уменьшить минимальное количество маркеров, необходимое для удержания ошибки в заданных пределах.

## Литература

1. Официальный сайт Ship Hull Inspections with AquaMap™.  
URL: [www.desertstar.com](http://www.desertstar.com).
2. Официальный сайт Bluefin Robotics AUV`s  
URL: <http://www.bluefinrobotics.com>
3. Digital World - Все о цифровой технике  
URL: [http://digitalworld.dviger.com/userblog/post/c\\_534.html](http://digitalworld.dviger.com/userblog/post/c_534.html)
4. Миронов Н.А., Сергеева А.А., Косачев В.С., Кошевой Е.П. Процессы переноса в телах эллипсоидальной конфигурации // Кубанский государственный технологический университет.
5. В.А. Залгаллер. Кратчайшая линия осмотра сферы // Записки научных семинаров ПОМИ. Том 299. 2003.
6. Murray R. Spiegel, Liu J. Mathematical handbook of formulas and tables // table 29.
7. Карпукhin Б.В., Мартынюк А.П., Простомолотов В.И. Доплеровский лаг для подводных аппаратов // Гідроакустичний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану). 2007. № 4.