

Учреждение образования  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.391, 621.384.3

**ЧАН**  
**Чонг Тай**

**АДАПТИВНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ПРИ СИНТЕЗЕ АПЕРТУРЫ  
ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ  
ИЗОБРАЖЕНИЯ ДНА**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства  
телевидения

Минск 2014

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель: **Гейстер Сергей Романович**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник государственного учреждения «Научно-исследовательский институт Вооруженных Сил Республики Беларусь»

Официальные оппоненты: **Кугейко Михаил Михайлович**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой квантовой физики и оптоэлектроники факультета радиофизики и компьютерных технологий Белорусского государственного университета

**Калинин Александр Александрович**, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник НПООО «ОКБ ТехноСоюзПроект»

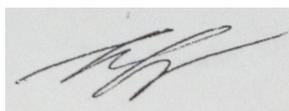
Оппонирующая организация: ОАО «АЛЕВКУРП»

Защита состоится «12» февраля 2015 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.02 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан «5» января 2015 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций



Н.В. Тарченко

## КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследований морского дна обусловлена, с одной стороны, тем, что под водой скрыто основное количество полезных ископаемых, в частности, около 80 % запасов нефти и газа. С другой стороны, помимо объектов естественного происхождения объектами дистанционного мониторинга являются также и объекты, созданные человеком: подводные части кораблей, трубопроводы (нефтепроводы и газопроводы) и кабели связи, проложенные по дну, подводные части гидроэлектростанций, опор мостов и пр.

В основе решения задачи мониторинга лежит построение изображений морского дна и объектов (предметов), находящихся на его поверхности. Построение таких изображений может быть реализовано с использованием волн, распространяющихся в водной среде и позволяющих получить соответствующее разрешение по дальности и угловым координатам. Анализ показывает, что единственным видом волн, которые могут быть использованы для подводного мониторинга, являются акустические волны.

В качестве средств, обеспечивающих получение наиболее полной и всесторонней информации о поверхности морского дна, можно использовать гидролокаторы бокового обзора. При разработке этих гидролокаторов особое внимание уделяется таким основным техническим характеристикам как дальность действия, разрешение и помехоустойчивость, которые достигаются за счет применения сложного зондирующего сигнала и цифровых способов формирования и обработки сигналов.

Получение высококачественного изображения дна на большой глубине является серьезной и часто непреодолимой проблемой, обусловленной ростом затухания волн по мере уменьшения длины волны и сложностью создания физических гидроакустических антенн больших (десятки метров) размеров. Решение этой проблемы заключается в использовании синтезированной апертуры антенны, которая является результатом специальной когерентной междупериодной обработки сигналов, последовательно принятых движущейся гидроакустической физической антенной при различном ее положении относительно объекта исследований. Использование синтеза апертуры антенны (САА) позволяет увеличивать размер апертуры антенны вдоль линии перемещения гидролокатора (то есть улучшить разрешающую способность по азимуту) и использовать большие длины волн (то есть уменьшить затухание волн при распространении и увеличить дальность действия).

В основе повышения качества САА и соответственно обеспечения характеристик гидролокатора с САА, близких к потенциально достижимым, лежит использование моделей сигналов и помех, максимально близких к реальности. Поэтому диссертационная работа посвящена разработке моделей временной и

спектральной структур отраженного сигнала, учитывающих частотно-зависимое затухание гидроакустических волн при распространении, повышению точности прогнозирования времени прихода отраженных сигналов и соответствующих фазовых сдвигов, созданию модели ревербераций в приложении к гидролокатору с САА, получению и анализу оценок влияния негативных факторов на качество формирования трехмерного изображения в гидролокаторе.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с крупными научными программами и темами**

Исследования проводились на кафедре радиотехнических систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в интересах создания средств мониторинга морского дна для Социалистической Республики Вьетнам.

### **Цель и задачи исследования**

Цель диссертационной работы заключается в увеличении глубины получения 3-мерных изображений (единицы километров) с высоким разрешением (единицы – десятки сантиметров) и повышении контрастности изображений на мелководье (с глубинами в сотни метров) при наличии интенсивных ревербераций. Достижение цели основано на САА с использованием разработанных математических моделей полезных сигналов и реверберационных помех.

В диссертационной работе решались следующие задачи:

1. Разработать математические модели временной и спектральной структур отраженных сигналов (ОС) с учетом влияния среды распространения гидроакустических волн и параметров гидролокатора (ГЛ).
2. Разработать математические модели сигналов ревербераций в движущемся гидролокаторе с синтезом апертуры антенны.
3. Разработать алгоритмы пространственно-временной обработки сигналов в задаче синтеза апертуры антенны гидролокатора для построения 3-мерного изображения морского дна, адаптирующиеся к текущим параметрам движения гидролокатора и среды распространения акустических волн.
4. Исследовать влияние основных факторов нестабильностей на качество формирования 3-мерного изображения морского дна в гидролокаторе с САА.

Объектом исследования являются гидролокаторы мониторинга дна и объектов на нем, использующие прямой САА. Предметом исследования являются модели сигналов и помех, алгоритмы адаптивной пространственно-временной обработки сигналов на фоне помех ревербераций.

## Научная новизна

Научная новизна полученных результатов заключается:

- в учете частотно-зависимого затухания гидроакустических волн при распространении в математических моделях временной и спектральной структур ОС в ГЛ с САА при неизбежном (для обеспечения высокой энергетики и разрешения по радиальной дальности) широкополосном зондировании;
- в учете нелинейно изменяющегося во времени дополнительного фазового сдвига сигнала, соответствующего отражениям от произвольного анализируемого разрешаемого объема, в математической модели гидроакустического сигнала, используемой для реализации САА в движущемся гидролокаторе;
- в разработке математической модели ревербераций в движущемся гидролокаторе с САА, включающей математическое описание пространства ревербераций для каждого анализируемого разрешаемого объема и учитывающей изменения состава отражателей при перемещении гидролокатора;
- в получении закономерностей влияния ошибок определения скорости движения носителя локатора и скорости распространения волны на качество формирования 3-мерного изображения дна и объектов на нем (разрешающая способность, смещение изображения, отношение сигнал/помеха).

## Положения, выносимые на защиту

1. Математические модели временной и спектральной структур отраженного сигнала в гидролокаторе с синтезом апертуры антенны, учитывающие частотно-зависимое затухание гидроакустических волн в среде распространения, приводящее к искажениям отраженных сигналов при использовании широкополосных зондирующих сигналов, и обеспечивающие прогнозирование снижения показателей качества обнаружения, измерения дальности и построения 3-мерных изображений. Модели учитывают плотность морской воды, являющейся функцией температуры и давления, скорость звука в воде, объемный модуль упругости, сдвиговую и объемную вязкости воды, коэффициент теплопроводности, теплоемкости при постоянном объеме и постоянном давлении.

2. Математическая модель гидроакустического сигнала при синтезе апертуры антенны в движущемся гидролокаторе, отличающаяся учетом нелинейно изменяющегося во времени дополнительного фазового сдвига сигнала, соответствующего отражениям от произвольного анализируемого разрешаемого объема. Дополнительный фазовый сдвиг возникает из-за сопоставимости скорости движения носителя гидролокатора и скорости распространения волны. Учет дополнительного фазового сдвига обеспечивает наблюдение малоразмерных объектов и их элементов благодаря увеличению отношения сигнал/помеха на

величину не менее 30 дБ для точечного отражателя на дальности 1500 м при скорости носителя 5 м/с, длине волны 0,02 м, частоте повторения зондирований 16,7 Гц и времени синтеза апертуры антенны 6 с.

3. Математическая модель ревербераций в движущемся ГЛ с САА, включающая математическое описание пространства ревербераций для каждого анализируемого разрешаемого объема и учитывающая изменения состава отражателей в этом пространстве при перемещении ГЛ. Модель позволяет получить количественные оценки мощностей помех ревербераций и оценить отношение сигнал/помеха в разрешаемых объемах для гидролокатора с синтезом апертуры антенны. Использование модели позволило провести сопоставительный анализ гидролокаторов с различными принципами построения 3-мерных изображений дна и показать, что в гидролокаторе с синтезом апертуры отношение сигнал/(помеха ревербераций) повышается примерно на 14 дБ по сравнению с гидролокатором с большой апертурой при функционировании в типовых условиях. Результат указывает на существенные преимущества гидролокатора с синтезом апертуры антенны при поиске низкоконтрастных (малоразмерных) объектов на мелководье с глубинами десятки – сотни метров.

4. Результаты исследования влияния ошибок определения скорости движения носителя локатора и скорости распространения волны на качество формирования 3-мерного изображения дна и объектов на нем (разрешающая способность, смещение изображения, отношение сигнал/помеха). Полученные результаты позволяют прогнозировать изменение показателей качества и сформировать требования к точности определения скорости носителя ГЛ и скорости распространения гидроакустической волны. Показано, что при использовании в канале обработки весовой функции Хэмминга для обеспечения требований к ухудшению разрешающей способности по азимуту не более чем на 40 % и уменьшению отношения сигнал/помеха не более чем на 2,15 дБ, ошибка определения скорости движения локатора не должна выходить за пределы  $\pm 4\%$ .

### **Личный вклад соискателя ученой степени**

#### **1. Соискатель лично:**

- разработал задачи гидролокации со сверхразрешением, учитывающие особенности построения изображения дна и объектов на нем, а также провел критический анализ современных ГЛ и способов обеспечения высокого разрешения при построении 3-мерного изображения на большой глубине;
- получил и исследовал амплитудно-фазо-частотную характеристику канала устройства синтеза апертуры антенны в гидролокаторе;
- разработал математическую модель гидроакустического сигнала при САА в движущемся ГЛ, учитывающую различия в расстояниях между фазовым

центром антенны и анализируемым объемом в момент зондирования и в момент приема соответствующего ОС;

- разработал методику оценки влияния негативных факторов на качество формирования изображения в гидролокаторе с САА и исследовал влияние ошибок определения скорости носителя и скорости распространения волны на качество формирования 3-мерных изображения дна и объектов на нем;

- провел сопоставительный анализ возможностей защиты от ревербераций гидролокатора с большой физической апертурой и ГЛ с САА.

2. Совместно с руководителем соискатель разработал:

- модели временной и спектральной структуры ОС в ГЛ с САА, учитывающие частотно-зависимое затухание акустических волн в водной среде;

- математическое описание механизма учета скорости движения носителя в разности расстояний между фазовым центром физической антенны и центром анализируемого объема в моменты зондирования и приема;

- математическую модель ревербераций в движущемся ГЛ с САА.

#### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях: 48-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР «Радиотехнические системы» (г. Минск, 2012); Международная научно-техническая конференция «Современные средства связи» (г. Минск, 2012); 9-я международная молодежная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2013» (г. Севастополь, Украина, 2013); XI Белорусско-российская научно-техническая конференция «Технические средства защиты информации» (г. Минск, 2013); 49-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР «Радиотехнические системы» (г. Минск, 2013); Международная научно-техническая конференция «Современные средства связи» (г. Минск, 2013); 18-й международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» (Харьков, Украина, 2014); 50-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР «Радиотехнические системы» (г. Минск, 2014); 7-я Международная научно-техническая конференция «Приборостроение – 2014» (г. Минск, 2014); XIX Международная научно-техническая конференция «Современные средства связи» (г. Минск, 2014).

## Опубликование результатов диссертации

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 16 печатных работ, в том числе 5 статей в научных журналах, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, общим объемом 1,8 авторских листа, 11 статей и тезисов в сборниках и материалах конференций.

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений.

Общий объем диссертации составляет 141 страницы, из них 89 страниц основного текста, 45 иллюстраций на 16 страницах, 10 таблиц на 4 страницах, библиографический список из 67 наименований на 5 страницах, список собственных публикаций из 16 наименований на 2 страницах и 6 приложений на 25 страницах.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В *первой главе* рассмотрены основные направления применения гидролокаторов со сверхразрешением по угловым координатам. Из анализа задач мониторинга морского дна следует необходимость увеличения дальности действия до единиц километров при обеспечении разрешающей способности в единицы – десятки сантиметров. Анализ существующих средств построения изображения дна и объектов на нем показал, что для повышения разрешающей способности по азимуту выбран наиболее простой путь – уменьшение длины волны зондирующего сигнала. Платой за это является уменьшение дальности действия ГЛ. Проведен анализ способов обеспечения сверхразрешения. Одним из сравнительно новых направлений решения проблемы обеспечения высокой разрешающей способности в азимутальной плоскости при одновременном обеспечении большой дальности действия является использование САА. На основе анализа основных объективных факторов, влияющих на качество изображения, определены основные задачи исследований, связанные с разработкой математических моделей временной и спектральной структур ОС с учетом влияния среды распространения волн, математических моделей сигналов ревербераций в движущемся ГЛ с САА и алгоритмов пространственно-временной обработки в задаче САА ГЛ для построения 3-мерного изображения дна. Кроме того, в качестве дополнительной задачи выделен анализ влияния основных факторов неустойчивости на качество формирования изображения.

**Вторая глава** посвящена разработке математических моделей временной и спектральной структур ОС, учитывающих частотно-зависимое затухание гидроакустических волн в среде распространения.

ОС, сформированные на выходе акустоэлектрического преобразователя (АЭП) ГЛ, характеризуются задержкой во времени, ослаблением и искажением, которые возникают при распространении акустических волн в морской среде. Если учитывать только влияние расширения фронта акустической волны, то мощность ОС от разрешаемого объема блока на расстоянии  $r_a$  от ГЛ, на выходе АЭП описывается как

$$\sigma_c^2 = \frac{P_0 G_{Tr} K_{P-Tr} G_{Rc} K_{P-Rc} \lambda^2 \sigma_t}{(4\pi)^3 r_{zs}^2 r_{ot}^2}, \quad (1)$$

где  $P_0$  – мощность зондирующего сигнала (ЗС) на входе электроакустического преобразователя передающей антенны;  $G_{Tr}$ ,  $G_{Rc}$  – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн;  $K_{P-Tr}$  – коэффициент преобразования мощности электрического сигнала в мощность акустического поля;  $K_{P-Rc}$  – коэффициент преобразования мощности акустического поля в мощность электрического сигнала;  $\lambda$  – длина волны ЗС;  $\sigma_t$  – эффективная отражающая поверхность (ЭОП) анализируемого объема;  $r_{zs}$  и  $r_{ot}$  – расстояния между фазовым центром антенны (ФЦА) и анализируемым объемом в момент передачи ЗС и момент приема соответствующего ОС.

Амплитудно-фазо-частотный спектр (АФЧС) ОС на выходе АЭП определяется произведением АФЧС закона модуляции ЗС  $G_0(\omega)$  и АФЧС трассы распространения акустических волн  $G_{SR}(\omega, r_\Sigma, \Psi)$ :

$$G_S(\omega, r_\Sigma, \Psi) = A_c(r_\Sigma) G_0(\omega - \omega_0) G_{SR}(\omega, r_\Sigma, \Psi), \quad (2)$$

где  $A_c(r_\Sigma)$  – амплитуда ОС на выходе АЭП, учитывающая в соответствии с (1) затухание волны из-за сферичности фронта при зондировании и отражении; АФЧС трассы определяется выражением

$$G_{SR}(\omega, r_\Sigma, \Psi) = |G_{SR}(\omega, r_\Sigma, \Psi)| \exp(-i\omega r_\Sigma / c_v(\Psi)), \quad (3)$$

где

$$|G_{SR}(\omega, r_\Sigma, \Psi)| = D_{SR}(\omega, r_{zs}, \Psi) D_{SR}(\omega, r_{ot}, \Psi)$$

есть амплитудно-частотный спектр трассы;  $D_{SR}(\omega, r_\Sigma, \Psi) = D_{SR}(\omega, r_{zs}, \Psi) D_{SR}(\omega, r_{ot}, \Psi)$  – некомплексная величина, которая учитывает затухание на разных частотах вследствие вязкости среды, ее теплопроводности:

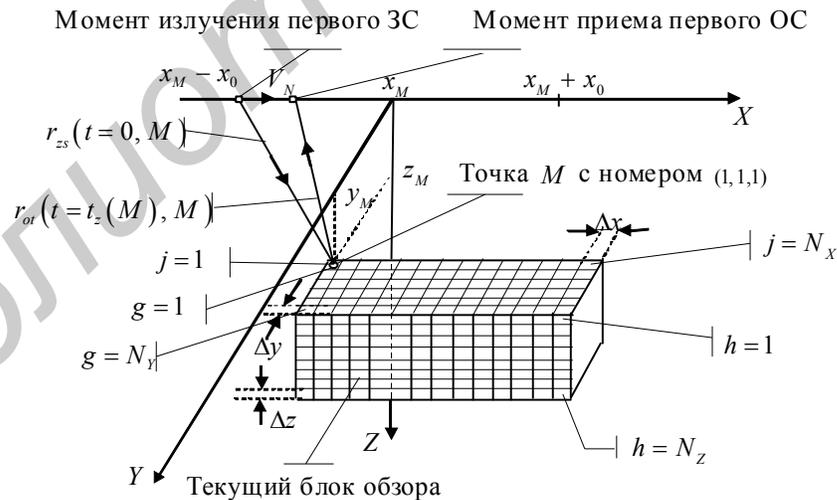
$$D_{SR}(\omega, r_{zs}, \Psi) = \exp[-\delta_r(\omega, \Psi) r_{zs}]; \quad D_{SR}(\omega, r_{ot}, \Psi) = \exp[-\delta_r(\omega, \Psi) r_{ot}], \quad (4)$$

где  $\delta_r(\omega, \psi)$  – суммарный коэффициент поглощения, учитывающий вязкость (сдвиговую и объемную) и теплопроводность среды, на частоте  $\omega$ ;  $\psi$  – вектор параметров, характеризующих состояние водной среды распространения.

Временная структура ОС определяется обратным преобразованием Фурье от ее спектра (2).

Модели спектральной и временной структур ОС позволяют учитывать параметры ГЛ (параметры ЗС, характеристики передающей и приемной антенн, коэффициенты электроакустических и акустоэлектрических преобразований), сферичность фронта волны, отражательные способности исследуемой поверхности (объекта), а также частотно-зависимое затухание акустических волн при распространении в водной среде. Разработанные модели позволяют учесть изменения скорости распространения акустической волны и частотно-зависимого затухания в соответствии с изменением глубины.

Вторым вопросом, который рассмотрен в главе, является *разработка математической модели гидроакустического сигнала*. В приложении к САА зона построения изображения (зона обзора) разбивается на трехмерные блоки в прямоугольной системе координат (рисунок 1). В ходе интервала САА длительностью  $T_{САА}$  строится один блок, имеющий размеры  $X_{OBS}$ ,  $Y_{OBS}$ ,  $Z_{OBS}$  и состоящий из разрешаемых объемов с размерами, соответствующими разрешающим способностям  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ . Количество элементов разрешения в блоке по соответствующим осям координат обозначим  $N_x$ ,  $N_y$ ,  $N_z$ .



**Рисунок 1. – Пояснение определения задержки ОС от разрешаемого объема в ГЛ с САА**

Произвольный разрешаемый объем в блоке обозначим номером  $(j, g, h)$ , причем  $j = \overline{1; N_x}$ ,  $g = \overline{1; N_y}$ ,  $h = \overline{1; N_z}$ . Носитель ГЛ перемещается прямолинейно со скоростью  $V_N$ , причем  $x_N(t) = x_{0N} + V_N t$ , а остальные его координаты не-

изменны ( $y_N = 0, z_N = 0$ ). Математическая модель гидроакустического сигнала, отраженного от отражателя, находящегося в центре произвольного  $(j, g, h)$ -го разрешаемого объема блока обзора, при САА, описывается выражением

$$u_s(t, j, g, h) = \sum_{n=1}^{N_T} E_s(j, g, h) U_0(t - t_z(t, j, g, h) - (n-1)T_r) e^{i(2\pi f_0(t - t_z(t, j, g, h) - (n-1)T_r) + \phi_0(j, g, h))},$$

где  $n$  – номер периода повторения ЗС;  $E_s(j, g, h), \phi_0(j, g, h)$  – амплитуда и случайная начальная фаза сигнала, отраженного от  $(j, g, h)$ -го разрешаемого объема;  $U_0(t)$  – закон модуляции ЗС;  $T_r$  – период повторения импульсов;  $t_z(t, j, g, h)$  – задержка ОС от  $(j, g, h)$ -го объема относительно ЗС.

Из-за сопоставимости скорости движения носителя и скорости распространения гидроакустической волны возникает различие в расстояниях между ФЦА и центром анализируемого объема в момент начала зондирования и в момент приема соответствующего ОС. Для исключения негативного влияния указанного различия в расстояниях необходимо описать его математически и учесть в модели временной структуры гидроакустического сигнала. При этом время задержки сигнала, отраженного от  $(j, g, h)$ -го объема, определяется как

$$t_z(t, j, g, h) = (r_{zs}(t, j, g, h) + r_{ot}(t, j, g, h)) / c_v, \quad (5)$$

где  $r_{zs}(t, j, g, h), r_{ot}(t, j, g, h)$  – расстояния между ФЦА и центром  $(j, g, h)$ -го объема в момент начала излучения произвольного ЗС и в момент приема соответствующего ОС, определяющиеся выражениями (см. рисунок 1):

$$r_{zs}(t, j, g, h) = \sqrt{(z_M + (h-1)\Delta z)^2 + (y_M + (g-1)\Delta y)^2 + (V_N t - x_0)^2}, \quad 0 \leq t \leq T_{SAА}; \quad (6)$$

$$r_{ot}(t, j, g, h) = \sqrt{(z_M + (h-1)\Delta z)^2 + (y_M + (g-1)\Delta y)^2 + (V_N t + V_N t_z(t, j, g, h) - x_0)^2}, \quad 0 \leq t \leq T_{SAА}, \quad (7)$$

где  $y_M, z_M$  – координаты по осям  $Y$  и  $Z$  точки  $M$  (с номером (1, 1, 1)).

Из (5), (6) и (7) получим выражение для искомой задержки:

$$t_z(t, j, g, h) = \frac{2}{c_v^2 - V_N^2} (c_v r_{zs}(t, j, g, h) + V_N^2 t) - \frac{2V_N x_0}{c_v^2 - V_N^2} [c]. \quad (8)$$

Выражение для суммарной задержки ОС относительно момента зондирования позволило описать дополнительный нелинейно изменяющийся во времени фазовый сдвиг сигнала, отраженного от произвольного анализируемого разрешаемого объема, который учитывает различия в расстояниях между ФЦА ГЛ и анализируемой точкой в момент передачи ЗС и в момент приема соответ-

вующего ОС. Учет этого дополнительного нелинейно меняющегося фазового сдвига в алгоритмах САА обеспечит построение изображения с более высоким качеством (разрешение и контрастность) на сравнительно больших дальностях.

В *третьей главе* рассмотрена проблема ревербераций в ГЛ. Проанализированы различные виды ревербераций и рассчитаны их мощности с учетом отражательных характеристик поверхностей дна, воды и объектов. В движущемся ГЛ с САА защита от реверберационных помех осуществляется естественным образом в ходе *когерентного междупериодного накопления* (КМН) полезных сигналов. КМН в ходе движения ГЛ осуществляется на длительном интервале в соответствии с индивидуальными законами изменения фаз полезных сигналов, которые отличаются от законов изменения фаз сигналов ревербераций. При этом реверберационные помехи, присутствующие в принятом сигнале, суммируются некогерентно, что приводит к повышению отношения сигнал/помеха в элементах разрешения и обеспечивает контрастность изображения.

На отношение *сигнал/помеха* в элементе разрешения влияют реверберации, принятые по главному и боковым лепесткам диаграммы направленности антенны (ДНА) из окружающего ГЛ пространства, сигналы которых имеют задержку, одинаковую с задержкой отражений от анализируемого  $(j_a, g_a, h_a)$ -го объема. По радиальной протяженности пространство ревербераций для  $(j_a, g_a, h_a)$ -го объема соответствует разрешающей способности по дальности  $\Delta r$ . Соответственно отражатели, формирующие реверберации для  $(j_a, g_a, h_a)$ -го объема, находятся в пространстве ревербераций, пределы которого ограничиваются двумя поверхностями, форма которых близка к форме сферы. Анализ позволяет получить математическую модель пространства ревербераций:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(1 - (V_N/c_v)^2\right) \left(x_{j_a, g_a, h_a} - x_0 + (n-1)V_N T_r - x\right)^2 + y^2 + z^2 - \\ - \left( (V_N (c_v^2 - V_N^2) (t_z(n, j_a, g_a, h_a) - \Delta t_z)) / c_v^2 \right) \left(x_{j_a, g_a, h_a} - x_0 + (n-1)V_N T_r - x\right) - \\ - \left( (c_v^2 - V_N^2) / 2c_v \right)^2 (t_z(n, j_a, g_a, h_a) - \Delta t_z)^2 \geq 0; \\ \left(1 - (V_N/c_v)^2\right) \left(x_{j_a, g_a, h_a} - x_0 + (n-1)V_N T_r - x\right)^2 + y^2 + z^2 - \\ - \left( (V_N (c_v^2 - V_N^2) (t_z(n, j_a, g_a, h_a) + \Delta t_z)) / c_v^2 \right) \left(x_{j_a, g_a, h_a} - x_0 + (n-1)V_N T_r - x\right) - \\ - \left( (c_v^2 - V_N^2) / 2c_v \right)^2 (t_z(n, j_a, g_a, h_a) + \Delta t_z)^2 \leq 0. \end{array} \right.$$

В диссертации проведен анализ пространства ревербераций на основе моделирования, результаты которого позволяют сделать следующие выводы:

- во-первых, сечения пространства ревербераций плоскостями  $XOY$  и  $XOZ$  имеют эллиптическую форму, что объясняется сопоставимостью скоро-

сти движения ГЛ со скоростью распространения акустической волны в воде. Размеры эллипсов ближней и дальней границ зависят от расстояния между ГЛ и центром анализируемого разрешаемого объема;

▪ во-вторых, в передней и задней областях пространства ревербераций, ограниченного двумя эллипсоидами ближней и дальней границ, наблюдается быстрая смена состава отражателей.

Математическая модель временной структуры сигнала ревербераций для  $(j_a, g_a, h_a)$ -го объема описывается выражением

$$h_r(t, j_a, g_a, h_a) = \sum_{n=1}^{N_T} \sum_{\chi=1}^{\chi_n} \left[ E(n, \chi) U_0(t - t_z(n, \chi) - (n-1)T_r) e^{i(2\pi f_0 t + \varphi_r(n, \chi) + \varphi_0(\chi))} \right],$$

где  $\chi_n$  – число мешающих отражателей в пространстве ревербераций при  $n$ -м зондировании;  $t_z(n, \chi)$  – суммарная задержка сигнала, отраженного от  $\chi$ -го отражателя при  $n$ -м зондировании. Важно отметить, что  $t_z(n, j_a, g_a, h_a) - \Delta r / c_v \leq t_z(n, \chi) \leq t_z(n, j_a, g_a, h_a) + \Delta r / c_v$ .

В ходе перемещение ГЛ с САА происходит изменение радиального расстояния  $r(n, j_a, g_a, h_a)$  до анализируемого  $(j_a, g_a, h_a)$ -го объема, что приводит к соответствующими изменениям пространства ревербераций (размер и расположение). Состав отражателей, создающих реверберации в принятом сигнале изменяется в ходе интервала САА. В соответствии с этой адекватной моделью суммарный сигнал ревербераций можно представить двумя составляющими: регулярной составляющей и случайной составляющей. Эти составляющие имеют существенные различия в спектрально-временных структурах, которые напрямую определяют возможности по снижению влияния ревербераций на качество формирования изображения.

Проведем сопоставительный анализ путем моделирования для типового ГЛ, в котором высокое разрешение обеспечивается за счет узкой ДНА с большой физической апертурой, и для ГЛ с САА при одинаковых значениях длины волны и ширины спектра ЗС. Требование к обоим ГЛ – одинаковые линейные размеры разрешающих способностей по азимуту на дальности анализа  $r_a$ .

Анализ проведен путем сопоставления изображения набора отражателей при отсутствии и наличии ревербераций. Пространство анализа по азимуту ограничено значением  $\Delta\theta_{an} = 180$  град. Отражатели располагались на линии, параллельной оси  $X$ , в разрешаемых объемах с номерами  $j = 3, 6, 9, 12$  и  $15$ .

Для проведения объективной оценки влияния ревербераций шумы приемных устройств не моделировались. При моделировании использовались следующие параметры ГЛ:  $P_0 = 1$  Вт,  $T_0 = 0,02$  с,  $f_0 = 75$  кГц; закон модуляции ЗС – ЛЧМ с девиацией  $\Delta f_M = 3,75$  кГц;  $\lambda = 0,02$  м;  $T_r = 0,05$  с;  $G_{Tr} = G_{Rc} = 50$ ;

$K_{p-Tr} = 0,5$  и  $K_{p-Rc} = 0,5$ ; средний уровень боковых лепестков диаграмм направленности физических антенн  $\eta = -15$  дБ;  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0,5$  м;  $V_N = 5$  м/с,  $T_{SAA} = 6$  с и длина физической апертуры антенны  $l_A = 1$  м. Отражатели, создававшие полезные сигналы и реверберации по боковым лепесткам ДНА, характеризовались следующими параметрами: первый разрешаемый объем имел координаты  $x_{1,1,1} = 20$  м;  $y_{1,1,1} = 600$  м,  $z_{1,1,1} = 1375$  м; ЭОП каждого из пяти отражателей, создававших полезные сигналы,  $\sigma_i = 0,5$  м<sup>2</sup>; ЭОП каждого отражателя, создававшего реверберации,  $\sigma_r = 0,1$  м<sup>2</sup>, а количество этих отражателей в секторе анализа  $N_{ot} = 1260$ ;  $c_v = 1495$  м/с.

На рисунке 2, а приведены изображения для набора отражателей при наличии ревербераций в ГЛ с большой физической апертурой, а на рисунке 2, б – в ГЛ с САА. Изображения представлены в виде нормированных к максимальному значению квадратов модулей комплексных амплитуд, относящихся к 17 разрешаемым объемам и полученных на выходах устройств обработки двух сопоставляемых ГЛ. В диссертации также представлены результаты исследования для случая отсутствия ревербераций.

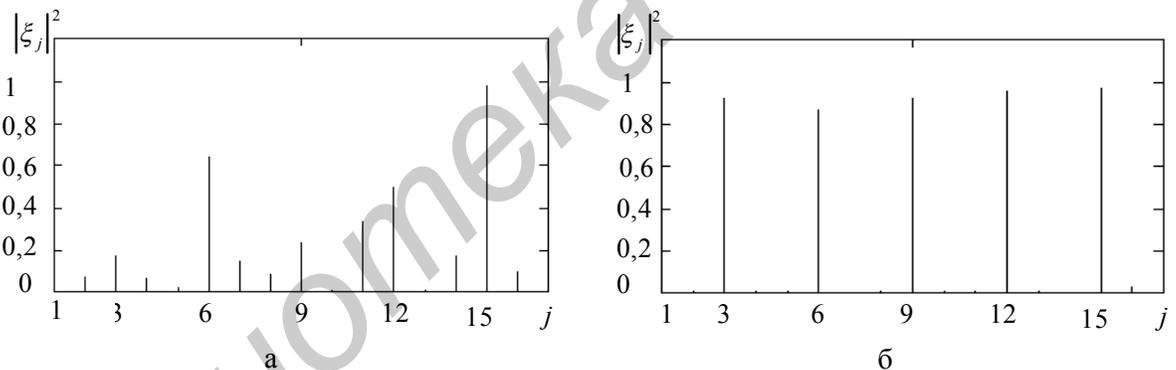


Рисунок 2. – Изображения на выходах устройств обработки при наличии ревербераций в ГЛ с большой физической апертурой (а) и в ГЛ с САА (б)

Анализ полученных результатов показывает, что при отсутствии ревербераций в обоих ГЛ формируются четкие и контрастные изображения, на которых видны все пять полезных отражателей, а при наличии ревербераций изображение, полученное в ГЛ с САА, практически не изменилось – отчетливо видны все полезные отражатели, среднее значение отношения сигнал/помеха составляет 20,3 дБ. Однако изображение, полученное в ГЛ с большой физической апертурой, не соответствует желаемому результату – полезные отражатели не наблюдаются с высокой контрастностью на фоне принятых ревербераций, а среднее значение отношения сигнал/помеха равняется 5,907 дБ.

В *четвертой главе* рассмотрены уточненный алгоритм САА и структура гидролокатора с САА, предназначенного для построения 3-мерных изображе-

ний дна. На основе анализа опорной функции устройства (канала) САА получена его амплитудно-фазо-частотная характеристика.

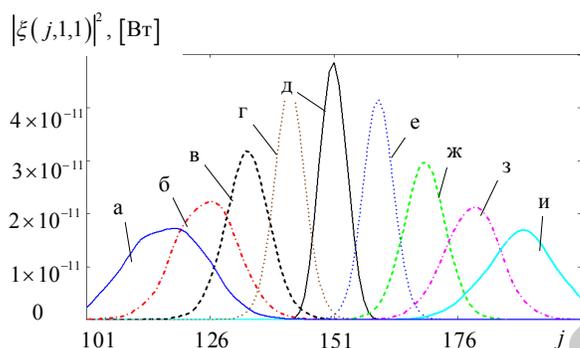
Проведен анализ влияния ошибки определения скорости движения носителя (ООСН) ГЛ на качество изображения. При этом в блоке обзора устанавливается только один отражатель в точке с номером ( $j = 151, g = 1, h = 1$ ). Первый объем блока обзора имеет центр в точке с координатами  $x_{1,1,1} = 20$  м;  $y_{1,1,1} = 600$  м;  $z_{1,1,1} = 1375$  м. Интервал расстановки каналов обработки по оси  $X$  равен  $\Delta_X = 0,1$  м. Так как нас интересует сравнительно небольшой интервал, то в моделируемом ГЛ реализуется ограниченное число каналов – от канала с номером (101,1,1) до канала с номером (201,1,1). Кроме того, для моделирования использовались следующие исходные данные:  $T_{САА} = 6$  с;  $f_0 = 75$  кГц,  $\Delta f_M = 3,75$  кГц,  $F_r = 20$  Гц; ширина ДН физической антенны ГЛ  $\Delta\beta = 1,146$  град;  $V_N = 5$  м/с;  $c_v = 1495$  м/с.

На рисунке 3 представлены квадраты модулей выходных сигналов каналов обработки с номерами от (101; 1, 1) до (201; 1, 1) для  $\delta_V = 0; \pm 2\%; \pm 4\%; \pm 6\%; \pm 8\%$  при использовании в канале обработки весовой функции Хэмминга, где  $\delta_V = \left( \left( \widehat{V}_N - V_N \right) / V_N \right) 100$  [%] – ООСН,  $\widehat{V}_N$  – измеренное значение скорости носителя, используемое для формирования опорных функций в каналах обработки,  $V_N$  – истинное значение скорости носителя, используемое для формирования фазовых сдвигов ОС.

Из рисунка 3 (случай д) видно, что при отсутствии ошибки в измерении скорости носителя выходной сигнал имеет наибольшее значение для канала обработки с номером (151, 1, 1), настройки которого соответствуют истинному положению отражателя в точке с номером (151, 1, 1). Появление ошибки в измерении скорости движения носителя ГЛ приводит, во-первых, к смещению изображения отражателя относительно его истинного значения и, во-вторых, к уменьшению уровня сигнала в канале обработки, где смещенное изображение появилось. Значение смещения изображения напрямую связано с ошибкой местоположения ГЛ  $\left( \widehat{V}_N - V_N \right) T_{САА}$ , накопленной за время САА.

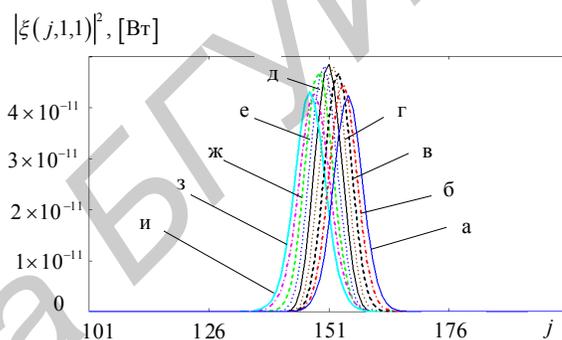
Исследование влияния ошибки  $\delta_c$  определения скорости распространения волн (ООСРВ) на качество изображения проведено аналогичным образом. На рисунке 4 представлены квадраты модулей выходных сигналов каналов обработки с номерами от (101; 1, 1) до (201; 1, 1) для девяти вариантов ООСРВ:  $\delta_c = 0\%; \pm 1\%; \pm 2\%; \pm 3\%; \pm 4\%$ . В ходе исследований установлены математические выражения для определения зависимости смещения изображения, ли-

нейного значения разрешающей способности по азимуту и отношения сигнал/помеха на выходе в анализируемом объеме от ООСН и ООСРВ. Полученные результаты исследования показали, что смещение изображения в исследованном интервале ошибок определения скорости практически пропорционально значению ООСН и ООСРВ, линейная разрешающая способность по азимуту ухудшается, а отношение сигнал/помеха уменьшается с ростом ООСН и ООСРВ при любом их знаке. Однако влияние относительных ООСРВ на смещение изображения и снижение отношения сигнал/помеха в несколько раз ниже, чем влияние относительных ООСН носителя гидролокатора. Это указывает на приоритетность в обеспечении точности измерения именно скорости движения носителя.



а –  $\delta_v = -8\%$ ; б –  $\delta_v = -6\%$ ;  
 в –  $\delta_v = -4\%$ ; г –  $\delta_v = -2\%$ ; д –  $\delta_v = 0\%$ ;  
 е –  $\delta_v = 2\%$ ; ж –  $\delta_v = 4\%$ ; з –  $\delta_v = 6\%$ ;  
 и –  $\delta_v = 8\%$

Рисунок 3. – Квадраты модулей выходных сигналов каналов обработки при наличии ООСН



а –  $\delta_c = -4\%$ ; б –  $\delta_c = -3\%$ ;  
 в –  $\delta_c = -2\%$ ; г –  $\delta_c = -1\%$ ; д –  $\delta_c = 0\%$ ;  
 е –  $\delta_c = 1\%$ ; ж –  $\delta_c = 2\%$ ; з –  $\delta_c = 3\%$ ;  
 и –  $\delta_c = 4\%$

Рисунок 4. – Квадраты модулей выходных сигналов каналов обработки при наличии ООСРВ

Разработанные методические подходы к исследованию влияния ошибок ООСН и ООСРВ на качество формирования 3-мерных изображений дна и результаты исследований позволяют прогнозировать изменение показателей качества в реальных условиях, а также формировать требования к точности определения скорости носителя гидролокатора и скорости распространения волны.

В **заключении** сформулированы основные научные результаты диссертации и рекомендации по их практическому применению.

В **Приложениях** представлены исторические шаги в гидроакустике, закон изменения скорости звука от глубины, анализ влияния частотно-зависимого затухания акустической волны при распространении в воде на качество обработки на основе моделирования, анализ отношения сигнал/помеха на выходе канала обработки устройства САА при применении модели гидроакустического сигнала, учитывающей дополнительный фазовый сдвиг и акты о практическом использовании результатов диссертационной работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Обоснована возможность увеличения глубины построения гидролокационного изображения дна и объектов на нем при одновременном обеспечении высокого разрешения и устойчивости к влиянию помех ревербераций только за счет использования прямого синтеза апертуры антенны. На основе обобщенной структуры гидроакустического тракта формирования, распространения и приема разработаны математические модели временной и спектральной структур отраженного сигнала, учитывающие частотно-зависимое затухание акустических волн при распространении в воде. Модели позволяют прогнозировать снижение показателей качества обнаружения, измерения дальности и построения 3-мерных изображений в различных водных средах для любых параметров гидролокатора [1, 4, 6, 11, 12, 13].

2. Разработана математическая модель гидроакустического сигнала на выходе акустоэлектрического преобразователя приемной антенны движущегося гидролокатора, выполняющего пространственно-временную обработку в ходе синтеза апертуры антенны. На основе анализа геометрического представления движущегося гидролокатора в приложении к САА получено ключевое для синтеза апертуры антенны математическое выражение, описывающее суммарное время задержки отраженного сигнала и соответственно суммарный фазовый сдвиг сигнала для любой точки пространства. Важным отличием модели является учет дополнительного фазового сдвига сигнала, проявляющегося в различиях расстояний между фазовым центром физической антенны и центром анализируемого объема в момент излучения зондирующего сигнала и в момент приема отраженного сигнала. Этот сдвиг обусловлен сопоставимостью скорости распространения акустической волны в воде и скорости движения гидролокатора. Компенсация дополнительного фазового сдвига, изменяющегося в ходе синтеза апертуры антенны, в соответствующем отраженном сигнале при использовании его в опорных функциях каналов обработки устройства синтеза апертуры антенны позволяет улучшить разрешающую способность, а также увеличить отношение сигнал/помеха и, как следствие, повысить контрастность изображений [2, 7, 8].

3. Обосновано новое направление в защите от помех ревербераций движущихся гидролокаторов построения 3-мерных изображений дна, которое основано на когерентной пространственно-временной обработке сигнала, принятого движущимся гидролокатором, в ходе синтеза апертуры антенны. Разработана математическая модель помех ревербераций, включающая математическое описание пространства ревербераций и учитывающая изменение состава отра-

жателей в этом пространстве при перемещении гидролокатора в ходе каждого цикла синтеза апертуры антенны. Сопоставительный анализ воздействия ревербераций на типовой гидролокатор бокового обзора с большой физической апертурой и на гидролокатор с синтезом апертуры антенны показал существенно большую устойчивость последнего к воздействию помех ревербераций благодаря использованию специального когерентного междупериодного накопления, основанного на учете индивидуальности законов изменения фаз полезных сигналов при движении гидролокатора относительно анализируемой поверхности [3, 4, 5, 9, 10, 11, 14].

4. На основе анализа опорной функции канала обработки, учитывающей дополнительный фазовый сдвиг, получено математическое выражение для его амплитудно-фазо-частотной характеристики. Проведены исследования влияния ошибок определения скорости движения гидролокатора и скорости распространения акустических волн на качество формирования 3-мерных изображений дна, также полученные результаты исследований позволяют прогнозировать изменение показателей качества в реальных условиях, а также формировать требования к точности определения скорости носителя гидролокатора и скорости распространения гидроакустической волны. Определена приоритетность в обеспечении точности измерений скоростей движения носителя и распространения волны на основе того, что влияние относительных ошибок измерения скорости распространения волны на смещение изображения и снижение отношения сигнал/помеха в несколько раз ниже, чем влияние относительных ошибок определения скорости движения носителя гидролокатора [16].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Разработанные модели внутриволновой и междупериодной структур отраженного сигнала целесообразно использовать при разработке устройств внутриволновой обработки и каналов обработки устройства синтеза апертуры антенны, что повысит качество формирования 3-мерных изображений дна, а также возможности обнаружения слабоконтрастных и малоразмерных объектов [1, 12, 13]. Применение САА, основанного на разработанных моделях, позволит повысить защищенность гидролокатора от помех ревербераций и повысить эффективность поиска малоразмерных объектов на мелководье (глубина десятки – сотни метров) [3, 5, 9, 10, 11, 14]. Результаты исследования влияния негативных факторов на качество формирования изображений требуют приоритетного внимания к повышению точности измерения скорости движения гидролокатора. Рекомендуется использовать полученные результаты для создания современных и конкурентоспособных на мировом рынке гидролокаторов мониторинга морского дна [2, 7, 8].

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Статьи в научных журналах*

1. Гейстер, С.Р. Влияние среды распространения гидроакустических волн на спектральную и временную структуры принятого локационного сигнала / С.Р. Гейстер, Т.Ч. Чан // Доклад БГУИР. – 2013. – № 5(75). – С. 72 – 78.
2. Гейстер, С.Р. Математическая модель и время задержки отраженного сигнала при гидроакустическом синтезе апертуры антенны / С.Р. Гейстер, Т.Ч. Чан // Доклад БГУИР. – 2014. – № 3(81). – С. 71 – 77.
3. Гейстер, С.Р. Анализ воздействия ревербераций на построения изображения дна в гидролокаторе с синтезом апертуры антенны / С.Р. Гейстер, Т.Ч. Чан // Доклад БГУИР. – 2014. – № 6(84). – С. 55 – 59.
4. Чан, Т.Ч. Актуальность применения гидролокатора с синтезом апертуры антенны в мониторинге дна / Т.Ч. Чан // Наука и военная безопасность. – 2014. – № 2. – С. 34 – 37.
5. Гейстер, С.Р. Математическая модель ревербераций в гидролокаторе с синтезом апертуры антенны / С.Р. Гейстер, Т.Ч. Чан // Наука и военная безопасность. – 2014. – № 3. – С. 37 – 41.

### *Статьи в материалах конференций*

6. Чан, Т.Ч. Актуальность мониторинга морского дна / Т.Ч. Чан // Радиотехнические системы : материалы 48-й научной конференции аспирантов, магистрантов, студентов БГУИР, Минск, Беларусь, 7 – 8 мая 2012 г. – С. 5.
7. Чан, Т.Ч. Модель гидроакустического сигнала, отраженного от точечного объекта, при синтезе апертуры антенны / Т.Ч. Чан, С.Р. Гейстер // Современные средства связи : материалы XVII Международной научно-технической конференции, Минск, Беларусь, 16 – 18 октября 2012 г. – С. 79.
8. Чан, Т.Ч. Фаза и доплеровская частота гидроакустического сигнала, отраженного от точечного объекта, при синтезе апертуры антенны / Т.Ч. Чан, С.Р. Гейстер // Современные средства связи : материалы XVII Международной научно-технической конференции, Минск, Беларусь, 16 – 18 октября 2012 г. – С. 80.
9. Чан, Т.Ч. Временные и спектральные характеристики реверберации различных типов в гидролокаторе / Т.Ч. Чан // Радиотехнические системы : материалы 49-й научной конференции аспирантов, магистрантов, студентов БГУИР, Минск, Беларусь, 7 мая 2013 г. – С. 26 – 27.

10. Чан, Т.Ч. Морская реверберация в гидролокаторе с синтезом апертуры антенны / Т.Ч. Чан // Радиотехнические системы : материалы 50-й научной конференции аспирантов, магистрантов, студентов БГУИР, Минск, Беларусь, 7 мая 2013 г. – С. 10.

11. Чан, Т.Ч. Анализ возможностей защиты от сигналов реверберации при гидроакустическом синтезе апертуры антенны / Т.Ч. Чан, С.Р. Гейстер // Технические средства защиты информации : материалы XI Белорусско-российской научно-технической конференции, Минск, Беларусь, 5 – 6 июня 2013 г. – С. 27.

12. Чан, Т.Ч. Оценка влияния затухания на качество внутрипериодной обработки при синтезе апертуры гидроакустической антенны / Т.Ч. Чан, С.Р. Гейстер // Современные средства связи : материалы XVIII Международной научно-технической конференции, Минск, Беларусь, 15 – 16 октября 2013 г. – С. 83.

13. Чан, Т.Ч. Влияние частотной зависимости затухания сигнала на качество решения задач гидролокации / Т.Ч. Чан // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций: материалы 9-й Международной молодежной научно-технической конференции РТ-2013, Севастополь, Украина, 2013 г. – С. 61.

14. Чан, Т.Ч. Особенности реверберации в гидролокаторе с синтезом апертуры антенны / Т.Ч. Чан // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке : материалы 18-го международного молодежного форума, Харьков, Украина, 2014 г. – С. 181 – 182.

15. Чан, Т.Ч. Оценка воздействия ревербераций на формирование изображения дна в гидролокаторе с синтезом апертуры антенны / Т.Ч. Чан // Приборостроение – 2014 : материалы 7-й Международной научно-технической конференции, Минск, Беларусь, 19 – 21 ноября 2014 г. – С. 135 – 137.

16. Чан, Т.Ч. Исследование влияния негативных факторов на качество формирования 3D-изображения в гидролокаторе с синтезом апертуры антенны / Т.Ч. Чан // Современные средства связи : материалы XIX Международной научно-технической конференции, Минск, Беларусь, 14 – 15 октября 2014 г. – С. 112 – 114.



Чан Т.Ч. Чан Т.Ч. Чан Т.Ч.

**РЭЗІЮМЭ**

Чан Чонг Тай

Адаптыўная апрацоўка сігналаў пры сінтэзе апертуры гідраакустычнай антэны для пабудавання відарыса дна

*Ключавыя словы:* гідраакустыка, гідралакатар, гідраакустычная антэна, сінтэз апертуры антэны, рэверберацыі, маніторынг дна.

*Мэта работы* заключаецца ў павелічэнні глыбіні атрымання 3-мерных відарысаў дна і аб'ектаў на ім з высокім распазнаваннем і павышэнні кантрастнасці відарысаў на мелкаводдзе пры наяўнасці інтэнсіўных рэверберацый. Дасягненне мэты заснавана на распрацоўцы мадэляў карысных сігналаў і рэверберацыйных памех, якія ўлічваюць частотна-залежнае затуханне асяроддзя распаўсюджвання і супастаўленне хуткасцей перамяшчэння гідралакатара і распаўсюджвання акустычнай хвалі.

*Метадамі даследавання з'яўляюцца* матэматычны аналіз, матэматычнае і камп'ютэрнае мадэліраванне.

*Атрыманыя вынікі:*

- мадэлі часовай і спектральнай структурадлюстраванага сігнала ў гідралакатары з сінтэзам апертуры антэны, якія ўлічваюць частотна-залежнае затуханне гідраакустычных хваляў у асяроддзі распаўсюджвання;

- мадэль гідраакустычнага сігнала пры сінтэзе апертуры антэны ў гідралакатары, які рухаецца, з улікам супастаўлення хуткасці распаўсюджвання акустычнай хвалі ў вадзе і хуткасці перамяшчэння гідралакатара;

- мадэль рэверберацый, якая ўключае апісанне прасторы рэверберацый і ўлічвае змяненне саставу адбівальнікаў у прасторы рэверберацый пры перамяшчэнні гідралакатара;

- аналіз уплыву памылак вызначэння хуткасці носыбіта і хуткасці распаўсюджвання хваляў на якасць відарыса.

*Вобласць прымянення:* рэкамендуецца выкарыстоўваць атрыманыя вынікі для стварэння сучасных і канкурэнтаздольных на сусветным рынку гідралакатараў маніторынгу марскога дна.

**РЕЗЮМЕ**

Чан Чонг Тай

Адаптивная обработка сигналов при синтезе апертуры гидроакустической антенны для построения изображения дна

*Ключевые слова:* гидроакустика, гидролокатор, гидроакустическая антенна, синтез апертуры антенны, реверберации, мониторинг дна.

*Цель работы* состоит в увеличении глубины получения 3-мерных изображений дна и объектов на нем с высоким разрешением и повышении контрастности изображений на мелководье при наличии интенсивных ревербераций. Достижение цели основано на разработке моделей полезных сигналов и реверберационных помех, учитывающих частотно-зависимое затухание акустической волны в среде распространения и сопоставимость скоростей перемещения гидролокатора и распространения акустической волны.

*Методами исследования* являются математический анализ, математическое и компьютерное моделирование.

*Полученные результаты:*

- модели временной и спектральной структур отраженного сигнала в гидролокаторе с синтезом апертуры антенны, учитывающие частотно-зависимое затухание гидроакустических волн в среде распространения;
- модель гидроакустического сигнала при синтезе апертуры антенны в движущемся гидролокаторе с учетом сопоставимости скорости распространения акустической волны в воде и скорости перемещения гидролокатора;
- модель ревербераций, включающая описание пространства ревербераций и учитывающая изменение состава отражателей в пространстве ревербераций при перемещении гидролокатора;
- анализ влияния ошибок определения скорости носителя и скорости распространения волн на качества изображения.

*Область применения:* рекомендуется использовать полученные результаты для создания современных и конкурентоспособных на мировом рынке гидролокаторов мониторинга морского дна.

**RESUME**

Tran Trong Tai

Adaptive signal processing at aperture synthesis of hydro-acoustic antenna for seabed imaging

*Keywords:* hydro-acoustics, sonar, hydro-acoustic antenna, aperture synthesis, reverberation, seabed monitoring.

*The purpose of this thesis:* consists in increase of depth of the received 3D-seabed images and object images with high resolution at the same time raising contrast of shallow water in the presence of intensive reverberations. Achievement of this purpose is based on the model developments of useful signals and reverberations, which consider the frequency dependence of attenuation of hydro-acoustic waves, comparability of sonar speed and the speed of hydro-acoustic wave.

*Research methods:* mathematical analysis, mathematical-mechanical and computer modeling.

*The obtained results and their novelty:*

- models of the temporal and spectral structure of the reflected signal in synthetic aperture sonar, taking into account the frequency-dependent attenuation of hydro-acoustic waves in the propagation medium;
- model of hydro-acoustic signal in the moving synthetic aperture sonar based on comparability of acoustic waves propagation speed in the water and speed of a sonar movement;
- model of reverberation, which includes the description of reverberating space and considers the change of reflecting structure in reverberating space with movement of sonar;
- analysis of influence of determination error of the carrier speed and distribution error of waves speed on image qualities.

*Field of application:* the received results is recommended to use for creation of modern and competitive sonar of monitoring seabed in the world market.

*Научное издание*

**Чан Чонг Тай**

**АДАПТИВНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ПРИ СИНТЕЗЕ  
АПЕРТУРЫ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ ДЛЯ  
ПОСТРОЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ДНА**

Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства  
телевидения

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать 24.12.2014	Формат 60×84 <sup>1</sup> / <sub>16</sub> .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Гаймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,63
Уч.-изд. л. 1,4	Тираж 60 экз.	Заказ 483

---

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,

ЛИ №02330/264 от 14.04.202014

220013, Минск, П. Бровки, 6.