

Учреждение образования  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.391, 621.384.3

НГУЕН  
Нгок Донг

**ПАССИВНАЯ ГИДРОЛОКАЦИЯ ДВИЖУЩИХСЯ МОРСКИХ  
ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ КОГЕРЕНТНОГО НАКОПЛЕНИЯ  
СПЕКТРАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ СИГНАЛА**

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

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

Минск 2018

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:

**Цветков Виктор Юрьевич**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой инфокоммуникационных технологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

**Ярмолик Сергей Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, начальник цикла кафедры автоматизации, радиолокации и приемопередающих устройств учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь».

Оппонирующая организация    ОАО «АЛЕВКУРП»

Защита состоится «21» июня 2018 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 «14» мая 2018 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций,  
кандидат технических наук, доцент



Т. А. Пулко

## КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Задачи обнаружения и измерения пеленга движущихся морских объектов в настоящее время актуальны для всех стран, имеющих выход к морю. Особенно остро эти задачи стоят в противолодочной обороне. Состояние нерешенности задач определения и измерения пеленга определяется постоянным совершенствованием средств атаки со стороны моря, и особенно, подводных средств.

На данный момент времени существует большое число методов обнаружения морских объектов в различных физических полях (электромагнитное, магнитное, электрическое, тепловое, акустическое и пр.). Однако по-прежнему обнаружение и измерение пеленга морского объекта по акустическому полю играет важную роль, так как если объект является подводным, то акустические волны являются единственным видом волн, способных распространяться в морской среде на большие расстояния.

Обнаружение является первой и главной задачей в борьбе с морским противником, так как именно с момента обнаружения объекта начинают решаться все остальные задачи (измерение координат, распознавание). Второй по важности является задача измерения координат, в основе которой лежит пеленгация объекта, а ее актуальность рассматривается в ключе повышения точности измерений при низких отношениях сигнал/шум.

С точки зрения непредсказуемости для противника и невозможности для него принять адекватные меры противодействия наиболее эффективными из гидроакустических систем (ГАС) являются пассивные ГАС, работающие по собственным акустическим излучениям движущихся морских объектов. В настоящее время по-прежнему ведущие разработчики военно-морской техники используют все новые достижения в области науки и техники, обеспечивающие снижение шумности морских объектов до уровня окружающего фона.

В основе повышения дальности обнаружения и точности измерения пеленга морского объекта лежит повышение отношения сигнал/помеха, что достигается совершенствованием способов и алгоритмов обработки шумовых излучений объекта. Наиболее эффективным является диапазон низких частот, так как низкочастотные сигналы имеют малое затухание при распространении в водной среде.

В пассивном гидролокаторе (ГЛ) полезным сигналом является шум, создаваемый движущимся морским объектом. Источниками шумоизлучения (ШИ) при движении морского объекта являются гребной винт, машины и механизмы на борту объекта, обтекание объекта водой. Однако гидроакустический приемник (гидрофон) принимает не только полезные сигналы, но и разнообразные помехи различного происхождения с неизвестными параметрами. Следовательно, совершенствование обработки принятого сигнала с выхода гидрофона (ГФ) в задачах обнаружения и пеленгации должна быть связана с адаптацией к априорно

неизвестным параметрам полезного сигнала (например, частоте вращения вала гребного винта с неизвестным числом лопастей) и помех.

Настоящая диссертационная работа посвящена разработке новых подходов к обработке гидроакустических сигналов в пассивном ГЛ, обеспечивающих при решении задач обнаружения и пеленгации повышение отношения сигнал/помеха и, соответственно, увеличение дальности обнаружения и снижение ошибок пеленгации.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

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

Исследования проводились на кафедре информационных радиотехнологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в интересах создания новых способов, методов и устройств адаптивной обработки гидроакустических сигналов, обеспечивающих на практике повышение дальности обнаружения и точности измерения пеленга движущихся морских объектов для Социалистической Республики Вьетнам.

### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертационной работы является разработка новых подходов к обработке гидроакустических сигналов в пассивном ГЛ, обеспечивающих при решении задач обнаружения и пеленгации повышение отношения сигнал/помеха и, соответственно, увеличение дальности обнаружения и снижение ошибок пеленгации в ГЛ. Достижение цели основано на когерентном накоплении спектральных составляющих амплитудно-фазочастотного спектра (АФЧС) сигнала.

В диссертационной работе решались следующие задачи:

1. Анализ основных физических факторов, определяющих появление и параметры компонентов в шумовом излучении движущегося морского объекта.
2. Разработка нового способа обработки гидроакустических сигналов, основанного на когерентных свойствах сигнала гребного винта и заключающегося в когерентном накоплении спектральных составляющих (КНСС) этого сигнала на фоне шумовых помех.
3. Разработка модифицированного метода фазового мгновенного сравнения (ФМС) сигналов, основанного на использовании способа КНСС сигнала для повышения точности измерения пеленга движущегося морского объекта;
4. Экспериментальные исследования работоспособности разработанных устройств обнаружения и измерения пеленга, в основе которых лежит предложенный способ КНСС.

Объектом исследования являются пассивные ГЛ. Предметом исследования является спектральный и корреляционный анализ акустических сигналов,

фильтрация сигналов на фоне помех для решения основных задач гидролокации – обнаружения и измерения пеленга движущегося морского объекта.

### **Научная новизна**

Научная новизна полученных результатов заключается:

– в разработке способа КНСС принятого сигнала, обеспечивающего повышение отношения сигнал/помеха и, соответственно, увеличение дальности обнаружения движущегося морского объекта с преодолением априорной неопределенности относительно неизвестных параметров полезного сигнала путем избыточности;

– в разработке модифицированного метода ФМС сигналов, отличающегося от известных использованием в каналах обработки способа КНСС для повышения точности измерения пеленга движущихся морских объектов за счет повышения отношения сигнал/помеха.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Способ когерентного накопления спектральных составляющих принятого сигнала в пассивном гидролокаторе, обеспечивающий по сравнению с обычным когерентным накоплением повышение отношения сигнал/помеха прямо пропорционально количеству «эффективных» модуляционных составляющих в спектре полезного сигнала гребного винта движущегося морского объекта, что позволяет увеличить дальность обнаружения объекта прямо пропорционально корню квадратному от количества «эффективных» модуляционных составляющих. Например, при накоплении 5-ти составляющих дальность обнаружения на фоне шумов увеличится в 2,45 раза по сравнению с дальностью традиционного обнаружения по одной спектральной составляющей.

2. Модифицированный метод ФМС для измерения пеленга морского объекта, отличающийся от известных использованием в каналах обработки способа КНСС, что обеспечивает по сравнению с обычным методом ФМС уменьшение среднего квадратического отклонения (СКО) ошибки измерения пеленга практически обратно пропорционально количеству когерентно накапливаемых «эффективных» спектральных составляющих полезного сигнала. Например, при накоплении 5-ти составляющих СКО ошибки измерения пеленга уменьшится примерно в 5 раз по сравнению с обычным методом ФМС.

3. Результаты полунатурных экспериментальных исследований разработанных устройств обнаружения и измерения пеленга, в основе которых лежит предложенный способ КНСС, которые подтверждают увеличение отношения сигнал/помеха (увеличение дальности обнаружения) и уменьшение ошибок из-

мерения пеленга движущегося морского объекта по сравнению с традиционными устройствами гидролокации.

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

1. Соискатель лично:

- выполнил анализ основных физических факторов в спектре ШИ движущегося морского объекта, которые используются для обнаружения;

- рассмотрел и проанализировал задачи обнаружения, измерения пеленга морского объекта по акустическому полю, исследовал состояние, основные проблемные вопросы и пути решения задач увеличения дальности обнаружения и повышения точности измерения пеленга движущегося морского объекта в пассивном ГЛ;

- получил и исследовал АФЧС некоторых видов периодической последовательности видеоимпульсов;

- провел моделирование устройства обнаружения объекта на основе способа КНСС сигнала;

- провел моделирование устройства измерения пеленга движущегося морского объекта и сопоставил с существующим известным устройством измерения;

- разработал методики для исследования сигналов гребных винтов при экспериментальном исследовании;

- выполнил полунатурные моделирования и сопоставленный анализ работы разработанных устройств обнаружения и измерения пеленга движущегося морского объекта по сравнению с традиционным устройством.

2. Совместно с руководителем соискатель разработал:

- способ КНСС сигнала в пассивном ГЛ, обеспечивающий увеличение дальности обнаружения движущегося морского объекта;

- модифицированный метод ФМС сигналов для измерения пеленга морского объекта на основе способа КНСС сигнала;

- метод оперативной оценки амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) трактов приема акустических устройств пассивной локации.

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

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях: 21-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» (г. Харьков, Украина, 2017); 53-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (г. Минск, 2017); 10-я Международная научно-техническая конференция молодых ученых и студентов «Новые направления

развития приборостроения» (г. Минск, 2017); 13-я Международная молодежная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2017» (г. Севастополь, Россия, 2017).

### **Опубликование результатов диссертации**

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 9 научных работ, в том числе 4 статьи в научных рецензируемых журналах, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, объемом 1,46 авторского листа, 5 тезисов докладов в сборниках материалов научных конференций объемом 0,43 авторского листа. Общий объем публикаций составляет 1,89 авторского листа.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений.

Общий объем диссертации составляет 177 страниц, из них 95 страниц основного текста, 62 иллюстрации на 32 страницах, 19 таблиц на 7 страницах, библиографический список из 80 наименований на 5 страницах, список собственных публикаций из 9 наименований на 1 странице и 5 приложений на 37 страницах.

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

В *первой главе* проведен анализ физических факторов, определяющих появление и параметры компонентов в ШИ движущегося морского объекта. Из анализа следует, что наиболее мощное излучение наблюдается на дискретных составляющих (ДС), связанных с работой гребных винтов, частоты которых зависят от частоты вращения вала  $f_V$  и количества лопастей гребного винта  $N_L$ :  $f_L = N_L f_V$ , где  $f_L$  – частота появления сигналов лопастей гребного винта. Эти ДС широко используются для решения задач обнаружения и измерения пеленга движущегося морского объекта. Рассмотрены состояние, основные проблемные вопросы и пути решения задач обнаружения и измерения пеленга движущегося морского объекта. Анализ показал, что одним из перспективных направлений для решения этих задач является обработка сигналов гребных винтов морских объектов в области низких частот.

*Вторая глава* посвящена разработке нового способа повышения отношения сигнал/помеха и, соответственно, увеличения дальности обнаружения объекта, в основе которого лежит когерентная обработка АФЧС принятого сигнала.

Вначале рассматривается АФЧС принятого сигнала, полученный с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ), который и используется для решения задачи обнаружения. Сигнал, создаваемый гребным винтом морского объекта, полученный на выходе акустоэлектрического преобразователя (АЭП) приемной антенны устройства обработки сигналов, представляется периодической последовательностью видеоимпульсов (ВИ). В спектре такого сигнала содержится ряд спектральных составляющих (СС)  $X_k$ , являющихся комплексными числами  $X_k = |X_k| \exp(i\varphi_k)$ . Для видеосигналов характерны свойства:  $|X_k| = |X_{-k}|$  и  $\varphi_k = -\varphi_{-k}$ . Главный лепесток огибающей спектра последовательности прямоугольных импульсов содержит набор СС (гармоник)  $X_k$  с амплитудами  $|X_k| = \left| \frac{2E_0}{k\omega_r T_r} \cdot \sin\left(k\omega_r \frac{T_0}{2}\right) \right|$  и фазами  $\varphi_k = -k\omega_r t_z$ , где  $E_0$  – амплитуда ВИ;  $T_0$  – длительность ВИ;  $t_z$  – время задержки, соответствующее отклонению середины первого импульса относительно времени начала наблюдения. *Фаза гармоники определяется ее частотой и временем задержки.*

На основании анализа АФЧС принятого сигнала разработан способ КНСС. Важной особенностью реализации способа является преодоление априорной неопределенности относительно частоты повторения  $f_{r\_ist}$  и задержки  $t_{z\_ist}$  полезного сигнала путем аппаратной избыточности. Основными алгоритмическими операциями, обеспечивающими реализацию способа КНСС сигнала, являются:

прием дискретных временных отсчетов принятого сигнала, следующих с частотой дискретизации  $F_{dis}$ , в течение интервала когерентного накопления  $T_{KN}$  и получение спектра сигнала путем прямого БПФ;

реализация  $H$  каналов обработки спектра по частоте. Каждый  $h$ -й канал настроен на свою частоту  $f_h = f_{DS\_min} + (h-1)\Delta f_r$ , где  $\Delta f_r$  – интервал расстановки каналов КНСС по частоте. Число  $H$  каналов обработки определяется диапазоном частот  $(f_{DS\_min}, f_{DS\_max})$  и величиной  $\Delta f_r$ . В каждом  $h$ -м канале из спектра  $G(n)$ ,  $n = \overline{0, N_{FFT} - 1}$  выбираются СС  $G(h, l) = G_j$ , для которых частоты  $f_j = j\Delta f_{FFT}$  соответствуют частотам  $lf_h$ ,  $l = \overline{\pm 1, L}$ , где  $\Delta f_{FFT}$  – интервал расстановки фильтров БПФ;

реализация в каждом  $h$ -м канале по частоте  $M$  подканалов коррекции по фазе и когерентного суммирования. Коррекция вводится по начальному набегу фазы, который рассчитывается для первой спектральной компоненты на частоте  $f_h$ . В каждом  $m$ -м подканале начальный набег по фазе определяется как  $\varphi_m = m\Delta\varphi$ , где  $\Delta\varphi = 2\pi/M$ . Коррекция по фазе и суммирование выполняются в

соответствии с выражением  $\xi_\Sigma(h, m) = \left| \sum_{l \neq 0, l = \overline{-L, L}}^L G(h, l) \exp(-il\varphi_m) \right|$ ;



определение подканала обработки из всех  $H \times M$  подканалов с максимальным выходным сигналом  $\xi_{\Sigma}(h_0, m_0) \rightarrow \max$ , где  $m_0$  – номер подканала в  $h_0$ -м канале обработки;

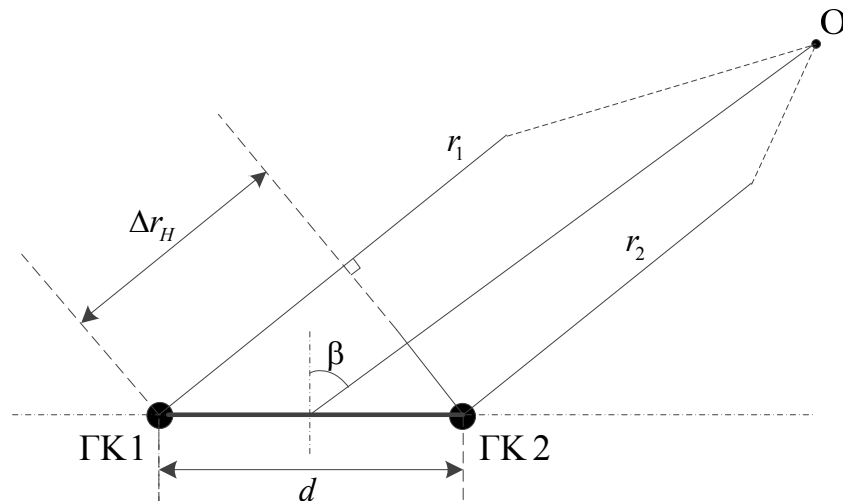
принятие решения о наличии объекта путем сравнения  $|\xi_{\Sigma}(h_0, m_0)|^2$  с порогом обнаружения  $z_*$ .

Необходимо отметить, что при выделении СС полезного сигнала с помощью цифровых фильтров БПФ частота повторения полезного сигнала не всегда совпадает с резонансной частотой фильтра. В результате появляются дополнительные фазовые сдвиги  $\varphi_{d-l}(h) = (f_{p-n_l} - lf_h) \frac{\pi}{N_{FFT} T_{dis}}$ , где  $f_{p-n_l}$  – резонансная частота фильтра БПФ, в который попадает спектральная составляющая с частотой  $lf_h$ . Тогда КНСС с учетом компенсации дополнительных фазовых сдвигов представляется в виде

$$\xi_{\Sigma}(h, m) = \left| \sum_{l \neq 0, l=-L}^L G(h, l) \exp\{-i[l\varphi_m - \varphi_{d-l}(h)]\} \right|.$$

Статистическое моделирование показало, что способ КНСС с учетом компенсации дополнительных фазовых сдвигов обеспечивает более точное определение частоты повторения, а также повышение отношения сигнал/помеха и, как следствие, увеличение дальности обнаружения. При обнаружении объекта частота повторения полезного сигнала определяется как  $f_{r-izm} = f_{DS\_min} + (h_0 - 1) \cdot \Delta f_r$ .

В *третьей главе* рассмотрен предлагаемый для измерения пеленга движущегося морского объекта модифицированный метод ФМС, отличающийся от известных использованием в каналах обработки способа КНСС сигнала.



**Рисунок 1.** – Иллюстрация принципа определения пеленга морского объекта

В основе метода лежит измерение разности времен задержки сигналов, принятых двумя разнесенными на некоторую базу приемными гидроакустическими каналами (ГК) (рисунок 1).

Угловое направление на объект определяется выражением

$$\beta = \arcsin\left(\frac{C_v \Delta t_z}{d}\right), \quad (1)$$

где  $\Delta t_z = (r_1 - r_2)/C_v = t_{z1} - t_{z2} = \Delta r_H / C_v$  – разность времен задержки сигналов, принятых приемными ГК1 и ГК2;  $\beta$  – угловое положение объекта;  $d$  – база системы;  $C_v$  – скорость распространения звука в воде.

В диапазоне однозначного измерения угла  $\pm 90^\circ$  зависимость углового положения объекта от разности времен задержки сигналов является монотонной функцией (рисунок 2 для  $d=30$  м), и для обеспечения однозначности измерения пеленга в этом секторе величину базы  $d$  необходимо выбирать на основе неравенства

$$d \leq \frac{C_v T_{r\_min}}{2} = \frac{C_v}{2 f_{r\_max}}, \quad (2)$$

где  $T_{r\_min}$  – минимальный период повторения полезного сигнала, определяющий его максимальную частоту повторения  $f_{r\_max} = 1/T_{r\_min}$ .

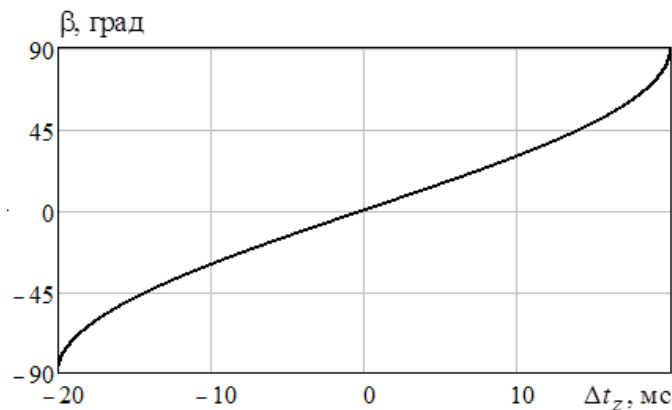


Рисунок 2. – Зависимость углового положения объекта от разности времен задержки

При типичном на практике варьировании величины  $T_{r\_min}$  для повышения точности измерения с одновременным выполнением условия однозначности целесообразно использовать набор каналов приема, антенны которых расположены равномерно на прямой линии в плоскости измерения. При этом *выбор каналов приема и, соответственно, базы осуществляется адаптивно в соответствии с измеренной в устройстве обнаружения частотой повторения сигнала  $f_{r\_izm}$* . Из совокупности каналов выбираются два приемных канала, расстояние между которыми (база) является наибольшим в пределах ограничения

$$d \leq \frac{C_v}{2 f_{r\_izm}}. \quad (3)$$

В модифицированном методе ФМС сигналов разность времен задержки  $\Delta t_z$  определяется на основе поиска максимума взаимной корреляционной функции (ВКФ)  $R_{H\_1,2}(\tau) = \overline{u_{H1}(t) u_{H2}^*(t - \tau)}$  сигналов  $u_{H1}(t)$  и  $u_{H2}(t)$ , которая од-

нозначно определяет угловое положение объекта  $\beta$ , где  $u_{H1}(t)$  и  $u_{H2}(t)$  – сигналы, сформированные путем обратного БПФ из выделенных СС, частоты которых кратны частоте  $f_{r\_izm}$ , в ГК1 и ГК2.

Разработана структурная схема устройства для обнаружения и измерения пеленга морского объекта, которая представлена на рисунке 3.

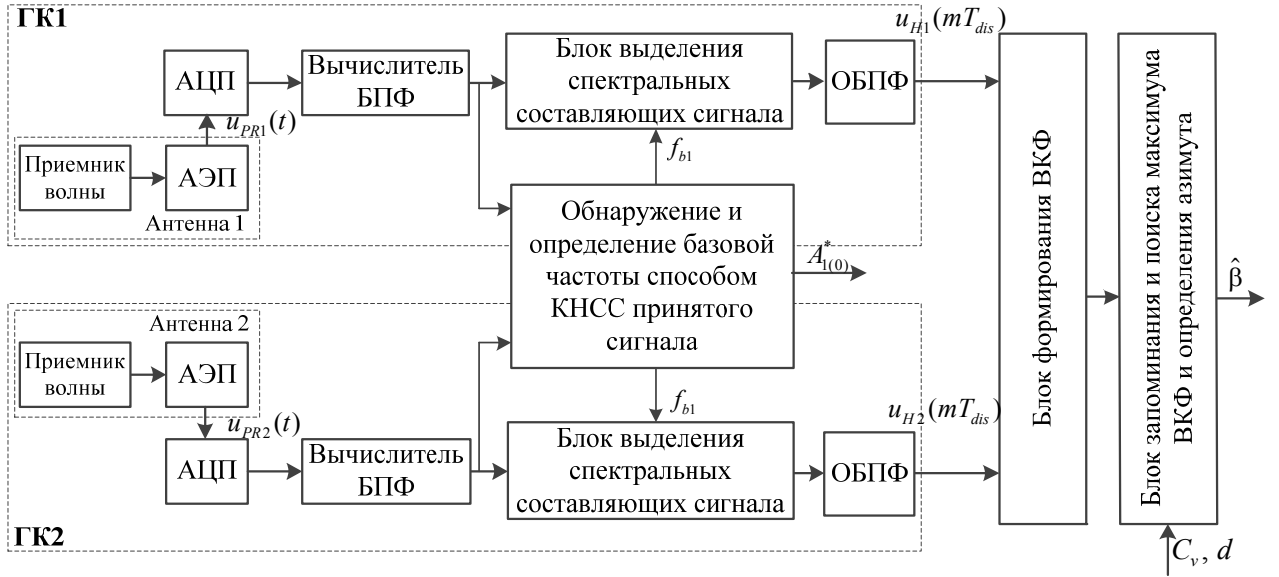


Рисунок 3. – Структурная схема устройства обнаружения и измерения пеленга морского объекта

В третьей главе путем статистического моделирования проанализировано влияние ошибок измерения времен задержки  $\Delta t_z$  на ошибки измерения пеленга объекта, полагая, что база системы  $d$  и скорость распространения звука в воде  $C_v$  определены точно. С учетом действия большого числа случайных равноценных факторов плотность распределения измеренного значения  $\Delta \hat{t}_z$  можно полагать нормальной, и в интервале углов  $\pm 45^\circ$  связь между  $\beta$  и  $\Delta t_z$  можно аппроксимировать линейной зависимостью вида  $\beta \cong (C_v/d)\Delta t_z$ , [рад] (рисунок 3). Тогда плотность распределения значения оценки  $\hat{\beta}$  определяется выражением

$$p(\hat{\beta}) = |I| p(\Delta \hat{t}_z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{\Delta \hat{t}_z} \frac{C_v}{d}} \exp \left[ -\frac{\left( \frac{d}{C_v} \hat{\beta} - m_{\Delta \hat{t}_z} \right)^2}{2\sigma_{\Delta \hat{t}_z}^2} \right] = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{\hat{\beta}}} \exp \left[ -\frac{(\hat{\beta} - m_{\hat{\beta}})^2}{2\sigma_{\hat{\beta}}^2} \right], \quad (4)$$

где  $I$  – якобиан преобразования, равный  $I = d\Delta \hat{t}_z / d\hat{\beta} = d/C_v$ .

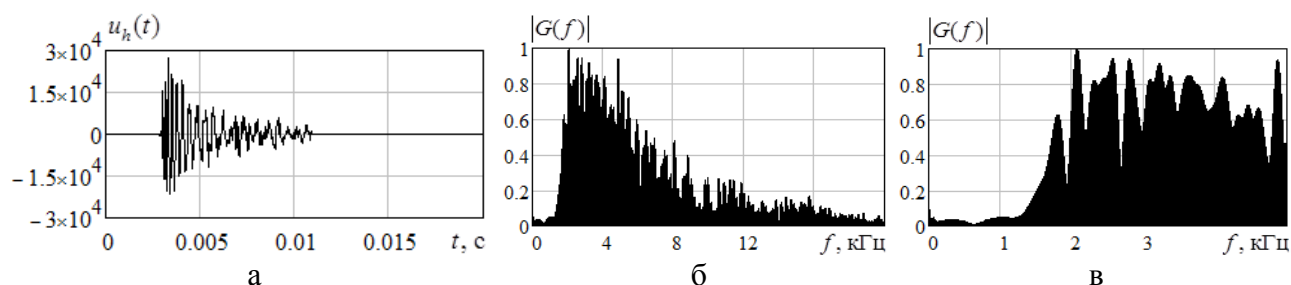
Анализ (4) показывает, что в диапазоне углов  $\pm 45^\circ$  оценки пеленга объекта распределены по нормальному закону с математическим ожиданием  $m_{\hat{\beta}} = (C_v/d)m_{\Delta \hat{t}_z}$  и СКО  $\sigma_{\hat{\beta}} = (C_v/d)\sigma_{\Delta \hat{t}_z}$ .

В *четвертой главе* представлены методика анализа сигнала гребного винта, оперативный метод оценки АЧХ трактов приема пассивного ГЛ и результаты полунатурных экспериментальных исследований работоспособности

способа КНСС сигнала и модифицированного метода ФМС в приложении к задачам обнаружения и измерения пеленга движущегося морского объекта.

Методика анализа сигнала гребного винта включает два этапа. Первым этапом является обнаружение объекта и определение частоты появления сигналов лопастей гребного винта, что выполняется в ходе обнаружения на основе способа КНСС сигнала. Вторым этапом является анализ сигналов в двух разнесенных приемных ГК для измерения пеленга объекта.

В четвертой главе также приведен оперативный метод оценки АЧХ для проверки состояния приемного тракта, основанный на формировании короткого импульса давления взрывом петарды, близкого к свойствам дельта-функции. В примере на рисунке 4 представлены фрагмент экспериментально полученного сигнала, использованного для оценки АЧХ ГФ, и оценка АЧХ ГФ в области низких и средних частот. Из рисунка 4 видно, что исследованный ГФ неисправен, так как имеет провал АЧХ в основной для пассивного ГЛ области частот.



**а – временная диаграмма фрагмента сигнала взрыва петарды; б – оценка АЧХ ГФ в области низких частот; в – оценка АЧХ ГФ в области средних частот**

**Рисунок 4. – Временная диаграмма фрагмента сигнала взрыва петарды, использованного для оценки АЧХ и оценка нормированной АЧХ ГФ**

Для экспериментального исследования способа КНСС и модифицированного метода ФМС были использованы цифровые записи сигналов, сформированные в ГФ акустическими волнами, созданными движущимся морским надводным кораблем (НК) в Южно-Китайском море. С целью проверки работоспособности способа КНСС для обнаружения при низких отношениях сигнал/помеха формировался сигнал  $u_{SN}(t)$  путем добавления к реальному сигналу «белого» гауссовского шума  $u_N(t)$ . Уровень шума устанавливался таким, чтобы отношение сигнал/помеха после БПФ было низким.

Оценка отношения сигнал/помеха на выходе устройства КНСС при экспериментальном исследовании определяется выражением

$$\hat{\rho}_{KHCC} = 10 \cdot \log \left[ \frac{\left( |\xi_{\Sigma_{SN}}(h, m)|^2 \right)_{\max} - 2\sigma_{0_{KHCC}}^2}{2\sigma_{0_{KHCC}}^2} \right], \text{ [дБ]}, \quad (5)$$

где  $\left( |\xi_{\Sigma_{SN}}(h, m)|^2 \right)_{\max}$  – максимальное значение квадрата модуля суммы  $|\xi_{\Sigma_{SN}}(h, m)|^2$  при наличии полезного сигнала и помех;

$2\sigma_{0\_KHCC}^2 = \frac{1}{H \cdot M} \sum_{h=1}^H \sum_{m=1}^M |\xi_{\Sigma\_N}(h, m)|^2$  – средний уровень мощности помех по  $(H \times M)$  каналам обработки по частоте и фазе при отсутствии полезного сигнала;  
 $|\xi_{\Sigma\_N}(h, m)|^2$  – квадрат модуля суммы канала  $(h, m)$  при наличии только помех.

Оценка отношения сигнал/помеха после БПФ определяется как

$$\overline{\rho_{БПФ}} = 10 \cdot \log \left( \frac{2\overline{\sigma_S^2}}{2\sigma_0^2} \right), [\text{дБ}], \quad (6)$$

где  $2\overline{\sigma_0^2} = \frac{\sum_{h=1}^{N_f} |G(h)|^2 - \sum_{k=1}^{12} |G_S(l_k)|^2}{N_f - 12}$  – среднее значение мощности СС помехи на выходе фильтра БПФ;

$$2\overline{\sigma_S^2} = \frac{\sum_{k=1}^{12} (|G_S(l_k)|^2 - 2\overline{\sigma_0^2})}{12}$$

– среднее значение мощности модуляционной составляющей полезного сигнала, рассчитанное в ходе эксперимента по 12 СС;

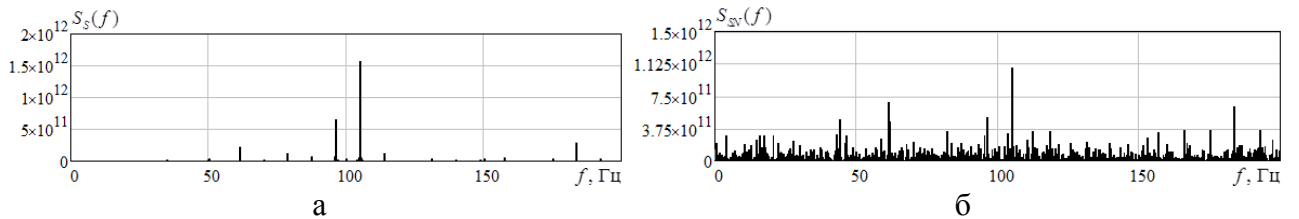
$N_f$  – число обработанных фильтров БПФ в рабочем диапазоне частот.

Максимальное значение отношения сигнал/помеха по мощности после БПФ определяется по максимальной составляющей полезного сигнала выражением

$$\rho_{БПФ\_max} = 10 \cdot \log \left( \frac{|G_S(l_k)|_{\max}^2 - 2\overline{\sigma_0^2}}{2\sigma_0^2} \right), [\text{дБ}]. \quad (7)$$

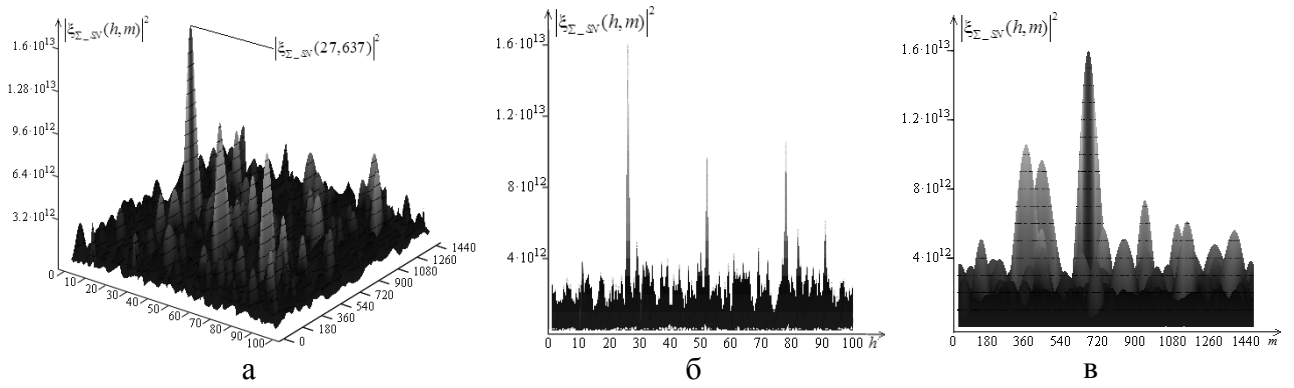
В качестве примера на рисунках 5 и 6 представлены энергетические спектры полезного сигнала, полезного сигнала с помехами при ракурсе наблюдения морского объекта  $\psi_h = \psi_1$  и результаты КНСС сигнала, включающего полезный сигнал и помехи при отношении сигнал/помеха  $\overline{\rho_{БПФ}} = 5$  дБ после БПФ, а на рисунках 7, 8 –  $\psi_h = \psi_2$  и  $\overline{\rho_{БПФ}} = 0$  дБ после БПФ.

При обработке использовались следующие параметры: диапазон исследуемых частот  $(f_{DS\_min}; f_{DS\_max}) = (7,45 \text{ Гц}; 12,45 \text{ Гц})$ ; число каналов обработки по частоте  $H = 100$ ; интервал расстановки каналов КНСС по частоте  $\Delta f_r = 0,05 \text{ Гц}$ ; число каналов обработки по фазе  $M = 1440$ ; разрешение по фазе  $\Delta\phi = 0,25$  град.



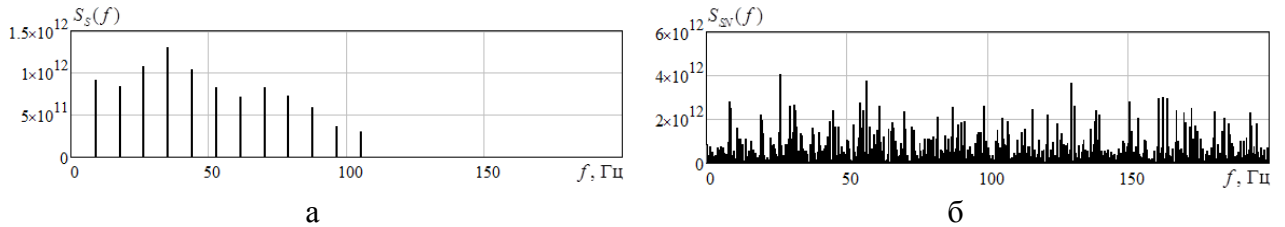
**а** – энергетический спектр полезного сигнала; **б** – энергетический спектр полезного сигнала с помехами при отношении сигнал/помеха 5 дБ после БПФ

**Рисунок 5.** – Энергетические спектры полезного сигнала, полезного сигнала с помехами при ракурсе наблюдения  $\psi_h = \psi_1$



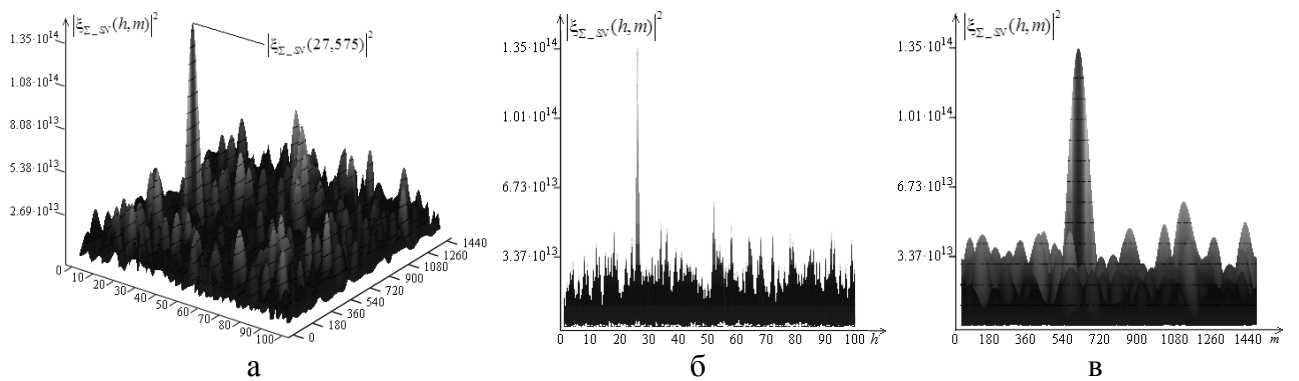
**а** – зависимость  $|\xi_{\Sigma\_SN}(h, m)|^2$ ; **б** – зависимость  $|\xi_{\Sigma\_SN}(h)|^2_{\max}$ ; **в** – зависимость  $|\xi_{\Sigma\_SN}(m)|^2_{\max}$

**Рисунок 6.** – Зависимость  $|\xi_{\Sigma\_SN}(h, m)|^2$  с когерентным накоплением 12 спектральных составляющих от номера каналов обработки по частоте  $h$  и по фазе  $m$  при ракурсе  $\psi_h = \psi_1$  и отношении сигнал/помеха  $\rho_{БПФ} = 5$  дБ  
 $(\hat{\rho}_{КНС} = 13,572$  дБ,  $\rho_{БПФ\_max} = 13,125$  дБ)



**а** – энергетический спектр полезного сигнала; **б** – энергетический спектр полезного сигнала с помехами при отношении сигнал/помеха 0 дБ после БПФ

**Рисунок 7.** – Энергетические спектры полезного сигнала, полезного сигнала с помехами при ракурсе наблюдения  $\psi_h = \psi_2$



**а** – зависимость  $|\xi_{\Sigma\_SN}(h, m)|^2$ ; **б** – зависимость  $|\xi_{\Sigma\_SN}(h)|^2_{\max}$ ; **в** – зависимость  $|\xi_{\Sigma\_SN}(m)|^2_{\max}$

**Рисунок 8.** – Зависимость  $|\xi_{\Sigma\_SN}(h, m)|^2$  с когерентным накоплением 12 спектральных составляющих от номера каналов обработки по частоте  $h$  и по фазе  $m$  при ракурсе  $\psi_h = \psi_2$  и отношении сигнал/помеха  $\rho_{БПФ} = 0$  дБ  
 $(\hat{\rho}_{КНС} = 12,244$  дБ,  $\rho_{БПФ\_max} = 3,028$  дБ)

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- при ракурсе наблюдения корабля  $\psi_h = \psi_1$  после когерентного накопления 12 СС, из которых только одна составляющая является эффективной, отношение сигнал/помеха повышается только на 0,5 дБ по сравнению с максимальным значением  $\rho_{БПФ\_max}$ ;

- при ракурсе наблюдения корабля  $\psi_h = \psi_2$  после когерентного накопления 12 СС, из которых несколько составляющих являются эффективными, отношение сигнал/помеха повышается на 8–9 дБ по сравнению с максимальным значением  $\rho_{БПФ\_max}$ ;

- практически при обнаружении объекта устройство КНСС обеспечило измерение частоты повторения полезного сигнала, оценка которой для использованных реальных сигналов составила  $f_{L\_izm} = f_{DS\_min} + (h_0 - 1)\Delta f_r = 8,75$  Гц, так как  $f_{DS\_min} = 7,45$  Гц,  $h_0 = 27$  и  $\Delta f_r = 0,05$  Гц.

Путем полунатурного эксперимента проведен анализ метода ФМС сигналов для измерения пеленга объекта. При этом формировались два требуемых сигнала на выходах двух ГФ с заданными задержками из одного зарегистрированного в ходе эксперимента сигнала при ракурсе наблюдения объекта  $\psi_h = \psi_1$ . К реальным сигналам добавлены «белые» гауссовские шумы, а уровни шумов установлены такими, чтобы значения отношений сигнал/помеха были низкими. Для измерений использована гармоника с номером  $m = 3$ , частота которой равна  $3f_L = 26,244$  Гц, и в соответствии с (3) установлена база  $d = 20$  м. На рисунке 9 представлена оценка нормированной ВКФ двух фрагментов с длительностью 0,743 с реальных частей сигналов, сформированных путем обратного БПФ от 8 выделенных в ГФ1 и ГФ2 СС, частоты которых кратны частоте  $3f_L$ , в обеих частях спектров принятых сигналов ( $L = 4$ ).

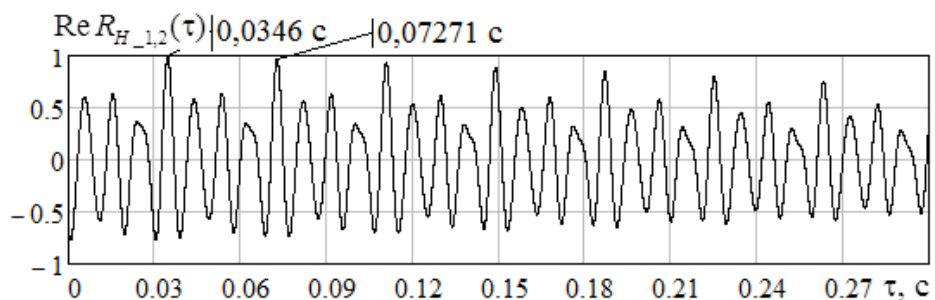


Рисунок 9. – Оценка нормированной взаимной корреляционной функции

По разработанному правилу, разность времен задержки сигналов  $\Delta t_z = \tau_{max} - T_r = -0,00351$  с, где  $\tau_{max}$  – момент времени, в котором ВКФ достигает максимума, и измеренный пеленг НК  $\beta_{izm} = \arcsin\left(\frac{C_v \Delta t_z}{d}\right) = -15,263$  град.

Проведено оценивание СКО ошибок измерения пеленга НК для различных отношений сигнал/помеха на выходе устройства обработки при использовании обычного метода ФМС и модифицированного метода ФМС (таблица 1).

Таблица 1. – Зависимость СКО ошибок измерения пеленга НК от отношения сигнал/помеха при истинной угловой координате  $\beta_{ist} = -15,2184$  град

Отношение сигнал/помеха			$\sigma_{\beta\_БПФ}$ , град (для обычного ФМС)	$\sigma_{\beta\_КНСС}$ , град (для модифицированного ФМС)
$\gamma$ , дБ	$\overline{\rho_{БПФ}}$ , дБ	$\overline{\rho_{КНСС}}$ , дБ		
-17,21	1,35	7,819	61,342	9,848
-15,97	4,02	10,236	43,015	5,32
-12,394	6,852	12,741	32,547	1,17
-7,951	11,021	16,524	3,245	0,585
-4,56	15,932	20,928	1,381	0,29

Из полученных результатов, представленных в таблице 1, видно, что:

- модифицированный способ ФМС обеспечивает более высокую точность в измерении пеленга движущегося морского объекта благодаря большему отношению сигнал/помеха за счет КНСС;

- СКО ошибки измерения пеленга объекта при использовании модифицированного метода ФМС уменьшается практически обратно пропорционально количеству когерентно накапливаемых «эффективных» СС полезного сигнала по сравнению с обычным методом ФМС;

- для измерения пеленга с СКО ошибок измерения не больше 1 град модифицированным методом ФМС требуется отношение сигнал/помеха на выходе устройства БПФ не меньше 7 дБ.

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

В **приложениях** представлены краткая характеристика создания и развития подводных лодок и подводных аппаратов, анализ АФЧС некоторых периодических последовательностей с разными законами модуляции одиночного ВИ и акты о практическом использовании результатов диссертационной работы.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследованы основные физические факторы, определяющие появление и параметры компонентов в шумовом излучении движущегося морского объекта. Обоснована возможность решения задач увеличения дальности обнаружения и повышения точности измерения пеленга движущегося морского объекта путем использования для обработки ДС в области низких частот спектра ШИ, создаваемого гребным винтом морского объекта в пассивном ГЛ [2, 5].

2. Разработан новый способ КНСС сигнала для обнаружения морского объекта, обеспечивающий повышение отношения сигнал/шум на выходе устройства обработки и, соответственно, увеличение дальности обнаружения объекта в пассивном ГЛ, в основе которого лежит КНСС принятого сигнала с преодолением априорной неопределенности относительно неизвестных параметров [2, 5, 6, 7]. Показано, что КНСС сигнала с учетом дополнительных фазовых сдвигов, возникающих из-за несовпадения частот спектральных составляющих полезного сигнала и резонансных частот соответствующих фильтров БПФ, позволяет улучшить точность определения базовой частоты, а также увеличить отношение сигнал/шум. Одновременно с обнаружением, разработанный способ позволил определить частоту повторения полезного сигнала, что является основой для измерения пеленга и распознавания класса обнаруженного объекта. Точность определения частоты повторения полезного сигнала зависит от количества накапливаемых спектральных составляющих в устройстве КНСС, интервала расстановки каналов КНСС по частоте и стабильности работы механизма, создающего излучения.

3. Разработан модифицированный метод ФМС сигналов для измерения пеленга движущегося морского объекта. Метод основан на измерении разности времен задержки сигналов, принятых в разнесенных приемных ГК. Отличительной особенностью метода является использование в измерителе пеленга способа КНСС сигнала. Использование данного способа обеспечило повышение отношения сигнал/шум в каналах приема, что привело к снижению ошибок измерения пеленга в пассивном ГЛ [3, 8, 9]. На основе предложенного метода ФМС сигналов разработано устройство пеленгации, состоящее из трех приемных ГК, обеспечивающее определение местоположения объекта. При этом ошибка измерения пеленга объекта определяется ошибкой измерения времени задержки сигналов. Оценка точности измерения пеленга объекта осуществляется косвенным методом путем оценивания значения разности времен задержки сигналов, принятых двумя приемными ГК.

4. Разработанная методика анализа сигнала гребного винта позволила провести выделение и анализ полезного сигнала, а также исследование и сопоставительный анализ метода ФМС для измерения пеленга движущегося морского объ-

екта. Для проверки работоспособности разработанных способа КНСС и метода ФМС выполнены полунатурные экспериментальные исследования с использованием нескольких реальных сигналов, принятых гидрофоном при различных ракурсах наблюдения корабля [4]. Показано, что способ КНСС более эффективен, если в диапазоне обрабатываемых частот имеется ряд спектральных составляющих, сопоставимых по мощности. Исследования позволили установить, что модифицированный метод ФМС сигналов обеспечил по сравнению с обычным методом ФМС уменьшение СКО ошибки измерения пеленга практически обратно пропорционально количеству когерентно накапливаемых «эффективных» спектральных составляющих полезного сигнала. Экспериментальные исследования подтвердили возможность использования разработанных способа КНСС и метода ФМС на практике для локации морских объектов.

5. Разработан метод оперативной оценки АЧХ трактов приема акустических устройств пассивной локации, позволяющий принять решение о работоспособности устройства локации [1]. Установлено, что основными ограничениями на применение рассмотренного метода являются ограниченный спектр пеленга, а также помеховые переотражения от границ разделов сред и предметов природного и искусственного происхождения.

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

1. Предложенный способ КНСС принятого сигнала целесообразно использовать при разработке гидролокационных устройств обнаружения, что увеличит дальность обнаружения малозумных движущихся морских объектов в сложной помеховой обстановке [2, 5, 6, 7].

2. Модифицированный метод ФМС сигналов, основанный на использовании способа КНСС, позволит на практике разработать эффективное устройство пеленгации, что обеспечит повышение точности измерения пеленга морских объектов в сложных помеховых условиях [3, 8, 9].

3. Рекомендуется использовать полученные результаты исследования для модернизации существующих ГАС наблюдения (например, гидроакустических буев, стационарных ГАС, корабельных ГАС и пр.) [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9].

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ**

### **Статьи в рецензируемых научных журналах**

1. Гейстер, С. Р. Метод оперативной оценки амплитудно-частотных характеристик трактов приема акустических устройств пассивной локации / С. Р. Гейстер, Д. Н. Нгуен // Наука и воен. безопасность. – 2015. – № 4. – С. 31–35.

2. Гейстер, С. Р. Способ когерентного накопления спектральных составляющих принятого сигнала в пассивном гидролокаторе / С. Р. Гейстер, Д. Н. Нгуен // Наука и воен. безопасность. – 2016. – № 3(50). – С. 36–38.

3. Гейстер, С. Р. Измерение пеленга движущихся объектов с использованием когерентного накопления спектральных составляющих сигнала в пассивном гидролокаторе / С. Р. Гейстер, Д. Н. Нгуен // Доклады БГУИР. – 2017. – № 3(105). – С. 52–57.

4. Гейстер, С. Р. Результаты экспериментальных исследований способа когерентного накопления спектральных составляющих сигнала в пассивном гидролокаторе / С. Р. Гейстер, Д. Н. Нгуен // Наука и воен. безопасность. – 2017. – № 4. – С. 43–48.

### **Тезисы докладов в сборниках материалов научных конференций**

5. Нгуен, Д. Н. Способ повышения дальности обнаружения морских объектов / Д. Н. Нгуен // Новые направления развития приборостроения: материалы 10-й Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых и студентов, Минск, Беларусь, 26–28 апр. 2017 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2017. – Т. 1. – С. 30.

6. Нгуен, Д. Н. Физические основы способа когерентного накопления для обнаружения движущихся морских объектов / Д. Н. Нгуен // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке : материалы 21-го Междунар. молодежного форума, Харьков, Украина, 25–27 апр. 2017 г. – Харьков, 2017. – С. 77.

7. Нгуен, Д. Н. Характеристика особенностей реализации способа когерентного накопления для обнаружения движущихся морских объектов / Д. Н. Нгуен // Радиотехнические системы : материалы 53-й науч. конф. аспирантов, магистрантов, студентов БГУИР, Минск, Беларусь, 7 мая 2017 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2017. – С. 60.

8. Нгуен, Д. Н. Модифицированный метод фазового мгновенного сравнения сигналов на основе способа когерентного накопления спектральных составляющих / Д. Н. Нгуен // Радиотехнические системы : материалы 53-й науч. конф. аспирантов, магистрантов, студентов БГУИР, Минск, Беларусь, 7 мая

2017 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2017. – С. 61.

9. Нгуен, Д. Н. Закон распределения ошибки измерения угловых координат объекта в пассивном гидролокаторе / Д. Н. Нгуен // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций: материалы 13-й Междунар. молодежной науч.-техн. конф. РТ-2017, Севастополь, Россия, 20–24 нояб. 2017 г. / Севастопольский гос. ун-т. – Севастополь, 2017. – С. 46.

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, overlapping loops and a long horizontal stroke extending to the right.

## РЭЗІЮМЭ

Нгуен Нгок Донг

Пасіўная гидролокация якія рухаючыся марскіх аб'ектаў на аснове кагерэнтнага назапашвання спектральных складнікаў сігналу

*Ключавыя словы:* гідраакустыка, пасіўны гідралакатар, выяўленне, вымярэнне, пеленг, кагерэнтнай назапашванні, адаптыўная апрацоўка, марскі аб'ект, час затрымкі, спектральныя складнікі, памылкі.

*Мэта работы* заключацца ў распрацоўцы новых падыходаў да адаптыўнай апрацоўцы гідраакустычных сігналаў у пасіўным гідралакатары, якія забяспечваюць пры вырашэнні задач выяўлення і пеленгацыі павышэнне стаўлення сігнал/перашкода і, адпаведна, павелічэнне далёкасці выяўлення і зніжэнне памылак пеленгацыі ў гідралакатары. Дасягненне мэты заснавана на кагерэнтным назапашванні спектральных складнікаў амплітудна-фаза-частотнаа спектру сігналу.

*Метадамі даследавання* з'яўляюцца матэматычны аналіз, матэматычнае і кампутарнае мадэляванне, статыстычны аналіз, эксперыментальныя даследаванні.

*Атрыманыя вынікі:*

- спосаб кагерэнтнага назапашвання спектральных складнікаў, які забяспечвае павышэнне стаўлення сігнал/перашкода на выхадзе прылады апрацоўкі і, адпаведна, павелічэнне далёкасці выяўлення рухаючыся марскіх аб'ектаў у пасіўным гідралакатары;

- мадыфікаваны метады фазавага імгненнага параўнання сігналаў для вымярэння пеленгу які рухаючыся марскога аб'екта, які адрозніваецца ад вядомых выкарыстаннем у каналах апрацоўкі спосабу кагерэнтнага назапашвання спектральных складнікаў сігналу. Выкарыстанне гэтага спосабу забяспечвае павышэнне стаўлення сігнал/перашкода ў каналах прыёму, што прыводзіць да зніжэння памылак вымярэння пеленгу ў пасіўным гідралакатары;

- вынікі полунатурных эксперыментальных даследаванняў распрацаваных прылад выяўлення і вымярэння пеленгу рэальных марскіх аб'ектаў;

- метады аператыўнай ацэнкі амплітудна-частотнай характарыстыкі гасцінцаў прыёму акустычных прылад пасіўнай лакацыі, які дазваляе аператыўна прыняць рашэнне аб працаздольнасці прылады лакацыі.

*Вобласць ужывання:* рэкамендуецца выкарыстоўваць атрыманыя вынікі для стварэння сучасных гідраакустычных сістэм, якія забяспечваюць павышаныя далёкасць выяўлення і дакладнасць вымярэння пеленгу марскога аб'екта ў складаных з перашкодамі умовах, а таксама для мадэрнізацыі існуючых гідраакустычных сістэм назірання.

## РЕЗЮМЕ

Нгуен Нгок Донг

Пассивная гидролокация движущихся морских объектов на основе когерентного накопления спектральных составляющих сигнала

*Ключевые слова:* гидроакустика, пассивный гидролокатор, обнаружение, измерение, пеленг, когерентное накопление, адаптивная обработка, морской объект, время задержки, спектральные составляющие, ошибки.

*Цель работы* состоит в разработке новых подходов к адаптивной обработке гидроакустических сигналов в пассивном гидролокаторе, обеспечивающих при решении задач обнаружения и пеленгации повышение отношения сигнал/помеха и, соответственно, увеличение дальности обнаружения и снижение ошибок пеленгации в гидролокаторе. Достижение цели основано на когерентном накоплении спектральных составляющих амплитудно-фазо-частотного спектра сигнала.

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

*Полученные результаты:*

- способ когерентного накопления спектральных составляющих, обеспечивающий повышение отношения сигнал/помеха на выходе устройства обработки и, соответственно, увеличение дальности обнаружения движущихся морских объектов в пассивном гидролокаторе;

- модифицированный метод фазового мгновенного сравнения сигналов для измерения пеленга движущегося морского объекта, отличающийся от известных использованием в каналах обработки способа когерентного накопления спектральных составляющих сигнала. Использование этого способа обеспечивает повышение отношения сигнал/помеха в каналах приема, что приводит к снижению ошибок измерения пеленга в пассивном гидролокаторе;

- результаты полунатурных экспериментальных исследований разработанных устройств обнаружения и измерения пеленга реальных морских объектов;

- метод оперативной оценки амплитудно-частотной характеристики трактов приема акустических устройств пассивной локации, позволяющий оперативно принять решение о работоспособности устройства локации.

*Область применения:* рекомендуется использовать полученные результаты для создания современных гидроакустических систем, обеспечивающих повышенные дальность обнаружения и точность измерения пеленга морского объекта в сложных помеховых условиях, а также для модернизации существующих гидроакустических систем наблюдения.

## RESUME

Nguyen Ngoc Dong

Passive sonar localization of moving marine objects is based on coherent accumulation of spectral components of the signal

*Keywords:* hydro-acoustic, passive sonar, detection, measurement, bearing, coherent accumulation, adaptive processing, marine object, delay time, spectral components, errors.

*The purpose of this thesis* is to develop new approaches to adaptive processing of hydro-acoustic signals in passive sonar, providing solution of detection and direction finding tasks to increase the signal-to-noise ratio and, accordingly, to increase the detection range and reduce direction finding errors in sonar. Achievement of this purpose is based on the coherent accumulation of spectral components of the amplitude-phase-frequency spectrum of the signal.

*Research methods:* mathematical analysis, mathematical and computer modeling, statistical analysis, experimental research.

*The obtained results:*

- method of coherent accumulation of spectral components, providing an increase in the signal-to-noise ratio at the output of the signal processing device and, accordingly, an increase in the range of detection of moving marine objects in the passive sonar;

- modified method of phase instantaneous comparison of signals for bearing measuring of moving marine object, different from known by use in the channels of processing the method of coherent accumulation of spectral components of the signal. The use of this method provides an increase in the signal-to-noise ratio in reception channels, which reduces bearing measurement errors in the passive sonar;

- the results of semi-natural experimental studies of the developed devices detection and bearing measurement real marine objects;

- method of rapid assessment of the amplitude-frequency characteristics of the reception paths of passive location acoustic devices, allowing you to quickly decide on the performance of the location device.

*Application field:* it's recommended to use the obtained results for creation of modern hydro-acoustic systems, that provide increased detection range and accuracy of bearing measurement of the marine object in difficult noise conditions, as well as for the modernization of existing hydro-acoustic monitoring systems.

*Научное издание*

**Нгуен Нгок Донг**

**ПАССИВНАЯ ГИДРОЛОКАЦИЯ ДВИЖУЩИХСЯ МОРСКИХ  
ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ КОГЕРЕНТНОГО НАКОПЛЕНИЯ  
СПЕКТРАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ СИГНАЛА**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

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

---

Подписано в печать 10.05.2018.	Формат 60×84 <sup>1</sup> / <sub>16</sub> .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,4.	Тираж 60 экз.	Заказ 90.

---

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,

№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.

ЛИ №02330/264 от 14.04.2014

220013, Минск, П. Бровки, 6