

Воробьев Всеволод Владимирович

**МЕТОД УМЕНЬШЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ
КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ЛАГОВ
НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ФУНКЦИЙ СРЕДНИХ МОДУЛЕЙ РАЗНОСТЕЙ**

05. 22. 19 – Эксплуатация водного транспорта, судовождение

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Владивосток – 2006

Работа выполнена на кафедре технических средств судовождения
в Федеральном государственном образовательном учреждении
высшего профессионального образования Морском государственном
университете имени адмирала Г. И. Невельского

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Завьялов Виктор Валентинович

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Розенбаум Анатолий Наумович;
кандидат технических наук, профессор
Карасев Владимир Владимирович

Ведущая организация: Тихоокеанский военно-морской институт
им. С. О. Макарова

Защита состоится 15 ноября 2006 г. в 14:00 часов в ауд. 241 на заседании дис-
сертационного совета Д 223. 005. 01 в Морском государственном университете
имени адмирала Г. И. Невельского: 690059, г. Владивосток, 59, ул. Верхнепор-
товая, 50а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Морского государственного
университета имени адмирала Г. И. Невельского.

Автореферат разослан _____ 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Резник А. Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из важнейших задач судовождения была и остается задача автономного определения путевой скорости и угла сноса судна. В связи с этим возросли требования к технико-эксплуатационным характеристикам лагов, информация от которых совместно с данными от приборов курсоуказания позволяет вести непрерывное, притом автономное счисление, а также используется для исключения методических погрешностей других технических средств навигации.

Исходя из опыта эксплуатации индукционных лагов на транспортных судах, следует отметить, что их погрешности непостоянны во времени вследствие обрастания корпуса судна, изменения его посадки и, как следствие, изменения толщины и других характеристик пограничного слоя под корпусом судна в районе установки индукционного преобразователя. Через 0,5÷1 год после очередного докования судна уменьшение показаний лаговой скорости может достигать 30 % и более. В результате этого скорость судна на большинстве судов в настоящее время вырабатывается, как правило, в основном по данным приемоиндикаторов СНС и РНС, причем только относительно грунта.

Специалисты в области судовождения уделяют большое внимание вопросам практического использования лагов (способам измерения абсолютной и относительной скоростей, определению и учету поправок лагов, методам расчета методических и инструментальных погрешностей лагов, а также их компенсации, минимизации и учету во время плавания).

Теоретические и экспериментальные исследования, проводимые с целью дальнейшего совершенствования и развития аппаратуры автономной навигации, привели, по мнению отечественных и зарубежных специалистов, к разработке достаточно перспективных корреляционных гидроакустических лагов. В теоретическом и техническом плане эти лаги изучены не достаточно полно, практически отсутствуют исследования по методам уменьшения погрешностей этих лагов.

Учитывая сказанное, можно утверждать, что разработка методов уменьшения погрешностей корреляционных гидроакустических лагов является актуальной задачей.

Научный базис для решения проблемы. Опубликованные в 1970–2004 годах работы отечественных и зарубежных ученых (Абрамович Б. Г., Боркус М. К., Бочкарев А. М., Воловов В. И., Козубовский С. Ф., Тарасенко В. П., Andermo I., Denbigh P. N., Dickey F. R., и др.) по корреляционным экстремальным системам, корреляционным лагам позволяют сделать вывод о существовании нескольких способов измерения скорости и их конструктивных реализаций. Некоторые аспекты специальных исследований аппаратуры с применением случайных процессов описаны в литературе (Бендат Дж., Быков В. В., Мирский Г. Я., Грибанов Ю. И., Жуковский А. П. и др.), где рассматриваются задачи, связанные с анализом случайных процессов, формированием реализаций случайных процессов с заданными спектральными характеристиками, разработкой аппаратных средств анализа корреляционных и спектральных характеристик случайных процессов.

Цель работы. Совершенствование корреляционных лагов с целью уменьшения их погрешностей на основе использования функций средних модулей разностей амплитуд эхо-сигналов.

Предметом исследования является разработка новых систем обеспечения безопасности плавания, а **объектом исследования** – методы уменьшения погрешностей корреляционных гидроакустических лагов на основе использования функций средних модулей разностей амплитуд эхо-сигналов.

Для достижения цели в работе поставлены и решены следующие **научные задачи**:

1. Уточнение информационно-физической модели лага с учетом условий эксплуатации.
2. Разработка структурных схем вычислительных устройств лагов с использованием функций средних модулей разностей эхо-сигналов.
3. Уточнение классификационной таблицы лагов с включением в нее

схем построения вычислительных устройств корреляционных лагов на основе использования функций средних модулей разностей эхо-сигналов.

4. Оценка флюктуационных погрешностей лагов, построенных на основе использования функций средних модулей разностей.

5. Оценка влияния помех на входах коррелятора и неидентичности амплитудных характеристик приемных каналов лага на погрешности измерения составляющих вектора скорости судна.

6. Разработка структурной схемы лага с компенсацией влияния изменения характеристик отражающей поверхности на флюктуационную погрешность.

7. Имитационное моделирование работы гидроакустического относительного лага, построенного на основе использования функций средних модулей разностей амплитуд огибающих эхо-сигналов в различных условиях.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Уточненная информационно-физическая модель лага с учетом специфики его применения.

2. Новые типы вычислительных устройств гидроакустических относительных лагов.

3. Методы уменьшения погрешностей измерения составляющих вектора скорости гидроакустическими корреляционными лагами.

Методы исследования. При решении поставленных научных задач использовались методы теории гидроакустики, корреляционного и спектрального анализа случайных процессов, имитационного моделирования и натурального эксперимента, теории автоматического управления.

Научная новизна работы заключается в применении нетрадиционных методов обработки эхо-сигналов для разработки высокоэффективного гидроакустического лага с уменьшенными погрешностями и его стендовых испытаний, в том числе: уточнена информационно-физическая модель лага с учетом специфики его применения; разработаны новые типы вычислительных устройств лагов с линейной базой направленных приемников (ЛБНП); уточнена классификация лагов с ЛБНП; получены сравнительные выражения для флюк-

туационных погрешностей лагов, построенных на основе использования функций средних модулей эхо-сигналов; получены выражения для оценки влияния неидентичности амплитудных характеристик приемных каналов на погрешности измерения скорости корреляционными способами; разработаны метод и структурная схема стабилизации флюктуационных погрешностей лага при изменяющихся характеристиках отражающей поверхности.

Достоверность результатов доказывается корректностью применения хорошо апробированного математического аппарата и совпадением результатов теоретических исследований с данными имитационного моделирования работы лагов.

Практическая ценность работы. Практическая ценность работы заключается в разработке рекомендаций по выбору алгоритмов работы и построению гидроакустических лагов с ЛБНП с уменьшенными погрешностями. Важным практическим результатом является разработка новых типов лагов с ЛБНП. Основные выводы анализа, который приведен в диссертационной работе, подтверждены при имитационном моделировании, морских экспериментах с отдельными блоками и образцами лагов с ЛБНП.

Тема связана с НИР и ОКР, проводимыми на кафедре «Технические средства судовождения» в ФГОУ ВПО МГУ им. адм. Г. И. Невельского в соответствии с федеральными целевыми программами: «Мировой океан» (1998–2012 гг.) в рамках задачи создания технологий для освоения ресурсов и пространств Мирового океана, транспортные коммуникации России в Мировом океане; «Модернизация транспортной системы России» (2002–2010 гг.) в рамках задачи «Комплексная информатизация транспорта на основе использования современных телекоммуникационных и навигационных систем», планами НИР вуза в рамках темы «Повышение эффективности технических средств навигации и разработка методов их комплексного использования».

Реализация результатов работы. Результаты работы непосредственно использованы при выполнении госбюджетных научно-исследовательских работ, которые велись на кафедре «Технические средства судовождения»

ФГОУ ВПО МГУ имени адмирала Г. И. Невельского.

Выводы и рекомендации, полученные при разработке диссертации, внедрены в процесс обучения курсантов и студентов ФГОУ ВПО МГУ имени адмирала Г. И. Невельского (лекции, курсовое и дипломное проектирование).

Апробация результатов работы. Основные теоретические положения подтверждены экспериментально при машинном моделировании лагов. При разработке программ для ЭВМ использованы результаты теоретических исследований, изложенных в диссертационной работе.

Материалы работы были доложены и одобрены на: международной научно-технической конференции «Безопасность на море. Научно-технические проблемы и человеческий фактор» – 2002 г.; пятой международной научно-практической конференции «Проблемы транспорта Дальнего Востока» – 2003 г.; шестой международной научно-практической конференции «Проблемы транспорта Дальнего Востока» – 2005 г.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 11 работ, в том числе 1 без соавторства.

Структура и объем диссертации. Диссертация представлена на 152 листах машинописного текста и состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников и одного приложения. Работа содержит 5 рисунков, 1 таблицу и список использованных источников из 122 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко рассмотрены задачи судовождения и роль лагов в решении этих задач в комплексе с другими техническими средствами навигации. Обоснована актуальность и сформулирована цель работы, дано краткое изложение результатов работы.

В первой главе произведен анализ способов измерения скорости судна с использованием прямых методов оценок корреляционных функций и их некоторых технических реализаций.

Выявлено четыре корреляционных способа измерения скорости судна:

автокорреляционный, позволяющий измерить модуль полной скорости, использовать который автономно практически невозможно; взаимно корреляционный, позволяющий измерить так называемую кажущуюся (индицируемую) скорость; взаимно автокорреляционные, позволяющие измерять модуль полной скорости и продольную (курсовую) скорость.

Рассмотрены аналитические зависимости этих способов измерения скорости. Показан существенный недостаток алгоритмов работы этих способов – необходимо выполнять математическую операцию умножения амплитуд двух сигналов, что представляет определенные схемотехнические и программные трудности.

Проведен обзор литературных источников по использованию функций средних модулей разностей для целей измерения скорости судна; способам построения корреляционных лагов, в частности, по информационно-физическим моделям эхо-сигналов и структурам вычислительных устройств лагов; анализу способов моделирования случайных процессов; проведен анализ погрешностей корреляционных лагов и методов их уменьшения.

По результатам проведенных теоретических исследований сделаны выводы, в которых сформулированы научные задачи, требующие решения.

Вторая глава посвящена уточнению информационно-физической модели гидроакустических лагов с ЛБНП с учетом специфики их применения, разработке новых вычислительных устройств лагов, классификации гидроакустических лагов с ЛБНП и оценке погрешностей лагов.

Корреляционный гидроакустический лаг, назначением которого является получение скорости судна, представляет собой достаточно сложную систему. Для понимания роли факторов, влияющих на различные характеристики этой системы, его необходимо представить в виде некоторой информационно-физической модели. Гидроакустический лаг является одной из разновидностей радио- и гидролокационных систем. Однако наиболее близкой к нему по типу является информационно-физическая модель гидролокации. С учетом специфики применения, отличающейся от радиолокационных систем, и принципа

работы корреляционного гидроакустического относительного лага, его функционирование можно представить в виде информационно-физической модели, характеризующей взаимодействие между объектами локации, водной средой, судном, самим лагом и возможными потребителями информации.

На семантическом уровне информационно-физическая модель лага представлена в виде нескольких подсистем: судна с установленным на нем лагом, с основными блоками и источниками полезных и мешающих помех; водной среды и объекта локации с их характеристиками (рисунок 1).

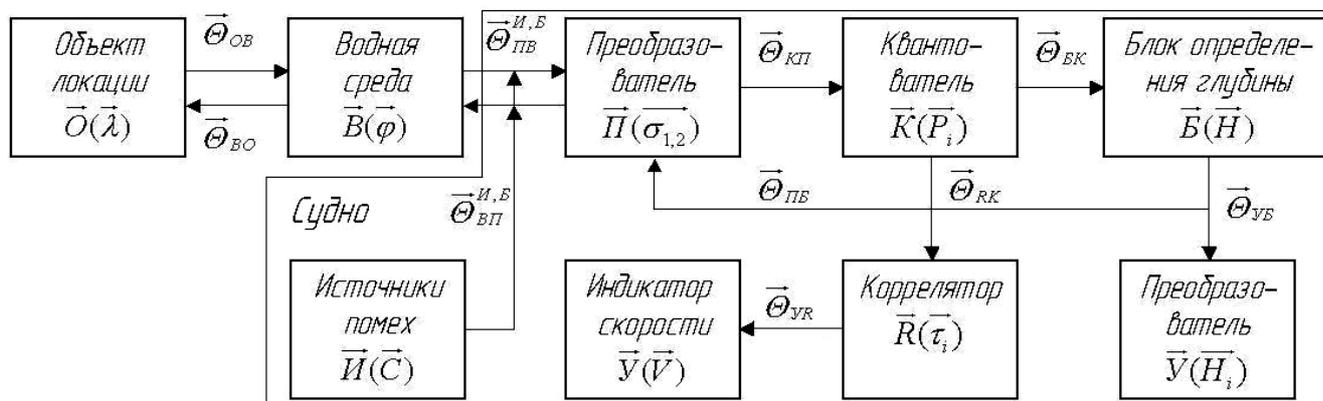


Рисунок 1 – Структурная схема информационно-физической модели корреляционного лага

Общую характеристику подсистем и входящих в них вектор-функций с уравнениями их преобразований можно представить в следующем виде:

1. Физические характеристики излучающего преобразователя $\vec{\Pi}(\vec{\sigma}_u)$ в акустические характеристики водной среды $\vec{B}(\vec{\varphi})$ с учетом влияния физических характеристик источников помех $\vec{I}(\vec{C})$ и физических характеристик блока глубины $\vec{B}(\vec{H})$:

$$\vec{B}(\vec{\varphi}) = \vec{\Theta}_{ВП}^{И,Б} [\vec{\Pi}(\vec{\sigma}_u) / \vec{I}(\vec{C}), \vec{B}(\vec{H})], \quad (1)$$

где $\vec{\Theta}_{ВП}^{И,Б}$ – оператор преобразования вектор-функции $\vec{\Pi}(\vec{\sigma}_u)$ в $\vec{B}(\vec{\varphi})$ с учетом $\vec{I}(\vec{C})$ и $\vec{B}(\vec{H})$; $\vec{\sigma}_u$ – физические характеристики излучающего преобразователя (амплитуда подводимого напряжения, площадь, частота сигнала несущей, чувствительность на излучение); \vec{C} – физические характеристики источника помех (частота и амплитуда вибрации, частота и амплитуда качки и рыскания, снос

судна); \vec{H} – физические характеристики подсистемы измерения глубины (время распространения сигнала до грунта и обратно); $\vec{\varphi}$ – акустические характеристики водной среды (плотность, температура, соленость, давление, скорость звука в воде).

2. Акустические характеристики водной среды $\vec{B}(\vec{\varphi})$ в физические характеристики объекта локации $\vec{O}(\vec{\lambda})$:

$$\vec{O}(\vec{\lambda}) = \vec{\theta}_{OB} [\vec{B}(\vec{\varphi})], \quad (2)$$

где $\vec{\theta}_{OB}$ – оператор преобразования вектор-функции $\vec{B}(\vec{\varphi})$ в $\vec{O}(\vec{\lambda})$; $\vec{\lambda}$ – физические характеристики грунта (площадь облучения грунта, характеристики неровностей, плотность грунта).

3. Физические характеристики объекта локации $\vec{O}(\vec{\lambda})$ в акустические характеристики водной среды $\vec{B}(\vec{\varphi})$:

$$\vec{B}(\vec{\varphi}) = \vec{\theta}_{BO} [\vec{O}(\vec{\lambda})], \quad (3)$$

где $\vec{\theta}_{BO}$ – оператор преобразования вектор-функции $\vec{O}(\vec{\lambda})$ в $\vec{B}(\vec{\varphi})$.

4. Акустические характеристики водной среды $\vec{B}(\vec{\varphi})$ в физические характеристики приемных преобразователей, в количестве от одного до n , $\vec{\Pi}(\vec{\sigma}_{1,\dots,n})$ с учетом влияния физических характеристик блока источника помех $\vec{I}(\vec{C})$ и физических характеристик блока глубины $\vec{B}(\vec{H})$:

$$\vec{\Pi}(\vec{\sigma}_{1,\dots,n}) = \vec{\theta}_{PB}^{I,B} [\vec{B}(\vec{\varphi})/\vec{I}(\vec{C}), \vec{B}(\vec{H})], \quad (4)$$

где $\vec{\theta}_{PB}^{I,B}$ – оператор преобразования вектор-функции $\vec{B}(\vec{\varphi})$ в $\vec{\Pi}(\vec{\sigma}_{1,\dots,n})$ с учетом $\vec{I}(\vec{C})$ и $\vec{B}(\vec{H})$; $\vec{\sigma}_{1,\dots,n}$ – физические характеристики преобразователей, работающих на прием (чувствительность преобразователей на прием, их площадь, частота сигнала несущей, полосы пропускания фильтров усилителей, коэффициенты передачи, способ получения огибающей, гашение нуля, АРУ, ВАРУ).

5. Физические характеристики блока преобразователей $\vec{\Pi}(\vec{\sigma}_{1,\dots,n})$ в физи-

ческие характеристики блока квантования $\vec{K}(\vec{P}_j)$:

$$\vec{K}(\vec{P}_j) = \vec{\theta}_{KP} [\vec{\Pi}(\vec{\sigma}_{1,\dots,n})], \quad (5)$$

где $\vec{\theta}_{KP}$ – оператор преобразования вектор-функции $\vec{\Pi}(\vec{\sigma}_{1,\dots,n})$ в $\vec{K}(\vec{P}_j)$; \vec{P}_j – физические характеристики квантователя (количество уровней квантования $j = 2 \div N$, где N – максимальное число уровней квантования).

6. Физические характеристики блока квантования $\vec{K}(\vec{P}_j)$ в физические характеристики блока определения глубины $\vec{B}(\vec{H})$:

$$\vec{B}(\vec{H}) = \vec{\theta}_{BK} [\vec{K}(\vec{P}_j)], \quad (6)$$

где $\vec{\theta}_{BK}$ – оператор преобразования вектор-функции $\vec{K}(\vec{P}_j)$ в $\vec{B}(\vec{H})$, причем N , как правило, равно двум.

7. Физические характеристики блока глубины $\vec{B}(\vec{H})$ в физические характеристики блока преобразователя (управляющий сигнал поступает с блока глубины на преобразователь:

$$\vec{\Pi}(\vec{\sigma}_u) = \vec{\theta}_{PB} [\vec{B}(\vec{H})], \quad (7)$$

где $\vec{\theta}_{PB}$ – оператор преобразования вектор-функции $\vec{B}(\vec{H})$ в $\vec{\Pi}(\vec{\sigma}_u)$.

8. Физические характеристики блока квантования $\vec{K}(\vec{P}_j)$ в физические характеристики корреляторов $\vec{R}(\vec{\tau}_i)$:

$$\vec{R}(\vec{\tau}_i) = \vec{\theta}_{RK} [\vec{K}(\vec{P}_j)], \quad (8)$$

где $\vec{\theta}_{RK}$ – оператор преобразования вектор-функции $\vec{K}(\vec{P}_j)$ в $\vec{R}(\vec{\tau}_i)$; τ_i – физические характеристики корреляторов (время задержки – τ_0, τ_1, τ_2).

9. Физические характеристики корреляторов $\vec{R}(\vec{\tau}_i)$ в физические характеристики блока индикации скоростей $\vec{Y}(\vec{V}_i)$:

$$\vec{Y}(\vec{V}_i) = \vec{\theta}_{YR} [\vec{R}(\vec{\tau}_i)], \quad (9)$$

где $\vec{\theta}_{YR}$ – оператор преобразования вектор-функции $\vec{R}(\vec{\tau}_i)$ в $\vec{Y}(\vec{V}_i)$.

10. Физические характеристики блока глубины $\vec{B}(\vec{H})$ в физические характеристики блока индикации глубины $\vec{Y}(\vec{H}_i)$:

$$\vec{Y}(\vec{H}_i) = \vec{\theta}_{YB} [\vec{B}(\vec{H})], \quad (10)$$

где $\vec{\theta}_{YB}$ – оператор преобразования вектор-функции $\vec{B}(\vec{H})$ в $\vec{Y}(\vec{H}_i)$.

На основе составленной информационно-физической модели корреляционного лага на семантическом уровне и описанной с помощью уравнений можно выделить основные процессы, которые происходят при его функционировании. В рамках предложенной модели в диссертации произведена частичная декомпозиция уравнений (1) – (5), (8) и (9) на алгоритмическом уровне.

Одним из косвенных методов определения нормированных корреляционных функций является метод функций среднего модуля разности (СМР) исследуемых процессов, алгоритм которого описывается уравнением:

$$G_{xx}(\tau) = M[|X(t) - X(t + \tau)|], \quad (11)$$

где M – знак операции математического ожидания, $X(t)$ и $X(t + \tau)$ – амплитуды случайных процессов в моменты времени t и $t + \tau$, τ – корреляционная задержка.

В корреляционных лагах, где каналы усиления и преобразования эхо-сигналов идентичны и предполагается, что величины амплитуд огибающих имеют гауссовское распределение вероятностей, выражения для среднего модуля авторазности $G_{xx}(\tau)$ и среднего модуля взаимной разности $G_{xy}(\tau)$ амплитуд огибающих имеют соответственно вид

$$G_{xx}(\tau) = \frac{2\sigma_x}{\sqrt{\pi}} \sqrt{1 - \rho_{xx}(\tau)}, \quad (12)$$

$$G_{xy}(\tau) = \frac{2\sigma}{\sqrt{\pi}} \sqrt{1 - \rho_{xy}(\tau)}, \quad (13)$$

где σ_x – среднее квадратическое отклонение амплитуд процесса, $\rho_{xx}(\tau)$, $\rho_{xy}(\tau)$ – нормированные функции автокорреляции и взаимной корреляции соответственно.

В результате исследований, проведенных А. В. Артемьевым и В. В. За-

вьяловым, предложены новые методы использования функций средних модулей разностей для измерения величин составляющих вектора скорости судна.

При цифровых методах обработки эхо-сигналов выражения для функций средних модулей авторазностей первого и второго каналов будут соответственно иметь вид:

$$G_{XX}(\tau) = \frac{1}{n+1} \cdot \sum_{n=0}^N |X(t) - X(t+\tau)|, \quad (14)$$

$$G_{YY}(\tau) = \frac{1}{n+1} \cdot \sum_{n=0}^N |Y(t) - Y(t+\tau)|. \quad (15)$$

Аналогично можно записать выражение для функции средних модулей взаимных разностей

$$G_{XY}(\tau) = \frac{1}{n+1} \cdot \sum_{n=0}^N |X(t) - Y(t+\tau)|. \quad (16)$$

Разработаны структурные схемы вычислительных устройств лагов на основе использования функций средних модулей разностей амплитуд эхо-сигналов, которые представлены на рисунке 2.

Управляющий сигнал на входе системы слежения (сигнал ошибки) $U(\tau_0)$ для СМВРИ ГАЛ описывается следующим выражением:

$$U(\tau_0) = M[|X(t + \tau_0 + \Delta\tau) - Y(t + \tau_{\text{ти}})| - |X(t + \tau_0 - \Delta\tau) - Y(t + \tau_{\text{ти}})|], \quad (17)$$

где $U(\tau_0)$ – управляющий сигнал на входе системы слежения (сигнал ошибки).

Управляющий сигнал для способа измерения модуля полной скорости по среднему модулю взаимно авторазностей (СМВАРМ) можно представить в виде

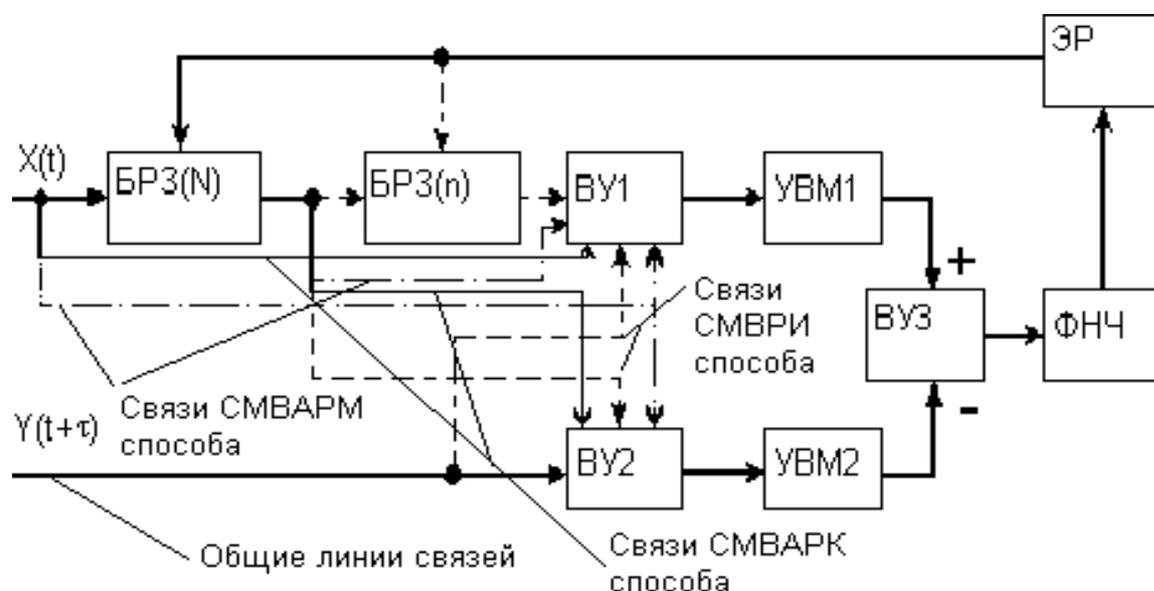
$$U(\tau_1) = M[|X(t) - X(t + \tau_1)| - |X(t + \tau_1) - Y(t + \tau_{\text{тм}})|]. \quad (18)$$

Управляющий сигнал для способа измерения курсовой скорости по СМВАРК запишется в виде

$$U(\tau_2) = M[|X(t) - X(t + \tau_2)| - |X(t + \tau_2) - Y(t + \tau_{\text{тк}})|]. \quad (19)$$

Анализ схемы позволяет сделать вывод, что составляющие части вычислительных устройств одинаковы для любого способа измерения скорости, ме-

няются только межблочные связи. Это удобно при разработке алгоритмов, программного обеспечения и изготовлении лагов, работающих по функциям средних модулей разностей эхо-сигналов.



$X(t)$ – огибающая эхосигнала первого канала; $Y(t+\tau)$ – огибающая эхосигнала второго канала; БРЗ(N), БРЗ(n) – блоки регулируемой задержки; ВУ1, ВУ2, ВУ3 – вычитающие устройства; УВМ1, УВМ2 – устройства выделения модуля; ФНЧ – фильтр низкой частоты; ЭР – экстремальный регулятор, СВВРИ – измерение кажущейся (индицируемой скорости), СВВАРМ – измерение модуля полной скорости, СВВАРК – измерение продольной(курсовой) скорости

Рисунок 2 – Функциональная схема лага, работающего на основе использования функций средних модулей разностей амплитуд эхо-сигналов

В диссертационных исследованиях, исходя из многообразия способов измерения скоростей с использованием линейной базы направленных приемников и их технических реализаций, была существенно доработана и расширена классификационная таблица корреляционных лагов. Переработаны уровни с первого по третий, существенно дополнен шестой уровень. Предложенная схема классификации имеет шесть уровней и произведена по виду локации, количеству приемных гидроакустических преобразователей в антенной системе и виду ориентации их характеристик направленности; режимам излучения, видам модуляции излучаемого сигнала и способам выделения огибающей эхо-сигналов; количеству и видам комбинаций обработки огибающих эхо-сигналов для измерения составляющих вектора скорости судна; по виду основной функции и способам измерения скорости (прямые и косвенные способы оценки корреляцион-

ных функций, интерполяционные); способам определения положения экстремума корреляционной функции и количеству моделей объекта регулирования в вычислительных устройствах; способам получения выборок отсчетов, видам задержки по времени в моделях и методам вывода измерителей в область экстремума при больших начальных отклонениях. Каждый новый уровень в общем случае является продолжением отдельных выходов предыдущего уровня. В разработанной классификации систематизированы данные о лагах, которые позволяют синтезировать на нижнем уровне более 10000 типов лагов с линейной базой направленных приемников, при описании которых используется единая терминология.

В диссертационной работе показано, что время корреляции амплитуд огибающих эхосигналов и среднее квадратическое значение помехи на входе системы слежения для прямых и косвенных оценок корреляционных функций примерно одинаковы. Однако крутизна функций в точках слежения различна. Получены выражения для качественной и количественной оценки величин флюктуационных погрешностей при использовании прямых и косвенных оценок корреляционных функций для измерения скорости методом сравнения крутизны функций в точках слежения для заданной амплитуды функций, которые имеют вид

$$O_{xx}(\tau) = -\sqrt{\pi} \cdot \sqrt{1 - \exp(-aV^2\tau^2)}, \quad (20)$$

$$O_{xy}(\tau) = -\sqrt{\pi} \cdot \sqrt{1 - \exp\{-a \cdot [X_0^2(\sin(C))^2 + (X_0 \cos(C) - V\tau)^2]\}}, \quad (21)$$

где $a = 2\pi\Delta_s^2/\lambda^2$; Δ_s – эквивалентная ширина характеристики направленности антенной системы; λ – длина волны излучаемых колебаний; V – скорость движения судна; τ – корреляционная временная задержка; X_0 – половина расстояния между центрами приемных антенн; C – угол сноса судна.

Численное моделирование показало, что величины отношений крутизны авто- и взаимных функций прямых к косвенным (средние модули разностей) методам оценок корреляционных ($OK_{xx}(\tau)$ и $OK_{xy}(\tau)$) меньше единицы практически во всем временном диапазоне точек слежения для заданных условий. Та-

ким образом, флюктуационные погрешности лагов, построенных на использовании функций средних модулей разностей, будут меньше, чем у лагов, построенных с использованием прямых оценок корреляционных функций, почти в 1,5 раза.

При измерении скорости судна взаимно автокорреляционными способами измеряется корреляционная задержка, при которой уровни взаимной корреляционной функции при определенном сдвиге и автокорреляционной функции равны. При неравенстве амплитудных характеристик приемных каналов лага (изменении средних квадратических отклонений амплитуд эхо-сигналов σ) будет наблюдаться сдвиг фиксируемой корреляционной задержки. Аналитическим путем получены выражения для относительных погрешностей измерения корреляционных задержек соответствующих модулю полной скорости (τ_1) и продольной (курсовой скорости) (τ_2) при использовании прямых методов измерения корреляционных функций (τ^k) и косвенных (средние модули разностей) (τ^c) соответственно:

$$\delta \tau_1^k [\%] = \frac{-\Delta \sigma_y \cdot 100\%}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \left[\text{Ln}(\sigma_x / \sigma_y) + aX_0 \right]} \times \sigma_y \cdot V \cdot \tau_1}, \quad (22)$$

$$\delta \tau_1^c [\%] = \frac{-(\Delta \sigma_y) \cdot 100\%}{2 \cdot \tau_1 \cdot V \cdot \sqrt{-a \cdot \text{Ln} \left(\frac{2\sigma_x \sigma_y \cdot \exp(-aX_0^2) + \sigma_x^2 - \sigma_y^2}{2\sigma_x^2} \right)}} \times \frac{2\sigma_x \cdot \exp(-aX_0^2) - 2\sigma_y}{2\sigma_x \sigma_y \cdot \exp(-aX_0^2) + \sigma_x^2 - \sigma_y^2}. \quad (23)$$

$$\delta \tau_2^k [\%] = \frac{-\Delta \sigma_y \cdot 100\%}{2 \cdot \sigma_y \cdot a \cdot X_0 \cdot V \cdot \tau_2}, \quad (24)$$

$$\delta \tau_2^c [\%] = \frac{\sigma_y - \sigma_x \cdot \exp \left[-a \cdot (X_0 - V \cdot \tau_2^c)^2 \right]}{2 \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot a \cdot V \cdot (X_0 - V \cdot \tau_2^c) \cdot \exp \left[-a \cdot (X_0 - V \cdot \tau_2^c)^2 \right]} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{\Delta\sigma_y \cdot 100\%}{2 \cdot \sigma_x^2 \cdot a \cdot V^2 \cdot \tau_2^c \cdot \exp(-a \cdot V^2 \cdot (\tau_2^c)^2)} \times \frac{\Delta\sigma_y \cdot 100\%}{\tau_2}. \quad (25)$$

Путем численного моделирования получены соответствующие корреляционные задержки при величине дисперсии сигналов второго канала $\sigma_y = 0,9$: $\tau_1^k = 0,00281$ с, $\tau_1^c = 0,002467$ с, $\tau_2^k = 0,00151$ с, $\tau_2^c = 0,001283$ с. Погрешности измерения скорости при этом составили: $\delta\tau_1^k = -6,9$ % (по выражению (22) – $-7,2$ %), $\delta\tau_1^c = +4,6$ % (по выражению (23) – $+7,2$ %), $\delta\tau_2^k = -15,3$ % (по выражению (24) – $-14,4$ %), $\delta\tau_2^c = +1,9$ % (по выражению (25) – $+2,7$ %).

На основании проведенных теоретических исследований сделан вывод, что не идентичность амплитудных характеристик приемных каналов наименьшим образом влияет на погрешности измерения продольной скорости судна при обработке эхо-сигналов по оценкам функций средних модулей разностей.

Во второй главе также проведены теоретические исследования по оценке влияния аддитивных помех на погрешности лага; выполнены оценки погрешностей цифрового полярного коррелятора, для минимизации и стабилизации погрешностей которого в диапазоне измеряемых скоростей судна предложена схема построения логического множительного устройства, причем количество разрядов регистра сдвига «модели» необходимо выбирать равное: $n = 2, 6, 10, 14, 18$.

Предложен метод и разработана структурная схема стабилизации ширины функции взаимной корреляции и, как следствие, флюктуационных погрешностей лага при изменяющихся характеристиках отражающей поверхности, которая изображена на рисунке 3. В цепи амплитуд эхо-сигналов между центрирующими фильтрами и входами коррелятора включаются управляемые фильтры нижних частот (УФНЧ-1 и УФНЧ-2). Источник опорного напряжения U_{on} выдает сигнал постоянного тока с амплитудой, равной величине функции взаимной корреляции при нулевом временном сдвиге, которая определяется исходя из характеристик отражающей поверхности. На выходе первого интегратора, который может представлять собой обычный фильтр нижних частот, получаем величину оценки функции взаимной корреляции амплитуд эхо-сигналов при

нулевом временном сдвиге. На вход второго интегратора подается разность напряжений между амплитудой опорного сигнала и амплитудой текущего значения оценки величины функции взаимной корреляции амплитуд эхо-сигналов при нулевом временном сдвиге. После интегрирования разностный сигнал поступает на управляющие входы УФНЧ. На информационные входы УФНЧ поступают амплитуды огибающих эхосигналов с выходов приемников. Процесс управления будет длиться до исчезновения рассогласования.

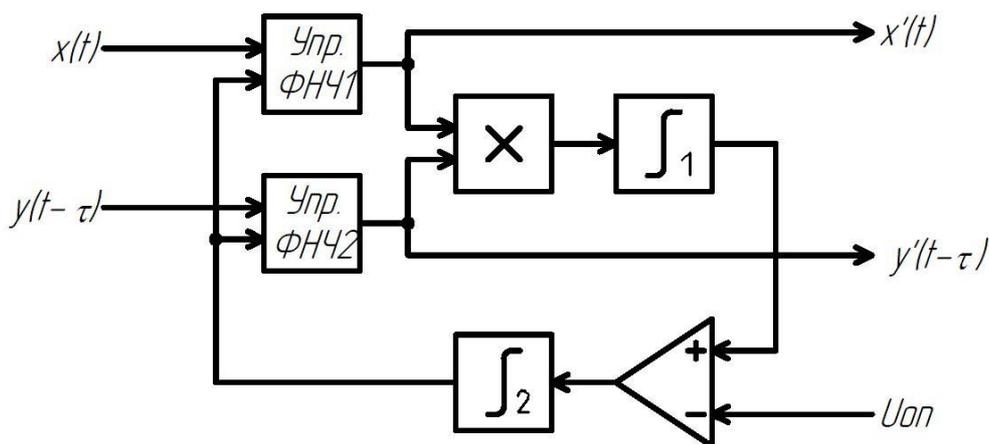


Рисунок 3 – Схема стабилизации ширины корреляционной функции

Преимущество достигается за счет того, что система автоматически следит и корректирует ширину взаимной корреляционной функции амплитуд огибающих эхо-сигналов при нулевом временном сдвиге, что приводит к стабилизации ширины авто- и взаимной корреляционной функций амплитуд эхо-сигналов.

Такое построение корреляционного лага приведет к инвариантности флюктуационных погрешностей по отношению к изменению характеристик отражающей поверхности.

В третьей главе произведено имитационное моделирование разработанных типов вычислительных устройств корреляционного лага с целью доказательства правильности проведенных теоретических исследований.

Для имитационного моделирования были сформированы два случайных процесса, каждый из которых содержит по три случайных процесса длительностью 10 секунд и различной шириной корреляционной функции, зависящей от

характеристик грунта. Статистические характеристики процессов обоснованы и соответствуют характеристикам корреляционного лага «SAL-R1». Однако величина частоты несущих колебаний выбрана ниже ($f_0 = 2,5$ МГц) для увеличения расстояния до рабочего слоя водной среды.

В пакете прикладных программ MathLab были синтезированы функциональные схемы вычислительных устройств лагов для измерения продольной (курсовой) скорости судна с традиционными корреляторами, а также на основе использования функций средних модулей разностей.

Анализ результатов моделирования позволил сделать вывод о работоспособности обеих синтезированных моделей, а также о том, что дисперсия измеренной задержки сигналов у модели для измерения продольной скорости с использованием функций средних модулей разностей меньше. Дисперсии величины измеренной задержки сигналов в установившемся режиме при измерении продольной скорости судна с использованием прямых методов оценки корреляционных функций $D^k[\tau_2] \approx 3 \cdot 10^{-10} \text{ с}^2$, а при использовании функций средних модулей разностей – $D^c[\tau_2] \approx 0,1 \cdot 10^{-10} \text{ с}^2$. Средние квадратические (флюктуационные) относительные погрешности измерения скорости ($V = 5,2$ м/с) составляют соответственно: $\delta V^k \approx 2,7 \%$, $\delta V^c \approx 0,51 \%$. Результаты моделирования с достаточной степенью сходимости подтвердили ранее сделанные теоретические выводы, полученные в главе 2.

Для моделирования работы схемы стабилизации флюктуационных погрешностей были использованы сформированные случайные процессы. Заданный уровень стабилизации $\rho_{xy}(0) = 0,3$. Уровень нормированной взаимной корреляционной функции при нулевом временной сдвиге и при заданных характеристиках грунта изменяется от 0,08 до 0,304. Флюктуационные погрешности лагов при таких условиях могут изменяться более чем в 2 раза. Результаты моделирования показаны на рисунке 3. Величина относительной средней квадратической погрешности измерения заданной корреляционной задержки при включенной схеме фильтрации уменьшилась с 0,42 % до 0,28 % и остается достаточно стабильной.

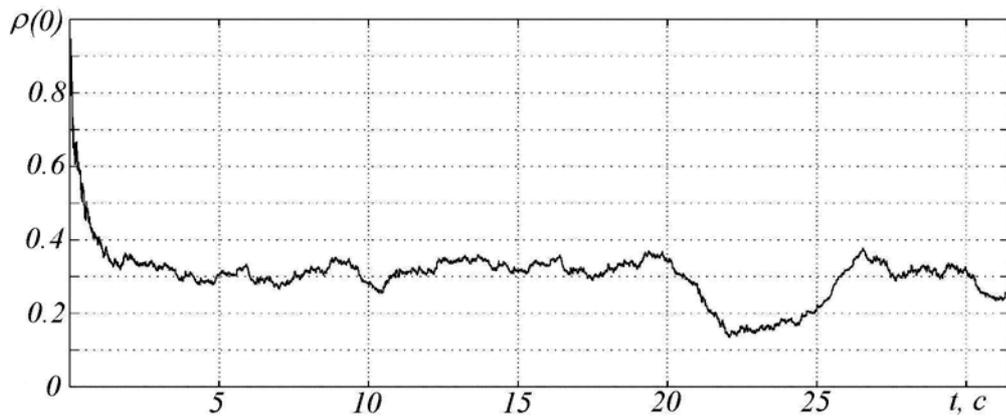


Рисунок 3 – График изменения уровня функции взаимной корреляции при нулевом временном сдвиге на выходе схемы стабилизации

Результаты моделирования показали, что предложенные методика постановки эксперимента и схема стабилизации уровня взаимной корреляционной функции при нулевом временном сдвиге, а следовательно, и флюктуационных погрешностей лагов с линейной базой направленных приемников, работоспособны и могут найти применение в новых разработках.

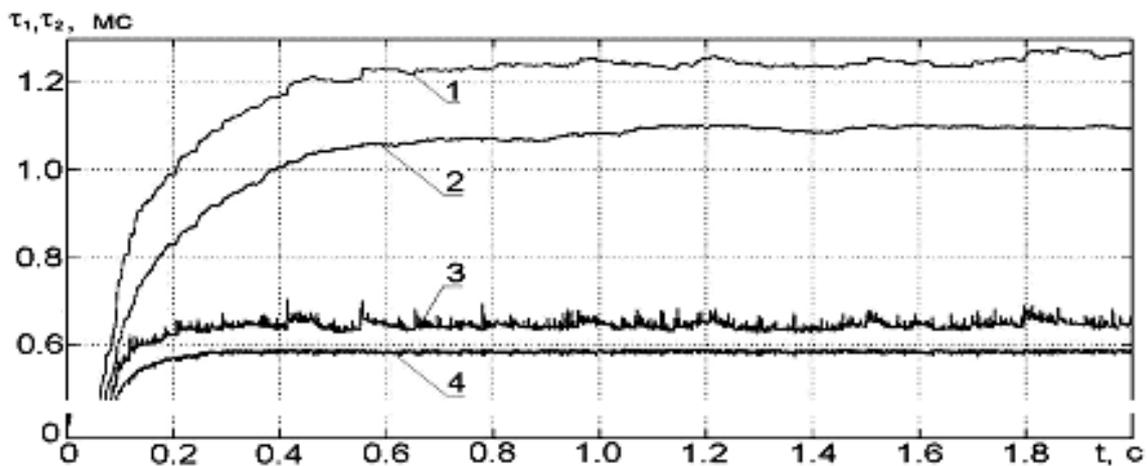


Рисунок 4 – Графики переходных процессов измерения модуля полной (1, 2) и продольной скоростей (3, 4) с использованием прямых методов оценок корреляционных функций (1, 3) и функций средних модулей разностей (2, 4)

Функционирование схем лагов с неидентичными амплитудными характеристиками каналов лагов моделировалось при уменьшении амплитуд второго канала на 10%. Переходные процессы вычислительных устройств лагов представлены на рисунке 4. Результаты моделирования показали достаточно хорошую сходимость полученных величин погрешностей и погрешностей, рассчитанных по выражениям (22)–(25). Расхождение в величинах погрешностей от 0 % до 30 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе, на основании выполненных исследований, получены следующие основные научные результаты и выводы:

1. В результате уточнения информационно-физической модели лага, на основе составленной и описанной с помощью уравнений семантической схемы корреляционного лага, выделены основные процессы, которые происходят при работе корреляционного лага с учетом условий эксплуатации.

2. Разработаны структурные схемы новых вычислительных устройств лагов на основе использования функций средних модулей разностей для измерений модуля, курсовой и измеренной (индицируемой) скоростей.

3. Уточнена классификационная таблица лагов с включением в нее других схем построения вычислительных устройств измерителей скорости с линейной базой направленных приемников, которая приводит в единую систему терминологию в этой области научных исследований и позволяет синтезировать более 10000 типов лагов для различных условий эксплуатации.

4. Получены математические выражения для оценки величин флюктуационных погрешностей при использовании прямых и косвенных оценок корреляционных функций для измерения скорости методом сравнения крутизны корреляционных функций в точках слежения для заданной амплитуды функций.

5. Получены математические зависимости для оценки влияния помех на входах коррелятора и неидентичности амплитудных характеристик приемных каналов лага на погрешности измерения составляющих вектора скорости судна.

6. Теоретически доказано и подтверждено экспериментальным путем, что флюктуационные погрешности и влияние неидентичности амплитудных характеристик приемных каналов на погрешности измерения скорости существенно меньше (от 1,5 до 5 раз) у лагов, построенных на основе использования функций средних модулей разностей амплитуд эхо-сигналов.

7. Разработана структурная схема лага с компенсацией влияния изменения характеристик отражающей поверхности на флюктуационную погрешность измерения скорости судна.

8. Имитационное моделирование работы гидроакустического относительного лага на основе использования функций средних модулей разностей амплитуд огибающих эхо-сигналов в различных условиях подтвердили правильность выводов и рекомендаций, полученных теоретическим путем.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Завьялов, В. В. Варианты построения вычислительных устройств измерителей скорости по среднему модулю разностей [Текст] / В. В. Завьялов, А. В. Артемьев, В. В. Воробьев // Междунар. науч.-техн. конф. “Безопасность на море. Научно–технические проблемы и человеческий фактор”. – Владивосток : Морск. гос. унив. – 2002 .– С. 40–44.

2. Воробьев, В. В. Анализ некоторых проблем создания гидроакустического корреляционного относительного лага [Текст] / В. В. Воробьев // Материалы пятой международной научно-практической конференции «Проблемы транспорта Дальнего Востока»: – 1–3 октября 2003 г.– Владивосток : ДВО Российской Академии транспорта.– 2003. – С. 341–346.

3. Артемьев, А. В. Стабилизация погрешностей измерителя скорости с линейной базой направленных приемников [Текст] / А. В. Артемьев, В. В. Воробьев, В. В. Завьялов, А. А. Панченко // Вестн. Морского государственного университета. Серия: Судовождение – Владивосток : Морск. гос. унив. – 2004, вып. 2. – С. 76–80.

4. Завьялов, В. В. Оценка флюктуационных погрешностей лагов, построенных на использовании функций средних модулей разностей [Текст] / В. В. Завьялов, В. В. Воробьев // Вестн. Морского государственного университета. Серия: Судовождение – Владивосток : Морск. гос. унив. – 2004, вып. 2. – С. 81–83.

5. Воробьев, В. В. Потенциальная точность корреляционного лага [Текст] / В. В. Воробьев, В. В. Завьялов, С. В. Шостак // Вестн. Морского государственного университета. Серия: Судовождение. – Владивосток : Морск. гос. унив. – 2004, вып. 2. – С. 85–89.

6. Панченко, А. А. Погрешности цифрового полярного коррелятора [Текст] / А. А. Панченко, В. В. Воробьев // Вестн. Морского государственного университета. Серия: Судовождение – Владивосток : Морск. гос. унив. – 2004, вып. 2. – С. 107–112.

7. Артемьев, А. В. Уточнение классификации измерителей скорости с линейной базой направленных приемников [Текст] / А. В. Артемьев, В. В. Воробьев, В. В. Завьялов, А. А. Панченко // Проблемы транспорта Дальнего Востока. Материалы шестой международной научно-практической конференции.–

5–7 октября 2005 г. Владивосток : ДВО Российской Академии транспорта. – 2005. – С. 93–95.

8. Воробьев, В. В. Моделирование функционирования измерителей скорости с линейной базой направленных приемников [Текст] / В. В. Воробьев, В. В. Завьялов // Вестн. Морского государственного университета. Серия: Судовождение. – Владивосток : Морск. гос. унив. – 2005, вып. 9. – С. 14–20.

9. Воробьев, В. В. Моделирование функционирования схемы стабилизации флюктуационных погрешностей корреляционного лага [Текст] / В. В. Воробьев, В. В. Завьялов // Вестн. Морского государственного университета. Серия: Судовождение. – Владивосток : Морск. гос. унив. – 2005, вып. 9. – С. 21–25.

Работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

10. Воробьев, В. В. Информационно-физическая модель корреляционного лага [Текст] / В. В. Воробьев, В. В. Завьялов // Транспортное дело России. М. : Морские вести России, 2006. – Спецвыпуск № 6. – С.18–21 .

11. Воробьев, В. В. Погрешности корреляционного лага с обработкой сигналов по функциям средних модулей разностей [Текст] / В. В. Воробьев, В. В. Завьялов // Транспортное дело России. М. : Морские вести России, 2006. – Спецвыпуск № 6. – С. 30–33.

Личный вклад автора.

Работа [2] выполнена автором лично. В работах [1, 3] автор участвовал в постановке задач, разработке алгоритмов и структурных схем. В работах [4, 5, 10, 11] автор участвовал в постановке задач, разработке модели, получении аналитических выражений оценок погрешностей. В работе [7] дополнил классификацию на основе разработанных структурных схем вычислительных устройств лагов. В работах [8, 9] автор участвовал в постановке задач, разработке структурных схем имитационных моделей и их моделировании, выполнял численные исследования.

Воробьев Всеволод Владимирович
МЕТОД УМЕНЬШЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ
КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ЛАГОВ
НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФУНКЦИЙ
СРЕДНИХ МОДУЛЕЙ РАЗНОСТЕЙ

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Усл. печ. л. 1,5. Уч.-изд. л. 1,0

Формат 60 × 84¹/₁₆

Тираж 100 экз.

Заказ № 467

Отпечатано в типографии ИПК МГУ им. адм. Г. И. Невельского
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а