

На правах рукописи



Сергеева Елена Игоревна

**Модели и алгоритмы параллельной обработки
гидроакустической информации линейных антенных
решёток**

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2022

Работа выполнена в научно-исследовательском отделении общекомплексного проектирования гидроакустических комплексов разработки программного обеспечения и цифровых вычислительных комплексов АО «Концерн «Океанприбор»

Научный руководитель: **Лисс Александр Рудольфович**

доктор технических наук, профессор, АО «Концерн «Океанприбор», руководитель экспертной группы

Оппоненты:

Максимов Василий Васильевич

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», профессор кафедры интеллектуальных систем и защиты информации, г. Санкт-Петербург

Мельканович Виктор Сергеевич

кандидат технических наук, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», ведущий научный сотрудник, г. Санкт-Петербург

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», г. Санкт-Петербург

Защита состоится «25» мая 2022 г. в 17:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.01, созданном при ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), расположенном по адресу: 197022, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5, литера Ф.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) и на сайте университета www.etu.ru

Автореферат разослан «24» марта 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.238.01



кандидат технических наук, доцент
Пазников Алексей Александрович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. В настоящее время существует широкий класс информационно-технических систем, которые получают информацию об удалённых объектах путём анализа создаваемых этими объектами волновых полей. К ним относятся гидроакустические, сейсмологические, радиолокационные и другие подобные системы. Волновое поле несёт информацию о своём источнике. Воздействуя на приёмные элементы антенны, поле порождает на них пространственно-временные сигналы. Задачи пространственно-частотно-временной обработки сигналов, принятых элементами антенны, или, так называемой, первичной обработки состоят в обнаружении источника сигнала и определении его пространственного положения (направления и дальности). В настоящей диссертации рассматриваются пассивные гидроакустические системы, содержащие в своём составе многоэлементные линейные антенные решётки (ЛАР).

Цифровая обработка гидроакустических сигналов выполняется в реальном времени на специализированных встроенных многопроцессорных вычислительных системах, где функционирует программное обеспечение. На вход таких систем поступают большие объёмы данных, темпы обновления которых составляют десятки миллисекунд. Заданный темп обновления информации накладывает жёсткие ограничения на время выполнения задач обработки и передачи информации. Следовательно, к производительности программного обеспечения вычислительных систем обработки гидроакустической информации предъявляются высокие требования.

Количество приёмных элементов ЛАР, которые являются источниками данных для обработки, может составлять сотни и тысячи. Большие апертуры дают возможность проводить обработку не только для традиционного плосковолнового приближения в дальней зоне, но и с учётом кривизны волнового фронта в зоне Френеля. Обработка в зоне Френеля позволяет извлекать информацию о дальности до источника сигнала в пассивном режиме. Однако такая обработка является ресурсоёмкой и её реализация в реальном времени является открытой проблемой. Актуальным представляется сокращение вычислительной сложности алгоритмов решения задач первичной обработки информации ЛАР или, другими словами, разработка «быстрых» вычислительных алгоритмов.

Рассматриваемые в диссертации многопроцессорные системы обработки гидроакустических сигналов обычно строятся на базе высокопроизводительных цифровых сигнальных процессоров (ЦСП), связанных между собой при помощи коммуникационной среды. Аппаратные средства, на базе которых строятся такие многопроцессорные системы, активно раз-

виваются.

Ещё одним способом ускорения вычислений является эффективное распараллеливание задач обработки с учётом архитектуры целевых вычислительных средств. Поэтому актуальным также является создание инструмента для распараллеливания обработки при проектировании программного обеспечения — модели параллельных вычислений, которая обобщает архитектурные особенности специализированных многопроцессорных систем и отражает структуру параллелизма обработки информации в реальном времени.

Объектом исследования является система определения в реальном времени пространственного положения источника гидроакустического сигнала по данным ЛАР.

Предметом исследования выступают вычислительные алгоритмы пространственно-частотно-временной обработки гидроакустической информации ЛАР и модели проектирования программного обеспечения встроенных многопроцессорных систем реального времени.

Цели и задачи диссертационной работы: разработка «быстрых» вычислительных алгоритмов обработки гидроакустической информации ЛАР и разработка модели организации параллельных вычислений для встроенных многопроцессорных систем реального времени.

Для достижения целей диссертационной работы были поставлены и решены следующие задачи:

1. Проанализированы известные методы первичной обработки гидроакустической информации линейных антенных решёток.
2. Проанализированы особенности архитектуры специализированных вычислительных средств, применяемых для построения встроенных систем обработки гидроакустической информации в реальном времени, и существующие модели параллельных вычислений.
3. Разработаны «быстрые» вычислительные алгоритмы для решения задач пространственно-частотно-временной обработки.
4. Построена модель параллельных вычислений, обобщающая архитектурные особенности встроенных многопроцессорных систем обработки потока информации в реальном времени.
5. С применением построенной модели выполнено проектирование программного обеспечения параллельной обработки гидроакустической информации ЛАР и разработка эффективных параллельных алгоритмов.

6. Разработано программное обеспечение обработки гидроакустической информации линейных антенных решёток для вычислительных средств на базе отечественных ЦСП «Комдив-128».
7. Проведены вычислительные эксперименты для анализа результатов работы и производительности предложенных «быстрых» алгоритмов обработки на целевых вычислительных средствах.

Методы исследования. Численные методы, теория параллельных вычислений, математическое моделирование, вычислительный эксперимент.

Научная новизна.

1. Разработан «быстрый» вычислительный алгоритм формирования статического веера пространственных каналов в широком секторе обзора с фокусировкой по дальности, который вместо квадратичной имеет квазилинейную вычислительную сложность в зависимости от размерности задачи.
2. Разработан метод априорной оценки точности и границ применимости «быстрого» алгоритма формирования статического веера пространственных каналов. Показано, что предложенное приближение фазовых коэффициентов, характеризующих задержки принимаемых сигналов на элементах ЛАР, обеспечивает точность, достаточную для решения задачи высокой размерности с фокусировкой по дальности до источника в зоне Френеля.
3. Получены оценки быстродействия разработанного алгоритма, подтверждающие возможность его реализации в реальном масштабе времени на бортовых вычислительных средствах.
4. Для реализации параллельной обработки гидроакустической информации построена модель блочно-синхронно-конвейерного параллелизма (БСКП) обработки потока данных в реальном времени, отражающая два уровня параллелизма многопроцессорных систем обработки гидроакустических сигналов: уровень многоядерного ЦСП и уровень многопроцессорной системы.
5. С использованием модели БСКП разработана архитектура системы параллельной обработки гидроакустической информации ЛАР, включающая новые «быстрые» алгоритмы первичной обработки.

Практическая значимость.

1. Разработан комплекс программ, применяемый на этапе проектирования систем первичной обработки гидроакустической информации ЛАР в реальном времени.
2. Разработана библиотека программных модулей для реализации «быстрых» алгоритмов первичной обработки сигналов ЛАР в составе вычислительных систем, построенных с использованием ЦСП «Комдив-128».

Внедрение результатов. Результаты диссертационной работы внедрены в ряде изделий АО «Концерн «Океанприбор» (в двух ОКР и одной НИР). Подтверждено актами о внедрении.

Результаты работы используются в учебном процессе базовой кафедры «Программное и аппаратное обеспечение гидроакустических информационных систем» СПбГЭТУ «ЛЭТИ» при АО «Концерн «Океанприбор» при преподавании курсов «Архитектура программного обеспечения гидроакустических систем» и «Технология разработки программного обеспечения гидроакустических систем».

Положения, выносимые на защиту:

1. «Быстрый» вычислительный алгоритм формирования статического веера пространственных каналов ЛАР в широком секторе обзора с фокусировкой по дальности, который вместо квадратичной имеет квазилинейную вычислительную сложность в зависимости от размерности задачи (пп. 1–3 научной новизны).
2. Модель блочно-синхронно-конвейерного параллелизма (БСКП) обработки потока данных в реальном времени для построения параллельной обработки гидроакустической информации (п. 4, 5 научной новизны).
3. Комплекс программ для построения систем первичной обработки гидроакустической информации ЛАР на бортовых многопроцессорных системах (пп. 1, 2 практической значимости).

Апробация. Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях:

- Всероссийская конференция «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», Санкт-Петербург — 2012, 2016, 2018 гг.;

- Научно-техническая конференция молодых учёных и специалистов «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», Санкт-Петербург — 2013, 2015, 2019 гг., Туапсе — 2017 г.;
- Научно-практическая конференция молодых специалистов интегрированной структуры АО «Концерн «Океанприбор», Туапсе — 2016, 2018, 2020 гг.;
- Научно-техническая конференция «Состояние, проблемы и перспективы создания корабельных информационно-управляющих комплексов», Москва — 2017 г.;
- XVIII Всероссийская конференция молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям, Иркутск — 2017 г.;
- Всероссийский конгресс молодых учёных, Санкт-Петербург, НИУ ИТМО — 2013, 2014 гг.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 24 печатных работах, из них 7 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК [1–7], 9 статей в сборниках трудов конференций [8–16], 3 тезисов докладов [17–19], 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ [20–23], учебное пособие [24].

Личный вклад автора. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографии, приложений. Общий объем диссертации 190 страниц, из них 144 страницы текста, включая 53 рисунка и 6 таблиц. Библиография включает 154 наименования на 19 страницах, приложения на 27 страницах.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа выполнена в соответствии с паспортом специальности 05.13.18 — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, отрасль — технические науки. Диссертация соответствует пунктам 3, 4, 5 паспорта специальности 05.13.18: п. 3 — Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий (ш. 1–3 научной новизны); п. 4 — Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированные программ для проведения вычислительного эксперимента (ш. 1, 2 практической значимости); п. 5 — Комплексные

исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента (п. 4, 5 научной новизны).

Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, приведён обзор литературы по теме исследования, представлены положения, выносимые на защиту, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе приводятся необходимые сведения из рассматриваемой предметной области — обработки гидроакустической информации. Рассмотрен предмет первичной обработки сигналов, состоящий в извлечении информации о наблюдаемом объекте непосредственно из «сырых» данных, принятых элементами антенной решётки. Описаны модельные представления первичной обработки в общем виде, которые позволяют работать не только с традиционным плосковолновым приближением в дальней зоне, но и учитывать кривизну волнового фронта при работе в зоне Френеля.

Выделены основные этапы пространственно-частотно-временной обработки информации L -элементной линейной антенной решётки. Одним из наиболее ресурсоёмких является этап формирования статического веера пространственных каналов в широком секторе обзора по пространству с фокусировкой по дальности (далее будем сокращённо называть этот этап «формированием пространственных каналов» — ФПК).

Каждому углу α_q в секторе обзора ставится в соответствие номер q (который будем называть пространственным каналом), дискретизация сектора обзора по пространству производится следующим образом:

$$\sin \alpha_q = \frac{2q}{(Q-1)}, \quad q = -\left\lfloor \frac{Q}{2} \right\rfloor, \dots, \left\lfloor \frac{Q}{2} \right\rfloor,$$

где Q — количество пространственных каналов (для удобства будем полагать, что Q — нечетное число).

Расстояние до источника излучения r_j априори не известно. Дискретизация по расстояниям до источника производится следующим образом:

$$r_j = \frac{d^2(L-1)^2}{2j\lambda}, \quad j = 1, \dots, J,$$

где J — количество каналов по дальности, λ — длина волны, d — расстояние между приёмными элементами ЛАР. При $j = 0$ считаем, что источник находится в дальней зоне (в этом случае индекс j в обозначениях будем опускать).

ФПК на дискретной частоте f_k , $k = k_n, \dots, k_b$, представляется в виде

$$Y_q^j(k) = X^T(k) \bar{V}_q^j(k), \quad (1)$$

где $X(k)$ — L -компонентный вектор спектров входных сигналов на элементах ЛАР; $V_q^j(k) = \{\exp\{2\pi i f_k \tau_l(q, j)\}\}_{l=0}^{L-1}$ — L -компонентный вектор, отвечающий задержкам сигнала на элементах ЛАР в частотной области для пространственного канала q и канала по дальности j ; $\tau_l(q, j)$ — временная задержка сигнала, пришедшего на l -й элемент ЛАР; $j = 0, \dots, J$; $q = -\lfloor Q/2 \rfloor, \dots, \lfloor Q/2 \rfloor$.

При работе в зоне Френеля в задержках $\tau_l(q, j)$ заключается информация не только о направлении прихода сигнала, но и о расстоянии r_j до источника. Выражение для задержек сигнала на элементах ЛАР в общем случае имеет вид

$$\tau_l(q, j) = \frac{r_j(\rho_j(l, q) - 1)}{c}, \quad q = -\left\lfloor \frac{Q}{2} \right\rfloor, \dots, \left\lfloor \frac{Q}{2} \right\rfloor,$$

где

$$\rho_j(l, q) = \sqrt{1 + \left(\frac{ld - D/2}{r_j}\right)^2 - \frac{4(ld - D/2)q}{r_j(Q - 1)}}, \quad (2)$$

$j = 1, \dots, J$, $l = 0, \dots, L - 1$, $D = d(L - 1)$ — апертура ЛАР.

В случае, когда для поля приходящего на элементы ЛАР принята плосковолновая модель (при $j = 0$) в выражении для задержки сигнала на l -м приемном элементе содержится информация только о направлении прихода и не содержится информации о расстоянии до источника. При работе в дальней зоне для выражения (2) используется линейное приближение, где информация о дистанции не используется и задержки на элементах ЛАР имеют вид

$$\tau_l(q) = \frac{2qld}{c(Q - 1)}, \quad q = -\left\lfloor \frac{Q}{2} \right\rfloor, \dots, \left\lfloor \frac{Q}{2} \right\rfloor.$$

Также в главе рассмотрена модель адаптивной обработки по выходу сформированных пространственных каналов. Сформулирован перечень задач, которые выполняются в реальном времени программным обеспечением многопроцессорной системы. Приведены упрощённые модели имитации типовых сигналов на приёмных элементах ЛАР и уплотнённых сигналов, предназначенные для проверки функционирования основных задач первичной обработки.

Также в этой главе приведены основные сведения о вычислительных средствах на базе цифровых сигнальных процессоров (ЦСП), которые применяются для обработки гидроакустической информации в реальном времени. Отмечены общие для ряда специализированных вычислительных средств современные архитектурные решения.

Приведён краткий обзор видов и способов представления параллелизма алгоритмов и программ. Рассмотрено, введённое М. Коулом (M. Cole), понятие параллельных каркасов — некоторых шаблонов, отражающих закономерности в организации вычислений и межпроцессорных коммуникаций. Описаны известные каркасы с параллелизмом данных и с параллелизмом задач.

Рассмотрено, введённое Л. Вэлиантом (L. Valiant), понятие «связующей модели» параллельных вычислений. Дается классификация таких моделей.

Обоснована актуальность построения связующей модели для встроенных многопроцессорных вычислительных систем и алгоритмов обработки гидроакустической информации в реальном времени. Формулируются требования к такой модели. Основным из которых является обобщение характеристик ряда существующих и перспективных технических систем обработки гидроакустической информации, значительно влияющих на реализацию алгоритмов обработки.

Во второй главе предложены «быстрые» вычислительные алгоритмы для основных ресурсоёмких задач первичной обработки информации ЛАР, т. е. такие, в которых для сокращения количества арифметических операций применяются алгоритмы «быстрой свёртки». Известно, что вычисление свёртки с помощью алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ) имеет квазилинейную временную сложность вместо квадратичной.

В основу «быстрого» ФПК ЛАР положен известный алгоритм Блюстейна. Выполнены преобразования выражений для ФПК ЛАР к виду, удобному для применения этого алгоритма.

Пусть M — наименьшее целое число, являющееся степенью 2, такое, что $M \geq Q + L$; в каждом частотном канале $k = k_n, \dots, k_b$ входной вектор $X(k)$ длины L дополнен нулями до длины M . Тогда ФПК ЛАР в каждом частотном канале сводится к выполнению двух БПФ длины M и трёх поэлементных комплексных умножений векторов длины M . В случае работы в дальней зоне «быстрый» алгоритм ФПК ЛАР применяется для вычисления исходного выражения без приближения.

Для ФПК в зоне Френеля предложено приблизить выражение (2) полиномами вида

$$\tilde{\rho}_j(l, q) = a_0^{(j)} + a_1^{(j)}q + a_2^{(j)}l + a_3^{(j)}q^2 + a_4^{(j)}l^2 + a_5^{(j)}(q - l)^2. \quad (3)$$

Тогда ФПК при работе в зоне Френеля легко сводится к вычислительным алгоритмам на базе «быстрой свёртки». Таким образом, предложенный «быстрый» алгоритм ФПК ЛАР является универсальным для случаев дальней зоны и зоны Френеля. Его вычислительная сложность в каждом канале по частоте и по дальности составляет $O(M \log M)$ арифметических операций

вместо $O(M^2)$.

Задача поиска набора векторов коэффициентов $a^{(j)} \in \mathbb{R}^6$, $j = 1, \dots, J$, полиномов (3) состоит в решении переопределённых систем линейных уравнений (в каждом канале по дистанции). Для их решения применён метод наименьших квадратов.

Проведено исследование точности работы приближённого «быстрого» алгоритма ФПК в зоне Френеля для решения задачи фокусировки. Описаны численные эксперименты на программных моделях. Их результаты показали, что для достижения точности приближения, позволяющей решать задачи обработки сигналов в зоне Френеля, диапазон пространственных каналов необходимо разбить на поддиапазоны и для каждого сформировать свой набор коэффициентов полиномов (3). При этом точность приближённого алгоритма ФПК позволяет решать задачу фокусировки.

Выполнена оценка ожидаемого выигрыша в производительности предложенного алгоритма ФПК ЛАР в зависимости от количества приёмных элементов и количества пространственных каналов. Показано, что для типовых параметров обработки он выигрывает в производительности в десятки раз по отношению к вычислениям по определению. Помимо этого «быстрый» алгоритм ФПК ЛАР выигрывает и по необходимому для хранения фазовых коэффициентов объёму памяти.

Далее рассматриваются вопросы применения алгоритмов «быстрой свёртки» при решении ряда других задач пространственно-частотно-временной обработки информации ЛАР.

Результаты **второй главы** опубликованы в работах [1–4].

В третьей главе построена связующая модель блочно-синхронно-конвейерного параллелизма (БСКП) для обработки потока данных в реальном времени. Рассмотрено применение модели БСКП для проектирования пространственно-частотно-временной обработки информации ЛАР (БСКП-обработка) и БСКП-алгоритмы восстановления данных по известным значениям в узлах равномерной сетки.

Вычислительная система в модели БСКП (далее БСКП-компьютер) включает в себя $N_{\text{ЭЦСП}}$ эквивалентов цифровых сигнальных процессоров (ЭЦСП), соединённых между собой эквивалентом коммуникационной среды (ЭКС) с пропускной способностью BW машинных слов в единицу времени. ЭКС является полносвязной и однородной. В составе каждого ЭЦСП есть глобальная память объёмом $GMem$ машинных слов и эквиваленты вычислительных ядер (ЭВЯ) в количестве $N_{\text{ЭВЯ}}$, обладающие собственной локальной памятью объёмом $LMem$. Пропускная способность передачи данных между глобальной памятью ЭЦСП и локальной памятью ЭВЯ составляет bw машинных слов в единицу времени. Множество всех ЭЦСП разбивается на $N_{\text{ВВЭ}}$ непересекающихся подмножеств, называемых виртуальными вы-

числительными элементами (ВВЭ). Функционирование БСКП-компьютера рассмотрено на двух уровнях, на каждом уровне введены стоимостные компоненты вычислительного процесса.

Вычисления в модели БСКП представляются в виде конвейера, состоящего из *стадий*, соединённых между собой *потоками* по которым передаются данные. Работа конвейера рассматривается как итерационный процесс, разворачивающийся во времени. На каждой *итерации* стадия обрабатывает *входную порцию данных (ВПД)*, полученную из входного потока. Период поступления очередной ВПД для каждой стадии задан априори и фиксирован. Обработка ВПД в стадии представляется набором *вычислительных процедур*. Каждая вычислительная процедура завершается барьерной синхронизацией. Это гарантирует, что результаты её вычислений находятся в глобальной памяти ЭЦСП. После завершения любой из вычислительных процедур данные могут быть выданы в другие стадии конвейера. ВПД разделяется на *элементы порции данных (ЭПД)* и распределяется между вычислительными элементами на которых выполняется стадия, таким образом, что размер ЭПД не превышает размера локальной памяти. Операции, которые выполняются над ЭПД, будем называть *вычислительным ядром*.

Далее рассматривается применение модели БСКП при проектировании программного обеспечения пространственно-частотно-временной обработки, выполняющего функциональные задачи описанные в первой главе. При этом применяются «быстрые» вычислительные алгоритмы, предложенные в главе 3. Приводятся вычислительные процедуры и атрибуты каждой стадии БСКП-обработки. Для ресурсоёмких задач приводится количество арифметических операций.

Предложены эффективные параллельные БСКП-алгоритмы восстановления данных по известным значениям в узлах равномерной сетки, применяемых при имитации уплотнённых входных сигналов и обработке сигналов прослушивания. Произведена теоретическая оценка вычислительной и коммуникационной сложности предложенных БСКП-алгоритмов.

Результаты **третьей главы** опубликованы в статьях [5–7].

В четвёртой главе рассматриваются вопросы практического применения результатов диссертационной работы в технических системах. Описана, разработанная для многопроцессорных систем на базе ЦСП семейства «Комдив» (целевой многопроцессорной системы), библиотека «быстрой» обработки гидроакустической информации ЛАР, которая предназначена для решения основных функциональных задач обработки гидроакустической информации ЛАР. Библиотека включает в себя функции, реализующие следующие алгоритмы обработки сигналов ЛАР: «быстрого» ФПК, вычисления фазовых коэффициентов для ФПК в дальней

зоне и в зоне Френеля, последетекторной обработки, автоматического сопровождения целей, формирования и обработки сигналов прослушивания, адаптации, экспоненциального накопления и формирования сплошной части спектра. Приведён файловый состав этой библиотеки и интерфейсы основных её функций.

Для анализа производительности программной реализации предложенного алгоритма ФПК ЛАР проведён ряд вычислительных экспериментов на ЦСП «Комдив-128». Результаты этих экспериментов показали, что выигрыш в производительности для «быстрого» ФПК ЛАР сопоставим с теоретическим (полученным в главе 3). Применение «быстрых» алгоритмов позволяет ускорить решение задачи ФПК ЛАР в зоне Френеля на порядок по сравнению с точным решением.

Разработана программа, предназначенная для построения по заданным параметрам обработки приближённых фазовых коэффициентов, позволяющих реализовать «быстрый» алгоритм ФПК ЛАР в зоне Френеля, а также выполняющая априорную оценку точности «быстрого» вычислительного алгоритма ФПК ЛАР. Данная программа применяется на этапе проектирования программного обеспечения систем реального времени пространственно-частотно-временной обработки в зоне Френеля.

Далее рассматривается программная реализации «быстрой» БСКП-обработки информации ЛАР для целевой многопроцессорной системы с использованием имеющихся в распоряжении технологических средств разработки. Описана логика организации вычислений в соответствии с предложенной моделью, приводятся блок-схемы вызовов функций библиотеки «быстрой» обработки гидроакустической информации ЛАР в стадиях, обсуждаются вопросы распределения по процессорам в многопроцессорной системе.

Разработана библиотека, реализующая предложенные в четвёртой главе БСКП-алгоритмы восстановления данных по известным значениям в узлах равномерной сетки. Функции этой библиотеки применяются для повышения частоты дискретизации сигналов при программной имитации гидроакустической информации ЛАР.

Для проверки программного обеспечения пространственно-частотно-временной обработки гидроакустической информации ЛАР разработан программный имитатор входных сигналов ЛАР. Имитатор имеет модульную структуру, благодаря которой, является легко расширяемым и модифицируемым.

Разработанное программное обеспечение имеет свидетельства о государственной регистрации [20–23].

В Заключение сформулированы основные научные и практические результаты работы.

1. Разработан «быстрый» вычислительный алгоритм формирования статического веера пространственных каналов в широком секторе обзора с фокусировкой по дальности.
2. Разработан метод априорной оценки точности и границ применимости «быстрого» вычислительного алгоритма формирования статического веера пространственных каналов. Показано, что предложенный алгоритм обеспечивает точность, достаточную для решения задачи фокусировки.
3. Получены оценки быстродействия вычислительного алгоритма формирования статического веера пространственных каналов, которые показывают возможность реализации предложенного алгоритма в реальном масштабе времени на бортовых вычислительных средствах.
4. Построена модель БСКП для обработки потока данных в реальном времени, отражающая два уровня параллелизма многопроцессорных систем обработки гидроакустической информации.
5. С использованием модели БСКП проведено проектирование программного обеспечения параллельной обработки информации линейных антенных решёток, а также предложен эффективный параллельный алгоритм восстановления данных по известным значениям в узлах.
6. Разработан комплекс программ обработки гидроакустической информации линейной антенной решётки для вычислительных средств на базе отечественного ЦСП «Комдив-128».
7. Проведены вычислительные эксперименты, подтверждающие правильность работы предложенных алгоритмов.
8. Разработанное программное обеспечение внедрено и функционирует в изделиях АО «Концерн «Океанприбор».

Список публикаций

1. Пуеров Г. Ю., Сергеева Е. И. Применение быстрого преобразования Фурье при формировании характеристик направленности линейной антенной решётки // Гидроакустика. 2015. Вып. 24 (4). С. 70–74.
2. Пуеров Г. Ю., Сергеева Е. И. Программное обеспечение обработки гидроакустических сигналов линейной антенны, адаптированное к архитектуре вычислительных средств // Гидроакустика. 2018. Вып. 34 (2). С. 62–66.
3. Мнацаканян А. А., Пуеров Г. Ю., Сергеева Е. И. Обработка сигналов прослушивания режима шумопеленгования в низкочастотном диапазоне на сигнальных процессорах // Гидроакустика. 2018. Вып. 33 (1). С. 59–69.
4. Пуеров Г. Ю., Сергеева Е. И. Об использовании «быстрой свертки» для формирования характеристик направленности линейной антенной решётки при работе в зоне Френеля // Гидроакустика. 2019. Вып. 40 (4). С. 56–65.
5. Лисс А. Р., Пуеров Г. Ю., Сергеева Е. И. Модель системы параллельной обработки гидроакустической информации в реальном масштабе времени // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2020. № 3. С. 29–38.
6. Лисс А. Р., Пуеров Г. Ю., Сергеева Е. И. Параллельная обработка гидроакустической информации линейных антенных решёток в реальном времени // Гидроакустика. 2020. Вып. 42 (3). С. 50–57.
7. Лисс А. Р., Пуеров Г. Ю., Сергеева Е. И. Эффективные параллельные алгоритмы восстановления данных по известным значениям в узлах // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2021. № 6. С. 17–23.
8. Пуеров Г. Ю., Сергеева Е. И. Программное обеспечение системы цифрового разделения каналов в гидроакустических станциях и комплексах с частотным уплотнением сигналов в антенне // Труды XI всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (ГА-2012). СПб: «Наука», 2012. С. 146–148.
9. Пуеров Г. Ю., Сергеева Е. И. Об эффективной реализации некоторых ресурсоёмких задач пространственно-частотной обработки сигналов линейной антенной решётки // Труды XIII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (ГА-2016). СПб, 2016. С. 292–294.

10. Пуеров Г. Ю., Сергеева Е. И. Приближённый алгоритм формирования характеристик направленности линейной антенной решётки при работе в зоне Френеля // Труды XIV Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (ГА-2018). СПб, 2018. С. 430—432.
11. Пуеров Г. Ю., Ложкин Д. В., Сергеева Е. И. Многофункциональный имитатор сигналов гибкой протяжённой буксируемой антенны // Сборник докладов III объединенной конференции молодых учёных и специалистов «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб, 2013. С. 193—197.
12. Пуеров Г. Ю., Сергеева Е. И. Программная реализация формирования характеристик направленности линейной антенной решётки с применением алгоритмов «быстрой свёртки» // Сборник докладов IV научно-технической конференции молодых учёных и специалистов «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (МАГ-2015). СПб, 2015. С. 119—122.
13. Пуеров Г. Ю., Сергеева Е. И. Обработка сигналов прослушивания режима шумопеленгования в низком частотном диапазоне на сигнальных процессорах // Сборник трудов V научно-технической конференции молодых учёных и специалистов «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (МАГ-2017). Туапсе, 2017. С. 231—236.
14. Сергеева Е. И. Точность приближения при реализации «быстрого» алгоритма формирования характеристик направленности линейной антенной решётки в зоне Френеля // Сборник трудов VI научно-технической конференции молодых учёных и специалистов «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (МАГ-2019). СПб, 2019. С. 183—187.
15. Пуеров Г. Ю., Сергеева Е. И. Применение алгоритмов «быстрой свёртки» при программной реализации некоторых задач пространственно-частотно временной обработки сигналов линейной антенной решётки // Сборник трудов I научно-практической конференции молодых специалистов интегрированной структуры АО «Концерн «Океанприбор» (ИСТОК-2016). Туапсе, 2016. С. 253—256.
16. Пуеров Г. Ю., Сергеева Е. И. О некоторых подходах к проектированию программного обеспечения многопроцессорных систем обработки гидроакустических сигналов линейной антенной решётки // Сборник докладов научно-технической конференции «Состояние, проблемы и перспективы создания корабельных информационно-управляющих комплексов». Москва: АО «Концерн «Моринсис-Агат», 2017. С. 165—168.

17. *Сергеева Е. И.* Особенности проектирования программного обеспечения многопроцессорных систем обработки гидроакустических сигналов линейной антенной решётки // *Материалы XVIII Всероссийской конференции молодых учёных по математическому моделированию.* Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2017. С. 53—54.
18. *Сергеева Е. И.* Алгоритмы сглаживания на базе обобщённых средних В. А. Стеклова при восстановлении функций по известным значениям в узлах // *Сборник тезисов докладов конгресса молодых учёных.* Вып. 2. СПб: НИУ ИТМО, 2013. С. 285—286.
19. *Сергеева Е. И.* Алгоритмы восстановления функций по известным значениям в узлах равномерной сетки с применением аппарата средних В. А. Стеклова // *Сборник тезисов докладов конгресса молодых учёных.* Вып. 2. СПб: НИУ ИТМО, 2014. С. 284—285.
20. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ.* Библиотека «быстрой» обработки гидроакустической информации линейных антенных решёток / Е. И. Сергеева, Г. Ю. Пуеров; АО «Концерн «Океанприбор». № 2020613784 (Рос. Федерация).
21. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ.* Программа обеспечения разработки систем «быстрой» обработки в зоне Френеля гидроакустической информации линейных антенных решёток / Е. И. Сергеева; АО «Концерн «Океанприбор». № 2020613785 (Рос. Федерация).
22. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ.* Библиотека восстановления данных на равномерной сетке для систем параллельной обработки информации / Е. И. Сергеева; АО «Концерн «Океанприбор». № 2021614002 (Рос. Федерация).
23. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ.* Модульный программный имитатор сигналов ЛАР / Е. И. Сергеева; АО «Концерн «Океанприбор». № 2021614001 (Рос. Федерация).
24. *Лисс А. Р., Пуеров Г. Ю., Сергеева Е. И.* Учебное пособие «Архитектура и технология разработки программного обеспечения гидроакустических систем». СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. URL: <https://lk.etu.ru/dashboard/api/download/1171>.