

На правах рукописи



КОПЕЙКИН РОМАН ЕВГЕНЬЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ
ИНФОРМАЦИИ МОБИЛЬНЫХ СВЕРХКОРОТКОИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМ
МОНИТОРИНГА СНЕЖНО-ЛЕДОВЫХ ПОКРОВОВ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (в
технических системах)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель –

доктор технических наук, профессор
Борзов Андрей Борисович

Официальные оппоненты:

Тихомиров Николай Михайлович,
доктор технических наук, старший научный сотрудник,
начальник научно-технического управления АО «Концерн
«Созвездие»

Семенов Виталий Юрьевич,
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры радиотехники Федерального
государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования «Национальный
исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского»

Ведущая организация –

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский
технологический университет»

Защита диссертации состоится «29» марта 2022 года в 14 часов 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Госпитальный пер., д. 10, факультет Специального машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана, ауд. 613м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н. Э. Баумана» и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Муратов Игорь Валентинович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Россия – северная страна. Этот факт накладывает системные условия и особенности на многие направления жизни, быта, промышленного производства, управления, коммуникации и т. д. Среди этих направлений проблемы исследования снежно-ледовых покровов, неотъемлемых атрибутов зимы, приобретают особую важность и актуальность.

Проблематика формируется относительно парадигмы: необходимо обеспечить соответствующие службы мобильными техническими средствами, позволяющие с высокой (достаточной) точностью дистанционно определять структуру и толщину снежно-ледовых покровов. Эта проблематика полностью вписывается в многочисленные ведущиеся и планируемые государственные программы, среди которых можно отметить такие как «Арктика» и «Лавина». Естественно, к этим программам относятся мероприятия по защите наших северных рубежей и акваторий северных морей.

Народнохозяйственная проблематика, связанная с жизнедеятельностью в условиях или с применением (ледовая переправа) снежно-ледовых покровов (СЛП), определяет круг научных проблем, связанных с разработкой технических средств их мониторинга. Безусловно, спектр таких систем достаточно широк, но в нём особое место занимают мобильные системы дистанционного мониторинга СЛП, позволяющие с минимальными издержками, оперативно и точно измерять основные параметры СЛП, среди которых толщина этих покровов является наиболее важным параметром. Эти требования предопределяют режим автономного использования (применения) таких средств мониторинга, что, в частности, накладывает жёсткие условия на энергоэффективность системы (критерий: масса/габариты – продолжительность непрерывной работы).

В настоящее время, наиболее известным средством анализа СЛП является технология обработки радиолокационных изображений, получаемых космическими аппаратами и предоставляемых в открытом доступе, как элемент космического мониторинга водных экосистем с использованием геоинформационных систем, широко описанных в пособии под редакцией В. Г. Смирнова.

Среди мобильных систем мониторинга СЛП, удовлетворяющих всем ранее указанным требованиям по мобильности, автономности и точности, в наибольшей степени отвечают приборы серии «Пикор», широко представленные на отечественном рынке. Автор является одним из разработчиков этих приборов в части программно-алгоритмического обеспечения. Широкое и успешное применение этих приборов в различных спасательных и оперативных службах подтверждает их народнохозяйственную значимость с одной стороны, а с другой – актуальность научной проблематики в области исследований путей создания, разработки и применения автономных средств радиолокационного мониторинга снежно-ледовых покровов.

Современные способы построения сверхширокополосных систем были активно исследованы в трудах И.Я. Иммореева, и активно развивались на базе ООО КБОР с 2013 по 2017 года. В это же время были заложены первые алгоритмы устройств класса «Пикор», широко продемонстрированные в работе Л.В. Лабунца и В. В. Симакова. Этот труд можно считать базовым трудом, на котором строится данная работа с точки зрения алгоритмов цифровой обработки сигналов.

В рамках диссертации рассмотрены основные методики обработки цифровых рядов, показанные в работах Добеши, МакКуина, Ллойда, а основателем алгоритма миграционного преобразования традиционно считается Клаербоут.

Нельзя не отметить вклад отечественной фирмы «Логис» в создание систем сбора и обработки геофизической информации. Однако, следует заметить, что в большинстве своем данные приборы являются, по сути, георадарами и для успешного использования требуют услуг квалифицированного геофизика. Также следует отметить работу Семейкина, Монахова и Еременко как исчерпывающий труд по применению вышеописанного георадара для измерений толщин льда.

Таким образом, диссертация посвящена систематизации подходов к построению сверхширокополосных систем, а также (в первую очередь) алгоритмов обработки информации, притом для большинства описанных алгоритмов сохранена инвариантность к физической реализации приемопередающего устройства, что позволяет в случае необходимости, оперативно менять блок получения информации.

Цель работы: разработка и исследование автономной информационной системы дистанционного мониторинга толщины снежных и ледовых покровов.

Задачи работы:

- 1) разработка принципов рационального построения мобильных сверхкороткоимпульсных (СКИ) систем мониторинга снежно-ледовых покровов;
- 2) разработка математической модели данных систем мониторинга снежно-ледовых покровов на основе однокристалльных СКИ систем;
- 3) разработка и исследования алгоритма кратномасштабного анализа радарограммы с целью определения толщины ледового (снежного) покрова;
- 4) разработка и исследования алгоритма оценки толщины речного льда с помощью гистограммы, сглаженной сдвигом и алгоритма к-внутригрупповых средних;
- 5) разработка и исследования рекуррентного алгоритма миграционного преобразования радарограммы;
- 6) разработка методики автоматизированной обработки информации мобильных СКИ систем мониторинга снежно-ледовых покровов;
- 7) анализ результатов измерений снежно-ледовых покровов, полученных мобильными СКИ системами мониторинга.

Методы исследования. В работе использованы методы структурного синтеза систем, элементы теории принятия решений, статистической радиотехники, радиофизики, теории цифровой обработки сигналов и теории цифровых алгоритмов.

Научная новизна проведенных исследований и полученных результатов заключается в следующем:

- 1) Определена структура измерителя толщины СЛП на основе однокристалльных решений автономной СКИ-системы мониторинга.
- 2) Разработаны, верифицированы и внедрены в промышленные системы алгоритмы анализа радарограммы с целью определения толщины ледового (снежного) покрова.
- 3) Разработан рекуррентный алгоритм миграционного преобразования радарограммы для измерения толщины СЛП с многослойной неоднородной структурой.
- 4) Разработана методика автоматизированной обработки информации мобильной СКИ-системы мониторинга СЛП и показано её использование в составе промышленных образцов.

Достоверность методик исследования и обоснования параметров и характеристик СКИ-системы мониторинга толщины СЛП подтверждена актами испытаний в ходе различных экспериментальных исследований.

Внедрение результатов работы. Защищаемые положения диссертации, обладающие научной новизной, а именно: структура измерителя толщины СЛП на основе однокристалльных решений, алгоритм кратномасштабного анализа радарограммы, методика автоматизированной обработки информации мобильной СКИ-системы мониторинга СЛП входят в состав промышленных измерителей толщины СЛП таких как «Пикор-Лёд».

Апробация работы. Результаты и положения диссертационной работы были представлены и обсуждались на шестнадцатой международной конференции «Цивилизация Знаний: Российские реалии» (Москва, 2015)

Публикации. Основные результаты, полученные в диссертации опубликованы в двух статьях из Перечня ВАК РФ, двух тезисах докладов, общим объемом 3.2 п.л. По результатам работы получено два свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) Функционально-технические решения мобильных средств дистанционного

мониторинга снежно-ледовых покровов на основе однокристалльных сверхкороткоимпульсных систем, которые непосредственно ложатся в основу устройств, используемых для получения первичной информации о структуре СЛП.

2) Математическая модель исходных данных систем мониторинга снежно-ледовых покровов на основе однокристалльных сверхкороткоимпульсных систем, используемая для обоснования элементной базы приёмопередающих модулей системы оценки параметров СЛП.

3) Алгоритмы оценки толщины СЛП на основе скользящих средних с минимальными требованиями к ресурсам измерителя, используемые для быстрой оценки толщины СЛП (без оценки структуры) в наиболее энергоэффективных решениях и требующие начальной калибровки на месте непосредственных измерений.

4) Алгоритмы оценки толщины и структуры СЛП с помощью последовательности алгоритмов кратномасштабного анализа, гистограммы, сглаженной сдвигом и к-внутригрупповых средних, рациональные для слоистых структур, с некоторой степенью априорной информации об их природе, но не требующие калибровки по месту измерений.

5) Рекуррентный алгоритм на основе миграционного преобразования радарограммы, позволяющий получать структуру СЛП без каких-либо априорных знаний о структуре.

6) Методика автоматизированной обработки информации мобильных сверхкороткоимпульсных систем мониторинга снежно-ледовых покровов, показывающая последовательность калибровки алгоритмов, если таковая требуется

7) Результаты измерений снежно-ледовых покровов, полученных мобильными сверхкороткоимпульсными системами мониторинга, их верификация и анализ быстроедействия (с точки зрения времени выполнения) алгоритмов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, общих выводов и заключения. Объем диссертации составляет 172 страницы текста, 61 рисунок, 8 таблиц и приложение. Список литературы включает 87 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы и основные задачи исследования, дана их общая характеристика, указаны научная новизна и практическая значимость результатов работы, перечислены методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведены сведения о достоверности, апробации и внедрению результатов работы, о структуре и объеме диссертации.

В Главе 1 проведен анализ особенностей и выявлению основных мировых трендов развития и применения мобильных средств дистанционного мониторинга СЛП с позиций народнохозяйственной проблематики.

Первая глава посвящена структурному синтезу мобильных СКИ-систем мониторинга СЛП. К числу главных особенностей, определяющих суть и специфику научно-практической направленности работы, является обеспечение противоречивых требований к системе радиомониторинга, а именно, с одной стороны, система должна иметь компактные массогабаритные характеристики, допускающие широкие эксплуатационные возможности по её применению, например, «с рук», при установке на передний бампер автомобиля (снегохода), на беспилотный летательный аппарат, а с другой, система должна обеспечивать измерения (оценку) параметров различных типов СЛП за приемлемое время (фактически, сразу) и с достаточной точностью.

Такой подход определил структуру и содержание исследований первой главы. Вначале, рассматривается спектр наиболее известных и часто применяемых на практике систем мониторинга различных геофизических сред. При этом для обеспечения полноты анализа, рассматриваются геофизические и геологические комплексы и системы мониторинга, в состав которых системы мониторинга СЛП могут входить как составная часть.

Установлено, что в геофизике, наиболее близкой предметной области мониторинга СЛП, одним из наиболее рациональных является использование возможностей метода георадиолокации, который целесообразно распространить в виде методической основы

построения мобильной системы радиомониторинга. Анализ теоретических и практических результатов по созданию и эксплуатации существующих систем мониторинга позволил сформулировать ряд задач, решение которых позволяет осуществить перенос (транспарентность) основных результатов построения и применения стационарных георадиолокаторов на проблему создания носимой системы мониторинга СЛП «неподготовленным» потребителем. Их решение позволило сделать ввод о фактически безальтернативном выборе в пользу малогабаритных автономных систем радиомониторинга, с массой не более 5 кг, имеющие «рабочую дальность» измерения СЛП в пределах 2-5 м и допускающие их применение как в носимом режиме (измерения «с рук»), так и их установку на специальные транспортные средства.

Указано, что радиофизические аспекты взаимодействия зондирующих сигналов (полей возбуждения) и СЛП при построении систем радиомониторинга являются критически важными, поэтому на этапе определения технического облика мобильной системы радиомониторинга допустимо использования упрощенных, феноменологических («инженерных») методов и математических моделей.

Технический и функциональный облик системы радиомониторинга СЛП был определён как результат структурно-параметрического синтеза автономной мобильной информационной системы на основе использования передовых однокристалльных решений единого приёмопередающего модуля, в котором реализована перспективная технология параметрической синхронной последовательности СКИ сигналов, длительностью от 300 до 600 пс. Наиболее полно, всей совокупности требований, удовлетворяет

Установлено, что наиболее полно, всей совокупности требований к источнику информации об СЛП, удовлетворяет решение на основе использования однокристалльного приёмо-передающего модуля (приемопередатчик) серии NVA6100 компании Novelda (Норвегия), который работает в частотном диапазоне 1-10 ГГц и позволяет генерировать сверхкороткие импульсы с формой 1-й производной функции Гаусса и длительностью около 0,3 нс.

Выходная частота повторения импульсов генератора может изменяться в широких пределах и принимает значения 1,5 МГц, 3 МГц, 6 МГц, 12 МГц, 24 МГц, 48 МГц и 100 МГц. Данный набор частот повторения импульсов получается делением частоты основного тактового сигнала MCLK, который составляет 100 МГц. Спектральная плотность мощности однокристалльного приемопередатчика NVA6000 составляет -55...-50 дБ/МГц.

Для оценки возможностей реализации этого технического решения в составе мобильной системы радиомониторинга СЛП, была разработана математическая модель тракта распространения импульсных СШП сигналов в снежной и ледяной среде. Модель основана на анализе коэффициентов отражения слоистых сред в заданной полосе частот СШП сигнала. В результате моделирования определены значения модуля коэффициента отражения от слоев снега и льда, показанные на Рисунке 1, а также песка и торфа в различных их комбинациях слоёв.

Эти результаты позволили оценить потенциальные энергетические возможности системы СКИ-мониторинга, которые позволили утверждать о технической реализуемости системы с

заданными функциональными возможностями и техническими параметрами и характеристиками.

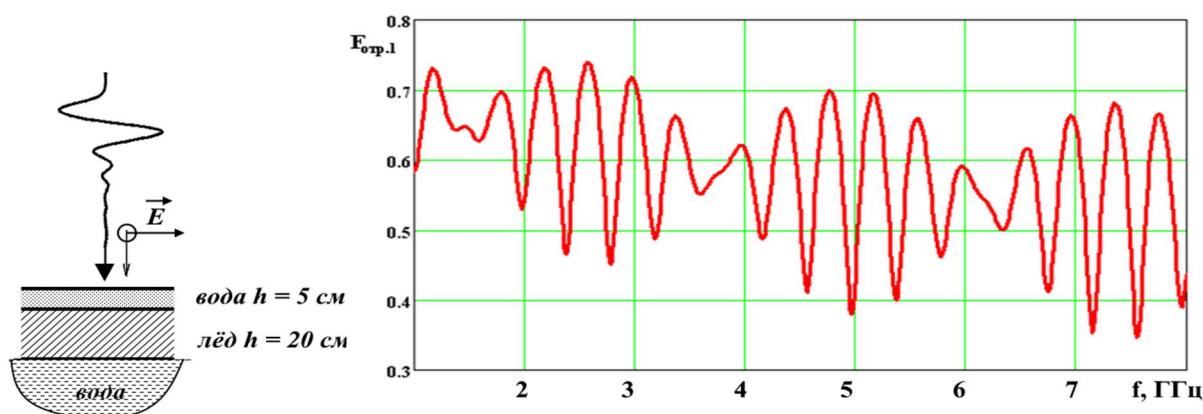


Рисунок 1. Зависимость модуля коэффициента отражения слоев снега и льда на поверхности воды в диапазоне частот 1..8 ГГц

В Главе 2 рассмотрены алгоритмы обработки информации мобильной СКИ-системы радиомониторинга СЛП.

Выбранный источник информации о параметрах СЛП, формирует в устройстве обработки сигналов временную импульсную последовательность, которая оказывается существенно обогащена спектрально-временными составляющими, относительно зондирующих сигналов. В этом и состоит главная (и основная) «плата» за использование микроминиатюрного СКИ-решения в мобильной системе измерения параметров СЛП.

Иными словами, основная проблема в такой системе, в отличие от классических радиосистем, состоит в нетривиальном подходе к выделению информативных признаков полезного сигнала на фоне интенсивных нестационарных помех, возникающих из-за сложных интерференционных явлений взаимодействия СШП воздействий и сложных сред, к числу которых и относятся СЛП.

Установлено, что построение блока обработки информации СКИ-системы радиомониторинга определения параметров СЛП рационально в виде двухуровневой (первичная и вторичная обработка сигнала) аппаратно-алгоритмической структуры.

На первом уровне формируется цифровая импульсная последовательность данных, содержащий всю информацию о структуре и параметрах СЛП, которая образуется в результате преобразования аналогового сигнала в цифровой. При этом, в качестве аппаратной платформы используется технология управляемой пикосекундной (6..8 пс) синхронной дискретизации входных сигналов, обеспечивающей программное управление режимами дискретизации сигналов в зависимости от типа и условий измерений параметров СЛП. Такие возможности, в совокупности с однокристальным форматом устройства, обеспечивают преимущества СКИ-системам радиомониторинга по сравнению с традиционными импульсными системами, среди которых наиболее значимыми являются: низкое энергопотребление, малые габариты и высокая разрешающая способность.

Алгоритм первичной обработки основан на принципе синхронного накопления большого числа поступающих с выхода СШП антенны сверхкоротких импульсов. В приёмнике реализовано накопление N импульсов вида:

$$s_u(t) = U_{\text{пр}}(t), 0 \leq t \leq T,$$

где $U_{\text{пр}}(t)$ - напряжение принятого СШП антенной СКИ сигнала; T - период повторения импульсов; $u = 0, 1, \dots, N_{\text{имп}} - 1$ - индекс принимаемого СКИ сигнала.

На первом этапе задается ожидаемый диапазон амплитуд входного сигнала в пределах от

s_{min} до s_{max} , которые соответствуют значениям минимального и максимального значений порога ЦАП в микросхеме NVA6100. Они устанавливают границы для сдвига уровней и ограничивают возможный диапазон амплитуды входного СКИ сигнала. Этот диапазон был выбран как результат математического моделирования отраженных от типовых целей сигналов на требуемых дальностях обнаружения СКИ для конкретного типа СЛП.

На втором, идёт формирование массива пороговых уровней сигнала, причем число порогов должно быть равно числу накапливаемых импульсов $N_{пор.} = N_{имп.}$:

$$s_{пор.}[u] = s_{min}, \Delta s = \frac{s_{max} - s_{min}}{N_{пор.}},$$

где Δs - шаг квантования амплитуды СКИ сигнала; $u = 0..N_{пор.} - 1$ - индекс порогового значения для принимаемого импульса.

На третьем этапе организуется цикл по числу принимаемых импульсов $u = 0, 1, \dots, N_{имп.} - 1$. Каждый принимаемый импульс разбивается во времени на 512 дискретизаторов (сэмплеров), каждый из которых соответствует усредненному уровню сигнала на интервале дискретизации по времени $\Delta t = 26$ пс.

В результате принимаемый импульс представляется в виде массива $m = 512$ дискретных значений на интервале времени $T_d = m \cdot \Delta t$:

$$s_d[k] = \frac{1}{N_d} \sum_{k=0}^{N_d} s_u(t_j), \quad k \cdot \Delta t \leq t_j \leq (k+1) \cdot \Delta t,$$

где N_d - число отсчетов сигнала, попадающих в интервал дискретизации по времени Δt ; $t_j = 0, 1, \dots, T$ - временной отсчет принимаемого импульса; $j = 0, 1, \dots, N_{sig}$ - число дискретных отсчетов импульса за период повторения; $k = 0, 1, \dots, m$ - номер дискретизатора из $m = 512$ дискретизаторов.

Для интервала дискретизации $\Delta t = 26$ пс и количества дискретизаторов 512 временной интервал, на котором происходит восстановление формы сигнала определяется как $T_m = m \cdot \Delta t = 13,31$ нс. Для реализации накопления импульсов формируется массив счетчиков $M[k]$, $0 \leq k \leq m$, в котором будут сохраняться значения числа превышений дискретных значений сигнала $s_d[k]$ установленных пороговых значений. Индекс каждого значения счетчика k соответствует номеру дискретизатора. В цикле по числу принимаемых импульсов $u = 0, 1, \dots, N_{имп.} - 1$ происходит заполнение массива счетчиков превышений дискретных значений сигнала порогового значения для каждого принятого импульса:

$$M[k] = M[k] + 1, \text{ если } s_d[k] \geq s_{пор.}[u].$$

После окончания накопления $N_{имп.}$ импульсов $M[k]$ представляет собой форму восстановленного СКИ сигнала, который нормируется к максимуму числа превышений порога относительно среднего значения числа его превышений за все время накопления.

Применение алгоритма первичной обработки позволяет преобразовать входной сигналов мобильной системы в унифицированный информационный поток данных на входе блока вторичной обработки по соответствующему алгоритму, в котором и формируется оценка толщины СЛП.

Вариация алгоритмов блока вторичной обработки (БВО) по совокупности параметров (структурно-параметрический синтез) позволяет сделать обоснованный выбор наиболее рационального алгоритма для его реализации на программно-алгоритмической платформе мобильной системы радиомониторинга.

В качестве базовой процедуры БВО рассматривается применение алгоритмов скользящего среднего для выделения толщины СЛП, для которой сигнал от многослойного СЛП представляется в виде

$$r_k(t) = \sum_{i=1}^N a_{ki} s(t - \tau_{ki}) + n(t),$$

где $s(t)$ - зондирующий сигнал, $n(t)$ - шумовая составляющая, k - индекс, соответствующий k -му принятому сигналу, t - время, затраченное на прием сигналов. Также полагается, что сигнал проходит N путей из-за многослойности среды и при прохождении каждого слоя ослабляется на a_{ki} и задерживается на τ_{ki} .

Простейшим методом вычитания фоновых шумов в заранее неизвестной шумовой обстановке, является экспоненциально взвешенное скользящее среднее (ЕМА – exponential moving average), определяемая по формулам:

$$c_k(t) = \alpha c_{k-1}(t) + (1 - \alpha)r_k(t); \quad y_k(t) = r_k(t) - c_k(t),$$

где $c_k(t)$ – рекурсивно накопленное значение скользящей средней на k -ом шаге; $r_k(t)$ – принятый сигнал; $y_k(t)$ – сигнал после вычитания среднего; $\alpha \in [0; 1]$ – коэффициент скользящей средней, отражающий вклад предыдущего накопления в новое значение скользящей средней на k -ом шаге, методика подбора которого является эмпирической.

Показано, что необходима реализация адаптивной подстройки коэффициента α в виде ЕМА-алгоритма, реализующий последовательность операций:

$$y_k(t) = r_k(t) - c_k(t); \quad d_k(t) = \frac{\min(\tilde{r}_k(t), \tilde{y}_k(t))}{\tilde{r}_k(t)};$$

$$\alpha_k(t) = \alpha_{min} + (\alpha_{max} - \alpha_{min})d_k(t); \quad c_{k+1}(t) = \alpha_k(t)c_k(t) + (1 - \alpha_k(t))r_k(t),$$

где α_{max} и α_{min} – наперед заданные значения, ограничивающие коэффициент ЕМА в определенных пределах; $y_k(t)$ – сигнал, очищенный от шумовой компоненты; $d_k(t)$ – величина, зависящая от времени, определяющая удаленность объекта от антенн радарного модуля; $\tilde{r}_k(t)$ и $\tilde{y}_k(t)$ соответствуют преобразованию Гильберта сигналов $r_k(t)$ и $y_k(t)$ соответственно.

Для дальнейшего повышения отношения сигнал-шум (ОСШ) и удаления шумовых компонент, имеющих случайный и непостоянный во времени характер (тряска прибора при перемещении, внутренние случайные шумы радарного модуля и т.д.), алгоритм простого скользящего среднего (например, ЕМА) можно обобщить в виде треугольной скользящей средней (ТМА), что заключается в рекурсивном использовании простой скользящей средней несколько раз вида

$$TMA[0][k, j] = SMA[k, j],$$

$$TMA[1][k, j] = SMA(SMA[0]); \dots; TMA[n][k, j] = SMA(SMA[n]),$$

где $SMA[k, j]$ – значение простой скользящей средней; $TMA[n][k, j]$ – значение ТМА для n -го шага, которое является параметром и называется «плечом» алгоритма ТМА.

Показано, что ТМА-алгоритм позволяет повысить ОСШ относительно однократного прогона скользящей средней, но при этом кратно повышает вычислительные затраты, в зависимости от выбора значения «плеча» ТМА. Тем не менее, этот алгоритм, в целом, состоит из элементарных операций и может быть эффективно реализован, в сравнении, например, с БПФ или вейвлет-анализом, даже на встраиваемых маломощных микроконтроллерах.

Толщина СЛП после обработки ТМА-алгоритмом будет определяться как

$$H = k_{зам} \frac{c\Delta\tau}{2}; \quad \Delta\tau = \Delta T(k_2 - k_1),$$

где H – оцениваемая толщина СЛП; $k_{зам}$ – поправочный коэффициент, определяемый эмпирически для конкретной местности из контрольных замеров, зависящий от электрофизических свойств СЛП; c – скорость света в вакууме; $\Delta\tau$ – временная задержка распространения сигнала в СЛП; $\Delta T = 26, 52, 216$ пс – внутреннее расстояние по времени между двумя соседними значениями дискретов радарного модуля. Конкретное значение выбирается в зависимости от внутренних настроек радарного модуля; k_1, k_2 – номера отсчетов, соответствующих первому и второму локальным максимумам сигнала, отраженного от СЛП.

Результаты обработки сигнала, полученного с ледовой переправы через реку Ванавара представлены на Рисунке 2. Здесь слева представлена радарограмма сигнала, полученная прибором «Пикор-Лёд», а справа - график сигнала для точки 1, показанной красной линией на радарограмме.

Следует отметить, что при верификации результатов, реальная толщина льда составила 60 см, а при оценке толщины ТМА-алгоритмом, было получено значение 63 см, что позволяет судить о хорошей (погрешность менее 5%) точности оценки толщины ледового покрова.

Если в ЕМА-алгоритме после выбора оптимального значения коэффициента α остается только выбрать оптимальный порог детектора, т.е. одномерная задача «порог-точность», то учёт

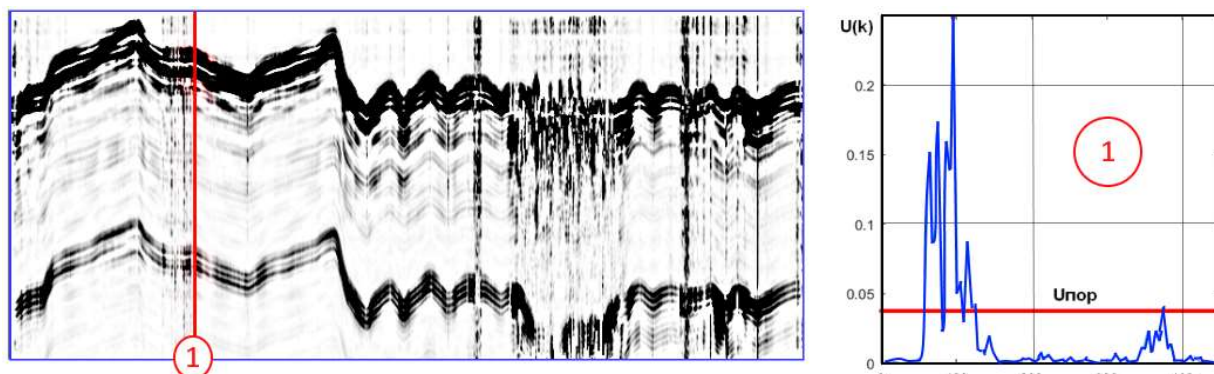


Рисунок 2. Результат обработки сигнала на ледовой переправе р. Ванавара

параметра «плечо ТМА» позволяет оптимизировать алгоритм по уже по трём параметрам «порог-плечо-точность», что соответствует задаче двумерной оптимизации. На Рисунке 3 слева представлена трёхмерная диаграмма погрешностей измерения толщины СЛП ледовой переправы через реку Ванавара как функция трёх координат «плечо ТМА, порог, точность (относительная погрешность)», а справа эксперимента по оценке толщины снежного покрова в Приэльбрусье. Приемлемые значения точности (ошибка менее 10%) соответствуют синему цвету, желтый цвет отражает значения погрешности оценки свыше 60%.

Анализ результатов для толщины СЛП ледовой переправы показал, что рациональное значение порога для точности не ниже 10% является 0,13, а минимальное значение «плеча ТМА» (что соответствует наименьшим вычислительным затратам) равно 2. Фактически, это означает, что при наименьшем выборе порогового значения, алгоритм ТМА не представляет какого-либо выигрыша относительно простых скользящих средних.

Ситуация в корне меняется при измерении отдельно снежного или ледового покрова, накрытого снегом, левый рисунок. Анализ представленных результатов показал, что здесь не наблюдается «явно выделенного значения порога», по которому можно «отсечь» минимальное значение «плеча ТМА», как в случае с ледовой переправой, что объясняется существенно большей дисперсией значений электрофизических параметров снега по сравнению с монолитным льдом.

В силу того, что как правило, ледовая переправа покрыта слоем снега, нельзя говорить отдельно об измерении толщины снега и льда. Возможно только говорить об оценке толщины всей СЛП в целом. Однако, данный алгоритм не дает возможности оценки самой структуры СЛП, а именно: количества слоёв и их параметры и поэтому возникает необходимость поиска и исследования таких алгоритмов, которые позволяют оценивать и структуру СЛП и значения параметров всех её слоёв.

Преодоление основного недостатка простейших алгоритмов вторичной обработки сигналов реализовано путём применения алгоритмов кратномасштабного анализа радарограмм для выделения первичных информативных признаков и грубой оценки толщины СЛП в реальном масштабе времени. Эта методика основана на технологии вейвлет декомпозиции сигналов и относится к числу наиболее перспективных в части удаления шумовых компонент радарограммы, а также выделения информативных признаков сигнала.

Здесь радарограмма представляется дискретной моделью с блочно-матричной формой в виде двумерной совокупности отсчётов по дальности N_1 и по ансамблю реализаций N_2

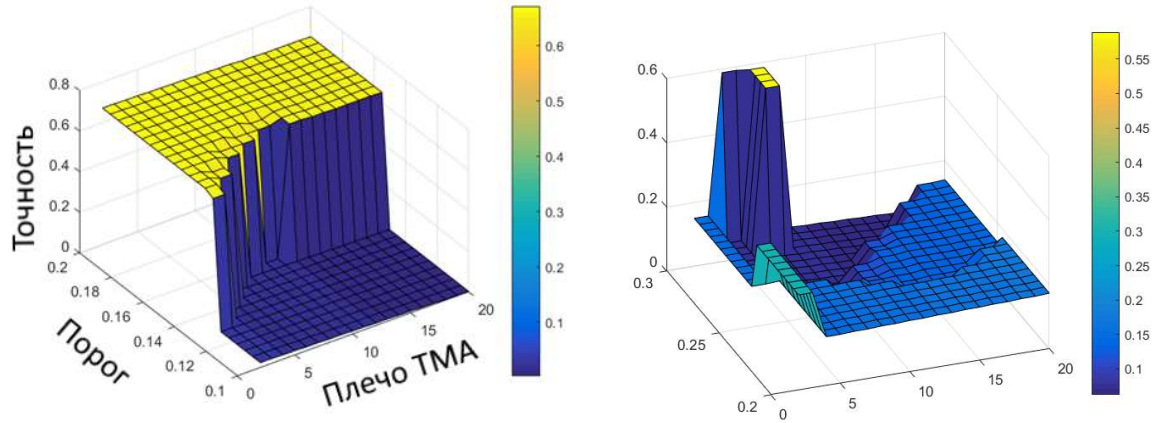


Рисунок 3. Трехмерные диаграммы погрешностей измерения толщины СЛП

$$r(n_1, n_2) \Rightarrow \vec{S}: [S] = \{\vec{S}_0, \dots, \vec{S}_{N_2}\}, \quad 0 \leq n_i \leq N_i - 1, i = 1, 2.$$

При этом $\vec{S} = \vec{S}_1 + \vec{S}_2 + \vec{S}_3$ представляет собой сумму трех структурных составляющих: мощная низкочастотная помеха $\vec{S}_n^{(1)}$, маломощный информативный сигнал $\vec{S}_u^{(2)}$ и шумы измерений $\vec{S}_f^{(3)}$.

Компенсация помехи проводится путём её скользящего усреднения по ансамблю сигналов (дискретная свёртка) $\vec{S}_n^{(1)} = \sum_{k=0}^{K-1} h(k) \vec{S}_{n_2-k}$, где K – количество сигналов в ансамбле, по которым выполняют усреднение; $h(k)$ – веса усреднения, определяемые моделью сглаживания. В случае простой модели скользящей средней $h(k) = 1/K$, если $0 \leq k \leq K - 1$ и ноль в противном случае, а при экспоненциальном сглаживании $h(k) = \alpha(1 - \alpha)^k$, где $\alpha = 2/(K + 1)$ – параметр сглаживания. Номер сигнала n в ансамбле, с которым ассоциируется результат усреднения, выбирался по схеме «прогнозирование вперед». В этом случае $n = n_2$. Центрированной оценке сигнала помехи отвечает выбор $n = n_2 - (K - 1)/2$ при условии, что K – нечетное число.

Показано, что по сравнению с процедурой дискретной свертки более эффективным в вычислительном отношении является эквивалентное представление экспоненциальной средней в виде уравнения, рекурсивного по ансамблю сигналов $\vec{S}_n^{(1)} = \alpha \vec{S}_{n_2} + (1 - \alpha) \vec{S}_{n-1}^{(1)}$. В этом случае зашумленный информативный сигнал можно определить как $\vec{S}_{n_2}^{(2)} + \vec{S}_{n_2}^{(3)} = \vec{S}_{n_2} - \vec{S}_n^{(1)}$.

На Рисунке. 4,а представлены результаты выделения зашумленного информативного сигнала с помощью стандартной процедуры простого скользящего усреднения по ансамблю из $K = 33$ сигналов $s_{223}(n_1), \dots, s_{255}(n_1)$, полученных в результате зондирования речного льда толщиной 60 см видеоимпульсами длительностью 600 пс.

Обобщением процедуры усреднения по ансамблю сигналов была использована модель усреднения/сглаживания данных с помощью пространственно-временного цифрового фильтра (ЦФ) вида

$$s_x(t) = \sum_{k_1=0}^{K_1-1} \sum_{k_2=0}^{K_2-1} h(k_1, k_2) s_{n_2-k_2}(n_1 - k_1),$$

где пространственная координата и момент времени ассоциировались со значениями $x = n_2 \Delta x$ и

$t = n_1 \Delta t$ в случае схемы «прогнозирования вперед», тогда центрированной оценке сигнала помехи соответствует выбор

$$x = \{n_2 - (K_2 - 1)/2\} \Delta x \text{ и } t = \{n_1 - (K_1 - 1)/2\} \Delta t.$$

Среди совокупности методов структурного анализа сигналов сделан выбор модели импульсной характеристики $h(k_1, k_2)$ пространственно-временного ЦФ в пользу эффективной процедуры кратномасштабного анализа (КМА) радарограммы в базисе дискретного вейвлет преобразования. В одномерном варианте использовалось частотно - временное разложение сигнала $s_{n_2}(n_1)$, при $0 \leq n_1 \leq N_1 - 1$ для фиксированного значения пространственной координаты $x = n_2 \Delta x$ вида $s_{n_2}(n_1) = \sum_{m=1}^M d_{n_2}(n_1, m) + a_{n_2}(n_1, M) + e_{n_2}(n_1, M)$, где M - количество масштабов разложения сигнала по дискретным частотам $K_m = 2^{M-m}$, согласованное с объемом выборки $N_1 \geq 2^M$; $e_{n_2}(n_1, M)$ - ошибка аппроксимации сигнала. При этом, детализирующая составляющая КМА на масштабе m представляет собой дискретную свертку

$$d_{n_2}(n_1, m) = \sqrt{K_m} \sum_{k=0}^{K_m-1} D_{n_2}(k, m) \psi(K_m n_1 - k)$$

отсчетов $D_{n_2}(k, m)$, $0 \leq k \leq K_m - 1$ импульсной характеристики идеального ЦФ с «материнским» вейвлетом $\psi(t)$, а высокочастотные компоненты сигнала $s_{n_2}(n_1)$ были получены на начальных масштабах разложения $m = 1, 2, \dots$ за счет сдвига и сжатия по времени вейвлета $\psi(t)$.

Низкочастотная компонента сигнала $s_{n_2}(n_1)$ в виде аппроксимирующей составляющей $a_{n_2}(n_1, M) = A_{n_2}(0, M) \phi(n_1)$, где $\phi(n_1) = \phi(n_1 \Delta t)$ - масштабирующая функция, определялась на заключительном масштабе M разложения. Выбор модели $\phi(n_1)$ обеспечивает свойства частотно - временной локализации и ортонормированности альтернативной системы координатных функций $\sqrt{2^{-m}} \phi(2^{-m} n_1 - k)$, $m = 1, 2, \dots$; $k = 0, 1, 2, \dots$, что позволяет формировать аппроксимирующую компоненту $a_{n_2}(n_1, m)$ сигнала $s_{n_2}(n_1)$ на текущем масштабе m в виде $a_{n_2}(n_1, m) = \sqrt{2^{-m}} \sum_{k=0}^{K_m-1} A_{n_2}(k, m) \phi(2^{-m} n_1 - k)$, где $A_{n_2}(k, m)$, $0 \leq k \leq K_m - 1$ - отсчеты импульсной характеристики идеального низкочастотного ЦФ.

На Рисунке 4,б представлен ансамбль сигналов от СЛП автомобильной переправы р. Ванавара, однако в отличие от реализаций на рис. 4.а, при её формировании оператор поднимал и опускал радар «ПИКОР» с небольшими отклонениями от нормали к поверхности, при этом ансамбль содержал $N_2 = 590$ реализаций сигналов по $N_1 = 512$ отсчетов. Шаг временной дискретизации составил $\Delta t = 27,3921$ пс. На рис. 4.в представлен результат КМА реконструкции пятидесятого $n_2 = 50$ сигнала (толстая линия в масштабе левой шкалы) из указанного выше ансамбля с помощью трех детализирующих компонент $d_{50}(n_1, m)$, $m = 1, 2, 3$ и аппроксимирующей составляющей $a_{50}(n_1, 3)$, $0 \leq n_1 \leq 511$ в базисе вейвлета Добеши 7-го порядка. Ошибка реконструкции (тонкая линия в масштабе правой шкалы) $e_{50}(n_1, 3)$ не превышает по абсолютной величине значения 0,0006.

Первую $d1: d_{50}(n_1, 1)$ и вторую $d2: d_{50}(n_1, 2)$ компоненты интерпретировались как информативные сигналы для оценки положения отражающих границ и толщины льда (рис. 4.в), а аппроксимирующая составляющая приобретает смысл оценки мощной помехи, присутствующей в измеренных данных, представленных на рис. (4.г).

Показано, что применение вейвлета Добеши 7-го порядка для разложения сигнала и выделения информативной составляющей само по себе дает существенно большие погрешности измерений (свыше 10%) для измерения толщин СЛП, чем алгоритмы ТМА, но может быть использовано для «грубой» оценки параметров СЛП, а также как входные данные для алгоритмов выделения информативной составляющей и алгоритма кластеризации.

Для преодоления недостатков алгоритма ТМА в части определения структуры СЛП

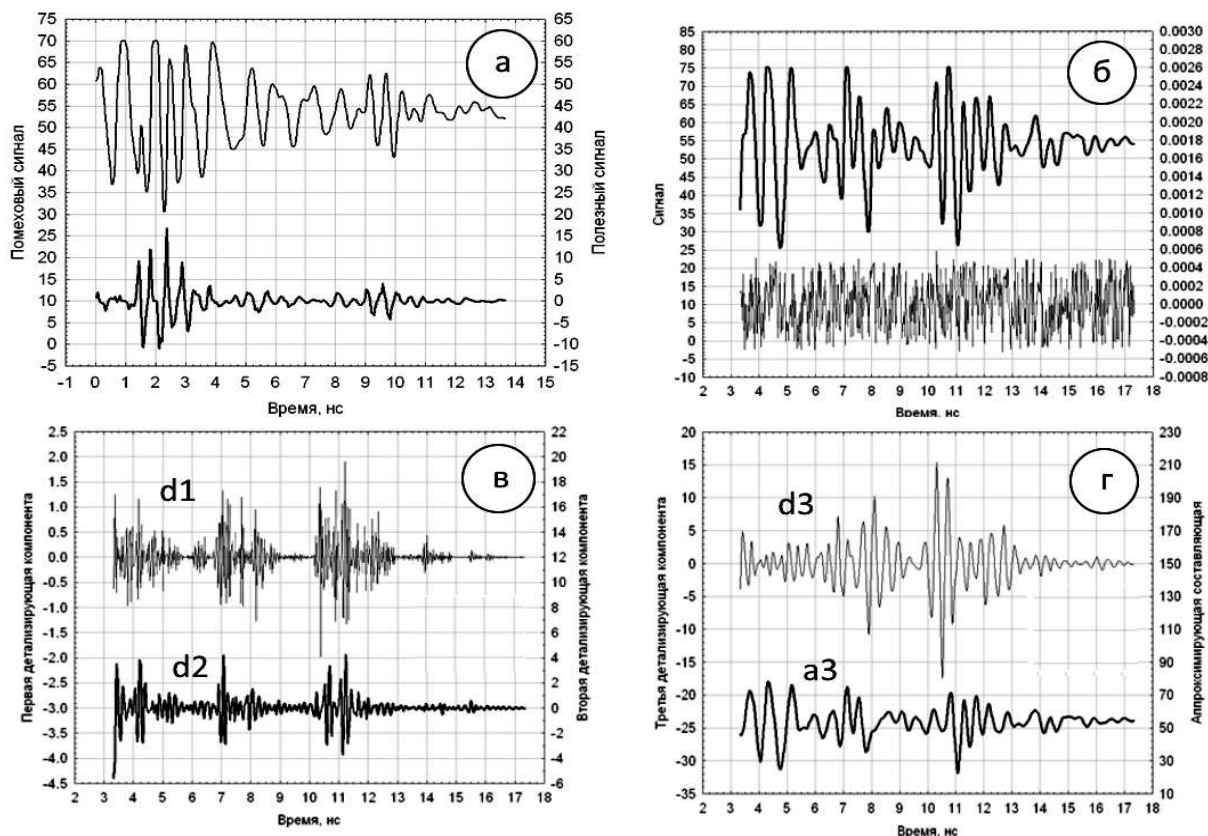


Рисунок 4 – Результаты структурного анализа радарограммы

предложен способ добавления к процедуре Вейвлет-декомпозиции сигнала связки из двух алгоритмов обработки: ASH-алгоритм (Average Shifted Histogram) гистограммы сглаженной сдвигом, для выделения информативной составляющей о границах СЛП и алгоритма к-внутригрупповых средних (k-means) для непосредственного выделения границ СЛП для их последующей оценки.

В соответствии с этими процедурами, вначале маркируются значения яркости (интенсивности) радарограммы, по которым строится гистограмма их распределения, которая в свою очередь сглаживается по ASH-алгоритму окном данных, размер которого является параметром процедуры. Пример гистограммы, сглаженной сдвигом для переправы Ванавара, приведён на рисунке 5,а, полученные данные были использованы для «отсечения» на диаграмме рассеяния (Рисунок 5,б) для реализаций с 522 по 524 радарограммы ледовой переправы Ванавара неинформативной части сигнала, что обозначено пунктирными линиями, где информативной составляющей принимаются значения, не попавшие внутрь пунктирных линий.

Процедура кластеризации k-means применялась как способ строгого определения координат слоев в СЛП, сущность которого заключается в минимизации суммарного

квадратичного отклонения точек кластеров от их центров, которые определяются как центры

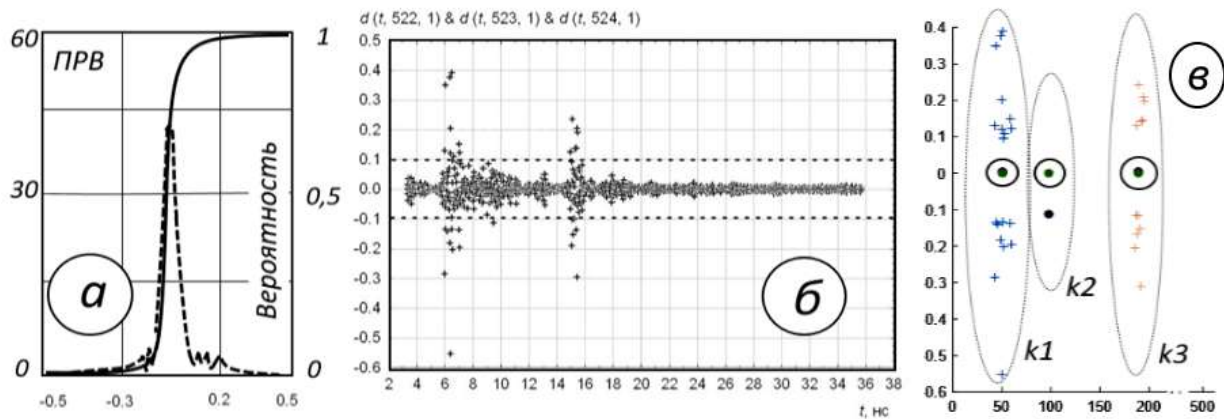


Рис. 5. Результат кластеризации данных алгоритмом k-means для трех заданных кластеров. Кластеры выделены различными цветами.

масс всех векторов кластера.

Отмечены основные недостатки алгоритма k-means: число кластеров надо знать заранее и его реализация является наиболее ресурсоемкой. На Рисунке 5, в представлено распределение кластеров, число которых 3 было задано. Толщины слоев СЛП определяются по координатам центроидов кластеров. Здесь отчетливо видны 2 границы СЛП, равно как и водяная прослойка между слоями.

В Главе 3 с наиболее общих позиций, предложен новый метод оценки структуры и параметров СЛП на основе рекурсивного миграционного преобразования СКИ-радарограммы.

Установлено, что алгоритмы обработки информации в мобильной СКИ-системе мониторинга, основанные на различных методических подходах, подробно рассмотренных в Главе 2, отработаны, апробированы и реализованы в составе законченных промышленных изделий серии «Пикор». Однако, практика использования этих систем показала, что погрешность измерения толщины СЛП существенно зависит от структуры СЛП в целом и отдельных его слоёв. Иными словами, по «сложным» СЛП предложенные во второй главе алгоритмы обработки информации дают высокую погрешность (низкую точность). Поэтому в третьей главе предложен рекурсивный алгоритм миграционного преобразования радарограммы потенциально позволяющий обеспечить высокую (заданную) точность определения параметров СЛП.

В основу анализа положена дискретная модель рассеянного средой волнового поля, заданная на ортогональном растре

$$f(n_1, n_2, n_3) = f(n_1 \Delta t, n_2 \Delta x, n_3 \Delta z), 0 \leq n_i \leq N_i - 1, i = 1, 2, 3,$$

где $\Delta t, \Delta x, \Delta z$ - интервалы временной и пространственной дискретизации, согласованные по теореме отсчетов Котельникова – Шеннона с верхними граничными частотами Найквиста $W_i, i = 1, 2, 3$. Соответствующая этому полю его реконструкция

$$\tilde{f}(t, x, z) = \sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} \sum_{n_3=0}^{N_3-1} f(n_1, n_2, n_3) \phi(t - n_1 \Delta t, x - n_2 \Delta x, z - n_3 \Delta z)$$

с помощью оптимальной интерполирующей функции

$$\phi(t, x, z) = \frac{\sin(W_1 t)}{W_1 t} \frac{\sin(W_2 x)}{W_2 x} \frac{\sin(W_3 z)}{W_3 z}$$

с нулевой или приемлемо малой ошибкой $e(t, x, z) = \tilde{f}(t, x, z) - f(t, x, z)$ представляет аддитивную конструкцию реакций элементарных отражателей однородной среды, удобной для применения алгоритмов миграции сигналов на основе суммирования амплитуд сигналов каждого

рассеивателя вдоль дифракционной гиперболы или методе Столта - восстановления геофизического изображения зондируемой среды. Эти алгоритмы устойчивы к шумам измерений, не вносят значимых интерференционных искажений в процессе преобразования.

При этом радарограмма представляет собой двумерное сечение матрицы $r(t, x) = f(t, x, z = 0)$, т. е. содержит результаты экспериментальных измерений поля на поверхности СЛП (среды) при $z = 0$. Миграционное преобразование радарограммы $r(t, x)$ позволяет восстановить волновое поле в вертикальном разрезе среды $p(x, z) = f(t = 0, x, z)$ для начального момента времени $t = 0$.

Показано, что волновое поле $f(t, x, z)$ на глубине z можно получить с помощью сдвига гармоник радарограммы $r(t, x) = f(t, x, z = 0)$ на величину накопленной фазы. Миграционное преобразование методом фазового сдвига предполагает вычисление обратного непрерывного преобразования Фурье спектрограммы поля с помощью дисперсионного соотношения, учитывающие свойства конкретного слоя. При этом Спектрограмма, является результатом фазовых сдвигов спектра Фурье радарограммы для текущих глубин z и последующего интегрирования по частоте.

Методически последовательно представлены все этапы реализации метода, при этом показано, что с методической точки зрения, радиофизическая интерпретация нелинейного отображения Столта состоит в преобразовании радарограммы двумерным фильтром.

Установлено, что в случае многослойной среды СЛП, в которой скорость распространения волны не зависит от горизонтальной координаты и изменяется локально постоянно от слоя к слою, рациональным является применение миграционного отображения Газдага.

Миграционное преобразование радарограммы с помощью алгоритма фазового сдвига предполагает наличие априорной информации о распределении скорости распространения волны по глубине СЛП, которая формируется на этапе предварительной обработки данных с помощью методов структурного анализа радарограммы, представленных в Главе 2.

Получены основные расчётные соотношения методов Столта и Газдага, указаны основные особенности их применения и алгоритмической реализации в виде рекурсивных процедур.

Проведена верификация алгоритмических процедур на основе известных (альтернативных) данных анализа сейсмических и геофизических полей, что показало устойчивую сходимость модельных данных с данными, полученными с помощью разработанных алгоритмов.

Установлено, что методы исследования структуры и параметров СЛП включая неоднородные среды, основанные на реализации миграционных преобразований сложных радиофизических процессов дают наиболее полную точную информацию об СЛП, но при этом являются наиболее требовательными как к качеству исходных данных об СЛП, так и к ресурсам системы радиомониторинга, что в мобильных вариантах реализации может быть недостижимым.

В Главе 4 изложены основные результаты экспериментальных исследований функциональных, технических и алгоритмических решений при создании мобильных СКИ-систем мониторинга СЛП.

Представлены описания трёх типов мобильных комплексов СКИ-мониторинга СЛП, построенных на основе общей однокристалльной платформы на основе микросхемы серии NVA6100 и условия их применения по различным типам СЛП.

В блоках вторичной обработки сигналов были реализованы алгоритмы, представленные в Главах 2 и 3.

Представлен анализ результатов экспериментальных исследований по измерению толщины льда в селе Ванавара Красноярского края, которые положили начало работ по измерениям и оценке структуры ледовых переправ с помощью мобильных СКИ-систем мониторинга СЛП.

Вторым крупным экспериментом являлся цикл натурных измерений толщины льда совместно с центром ГИМС МЧС России по г. Москве в движении с применением судна на воздушной подушке «ХИВУС».

На основании результатов испытаний были разработаны методические рекомендации по

применению прибора от Академии ГПС МЧС России, где подробно указан способ применения прибора, как при пешем обследовании ледовых переправ, так и при монтаже прибора на транспортное средство, а также последовательность работы с программным обеспечением комплекса.

В рамках испытаний мобильной системы по бесконтактному определению толщины снежного покрова, были проведены испытания на базе Эльбрусского военизированного противолавинного отряда ФГБУ «СКВС».

В рамках испытаний были опробованы алгоритмы п.2.4-2.5 данной работы. Представлены результаты измерений и их анализ. В результате, обоснована методика применения всех алгоритмов, представленных в работе, с учетом конкретного сценария использования, при этом выбор алгоритмов влияет на установку начальных параметров блока обработки информации системы СКИ-мониторинга СЛП.

В заключительном разделе главы представлены результаты анализа быстродействия алгоритмов систем СКИ-мониторинга СЛП.

Оценка вычислительной эффективности алгоритмов рассматривается не с точки зрения стандартных параметров, таких как: количество элементарных операций и количество необходимой памяти процессора, а с точки зрения разработки конечного устройства, а именно: времени выполнения алгоритма при фиксированной элементной базе блока обработки информации, массогабаритные характеристики, энергопотребление и различные варианты реализации процессорного блока системы.

Приведены результаты экспериментальных исследований СКИ-систем с различными параметрами и характеристиками, сформулированы рекомендации по их выбору.

В общих выводах и заключениях изложены основные результаты проведенных исследований, выполненных разработок и экспериментов.

В приложении приведены основные протоколы испытаний приборов, реализующих алгоритмы, описанные в данной работе

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Определено рациональное построение средства мобильного дистанционного мониторинга СЛП как малогабаритная носимая радиолокационная система на основе микросхемы NVA6100, формирующей последовательность сверхкоротких импульсов с управляемыми параметрами.

2. Для определения потенциальных характеристик системы СКИ-мониторинга разработана математическая модель расчёта электрофизических параметров СЛП при использовании сверхширокополосных сигналов, применение которой показало, что модуль коэффициента отражения от слоев снега и льда на поверхности воды изменяется в пределах от 0,37 до 0,72, т.е. во всей полосе частот большая часть энергии отражается от слоя снега, при этом выраженная дисперсия коэффициента отражения по частоте, характерна для водосодержащих сред, а коэффициент отражения от слоев песка и торфа изменяется в пределах от 0,38 до 0,6.

3. Разработан вычислительно эффективный алгоритм оценки толщины СЛП на базе алгоритмов скользящей средней (ТМА-алгоритм), требующий выполнения процедуры его калибровки на месте проведения измерений параметров СЛП.

4. Разработан и исследован алгоритм кратномасштабного анализа радарограммы, с целью определения толщины СЛП, применение которого позволило устранить недостатки ЕМА и ТМА алгоритмов простой скользящей средней как невозможности анализа структуры СЛП в виде добавления Вейвлет-декомпозиции сигналов в виде комбинации двух алгоритмов обработки: гистограммы сглаженной сдвигом, для выделения информативной составляющей о границах СЛП и алгоритма к-внутригрупповых средних для непосредственного выделения границ СЛП.

5. Показано, что рациональным, является реализация вторичной обработки СКИ-системы мобильного радиомониторинга СЛП как законченной последовательности обработки сигналов вида: «предобработка (вейвлет-декомпозиция) – выделение полезной составляющей

(ASH) – выделение границ (k-means)», при этом точность определения границ на последнем этапе (61 см при реальной толщине 60 см) является более высокой, чем у алгоритмов скользящей средней, а также удален недостаток, связанный с необходимостью предварительных замеров и калибровок, присущий алгоритмам скользящей средней и в некоторой степени выделения структуры СЛП с использованием априорных данных о ней.

6. На основе дискретной цифровой модели зондирующего сигнала (поля возбуждения) системы СКИ-мониторинга предложен механизм анализа структуры и оценки параметров широкого класса СЛП путём применения и алгоритмической реализации миграционного преобразования радарограммы, при этом рациональным является алгоритмическая реализация процедур анализа восходящего и нисходящего волновых полей в последовательных слоях СЛП путём комбинации рекурсивных процедур миграционных отображений Столта и Газдага. Установлено, что методы исследования структуры и параметров СЛП включая неоднородные среды, основанные на реализации миграционных преобразований сложных радиофизических процессов дают наиболее полную и точную информацию об СЛП, но при этом являются наиболее требовательными как к качеству исходных данных об СЛП, так и к ресурсам системы радиомониторинга, что в мобильных вариантах реализации может быть недостижимым.

7. Экспериментальные исследования СЛП посредством серийно выпускаемых и разрабатываемых комплексов мобильного СКИ-мониторинга на различных платформах, автоматизированная обработка информации в которых реализована на алгоритмах, представленные в Главах 2 и 3, показали обоснованность научных положений данной работы и её практическую значимость.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Алгоритм восстановления принимаемого сверхкороткоимпульсного сигнала в условиях воздействия активных помех / Р.Е. Копейкин [и др.] // Успехи современной радиоэлектроники. М.: Изд-во «Радиотехника». 2017. № 3. С. 10–21. (1,3 п.л./ 0,3 п.л.)
2. Рекурсивное миграционное преобразование радарограммы в системе подповерхностной радиолокации / Р.Е. Копейкин [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Самара: Самарский федеральный исследовательский центр РАН. 2016. Т. 18. № 4. С. 120–127. (0,9 п.л./ 0,3 п.л.)
3. Лабунец Л.В., Копейкин Р.Е., Серегин Г.М. Цифровая обработка радарограммы при измерении толщины речного льда // В сборнике: Цивилизация Знаний: Российские Реалии. Труды Шестнадцатой Международной научной конференции. М.: РосНОУ. 2015. С. 366–369. (0,5 п.л./ 0,2 п.л.)
4. Лабунец Л.В., Копейкин Р.Е., Серегин Г.М. Рекуррентный алгоритм миграционного преобразования радарограммы // В сборнике: Цивилизация Знаний: Российские Реалии. Труды Шестнадцатой Международной научной конференции. М.: РосНОУ. 2015. С. 362–365. (0,5 п.л./ 0,2 п.л.)
5. МСР-СКИ-Гео: а.с. 2013611753 РФ / В. В. Симаков, А.Д. Зеркаль, А.Р. Молочников, Р. Е. Копейкин; заявл. 04.02.2013; опубл. 20.03.2013.
6. Программа оценки структуры и параметров многослойных непрозрачных сред по георадиолокационным сигналам: а.с. 2017615019 РФ / А. Б. Борзов, Л.В. Лабунец, Р. Е. Копейкин, Г.М. Серегин; заявл. 25.11.2016; опубл. 02.05.2017.