

*На правах рукописи*

**Реганов Владислав Михайлович**

**КОГЕРЕНТНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ПАССИВНЫХ ПОМЕХ НА ОСНОВЕ  
АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В РЛС С КВАЗИНЕПРЕРЫВНЫМ  
РЕЖИМОМ РАБОТЫ**

Специальность 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Санкт-Петербург 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого», кафедра радиосистем.

**Научный руководитель:** **Быстров Николай Егорович**  
доктор технических наук, доцент,  
Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого, заведующий кафедрой радиосистем

**Официальные оппоненты:** **Юрченко Юрий Семёнович**  
доктор технических наук, профессор,  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), профессор кафедры радиотехнических систем

**Регинский Владимир Дмитриевич**  
кандидат технических наук, старший научный сотрудник,  
НИЦ РЭВ и ФИР ВМФ НИИ оперативно-стратегических исследований строительства ВМФ ВУНЦ ВМФ «ВМА им. Адмирала флота Н.Г. Кузнецова» (г. Пушкин), ведущий научный сотрудник

**Ведущая организация:** ОАО «Концерн «Гранит-Электрон»,  
г. Санкт-Петербург

Защита состоится «18» декабря 2013 г. в 14<sup>00</sup> часов.

на заседании диссертационного совета Д 212.218.03 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина).

Автореферат разослан «\_\_\_» ноября 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

С.А. Баруздин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Технические характеристики когерентных радиолокационных систем во многом определяются базой зондирующих сигналов и свойствами их функции неопределённости (ФН).

Наиболее удачно сложные фазоманипулированные сигналы с базой, достигающей нескольких сотен тысяч, реализуются в квазинепрерывном режиме их излучения и приёма (КНР). Зондирование пространства в этом режиме производится отдельными фазоманипулированными посылками, длительность и интервал следования, которых носят псевдослучайный характер, а приём отражённых сигналов производится в паузах излучения при работе РЛС на общую антенну. Излучаемый при этом квазинепрерывный сигнал (КНС) обеспечивает высокую чувствительность, а его большая длительность и малый пик-фактор – высокий энергетический потенциал радиолокационной системы. Характеристики ФН КНС позволяют достичь высокой разрешающей способности и точности измерения параметров по задержке и доплеровскому сдвигу частоты в широком диапазоне изменения их значений. Опыт применения локаторов с КНР, наряду с целым рядом преимуществ, выявил основную проблему применения таких сигналов. При воздействии мощных мешающих отражений в корреляционных каналах обработки возникают помехи, обусловленные боковыми лепестками (БЛ) ФН, которые приводят к маскированию слабых сигналов. В реальной помеховой обстановке требование к уровню БЛ ФН может достигать величин 80 дБ и выше.

Одним из основных возможных путей повышения помехоустойчивости является увеличение базы КНС. Однако на практике, максимальная длительность сигнала ограничена десятками миллисекунд, а ширина его спектра десятками мегагерц, что не позволяет снизить уровень БЛ ниже 50-60 дБ.

Существующие методы повышения помехоустойчивости либо неприменимы для КНС, либо оказываются недостаточно эффективными для устранения влияния мощных отражений, особенно распределённых по задержке и частоте. Таким образом, следует изыскивать другие пути решения данной проблемы.

**Целью** диссертационной работы является разработка и исследование эффективности методов когерентной компенсации пассивных помех на основе цифровой адаптивной фильтрации применительно к РЛС с квазинепрерывным режимом излучения и приёма сложных сигналов с большой базой.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие **задачи**:

1. Анализ проблем повышения помехоустойчивости квазинепрерывных РЛС к воздействию мощных мешающих отражений.
2. Обоснование систем с когерентной компенсацией помех на основе адаптивной фильтрации, оптимизация параметров и сопоставление эффективности применения известных методов оценивания.
3. Поиск путей повышения эффективности разработанных методов компенсации помех с помощью адаптивных фильтров.
4. Экспериментальная проверка эффективности когерентной компенсации в реальной помеховой обстановке и анализ путей схемотехнической реализации предложенных методов.

**Методы исследования** базируются на теории обнаружения и разрешения сигналов, теории оптимального оценивания, теории адаптивной цифровой фильтрации, теории цифровой обработки сигналов и математического моделирования.

**Основные положения**, выносимые на защиту:

1. Метод когерентной компенсации помех на основе адаптивной фильтрации с модификацией оценок методом наименьших квадратов (МНК);

2. Метод повышения эффективности компенсационной обработки на основе гребёнки фильтров, обеспечивающий подавление помех с расширенным спектром флуктуаций;

3. Пропорционально-нормализованный МНК, обеспечивающий более высокую эффективность компенсации помех, по сравнению с методом наименьших квадратов с нормализацией;

4. Способы упрощения реализации разработанных компенсационных методов за счёт введения инерционности формирования оценок и модификации процедуры совместной обработки;

5. Экспериментальная проверка эффективности разработанных компенсационных методов при обработке реальных отражённых сигналов;

6. Принципы схемотехнической реализации устройства компенсационной обработки методом наименьших квадратов.

**Научная новизна.** В диссертационной работе исследован метод компенсационной обработки КНС с применением адаптивных фильтров, позволяющий снизить влияние пассивных помех на обнаружение слабых отражений. В частности, новыми являются следующие результаты:

1. Получена оценка эффективности алгоритмов модификации оценок на основе фильтра Калмана, рекурсивных наименьших квадратов (РНК) и МНК для решения задачи когерентной компенсации помех в РЛС с квазинепрерывным режимом работы. Обоснована целесообразность применения МНК.

2. Произведён анализ влияния параметров зондирующего сигнала, устройства обработки и помеховой обстановки на эффективность работы алгоритмов когерентной компенсации на основе МНК.

3. Предложены метод оценивания комплексных амплитуд на основе гребёнки фильтров и пропорционально-нормализованный МНК, позволяющие повысить эффективность подавления пассивных помех.

4. Определена процедура совместной обработки сигнала ошибки с оценками адаптивного фильтра.

5. Выполнен анализ влияния инерционности формирования оценок в адаптивном фильтре на эффективность когерентной компенсации МНК.

**Практическая значимость** работы заключается в предложенных методах когерентной компенсации пассивных помех, повышающих помехоустойчивость РЛС с КНР излучения и приёма сложных сигналов с большой базой.

Основными результатами, представляющую практическую ценность являются:

1. Аппроксимирующие зависимости, позволяющие оценить среднеквадратическую ошибку компенсации для флуктуаций мешающих отражений гауссовской и экспоненциальной функцией корреляции.

2. Упрощенный способ совместной обработки сигнала ошибки и оценок, который при незначительном ухудшении качества компенсации позволяет существенно снизить вычислительные затраты при реализации.

3. Результаты экспериментальной проверки эффективности предложенных алгоритмов при воздействии реальных мешающих отражений от морской поверхности и городской застройки.

4. Схема компенсационной обработки МНК на базе ПЛИС и оценка аппаратных затрат, показывающая возможность практической реализации устройства обработки.

**Достоверность и обоснованность** полученных в работе результатов подтверждается результатами имитационного моделирования предложенных методов и экспериментальной проверкой их эффективности при обработке реальных отражённых радиолокационных сигналов.

**Внедрение результатов работы.** Теоретические и практические результаты диссертационной работы были использованы в НИР, выполненных по следующим научным федеральным целевым программам:

1. Фундаментальная НИР "Исследование методов синтеза сложных сигналов, видов модуляции и способов обработки для перспективных радиолокационных систем" по научно-технической программе Рособразования «Развитие научного потенциала высшей школы», гос. рег. № 0120.0 603815, 2006-2008 г.

2. Фундаментальная НИР "Теория анализа, синтеза и, обработки, шумоподобных сигналов в радиотехнических системах различного назначения" по заданию Рособразования, гос. рег. № 0120.0 503550, 2005-2009 г.

Также результаты работы использованы научно-исследовательской лабораторией цифровой обработки сигналов НовГУ при разработке и модернизации цифровых устройств формирования и обработки сигналов входящих в состав следующих систем:

1. Радиолокационные станции комплексов «Фрегат», СЧ ОКР в рамках ФЦП «Пирс» – ОАО «НПП «Салют», г. Москва.

2. Стенд функционального программного обеспечения Н-036ЕВС – ОАО «НИИП», г. Жуковский.

3. Опытный образец навигационной РЛС «К-10СМ» – ЗАО «Транзас», г. Санкт-Петербург.

4. Береговая РЛС загоризонтного обнаружения в рамках СЧ ОКР в рамках ФЦП «Озон», ЗАО «Морские испытания», г. Геленджик.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

– V ВНТК студентов, молодых ученых, специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании», г. Рязань, 2000 г.;

– XVII, XVIII и XX научно-технические конференции. НИИ приборостроения им. В.В. Тихомирова, г. Жуковский, 2002, 2006 и 2010 гг.;

– 9-я и 10-я международные научно-технические конференции «Радиолокация, навигация, связь», г. Воронеж, 2003 и 2004 гг.;

– 6-я и 9-я международные научно-технические конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение» – DSPA-2004 и DSPA-2007, г. Москва, 2004 и 2007 гг.;

– ежегодные научные конференции преподавателей, аспирантов и студентов НовГУ, В. Новгород, 2000-2013 гг.

**Публикации.** Всего по теме диссертации опубликовано 13 работ. Из них 6 – в центральных рецензируемых научных журналах, рекомендованных перечнем ВАК, 4 – содержатся в сборниках материалов научных конференций, 2 – в других изданиях. Получен 1 патент на полезную модель. Результаты диссертационной работы отражены в 6 отчётах по НИР и НИОКР.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения и библиографического списка. Она изложена на 138 страницах машинописного текста, содержит 58 рисунков, 2 таблицы. Библиографический список включает 73 наименования.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, показана научная новизна и практическая значимость, приводится краткое содержание работы по главам.

В **главе 1** приводится математическое описание КНС и отклика многоканального корреляционного устройства обработки при КНР излучения и приёма сигналов. Излагаются основные энергетические показатели таких сигналов, свойства и характеристики взаимной функции неопределённости (ВФН). Достижимый вид ВФН КНС обеспечивает однозначное измерение дальности и скорости объектов в большом диапазоне изменения задержек и в широкой доплеровской полосе частот. Выполняется краткое описание процедур сегментной корреляционно-фильтровой обработки с нормировкой и оконным взвешиванием, позволяющей экономично реализовать указанные преимущества таких сигналов в РЛС с КНР.

В реальной сигнально-помеховой обстановке обрабатываемый сигнал образуется суперпозицией флуктуационного шума, полезных обнаруживаемых целей и мешающих отражений, распределённых по задержке и доплеровскому сдвигу частоты. Последние, дополнительно к шуму, в корреляционных каналах обработки повышают фон помех, вызванный БЛ ФН. Значительный уровень этих помех может приводить к маскированию откликов слабых сигналов и невозможности их обнаружения. Поэтому в работе проводится аналитический обзор существующих методов повышения устойчивости к воздействию помех по БЛ ФН.

В ряде случаев достаточно эффективным оказывается традиционный способ решения данной проблемы, который заключается в синтезе сигнала, минимизирующего уровень БЛ ФН в заданной области частотно-временных сдвигов. Результаты этого направления в той или иной степени отражены в работах Ч. Кука, М. Бернфельда, Р.Фрэнка, Л.Е. Варакина, В.П. Ипатова, Д.Е. Вакмана, Р.М. Седлецкого, Я.А. Фурмана, Е.И. Кренгеля и др.

Второй подход заключается в синтезе фильтра или пары сигнал-фильтр, которые за счёт рассогласования обработки снижают воздействие от помех в требуемой области неопределённости. Данные вопросы изложены в трудах В.П. Ипатова, В.И. Амиантова, М.Б. Свердлика, Я.Д. Ширмана и др.

При всём их многообразии, применение большинства из методов этих направлений оказывается затруднительным. Так как они относятся к классам сигналов на основе периодических дискретных последовательностей, либо минимизируют уровень БЛ автокорреляционной функции (АКФ), т.е. теряют работоспособность при обработке сигналов с различным доплеровским сдвигом частоты. Кроме того, глубина подавления БЛ ФН снижается при коммутации приёмного тракта в КНР. Наиболее действенными средствами борьбы с мощными мешающими отражениями, применительно к КНР, являются алгоритмы временной и частотной режекции, однако их эффективность снижается с ростом числа помех, распределённых по задержке и частоте.

Еще в одно общее направление можно выделить группу методов, основанных на компенсации (устранении) помех в корреляционных каналах обработки. Данный подход повышения помехоустойчивости РЛС с КНР был предложен в докторской диссертации Чеботарёва Д.В. Принцип устранения помех основан на когерентном вычитании из принимаемого сигнала полученных каким-либо способом оценок мешающих отражений (комплексных амплитуд). Очевидно, что глубина подавления помех зависит от точности измерения этих параметров. В этой связи, перспективным направлением оказывается применение исследуемых в работе компенсационных методов устранения мешающих отражений, основанных на оценивании комплексных амплитуд сигналов с помощью адаптивных фильтров.

**Глава 2** посвящена разработке и исследованию компенсационных методов обработки на основе адаптивных фильтров, а также обоснованию возможности их применения для вычисления оценок комплексных амплитуд помех. Принцип работы устройства обработки с когерентной компенсацией на основе адаптивной фильтрации поясняется схемой на рисунке 1. На вход фильтра подаются отсчёты демодулирующего сигнала  $w(i)$  и сигнала ошибки  $e(i)$ . Задача адаптивного фильтра состоит в том, чтобы получить вектор оценок комплексных амплитуд  $\hat{a}(i)$  такой, чтобы ошибка была минимальной. При поступлении очередного отсчёта разностного сигнала  $e(i)$ , фильтр производит уточнение оценок и по их обновлённым значениям формирует компенсирующий сигнал  $y(i)$ , который в свою очередь вычитается из входного  $S(i)$ , образуя сигнал ошибки для следующего такта. Из-за наличия шумов и влияния мощных сигналов по БЛ ФН разность между входным и компенсационным сигналом будет ненулевой. В ней помимо некомпенсированной части помех содержатся полезные сигналы, отражённые от слабых целей. Поэтому сигнал ошибки подвергается дальнейшей обработке совместно с сигналом оценок комплексных амплитуд, сформированных адаптивным фильтром.

Рассматриваемый компенсационный метод обработки сигналов направлен на решение задачи обнаружения слабых сигналов при наличии мешающих отражений. Конечными критериями его эффективности должны служить вероятностные

характеристики обнаружения. Для их расчёта необходимо знание распределения вероятности процесса на выходе устройства обработки при наличии и отсутствии сигнала, а также требуется соблюдение условия линейности системы. Применительно к исследуемой задаче, мешающие отражения, на компенсацию которых настраивается фильтр, как правило, флуктуируют, так что устройство оценивания следит за их изменением, подстраивая при этом коэффициенты фильтра. Поэтому, как следствие, возможно проявление нелинейных свойств в части отклонения распределения вероятности выходного процесса фильтра от нормального, оценить которые оказывается достаточно проблематично. В связи с этим получить аналитические выражения распределения вероятностей и характеристик обнаружения, оказывается очень трудоёмкой задачей. Исходя из этого, разработка и исследование предлагаемых методов проводились с использованием численных методов математического моделирования, а в качестве критериев эффективности выступали следующие характеристики:

1. Относительная среднеквадратическая ошибка компенсации:

$$\eta = 10 \cdot \lg \left( \frac{E \{ |\mathbf{S} - \mathbf{y}| \}^2}{E \{ |\mathbf{S}|^2 \}} \right) \quad (1)$$

2. Усреднённая по задержке относительная среднеквадратическая погрешность оценок:

$$\eta_{\text{оц ср}} = 10 \cdot \lg \left( \frac{E \left[ \frac{\|\mathbf{a} - \hat{\mathbf{a}}\|^2}{M_d} \right]}{E \left[ \|\mathbf{a}\|^2 \right]} \right) \quad (2)$$

3. Отношение порогов обнаружения классической корреляционной фильтровой  $R_{0,\text{кл}}$  и исследуемой  $R_{0,\text{комп}}$  процедур обработки:

$$\eta_R = 10 \cdot \lg \left( \frac{R_{0,\text{кл}}}{R_{0,\text{комп}}} \right) \quad (3)$$

Важным факторами, влияющим на работу алгоритмов когерентной компенсации, являются как энергетические, так и статистические, корреляционные и спектральные характеристики сигналов, отражённых от разных видов подстилающих поверхностей в различных условиях. В этой связи для проведения исследований в работе обобщаются известные данные по этим характеристикам, и обосновывается выбор двух типов флуктуаций пассивных помех с экспоненциальным и гауссовским видом АКФ, как наиболее типичных и простых для моделирования в рассматриваемых радиолокационных приложениях. Проводится анализ спектральных и корреляционных характеристик этих типов флуктуирующих объектов, и разрабатываются упрощённые математические модели их формирования для проведения исследований.



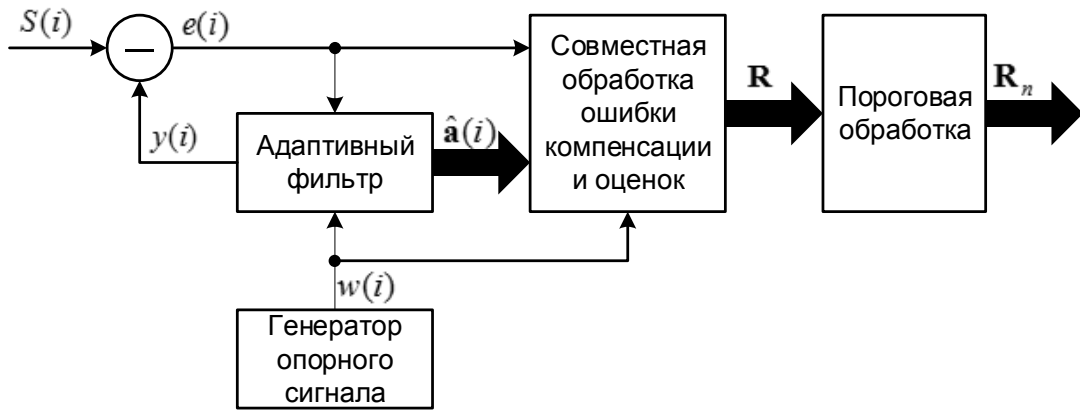


Рисунок 1 – Схема включения адаптивного фильтра в устройство обработки

Далее в работе исследуется простая модель компенсационной обработки на основе адаптивной фильтрации, укрупнённая схема которой приведена на рисунке 2.

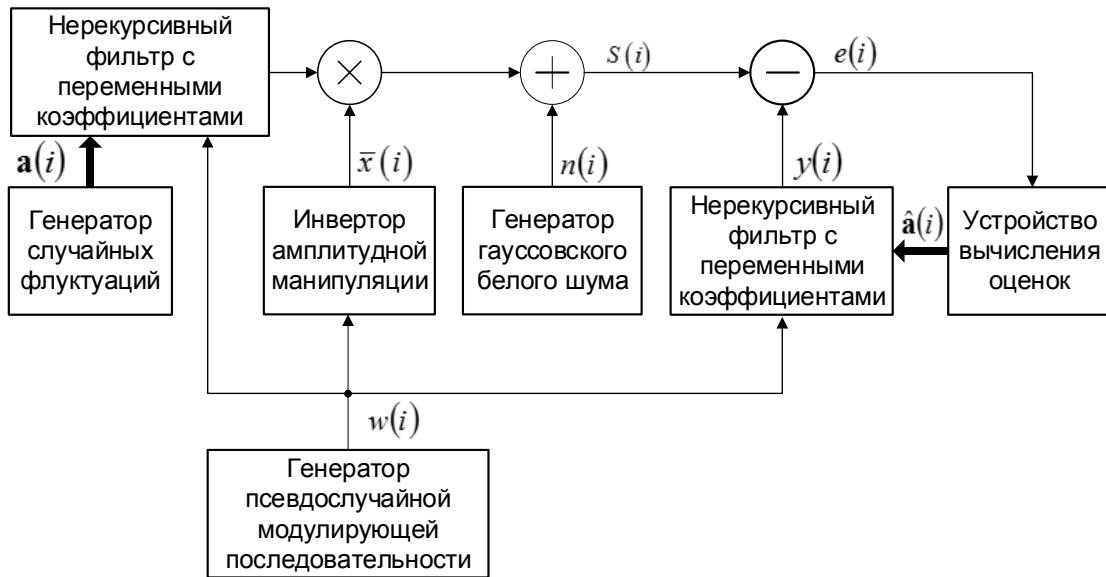


Рисунок 2 – Схема исследуемой модели

В качестве входного воздействия  $S(i)$  здесь выступают аддитивная смесь белого гауссовского шума  $n(i)$  и  $M_d$  флуктуирующих помех с экспоненциальной корреляционной функцией, описываемых вектором значений комплексных амплитуд  $\mathbf{a}(i)$ . Умножитель на последовательность  $x(i) = 1 - |w(i)|$  учитывает коммутацию приёмно-передающего тракта. Адаптивный фильтр представлен в модели блоком вычитания, устройством вычисления оценок и нерекурсивным фильтром порядка  $M_d$ , точно таким же, как и используемый для формирования сигнала помех. Сигнал ошибки  $e(i)$  описывается разностью (4), а компенсирующий  $y(i)$  – выражением (5).

$$e(i) = S(i) - y(i) \quad (4)$$

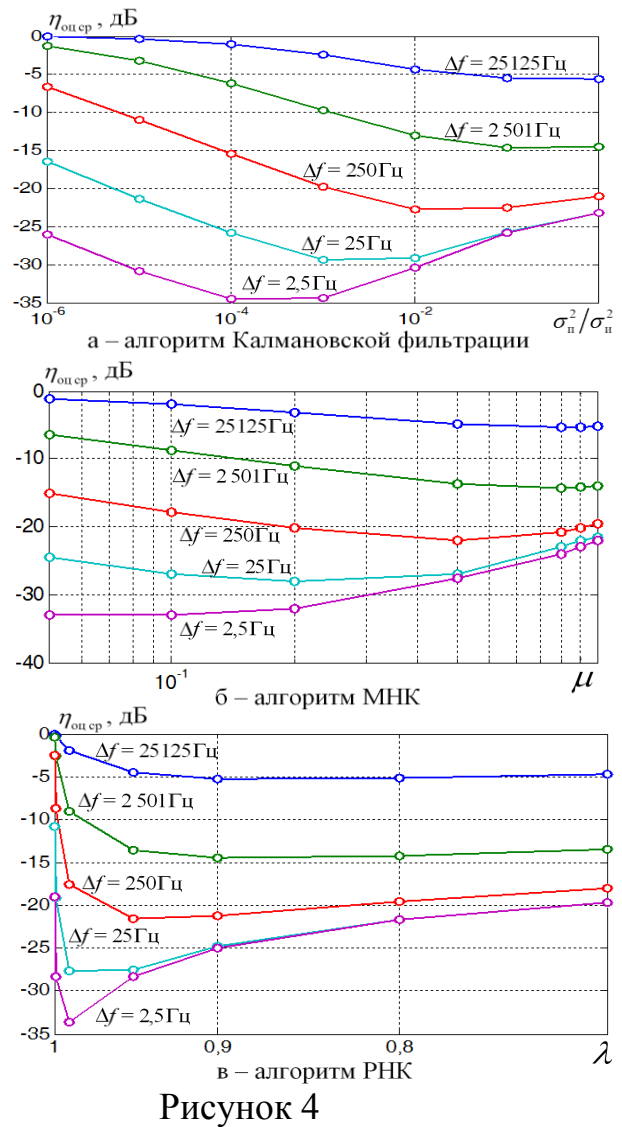
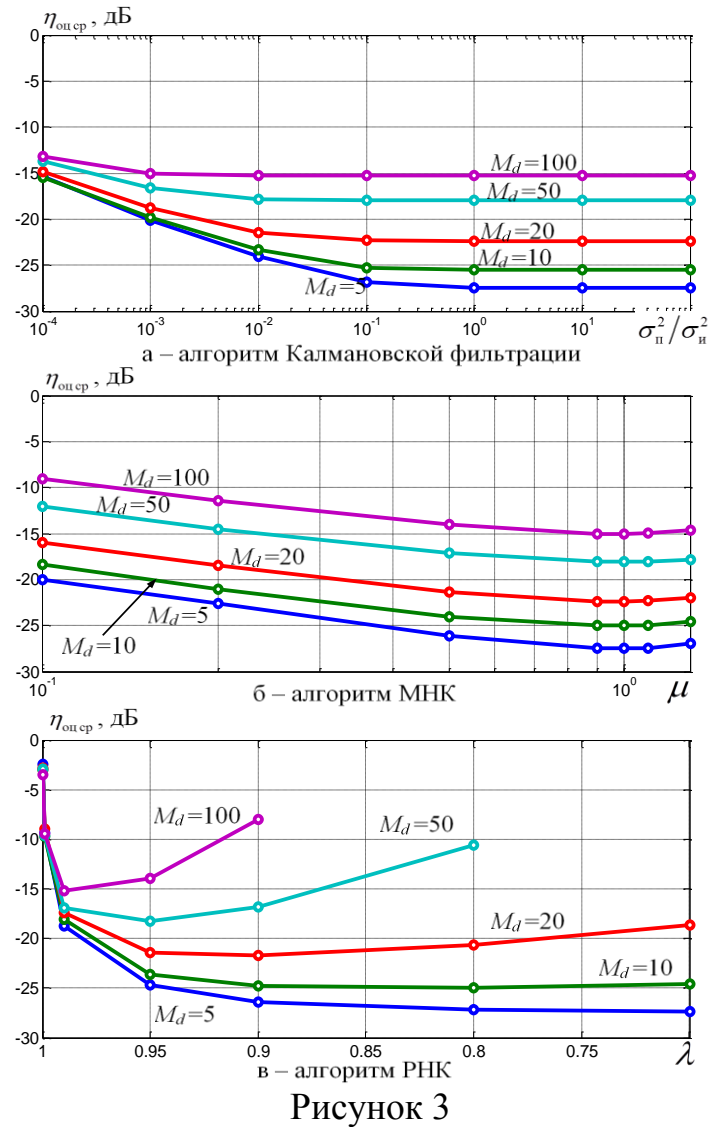
$$y(i) = \bar{x}(i) \cdot \mathbf{d}^H(i) \cdot \hat{\mathbf{a}}(i) \quad (5)$$

Опорный сигнал  $\mathbf{d}(i) = [w(i - M_d + 1), w(i - M_d + 2), \dots, w(i)]^T$  представляет из себя вектор-столбец, с нулевыми значениями элементов для отрицательных индексов

модулирующей последовательности  $w(i)$ .

Для трёх наиболее распространённых алгоритмов вычисления оценок: Калмана, РНК и МНК производилось сравнение работы модели по критерию (2) при варьировании параметров, таких как порядок фильтра  $M_d$ , эффективная ширина спектра флуктуаций, отношение сигнал-шум, пик-фактор, а также настраиваемый параметр. Для фильтра Калмана – это отношение шума измерений к шуму процесса  $\sigma_n^2/\sigma_w^2$ , для РНК – весовой экспоненциальный множитель  $\lambda$ , а для МНК – шаг адаптации  $\mu$ .

Проведённые исследования показали, что все три алгоритма применимы для компенсационной обработки КНС. В качестве иллюстрации на рисунках 3 и 4 приведены семейства эффективности компенсации  $\eta_{\text{оц. ср}}$  в зависимости от соответствующего настраиваемого параметра алгоритмов для разных порядков фильтра  $M_d$  и ширины спектра флуктуаций помех  $\Delta f$  – соответственно.



Алгоритмы сохраняют свою работоспособность при изменении параметров помех и обработки. Было установлено, что наилучшую точность оценивания в данных условиях обеспечивает обработка на основе фильтра Калмана. Однако, этот

выигрыш по сравнению с МНК и РНК в интересующем диапазоне изменения параметров, не превышает 1,5 дБ, а в среднем составляет 0,3-0,5 дБ.

Для достижения наилучшего по критерию (2) качества слежения за амплитудами флуктуирующих отражений необходимо задавать определённое значение настраиваемого параметра каждого из алгоритмов. Однако для обработки на основе калмановской фильтрации и МНК при отношении сигнал/шум свыше 40 дБ производить регулировку не требуется: единичные значения шага адаптации  $\mu$  и отношения  $\sigma_n^2/\sigma_s^2$  обеспечивают наилучшую точность оценивания параметров. Для алгоритма на основе РНК в зависимости от порядка фильтра или пик-фактора сигнала необходимо соответствующим образом задавать оптимальное значение экспоненциального весового коэффициента  $\lambda$ . Данный алгоритм в рассматриваемых условиях оказывается чувствительным к выбору этого множителя и способен терять устойчивость при малых значениях  $\lambda$ , при которых как раз и достигается минимальная погрешность оценивания.

При оптимальном значении настраиваемого коэффициента в интересующем диапазоне изменений параметров модели ошибка слежения алгоритмов РНК и МНК сопоставима и отличается на десятые доли децибел. Существуют алгоритмы, позволяющие автоматически регулировать настраиваемый множитель (например, РНК с адаптивной памятью), однако это требует дополнительные вычислительные затраты. Сравнивая исследуемые алгоритмы по этому критерию, наименьшую сложность имеет МНК. Поэтому, учитывая, что в заданных условиях точность оценивания фильтра Калмана лучше МНК в среднем не более децибела, то именно последнему и следует отдать предпочтение.

С целью получения общих характеристик, упрощающих оценку эффективности компенсационной обработки, было выполнено более детальное исследование свойств выбранного МНК применительно к двум типам флуктуаций мешающих отражений. Правило модификации оценок этого алгоритма устанавливается выражением:

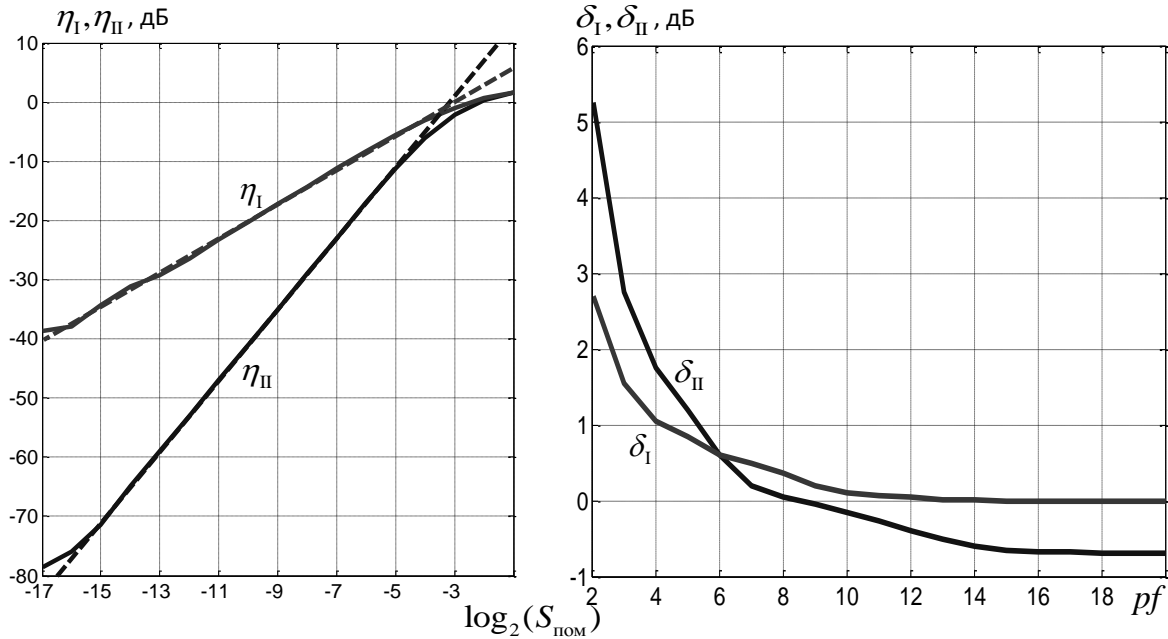
$$\hat{\mathbf{a}}(i) = \hat{\mathbf{a}}(i-1) + \frac{\mathbf{d}(i)}{\mathbf{d}^H(i) \cdot \mathbf{d}(i)} \cdot \mu \cdot e^*(i) \quad (6)$$

В результате моделирования было установлено, что среднеквадратическая ошибка компенсации (1) определяется произведением диапазона задержек мешающих отражений и эффективной ширины спектра флуктуаций их амплитуд  $S_{\text{пом}} = \Delta\tau \cdot \Delta f$ . На рисунке 5, а представлены зависимости среднеквадратической ошибки компенсации  $\eta_I$  и  $\eta_{II}$  (сплошные линии) для флуктуирующих помех с экспоненциальной и гауссовской АКФ – соответственно. В области значений, представляющих практический интерес, кривые на указанном графике хорошо аппроксимируются прямыми (пунктирные линии) в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned} \eta_I(S_{\text{пом}}) &\approx 3 \cdot (3 + \log_2 S_{\text{пом}}) + \delta_I \\ \eta_{II}(S_{\text{пом}}) &\approx 6 \cdot (3 + \log_2 S_{\text{пом}}) + \delta_{II} \end{aligned} \quad (7)$$

Скорость нарастания приведённых характеристик (наклон аппроксимирующих прямых) не зависит от пик-фактора и составляет 3 дБ/окт и 6 дБ/окт – для помех с экспоненциальной и гауссовской АКФ флуктуаций, соответственно. Графики на

рисунке 5, а соответствуют данным, полученным при пик-факторе  $pf = 5$ . Для других значений пик-фактора в диапазоне от 2 до 20 величина смещения  $\delta_I$  и  $\delta_{II}$  может быть определена по зависимостям, приведённым на рисунке 5, б.



а – относительная ошибка компенсации для двух типов флуктуаций

б – поправочные коэффициенты в зависимости от пик-фактора сигнала

Рисунок 5 Оценка эффективности компенсационной обработки МНК

Таким образом, не прибегая к моделированию, на основании простых выражений и графика на рисунке 5, б можно рассчитать относительную ошибку компенсации для двух моделей флуктуирующих помех, сигнала и устройства обработки.

В главе 3 рассматриваются варианты модификации алгоритма компенсационной обработки на основе адаптивного фильтра МНК, позволяющие повысить его эффективность. Приведённые результаты показывают, что исследуемый метод чувствителен к скорости флуктуации помех. Поэтому в ряде случаев эффективность алгоритма может оказаться недостаточной для компенсации быстро флуктуирующих или обладающих доплеровским сдвигом по частоте мешающих отражений. Для таких случаев в работе предложено модифицировать компенсационную обработку за счёт введения гребёнки фильтров для каждого элемента разрешения по задержке. Описание алгоритма в этом случае трансформируется из векторного к матричному виду, в соответствии с выражениями (8) – (10).

$$\hat{\mathbf{A}}(i) = \hat{\mathbf{A}}(i-1) + \frac{\mathbf{D}(i)}{\|\mathbf{D}(i)\|^2} \cdot \mu \cdot e^*(i) \quad (8)$$

$$y(i) = \bar{x}(i) \cdot \text{Tr} \left[ \mathbf{D}^H(i) \cdot \hat{\mathbf{A}}(i) \right] \quad (9)$$

$$\mathbf{D}(i) = \mathbf{d}(i) \cdot \mathbf{W} \quad (10)$$

где  $\mathbf{W}$  – вектор-строка размерности  $K_{FFT}$  элементов множителей вращения, определяемых выражением:  $W(k) = \exp\left(\frac{2\pi j}{F_s}(F_{\min} + k \cdot \Delta F)\right)$ ,  $k = 0, \dots, K_{FFT} - 1$ ;

$F_s$  – частота дискретизации входного сигнала;  $\Delta F$  – шаг приращения частоты в гребёнке фильтров, выбираемый из диапазона  $0 < \Delta F \leq F_s / K_{FFT}$ ;  $F_{\min}$  – минимальная частота настройки фильтра в гребёнке.

Результаты моделирования показали, что в отдельных случаях выигрыш этого метода может достигать 20 дБ. Однако, это обеспечивается ценой многократного роста вычислительных затрат.

Существенно, более простой способ повышения динамических свойств МНК основывается на особенности этого метода оценивать амплитуды помех "от мощных к слабым". Поэтому, если обеспечить более быстрое оценивание мощных помех, то возможно снизить инерционность его работы.

На этом свойстве основан предложенный в работе пропорционально-нормализованный метод наименьших квадратов (ПН МНК). Обработка в нём выполняется двумя каскадами фильтра. Первый реализует исходный алгоритм МНК без каких-либо модификаций в соответствии с выражениями (4) – (6). А оценки  $\hat{\mathbf{a}}(i)$ , полученные этим каскадом, после сглаживания фильтром первого порядка с коэффициентом авторегрессии  $\beta$ , используются в качестве шага адаптации  $\gamma(i)$  для второго каскада (выражения (11) – (13)).

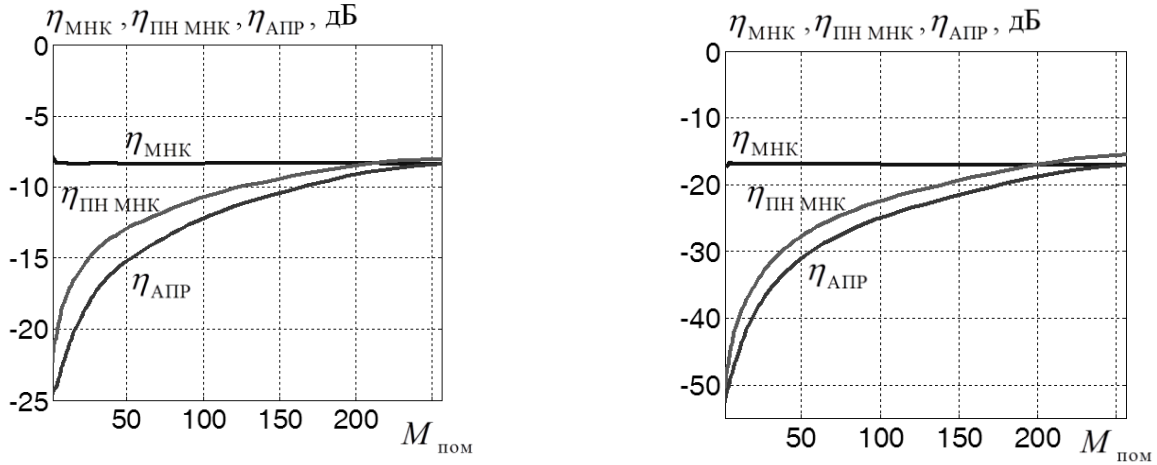
$$e_{II}(i) = \bar{x}(i) \cdot (S(i) - \mathbf{d}^H(i) \cdot \hat{\mathbf{a}}_{II}(i)) \quad (11)$$

$$\hat{\mathbf{a}}_{II}(i) = \hat{\mathbf{a}}_{II}(i-1) + \frac{\text{diag}(\gamma(i)) \cdot \mathbf{d}(i)}{\mathbf{d}^H(i) \cdot \text{diag}(\gamma(i)) \cdot \mathbf{d}(i)} \cdot \mu_{II} \cdot e_{II}^*(i) \quad (12)$$

$$\gamma(i) = |\hat{\mathbf{a}}(i)| + \beta \cdot \gamma(i-1) \quad (13)$$

На рисунке 6 приведены результаты моделирования, позволяющие сравнить относительные среднеквадратические ошибки компенсации исходной модели  $\eta_{\text{МНК}}$ , предлагаемого алгоритма ( $\eta_{\text{ПН МНК}}$ ) и его же ( $\eta_{\text{АПР}}$ ), когда вместо оценок  $\gamma(i)$  используются априорные значения комплексных амплитуд  $\mathbf{a}(i)$  – в зависимости от количества сигналов  $M_{\text{пом}}$  двух типов флуктуаций.

Как видно, ошибка компенсации  $\eta_{\text{МНК}}$  определяется порядком фильтра  $M_d$  (в данном случае  $M_d = 256$ ). В то время как, для алгоритма ПН МНК глубина компенсации  $\eta_{\text{ПН МНК}}$  зависит от числа реально присутствующих помех  $M_{\text{пом}}$ . При этом эффективность работы компенсатора близка к потенциально достижимой при наличии априорных сведений об амплитудах сигналов  $\eta_{\text{АПР}}$ . Аналогичная тенденция сохраняется и при изменении ширины спектра флуктуаций помех и пик-фактора зондирующего сигнала. Проведённое моделирование показало, что этот проигрыш ( $\eta_{\text{ПН МНК}} - \eta_{\text{АПР}}$ ) при варьировании параметров моделей в интересующем на практике диапазоне изменений не превышают 5 и 8 дБ для флуктуаций с экспоненциальной и гауссовской АКФ соответственно.



а – для помех с экспоненциальной АКФ      б – для помех с гауссовской АКФ

Рисунок 6 – Ошибка компенсации в зависимости от числа помех

Как уже отмечалось, для достоверного обнаружения всех отражённых сигналов требуется выполнять объединение оценок амплитуд  $\hat{\mathbf{a}}(i)$  и сигнала ошибки  $e(i)$ . Выражение (14) описывает правило этой совместной обработки. Упростить его можно, если выполнять объединение согласно равенству (15) с использованием усреднённого коэффициента наложения  $\Lambda_{н_ср}$ , определяемого формулой (16).

$$R(m, k) = \left| \sum_{i=0}^{N-1} \left( e(i) \cdot w^*(i-m) + \hat{a}_m(i) \cdot \bar{x}(i) \cdot x(i-m) \right) \cdot \exp \left( -j \frac{2\pi k}{N} \cdot i \right) \right| \quad (14)$$

$$R(m, k) = \left| \sum_{i=0}^{N-1} \left( e(i) \cdot w^*(i-m) + \hat{a}_m(i) \cdot \Lambda_{н_ср} \right) \cdot \exp \left( -j \frac{2\pi k}{N} \cdot i \right) \right| \quad (15)$$

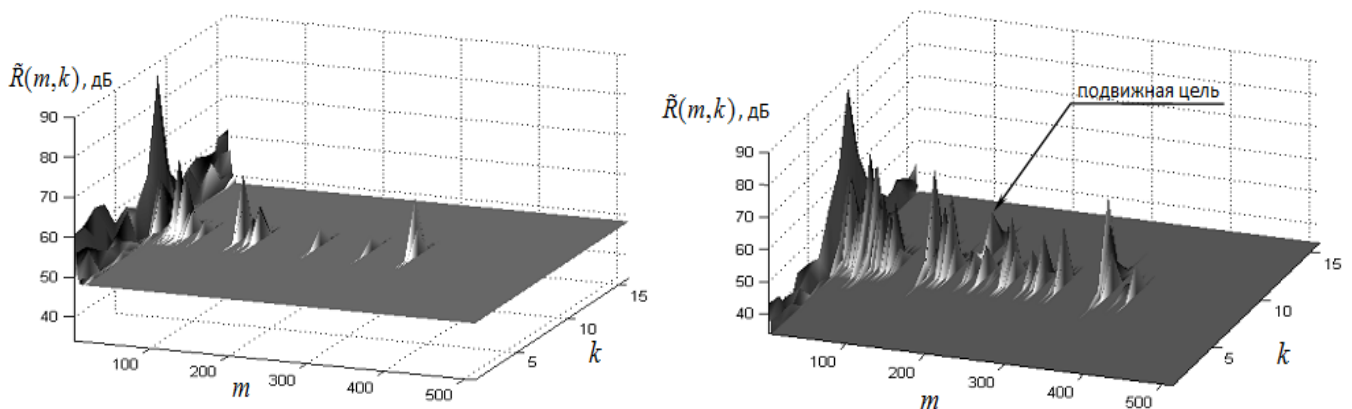
$$\Lambda_{н_ср} \approx \left( 1 - \frac{1}{pf} \right) \cdot \frac{1}{pf} \quad (16)$$

Проведённое моделирование показывает, что такой способ объединения приводит к незначительным (до 2 дБ) спектральным искажениям результатов, что не оказывает заметного влияния на качество обнаружения сигналов при наличии мешающих отражений.

Реализация компенсационной обработки даже на основе самого простого из рассматриваемых МНК – представляет собой трудную задачу. Одной из наиболее трудоёмких операций в описываемых алгоритмах является вычисление компенсационного сигнала  $y(i)$ . Как видно из выражения (5) его формирование, по сути, реализуется нерекурсивным цифровым фильтром порядка  $M_d$  с переменными коэффициентами. При построении в аппаратуре это сопровождается возникновением задержки формирования выходного сигнала фильтра. В результате исследований установлено, что подобная инерционность формирователя компенсирующего сигнала хотя и вносит дополнительные потери в эффективность работы модели, но не изменяет характер её зависимостей от параметров сигнала, обработки и помех. В практических значимых случаях при задержках формирования сигнала  $y(i)$  меньше, чем порядок фильтра, величина этих потерь не превышает 3 дБ.

В главе 4 исследованы вопросы экспериментальной проверки и практической реализации предложенных методов обработки. В целях определения их эффективности проводилась серия экспериментов. Для этого было разработано специальное устройство для записи отражённых сигналов, излучаемых действующей РЛС. Накопленный банк записей обрабатывался с помощью разработанных моделей компенсационной обработки и сравнивался с результатами классической корреляционно-фильтровой процедуры.

Выполнение компенсационной обработки для всех реализаций записанных сигналов обеспечивало снижение порога обнаружения по сравнению с классической обработкой. В зависимости от радиолокационной обстановки величина выигрыша по критерию (3) достигала 14 дБ. В качестве иллюстрации на рисунке 7 приведены результаты обработки одной и той же реализации сигнала в виде функции двух переменных: дискретной задержки, выраженной в элементах разрешения  $m$ , и дискретного сдвига частоты  $k$ . Восьмой порядковый номер отсчёта БПФ соответствует нулевому сдвигу частоты, то есть, неподвижным целям. Можно видеть, что за счёт уменьшения мощности мешающих отражений при компенсационной обработке стали обнаруживаться более слабые цели, в том числе и подвижная доплеровская цель. Абсолютные значения амплитуд откликов, из тех, что одновременно присутствуют в результатах обоих вариантов обработки – полностью совпадают. Отметим также, что уровень ложных отметок, вызванных высоким уровнем БЛ функции отклика в доплеровском сечении при задержках, близких к нулю, снизился не менее чем на 15 дБ.



а – без компенсации;

б – с компенсацией МНК

Рисунок 7 – Результаты обработки одной из реализаций записанного сигнала

Проведённое моделирование не выявило сколько-нибудь заметного ухудшения качества компенсации ни при вращении антенны, ни при изменении минимальной длительности сигнала амплитудной манипуляции. Однако, расширение спектра зондирующего сигнала до ширины полосы, согласованной с трактом промежуточной частоты приводит к снижению эффективности компенсационной обработки до 5 дБ, что, по-видимому, связано с рассогласованием формы спектра входного и компенсационного сигнала, вызванного влиянием амплитудно-частотной характеристики приёмного тракта.

В последнем разделе главы изложены основные принципы реализации устройства обработки сигналов на основе адаптивного фильтра МНК. Схема на

рисунке 8 отражает все операции, выполняемые при обработке КНС данным методом (за исключением формирования порога и принятия решения о наличии и параметрах целей).

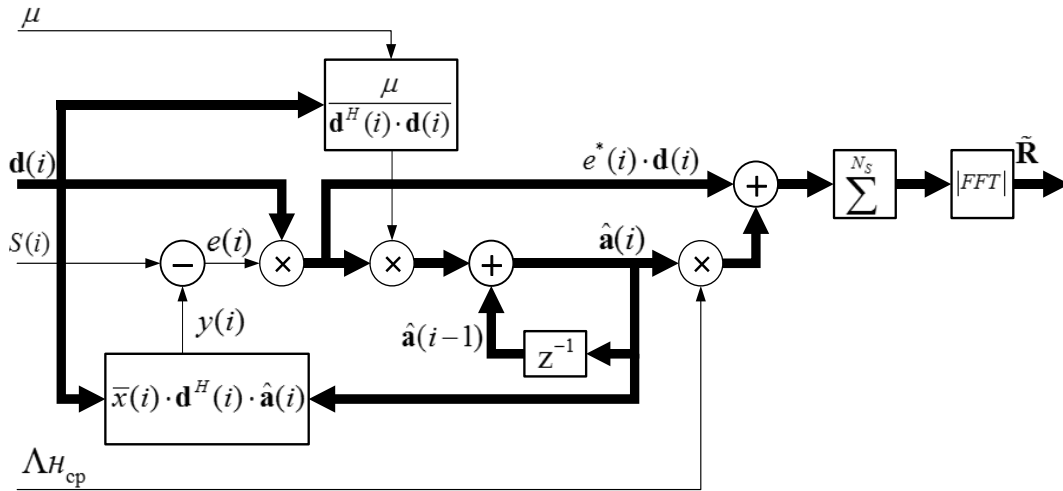


Рисунок 8 – Схема компенсационной обработки МНК

В разделе обосновывается выбор программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) в качестве элементной базы вычислительного устройства. На основе ПЛИС предложена схема устройства компенсационной обработки сигналов МНК, представленная на рисунке 9.

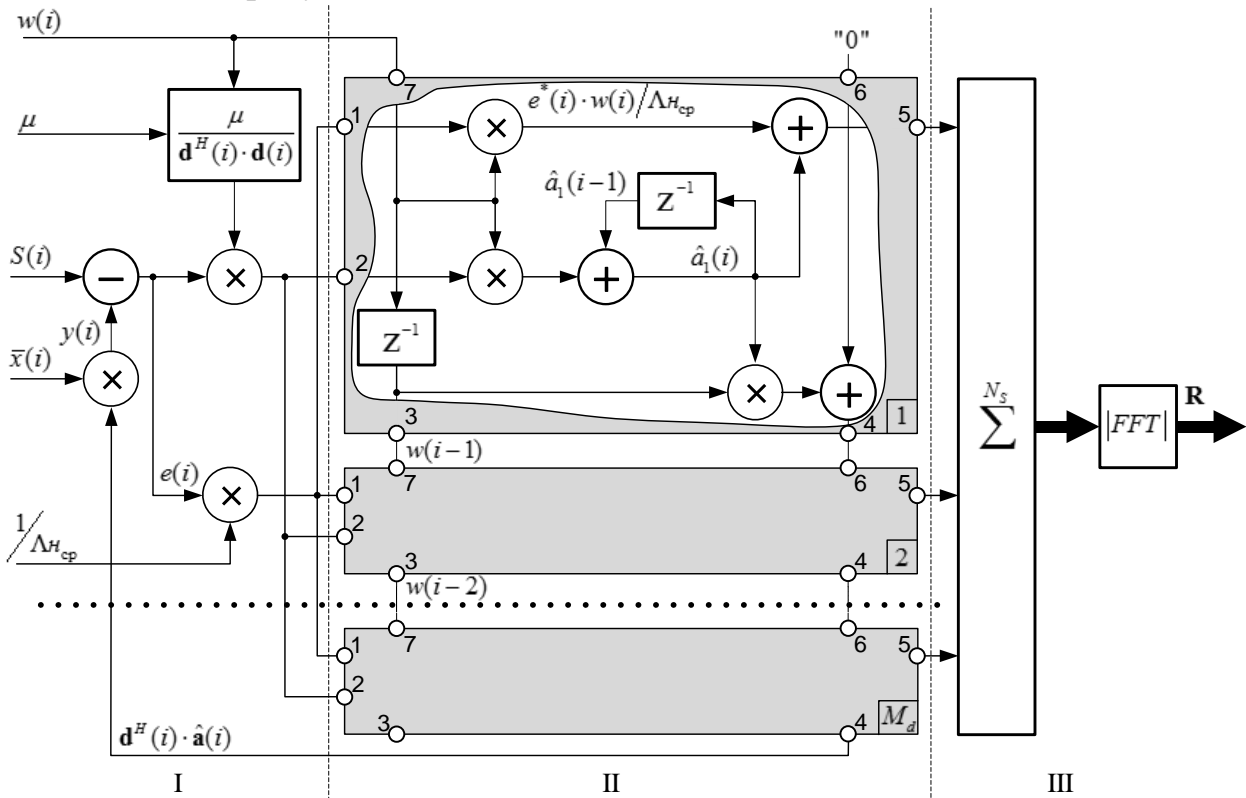


Рисунок 9 – Упрощенная схема устройства компенсационной обработки МНК

Приведённая структура легко позволяет масштабировать схему, распределяя при необходимости вычислительные ресурсы по нескольким устройствам. Учёт специфики КНС и внутренней архитектуры ПЛИС позволяет существенно упростить реализацию. При этом требуется примерно четырёхкратное увеличение



аппаратуры по сравнению с классической корреляционно-фильтровой обработкой. Рассмотренный в работе пример проекта ПЛИС фильтра формирователя компенсирующего сигнала даёт представления о реальных аппаратных затратах на реализацию предлагаемого устройства обработки.

В заключении обобщаются результаты, полученные в диссертационной работе.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Предложен и исследован метод обработки сложных сигналов в РЛС с квазинепрерывным режимом работы на основе когерентной компенсации мешающих отражений с помощью адаптивной фильтрации. Из трёх наиболее распространённых алгоритмов модификации оценок выбран МНК, как наиболее простой в реализации, при этом незначительно (до 1,5 дБ) проигрывающий в точности алгоритму на основе фильтра Калмана и сохраняющий устойчивость при вариации параметров помеховой обстановки, в отличие от метода РНК.

2. Показано, что эффективность работы предложенного алгоритма обработки определяется площадью неопределённости (произведением диапазона задержек на эффективную ширину спектра), занимаемой флуктуирующими помехами. Получены простые аппроксимирующие зависимости, позволяющие оценить относительную среднеквадратическую ошибку компенсации для двух типов флуктуаций пассивных помех.

3. Предложены модификации обработки МНК различной степени вычислительной сложности, позволяющие улучшить его динамические характеристики. В ряде случаев это обеспечивает снижение усреднённой среднеквадратической погрешности оценок флуктуирующих отражений до 20 дБ по сравнению с алгоритмом МНК с нормализацией.

4. Предложен ряд упрощений процедур компенсационной обработки, которые при незначительном ухудшении качества позволяют существенно снизить вычислительные затраты при реализации метода в аппаратуре. Упрощённый вариант совместной обработки ошибки компенсации и комплексных амплитуд оценок помех приводит к незначительной неравномерности (около 2 дБ) спектральной плотности мощности шума на выходе устройства обработки, что не оказывает заметного влияния на качество обнаружения сигналов при наличии мешающих отражений. Задержка в формировании компенсирующего сигнала не изменяет характер зависимостей эффективности работы компенсатора при вариации основных параметров помех, сигналов и обработки и примерно на 3 дБ ухудшает точность оценивания помех в интересующем диапазоне изменения задержек.

5. Проведена экспериментальная проверка эффективности исследуемых компенсационных алгоритмов на основе адаптивной фильтрации МНК при обработке записанных реальных отражённых сигналов в различных условиях помеховой обстановки. В результате моделирования установлено, что за счёт применения когерентной компенсации обеспечивалось снижение порога обнаружения примерно на 14 дБ по сравнению с классической корреляционно-фильтровой обработкой.

6. Предложена схема устройства, реализующего предложенный метод обработки на основе адаптивного фильтра с модификацией оценок МНК. Структура

рассмотренного устройства учитывает свойства КНС и архитектуру ПЛИС, обеспечивая экономичную реализацию и возможность распределения вычислений между несколькими устройствами.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

**Статьи в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень рекомендованных ВАК:**

1. Реганов, В.М. Адаптивная временная режекция мощных мешающих отражений в РЛС со сложным квазинепрерывным сигналом / Д.В. Чеботарев, В.М. Реганов // Вестник Новгородского государственного университета. – 2004. – №26. – с. 87-94.

2. Реганов, В.М. Влияние амплитудного ограничения на эффективность компенсационной обработки сигналов / Д.В. Чеботарев, В.М. Реганов // Вестник Новгородского государственного университета. – 2003. – №23. – с. 80-85.

3. Реганов, В.М. Влияние инерционности формирователя компенсационного сигнала на эффективность работы рекурсивного компенсатора мешающих отражений в РЛС со сложным сигналом / С.М. Кустов, В.М. Реганов, А.Д. Чеботарев // 362. Вестник Новгородского государственного университета. – 2011. – №65. – с. 55-60.

4. Реганов, В.М. Ошибки предсказания и погрешности оценок в адаптивном цифровом фильтре / Д.В. Чеботарев, В.М. Реганов // Вестник Новгородского государственного университета. – 2004. – №28. – стр. 54-60.

5. Реганов, В.М. Пропорционально нормализованный алгоритм адаптивной цифровой фильтрации сложных радиолокационных сигналов / Н.Е. Быстров, В.М. Реганов, Д.В. Чеботарев // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника – СПб, 2004. – вып. 1. – с. 64-72.

6. Реганов, В.М. Экспериментальная проверка эффективности компенсационной обработки в РЛС с квазинепрерывным режимом работы / С.М. Кустов, В.М. Реганов, А.Д. Чеботарев // Вестник Новгородского государственного университета. – 2010. – №60. – с. 73-77.

**Материалы научных конференций:**

7. Реганов, В.М. Автоматическая регулировка усиления приемника РЛС с квазинепрерывным сложнокодированным зондирующим сигналом / В.М. Реганов, Д.В. Чеботарев // Доклады XVII научно-технической конференции. ГП НИИ приборостроения им. В.В. Тихомирова. – Жуковский, 2002. – с. 72.

8. Реганов, В.М. Анализ адаптивного алгоритма цифровой фильтрации для компенсации мешающих отражений в РЛС со сложным сигналом / В.М. Реганов, Д.В. Чеботарев // Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи. Серия: Цифровая обработка сигналов. – 2004. – Выпуск VI-2. – с. 90-93.

9. Реганов, В.М. Экспериментальная проверка эффективности компенсационной обработки радиолокационных сигналов на основе метода НСК / Д.В. Чеботарев, В.М. Реганов, И.Н. Жукова, Н.В. Вахлячев // Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова. Сер.: Цифровая обработка сигналов и ее применение. – 2007. – Вып. IX-1. – с. 263-266.

10. Реганов, В.М. Экспериментальные исследования методов подавления помех от подстилающей поверхности в РЛС со сложным квазинепрерывным сигналом / С.М. Кустов, В.М. Реганов, А.Д. Чеботарев // Радиолокационные системы специального и гражданского назначения. 2010–2012 / Под. Ред. Ю.И. Белого. – М.: Радиотехника, 2011. – с. 343-350.

**Публикации в других изданиях:**

11. Реганов, В.М. Когерентная компенсация мешающих отражений в РЛС со сложным сигналом / В.М. Реганов, Д.В. Чеботарев // Наука – производству. – 2000. – № 8(33) – с. 47-50.

12. Реганов, В.М. Реализация устройства формирования и обработки сложно-кодированных сигналов с большой базой / В.М. Реганов, А.Б. Ушенин // Электронные компоненты. – 1998. – № 5. – с. 17-19.

13. Устройство для обработки сложного сигнала: пат. на полезную модель № 44833 Рос. Федерация: МПК7 G01S 7/28 / Быстров Н.Е., Комраков Е.В., Реганов В.М., Савин В.М., Чеботарев Д.В. – дата регистрации 27.03.2005.

Соискатель

Реганов В.М.