

На правах рукописи

Андреев Николай Александрович

**АЛГОРИТМЫ И ЦИФРОВЫЕ УСТРОЙСТВА
МНОГОСКОРОСТНОЙ АДАПТИВНОЙ ОБРАБОТКИ
ТРАЕКТОРНОГО СИГНАЛА**

Специальность: 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы и
устройства телевидения»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Рязань 2011

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Витязев Владимир Викторович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент
Клочко Владимир Константинович
кандидат технических наук, доцент
Филатов Александр Дмитриевич

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Московский институт радиотехники,
электроники и автоматики (технический
университет)»

Защита состоится « 15 » апреля 2011 г. в 12 часов на заседании
Диссертационного совета Д212.211.04 в ГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Рязанский Государственный радиотехнический университет».

Автореферат разослан « 11 » марта 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.211.04
канд.техн.наук, доцент



А.Г. Борисов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современные бортовые радиотехнические системы наблюдения за земной поверхностью, в режиме «воздух-земля», и окружающей воздушной обстановки, в режиме «воздух-поверхность», решают целый комплекс задач радиовидения путем обработки принимаемого траекторного сигнала и формирования радиолокационного изображения (РЛИ) в реальном времени. Эффективное решение задач радиовидения стало возможным благодаря оснащению РЛС нового поколения бортовым вычислительным комплексом (БВК) с полностью цифровой обработкой траекторного сигнала. Появление цифровых сигнальных процессоров (ЦСП) и модулей обработки сигналов (МОС) на их основе с вычислительной производительностью до нескольких миллиардов операций в секунду позволило от общетеоретических положений перейти к разработке реального программно-алгоритмического обеспечения работы БВК в различных режимах формирования и обработки РЛИ.

Значительный вклад в решение задач радиовидения и разработку теории, методов и эффективных алгоритмов обработки траекторного сигнала внесли отечественные ученые и специалисты, среди которых можно выделить работы: Антипова В.Н., Горяинова В.Т., Ключко В.К., Кондратенкова Г.Ф., Лаврова А.А., Орлова М.С., Самарина О.Ф., Фролова А.Ю. Вместе с тем, все более сложные алгоритмы формирования и обработки РЛИ, направленные на повышение разрешающей способности в условиях траекторных нестабильностей носителя БВК и возмущающих воздействий, их реализация в реальном времени с достаточно высокой скоростью смены кадров, требуют значительных вычислительных ресурсов, памяти данных и коэффициентов. Поэтому актуальной остается проблема устойчивой работы алгоритмов формирования РЛИ путем саморегулирования и адаптации к изменению параметров траекторного сигнала, а также минимизации вычислительных затрат на их реализацию.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование методов и алгоритмов адаптивной многоскоростной обработки траекторного сигнала в задачах радиовидения, направленных на повышение качества и скорости формирования РЛИ при одновременной минимизации вычислительных затрат и памяти данных.

Достижение поставленной цели предполагает решение следующих задач.

1. Анализ методов и алгоритмов обработки траекторного сигнала в различных режимах картографирования земной поверхности и формирования РЛИ на основе многоскоростной адаптивной фильтрации.
2. Разработка алгоритмов адаптации узкополосного фильтра-дециматора к уходу доплеровских частот и фазовым искажениям траекторного сигнала.
3. Разработка и оптимизация структуры адаптивного узкополосного фильтра-дециматора блока предварительной обработки траекторного сигнала в режиме секторного обзора.
4. Разработка способов и алгоритмов адаптации набора полосовых фильтров-дециматоров блока предварительной обработки широкополосного траекторного сигнала в режиме панорамного обзора.

5. Разработка и оптимизация структуры адаптивного цифрового приемника широкополосного траекторного сигнала.
6. Моделирование и исследование эффективности алгоритмов многоскоростной адаптивной обработки траекторного сигнала и формирования РЛИ в режимах секторного и панорамного обзоров.
7. Разработка аппаратных модулей и программно-алгоритмического обеспечения БВК, ориентированных на эффективное решение задач формирования РЛИ в реальном времени с учетом влияния траекторных неустойчивостей и автоматической фокусировки.

Методы исследований. При решении поставленных задач использовались теория и методы цифровой обработки сигналов, включающие в себя: методы частотно-временной селекции и спектрального анализа, многоскоростной и адаптивной фильтрации, оптимального проектирования многопроцессорных систем ЦОС на сигнальных процессорах. Теоретические исследования проводились с применением математического аппарата статистической радиотехники, радиолокации и радиовидения, методов оптимизации и имитационного моделирования.

Научная новизна. В процессе исследований получены следующие новые научные результаты.

1. Разработаны алгоритмы адаптации узкополосного фильтра-дециматора к уходу доплеровских частот и фазовым искажениям траекторного сигнала с применением многоскоростной обработки и набора формирующих фильтров с автофокусировкой в частотной области.

2. Предложен метод и проведена оптимизация параметров многоступенчатой структуры адаптивного узкополосного фильтра-дециматора блока предварительной обработки траекторного сигнала, реализуемого на ЦСП заданного семейства.

3. Разработаны способы и алгоритмы адаптации к структуре широкополосного траекторного сигнала на основе многоступенчатой многоскоростной обработки и оптимизации параметров цифрового приемника.

4. Предложена методика многокритериальной оптимизации и проведен оптимальный синтез двух- и трехступенчатых структур цифрового приемника широкополосного траекторного сигнала, реализуемого на ЦСП заданного семейства.

5. Проведены исследование и оценка эффективности новых способов и алгоритмов адаптивной многоскоростной обработки траекторного сигнала в задачах радиовидения.

Достоверность полученных результатов определяется корректным использованием математического аппарата при выводе аналитических выражений, экспериментальной проверкой предложенных способов и алгоритмов обработки траекторного сигнала с использованием имитационного моделирования и созданием опытного образца цифрового приемника.

Практическая значимость. Предложенные способы и алгоритмы многоскоростной адаптивной обработки траекторного сигнала и разработанные цифровые устройства на их основе позволяют:

- обеспечить устойчивую работу цифрового приемника траекторного сигнала при уходе (смещении) доплеровских частот, обусловленном траекторными неустойчивостями и возмущающими воздействиями;

- многократно (в 10-20 раз для контрольных примеров) уменьшить вычислительные затраты при одновременном снижении требований к скорости обработки и формирования РЛИ, а также емкости памяти данных и коэффициентов;

- создать семейство цифровых модулей обработки сигналов и программное обеспечение, ориентированное на эффективное решение задач радиовидения в реальном времени.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы внедрены на предприятии ФГУП «ГРПЗ» при модернизации серийно выпускаемых бортовых радиолокационных комплексов (БРЛК) систем управления вооружением для самолетов и вертолетов нового поколения.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Алгоритмы адаптации узкополосного фильтра-дециматора к уходу (смещению) доплеровских частот и фазовых искажений траекторного сигнала, отличающиеся многоступенчатой многоскоростной реализацией набора формирующих фильтров с применением автофокусировки в частотной области, которые позволяют уменьшить приведенные вычислительные затраты более чем в 10 раз и памяти данных в 2-4 раза.

2. Способы и алгоритмы адаптации цифрового приемника к структуре широкополосного траекторного сигнала, отличающиеся многоступенчатой многоскоростной реализацией набора перестраиваемых фильтров-дециматоров с поэтапной оценкой смещения и трансформации полосы доплеровских частот, которые позволяют уменьшить приведенные вычислительные затраты в 16-20 раз и памяти данных в 3-7 раз.

3. Методы многокритериальной оптимизации параметров многоступенчатой структуры адаптивного цифрового приемника блока предварительной обработки траекторного сигнала, отличающиеся новой постановкой и математической формализацией задачи оптимального проектирования, которая позволяет минимизировать приведенные вычислительные затраты на реализацию с учетом всех установленных ограничений для заданного семейства цифровых сигнальных процессоров.

4. Многопроцессорные устройства цифровой обработки траекторного сигнала, ориентированные на решение задач радиовидения в реальном времени.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: 7-й, 8-й, 9-й, 11-й и 12-й МНТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение-DSPA» (г. Москва, ИПУ РАН, 2005 г., 2006 г., 2007 г., 2009 г., 2010 г.); МНТК «Радиолокация, навигация, связь» (г. Воронеж, 2005 г.); 19-й, 21-й НТК НИИ приборостроения имени В.В. Тихомирова (г. Жуковский, 2005 г., 2007 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 22 работы, среди которых: 5 статей в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 5 патентов, 12 докладов в трудах и тезисах международных и отраслевых конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии из 69 наименований, 12-ти приложений. Содержание работы изложено на 179 стр. основного текста, включая 80 иллюстраций, 7 стр. библиографии и 87 стр. приложений.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, дана общая характеристика работы, сформулированы цель, задачи и основные положения, выносимые на защиту; определен круг вопросов, касающихся решения поставленных задач.

Первая глава посвящена описанию и анализу алгоритмов обработки и способов построения структуры цифрового приемника траекторного сигнала в задачах радиовидения. Приводится математическая модель траекторного сигнала и алгоритмы его обработки в режимах: реального луча (РЛ), доплеровского обужения луча (ДОЛ), фокусируемого синтезирования апертуры (ФСА) и селекции наземных движущихся целей (СНДЦ). Рассматриваются способы построения структуры адаптивного цифрового приемника траекторного сигнала в режимах ДОЛ и ФСА с одновременной селекцией наземных движущихся объектов. Отмечается эффективность применения многоскоростной обработки, предшествующей формированию РЛИ. Формулируются задачи исследований.

При картографировании земной поверхности путем формирования РЛИ в качестве зондирующего сигнала обычно используются фазоманипулированные последовательности импульсов с заданной частотой повторения. Зондирующий сигнал $s_0(t)$ отражается от всей совокупности N точек земной поверхности в пределах зоны обзора и в виде суммы сигналов

$$s(t) = \sum_{i=0}^{N-1} s_i(t)$$

поступает на радиолокационный приемник. Такой сигнал называют **траекторным**, так как каждая его составляющая $s_i(t)$, принимаемая от i -ой точки земной поверхности, зависит не только от ее отражающих свойств, но и от параметров траектории полета носителя БРЛК

$$s_i(t) = U_i G(t) \exp \left\{ -j \left[\frac{4\pi}{\lambda} D_{ni}(t) - \varphi_{0i} \right] \right\}, \quad (1)$$

где: U_i, φ_{0i} - случайные амплитуда и начальная фаза сигнала; λ - длина волны; $G(t)$ - нормированная функция, характеризующая модуляцию сигнала ДНА; $D_{ni}(t)$ - текущее расстояние от носителя БРЛК до i -ой точки отражения в наклонной плоскости, которое для прямолинейной траектории полета определяется как

$$D_{ni}(t) = R_{ni} - Vt \cos \theta_{ni} + \frac{V^2 t^2 \sin^2 \theta_{ni}}{2 R_{ni}} + \frac{V^3 t^3 \sin^2 \theta_{ni} \cos \theta_{ni}}{4 R_{ni}^2} + \dots \quad (2)$$

где R_{ni} - наклонная дальность до i -ой точки отражения в начальный момент времени, θ_{ni} - азимут i -ой точки отражения в плоскости ДНА, содержащей наклонную дальность, V - скорость полета БРЛК.

Подставив (2) в аргумент функции (1) и отбросив все составляющие выше кубической, получим, что доплеровская частота i -ой составляющей траекторного сигнала принимает вид:

$$F_{\text{доп}i}(t) = \frac{2V}{\lambda} \cos \theta_{ni} - \frac{2V^2 t}{\lambda R_{ni}} \sin^2 \theta_{ni} - \frac{3V^3 \sin^3 \theta_{ni} \operatorname{ctg} \theta_{ni}}{2\lambda R_{ni}^2} t^2. \quad (3)$$

В зависимости от точности аппроксимации принятой модели траекторного сигнала различают три режима картографирования земной поверхности: режим РЛ, когда пренебрегают изменением дальности до i -ой точки отражения за предельно короткое время зондирования, режим ДОЛ, когда учитывается линейная составляющая в модели (2), и, наконец, режим ФСА на длительных интервалах синтезирования, принимающий во внимание квадратичную составляющую изменения дальности в (2) и, как следствие, линейную частотную модуляцию в (3).

В работе представлены алгоритмы обработки траекторного сигнала во всех перечисленных режимах картографирования земной поверхности. Описывается способ построения структуры адаптивного цифрового приемника траекторного сигнала в режимах ДОЛ и ФСА с одновременной селекцией НДЦ на основе многоскоростной обработки, впервые предложенный в работах Колодыко Г.Н. и принятый для дальнейшего исследования и модификации с позиции обеспечения устойчивой работы цифрового приемника в условиях траекторных нестабильностей и фазовых искажений, а также минимизации требуемых вычислительных затрат при реализации на ЦСП заданного семейства. Формулируются задачи исследований.

Во второй главе рассматриваются алгоритмы адаптации узкополосного фильтра-дециматора к уходу (смещению) доплеровских частот и фазовых искажений траекторного сигнала. Формулируется задача оптимального проектирования на сигнальных процессорах многоступенчатой структуры адаптивного узкополосного фильтра-дециматора блока предварительной обработки траекторного сигнала. Проводится математическая формализация и решение задачи оптимального проектирования на ЦСП заданного семейства набора формирующих фильтров-дециматоров, перестраиваемых по центральной частоте и ширине полосы пропускания.

Введение этапа предварительной фильтрации в алгоритме обработки узкополосного траекторного сигнала в режиме секторного обзора оказывается эффективным не только с точки зрения понижения частоты дискретизации перед основной обработкой, но и с позиции возможности предварительной компенсации фазовых искажений за счет применения адаптивных методов настройки фильтра-дециматора. Действительно, основная задача предварительной фильтрации состоит в выделении полосы частот узкополосного траекторного сигнала и переходе к обработке только информативного участка спектра с пропорциональным уменьшением вычислительных затрат. В тоже время траекторные не-

стабильности и другие источники искажений оказывают существенное влияние на положение полосы частот сигнала и вызывают ее уход (смещение). Система обработки фактически становится «расстроенной», что уменьшает отношение сигнал/шум и приводит к искажениям формируемого РЛИ. Компенсация ухода полосы доплеровских частот может быть естественным образом произведена на этапе предварительной фильтрации. Поэтому цифровой полосовой фильтр-дециматор становится адаптивным, выполняя поиск полосы частот траекторного сигнала и самонастройку параметров.

Рассматриваются различные варианты построения структуры адаптивного цифрового фильтра-дециматора (ЦФД) и алгоритмы обработки узкополосного траекторного сигнала на основе многоскоростной фильтрации и адаптации в частотной области с применением набора формирующих фильтров.

Ставится задача оптимального проектирования на ЦСП заданного семейства многоступенчатой структуры адаптивного узкополосного фильтра-дециматора в классе КИХ-цепей. На рис.1 показан общий вид блока предварительной обработки узкополосного траекторного сигнала, включающего m ступеней децимации на основе фильтров N_i -го порядка с функциями передачи $H_i(j\omega)$, $i = \overline{1, m}$, выполняющих понижение частоты

дискретизации в $\nu = \prod_{i=1}^m \nu_i$ раз, и набора из M формирующих фильтров (ФФ)

N_0 -го порядка с функцией передачи $H_0(j\omega)$, обеспечивающих согласование со спектральной структурой траекторного сигнала, работая на пониженной в ν раз частоте дискретизации.

Решающее устройство (РУ) на выходе набора ФФ определяет уход полосы частот траекторного сигнала и передает соответствующую информацию в блок адаптации. Последний дополнительно оценивает ширину полосы частот обрабатываемого сигнала и настраивает узкополосный фильтр-дециматор на соответствующую полосу частот. Число ФФ M зависит от ширины полосы частот траекторного сигнала с учетом максимально возможного ухода доплеровских частот и требуемой точности настройки цифрового приемника.

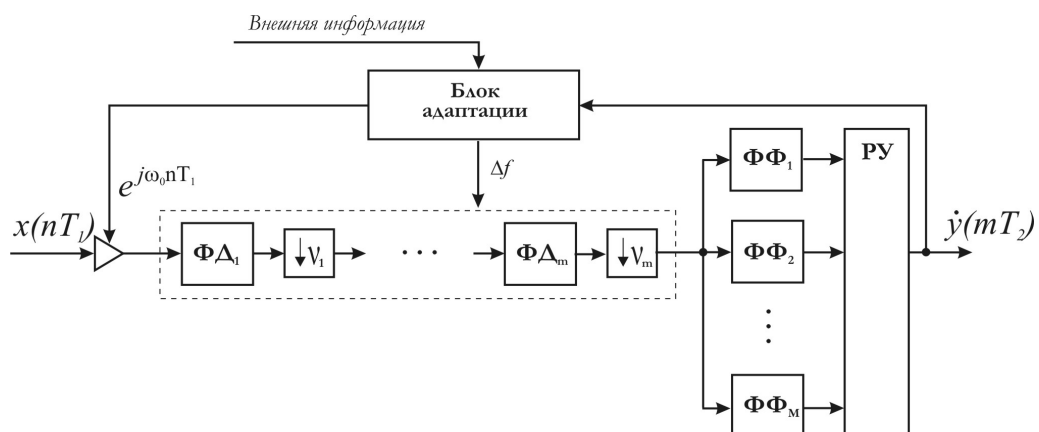


Рисунок 1. Структурная схема устройства предварительной обработки траекторного сигнала.

Предполагается, что в режиме «захвата» полосы частот траекторного

сигнала, когда информация об его «тонкой» структуре не известна, набор ФФ заменяется набором обычных полосовых фильтров с заданными шириной полосы пропускания и параметрами частотной избирательности, определяющими порядок N . В режиме «слежения» за уходом полосы частот траекторного сигнала порядок N и форма импульсной характеристики ФФ считаются заданными.

Задача заключается в оптимизации параметров многоступенчатой структуры набора из M ФФ (в частном случае полосовых) с заданным коэффициентом перекрытия их частотных характеристик и значением минимального порядка N , обеспечивающей минимизацию приведенных вычислительных затрат на реализацию в реальном времени.

Задачу оптимального проектирования многоступенчатой структуры набора ФФ сформулируем следующим образом: на множестве многоступенчатых структур $G_F^{D_l} \in G_F^D$, $l = 0, 1, \dots, m$, класса КИХ-цепей G_F^D , реализуемых с использованием вторичной дискретизации, найти подкласс $G_F^{D_k} \in G_F^{D_l}$ и составной оператор $F^k \in G_F^{D_k}$ вида $F^k = L^{D_k} \{F_0, F_1, \dots, F_k\}$ с заданной структурой L^{D_k} , такие, что

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi^*(G_F^{D_k}, F^k) = V(G_F^{D_l}, F^l) \rightarrow \min_{G_F^{D_l}, F^l}; \\ \max_{\omega=-\pi, \pi} p(\omega) |H_B(j\omega, F^k) - H(j\omega)| \leq \varepsilon_{\text{дон}}; \\ S(G_F^{D_k}, F^k) \leq S_{\text{дон}}; \quad Q(G_F^{D_k}, F^k) \leq Q_{\text{дон}}; \quad D(G_F^{D_k}, F^k) \leq D_{\text{дон}}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где $\Phi^*(G_F^{D_k}, F^k)$ — целевая функция, выбираемая из критерия минимизации приведенные к периоду дискретизации T_1 входного сигнала временных затрат $V(G_F^{D_k}, F^k)$ на программно-аппаратную реализацию оператора F^k в подклассе $G_F^{D_k}$; $H_B(j\omega, F^k)$ и $H(j\omega)$ — воспроизводимая с допустимой погрешностью $\varepsilon_{\text{дон}}$ и желаемая функции передачи ФФ; $p(a)$ — весовая функция чебышевского приближения; $S(G_F^{D_k}, F^k)$ и $Q(G_F^{D_k}, F^k)$ — емкость внутрикристалльной памяти данных и емкость памяти программ, требуемые на программную реализацию оператора $F^k \in G_F^{D_k}$; $D(G_F^{D_k}, F^k)$ — дисперсия собственного шума на выходе цифрового устройства, реализующего оператор $F^k \in G_F^{D_k}$; $S_{\text{дон}}$, $Q_{\text{дон}}$, $D_{\text{дон}}$ — совокупность ограничивающих факторов, определяемых конкретными условиями программно-аппаратной реализации оператора $F^k \in G_F^{D_k}$. Допустимые ограничения на предельную емкость внутрикристалльной памяти данных $S_{\text{дон}}$ и внешней (внекристалльной памяти программ) $Q_{\text{дон}}$ определяются семейством ЦСП и способом организации памяти цифрового

устройства, а допустимый уровень собственных шумов $D_{дон}$ зависит от требований, накладываемых на точность воспроизведения желаемых характеристик фильтра.

Проводится математическая формализация всех функциональных зависимостей, входящих в (1). Показано, что объединенные оценки приведенных к периоду T_1 временных затрат и затрат памяти на реализацию $(l+1)$ -ступенчатой структуры набора из M фильтров можно представить в виде

$$\left\{ \begin{aligned} V(G_F^{D_l}, F^l) &= \sum_{i=1}^l \frac{1}{\prod_{j=1}^i v_j} [V_i(G_F^{D_i}, N_i, v_i)] + \frac{M}{\prod_{j=1}^l v_j} V_0(G_F^{D\Phi_l}, N_0); \\ S(G_F^{D_l}, F^l) &= \sum_{i=1}^l S_i(G_F^{D_i}, N_i, v_i) + S_0(G_F^{D\Phi_l}, N_0); \\ Q(G_F^{D_l}, F^l) &= \sum_{i=1}^l Q_i(G_F^{D_i}, N_i, v_i) + MQ_0(G_F^{D\Phi_l}, N_0). \end{aligned} \right. \quad (2)$$

Приводятся оценки затрат, входящих в описание (2), ориентированные на реализацию с применением ЦСП семейства TMS 320C6713 и семейства ADSP TS201 для полифазной формы построения фильтров-дециматоров и прямой формы реализации формирующего фильтра.

Показано, что исходная задача оптимального проектирования, с учетом описания (2) при заданном порядке формирующих фильтров N , может быть полностью математически формализована и сведена к решению задачи оптимизации структурных параметров: числа ступеней k_{opt} , значений порядков фильтров-дециматоров $N_{i_{opt}}$ и коэффициентов децимации $v_{i_{opt}}$ для каждой i -ой ступени преобразования, $i = \overline{0, k_{opt}}$, при условии, что порядок $N_{\exists}(G_F^{D^k}, F^k)$ эквивалентного по свойствам частотной избирательности одноступенчатого ФФ $N_{\exists}(G_F^{D^k}, F^k) \geq N$.

Получены аналитические соотношения, связывающие друг с другом основные структурные параметры многоступенчатой реализации набора узкополосных формирующих фильтров с последовательным понижением частоты дискретизации на выходе системы. Проведен оптимальный синтез двух- и трехступенчатых структур набора формирующих фильтров с заданным коэффициентом перекрытия их АЧХ для ЦПОС семейства ADSP TS201 TigerSHARC фирмы Analog Devices.

Показано, что для рассматриваемой задачи построения адаптивного цифрового приемника узкополосного траекторного сигнала оптимальная структура обеспечивает уменьшение общих вычислительных затрат более чем в 10 раз и памяти данных – в 2-4 раза. Проведено сравнение по вычислительной эффективности и памяти данных квазиоптимальной многоступенчатой реализации набора узкополосных формирующих фильтров на основе последовательного

соединения элементарных фильтров-дециматоров, понижающих частоту дискретизации в 2 раза, с оптимальной трехступенчатой структурой. Показано, что использование квазиоптимальной реализации структуры набора формирующих фильтров для решения поставленной задачи может быть в ряде случаев более предпочтительным.

Предметом исследований третьей главы диссертационной работы являются способы и алгоритмы адаптивной многоскоростной обработки широкополосного траекторного сигнала. Приводится общая структура цифрового приемника широкополосного траекторного сигнала, использующая набор полосовых фильтров-дециматоров с разнотипными частотными характеристиками, реализуемый с применением многоскоростной многоступенчатой обработки. Проводится математическая формализация и решение задачи оптимизации многоскоростной обработки широкополосного траекторного сигнала на ЦСП заданного семейства. Предлагаются новые способы и алгоритмы многоступенчатой адаптации на основе многоскоростной обработки с поэтапной оценкой смещения и трансформации полосы доплеровских частот траекторного сигнала.

С целью значительного уменьшения времени формирования РЛИ рекомендуется использовать режим панорамного обзора, отличающийся от секторного обзора расширением ДНА в азимутальном направлении и, как следствие, увеличением ширины полосы частот принимаемого траекторного сигнала. Как показал анализ спектральной структуры траекторного сигнала, для обеспечения равного азимутального разрешения по всем направлениям обзора и формирования РЛИ требуется неравномерное спектральное разрешение, в значительной степени возрастающее при переднем обзоре. Для реализации неравномерной частотной селекции азимутальных каналов было предложено использовать набор (банк) цифровых полосовых фильтров-дециматоров предварительной обработки широкополосного траекторного сигнала, «имитирующего» пространственно-частотное разделение азимутальных каналов, характерное для секторного обзора.

Общая структурная схема цифрового приемника траекторного сигнала в режиме панорамного обзора приведена на рис.2. Входной траекторный сигнал $x_i(nT_1)$, в общем случае комплексный, подается на вход устройства предварительной обработки, включающего в себя набор из M ЦПФ, перестраиваемых по центральной частоте ω_{0j} и ширине полосы пропускания $2\omega_{c_j}, j = \overline{1, M}$, и блока адаптации. Задача первого блока – банка фильтров-дециматоров, выделить заданные полосы частот траекторного сигнала, соответствующие определенным азимутальным направлениям ДНА в режиме секторного обзора, и понизить частоту дискретизации в ν_j раз, пропорционально отношению частоты повторения зондирующих импульсов к ширине полосы частот j -ой составляющей траекторного сигнала. Предполагается, что при переходе от бокового обзора к переднему и формированию РЛИ в соответствующем азимутальном направле-

нии ДНА равной ширины, полоса частот траекторного сигнала в значительной степени сужается, а, следовательно, возрастает коэффициент децимации V_j .

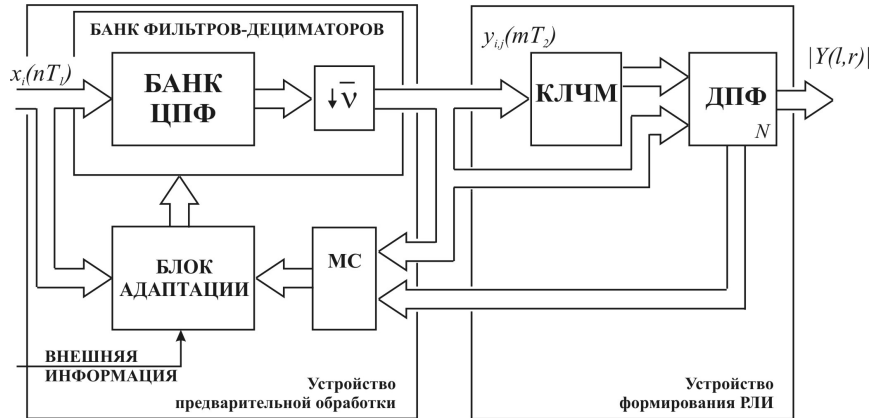


Рисунок 2. Структурная схема цифрового приемника траекторного сигнала в режиме панорамного обзора

Задача второго блока - блока адаптации - слежение за возможным непропорциональным уходом центральных частот α_{0j} и ширины полосы частот траекторного сигнала на выходе каждого канального ЦПФ, вследствие траекторных нестабильностей и маневров носителя БРЛК, и автоматическая настройка соответствующих параметров набора полосовых фильтров-дециматоров. По внешней информации, поступающей от блока управления БРЛК, задается ширина сектора и направление обзора. Устройство формирования РЛИ по прореженным последовательностям траекторного сигнала $y_{i,j}(mT_{2j}), j = \overline{1, M}, i = \overline{1, K}$, путем прямого вычисления ДПФ (в режиме «ДОЛ») или с использованием предварительной компенсации ЛЧМ (в режиме «ФСА») и оценки модуля элементов матрицы вычисленных коэффициентов Фурье $|Y(i, j)|$, синтезирует текущий кадр изображения.

Рассмотрены два подхода к решению задачи предварительной обработки траекторного сигнала с помощью набора полосовых фильтров-дециматоров. Первый предполагает, что ширина полосы частот траекторного сигнала на выходе каждого j -го ЦПФ изменяется в относительно небольших пределах (не более чем на половину ширины полосы пропускания), а уход по центральной частоте α_{0j} компенсируется блоком адаптации по внешней информации о скорости и ускорении носителя БРЛК, траектории его полета и другим параметрам, однозначно определяющим уход доплеровских частот траекторного сигнала. В этом случае задача построения оптимальной структуры цифрового приемника траекторного сигнала сводится к оптимизации параметров в общем случае многоступенчатой пирамидальной структуры набора из M полосовых фильтров-дециматоров с заданными параметрами и свойствами частотной избирательности. При этом, с учетом возможного расширения полосы частот и некомпенсированного блоком адаптации ухода доплеровских частот, предлагается увеличить коэффициент перекрытия соседних частотных каналов как минимум в

два раза, оставляя прежними значения центральных частот a_{0j} каждого j -го фильтра, что позволит в последующем, на этапе формирования РЛИ, выполнить «подстройку» амплитудного спектра в каждой j -й полосе частот траекторного сигнала.

Второй подход к реализации устройства предварительной обработки траекторного сигнала полностью ориентируется на методы и алгоритмы автофокусировки и адаптации в частотной области с использованием устройства спектрального оценивания. По результатам спектрального оценивания решающее устройство блока адаптации производит оценку возможного ухода полосы частот траекторного сигнала, используя один из алгоритмов автофокусировки, а

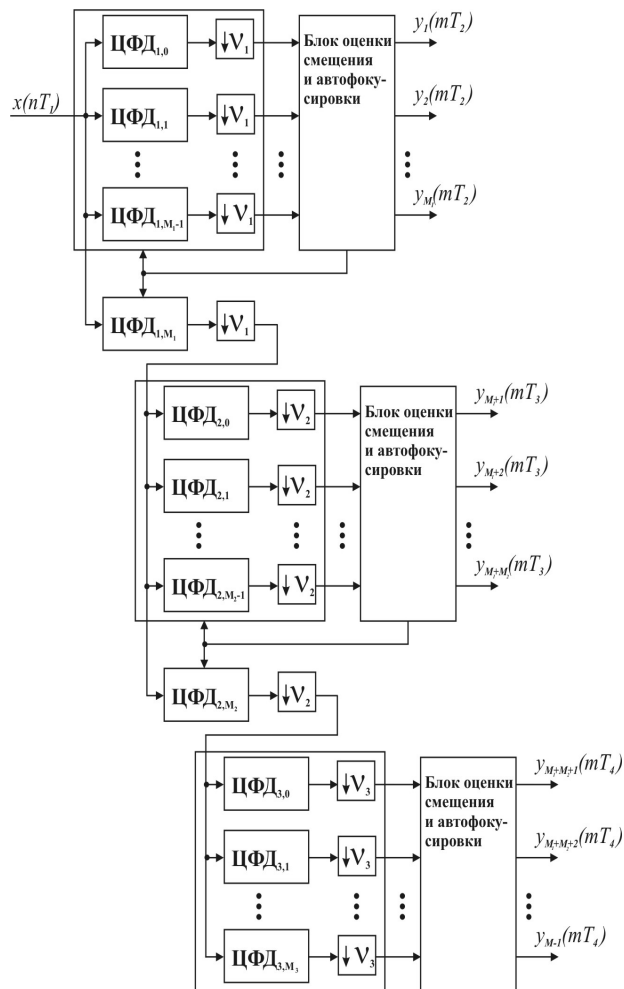


Рисунок 3. Способ многоступенчатой адаптации на основе квазиоптимальной комбинированной структуры набора ЦФД

переходном процессе). Фактически фильтры-дециматоры реализуются как фильтры с растущей памятью. Последнее позволяет последовательно увеличивать точность оценок параметров адаптивной системы для более узкополосных субполосных каналов, используя «грубые» оценки смещения доплеровских

блок перестройки параметров вносит соответствующую коррекцию центральных частот набора полосовых фильтров-дециматоров.

Предложены два способа многоступенчатой адаптации на основе многоскоростной обработки широкополосного траекторного сигнала и алгоритмы их реализации с использованием набора перестраиваемых полосовых фильтров-дециматоров, позволяющие уменьшить вычислительные затраты, увеличить точность настройки системы и ускорить процесс адаптации. Первый способ предполагает многоступенчатую оценку смещения полосы частот траекторного сигнала по ее верхней границе, а второй – многоступенчатую адаптацию на основе комбинированной структуры набора фильтров-дециматоров и алгоритмов фильтрации в частотной области (рис. 3).

Ускорение процесса адаптации обусловлено тем, что настройка фильтров-дециматоров выполняется поэтапно, от ступени к ступени, не дожидаясь окончательного результата обработки на их выходах (т.е. в

частот предыдущих ступеней преобразования. Уменьшение приведенных вычислительных затрат связано с эффектом децимации, т.е. уменьшением частоты дискретизации и, соответственно, скорости входного потока данных на каждой последующей ступени преобразования и настройки адаптивной системы.

Предложена методика формализации и решения задачи оптимального проектирования на сигнальных процессорах набора полосовых фильтров-дециматоров с разнотипными частотными характеристиками, перекрывающих заданную полосу частот траекторного сигнала.

Математически формализована задача оптимального проектирования на сигнальных процессорах многоступенчатой древовидной структуры набора фильтров-дециматоров с неравнополосными частотными характеристиками. Получены аналитические соотношения, устанавливающие связь между различными структурными параметрами и параметрами частотной избирательности многоступенчатой древовидной структуры набора полосовых фильтров-дециматоров. Проведен оптимальный синтез двух- и трехступенчатых структур набора фильтров-дециматоров с заданными свойствами частотной избирательности и коэффициентом перекрытия АЧХ соседних субполосных каналов.

Показано, что для рассматриваемой задачи построения адаптивного цифрового приемника широкополосного траекторного сигнала оптимальной является двухступенчатая структура набора фильтров-дециматоров, позволяющая (по отношению к одноступенчатой структуре) уменьшить вычислительные затраты в 2-3 раза, емкость памяти данных в 3-7 раз и емкость памяти коэффициентов в 2-5 раз.

В четвертой главе проводится моделирование и анализ эффективности алгоритмов многоскоростной адаптивной обработки траекторного сигнала. Формулируются контрольные задачи для принятой модели траекторного сигнала. Описывается разработанное программное обеспечение и типовые модули обработки сигналов на ЦСП семейства ADSP-TS101 TigerSHARC. Приводятся результаты моделирования, иллюстрирующие работоспособность и эффективность предложенных алгоритмов многоскоростной адаптивной обработки траекторного сигнала. Представлены оценки вычислительных затрат на реализацию алгоритмов адаптации для режимов секторного и панорамного обзоров.

С целью иллюстрации эффективности рассмотренных выше методов и алгоритмов адаптации цифрового приемника траекторного сигнала было проведено моделирование их работы отдельно для узкополосного (режим секторного обзора) и широкополосного (режим панорамного обзора) сигналов.

Эффект от применения схемы адаптации, введенной в цифровой приемник узкополосного траекторного сигнала, иллюстрирует рис. 4. Здесь показан случай некогерентного накопления выходов согласованной обработки сигнала от кадра к кадру с целью снижения уровня шумов. Показано, что при отсутствии схемы компенсации фазовых искажений некогерентное накопление, повышая отношение сигнал/шум, вместе с тем приводит к размытию РЛИ (рис. 4б). Причина этого явления состоит в том, что также как и отдельные реализации шума, сигналы РЛИ в разных периодах наблюдения оказываются слабо коррелиро-

ванны друг с другом, и метод накопления не дает ожидаемых результатов. Применение схемы адаптации «возвращает» полосу сигнала в исходное положение, и корреляция между отдельными наблюдениями повышается. РЛИ на рис.4в отличается высоким отношением сигнал/шум и увеличенной четкостью и контрастностью.

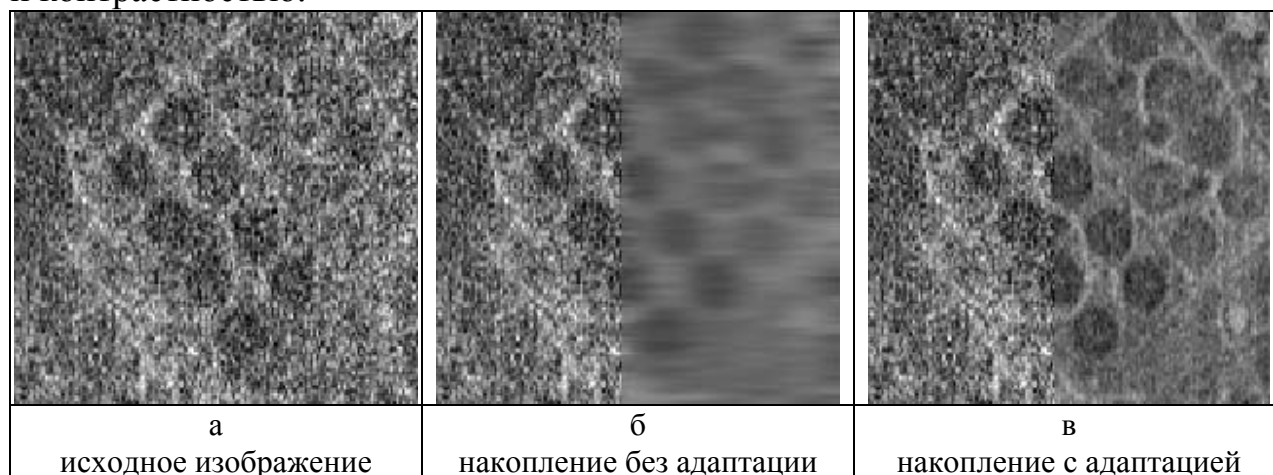


Рисунок 4. Иллюстрация алгоритма адаптации цифрового приемника.

Дополнительно отметим, что схема адаптации к полосе траекторного сигнала способна компенсировать уход частот, связанный с квадратичным набегом фазы, увеличивая потенциально достижимый уровень разрешающей способности по азимуту в этом режиме.

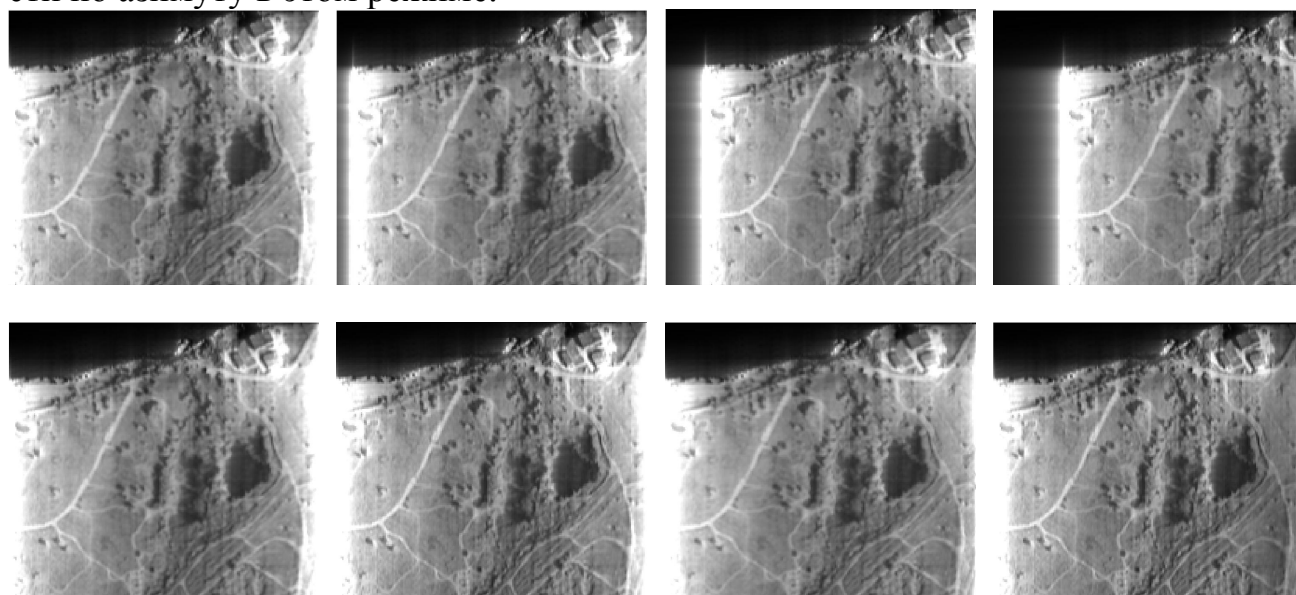


Рисунок 5. Иллюстрация формирования РЛИ при различных значениях ухода частот траекторного сигнала в режиме секторного обзора

На рис. 5 в верхнем ряду представлены результаты обработки траекторных сигналов с уходами частот на 0, 10, 25 и 45 элементов разрешения, соответственно, когда процедура адаптации не применялась. В нижнем ряду представлены соответствующие радиолокационные изображения, полученные с применением процедуры адаптации. Можно сделать вывод о целесообразности использования предложенных алгоритмов. Эффект от предложенной адаптации особенно ярко проявляется при повторяющихся накоплениях результатов обработки с целью повышения отношения сигнал/шум и борьбы со спекл-шумом.

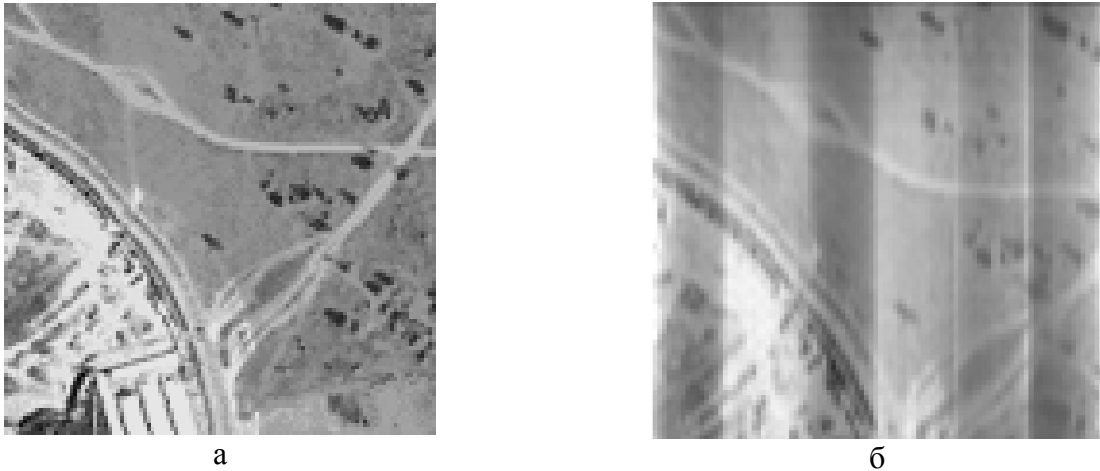


Рисунок 6. Иллюстрация формирования РЛИ в режиме панорамного обзора

Рис. 6 иллюстрирует результат формирования РЛИ (б) в режиме панорамного обзора по принятой модели широкополосного траекторного сигнала, адекватной исходному изображению (а).

Приведены оценки вычислительной эффективности алгоритмов многоскоростной адаптивной фильтрации узкополосного и широкополосного траекторных сигналов, реализуемых на ЦСП ADSP-TS101 TigerSHARC. Показано, что для контрольных примеров разработанные алгоритмы и программы позволяют уменьшить вычислительные затраты в 16 - 20 раз.

Разработано на языке СИ программное обеспечение алгоритмов многоскоростной адаптивной обработки траекторного сигнала в режимах секторного и панорамного обзоров, установленное на цифровые модули МОС 3С001 обработки радиолокационных сигналов в составе ББК самолетов и вертолетов нового поколения.

В приложениях к диссертации содержатся: примеры расчета параметров оптимальных двухступенчатой, трехступенчатой и комбинированной многоступенчатой структур набора фильтров-дециматоров с заданными свойствами частотной избирательности; программы моделирования работы адаптивного цифрового приемника траекторного сигнала в системе MATLAB и на языке СИ для ЦСП семейства ADSP-TS101 TigerSHARC; краткое описание разработанных модулей обработки сигналов МОС 3С001, а также акт о внедрении результатов диссертационной работы.

В заключении сформулированы основные научные положения диссертационной работы, которые заключаются в следующем.

1. Показано, что с целью значительного уменьшения вычислительных затрат и памяти данных целесообразно включить в общую структуру цифрового приемника блок предварительной обработки, выполняющей согласование полосы пропускания устройства формирования РЛИ с шириной полосы частот траекторного сигнала и пропорциональное понижение частоты дискретизации на его выходе. Установлено, что блок предварительной обработки траекторного сигнала должен строиться по многоступенчатой структуре набора фильтров-дециматоров, перестраиваемых по центральной частоте и ширине полосы пропускания с использованием алгоритмов адаптации в частотной области. Пред-

ложены два алгоритма адаптации узкополосного фильтра-дециматора к уходу (смещению) доплеровских частот траекторного сигнала: на основе набора формирующих фильтров и автофокусировки в частотной области.

2. Математически формализована задача оптимального проектирования на сигнальных процессорах многоступенчатой структуры адаптивного узкополосного фильтра-дециматора на основе набора формирующих фильтров, перекрывающих заданную полосу ухода доплеровских частот траекторного сигнала. Получены аналитические соотношения, связывающие друг с другом основные структурные параметры многоступенчатой реализации набора узкополосных формирующих фильтров с последовательным понижением частоты дискретизации на выходе системы.

3. Проведен оптимальный синтез двух- и трехступенчатых структур набора формирующих фильтров с заданным коэффициентом перекрытия их АЧХ для ЦСП семейства ADSP TS201 TigerSHARC фирмы Analog Devices. Показано, что для рассматриваемой задачи построения адаптивного цифрового приемника узкополосного траекторного сигнала оптимальная структура обеспечивает уменьшение общих вычислительных затрат более чем в 10 раз и памяти данных – в 2-4 раза.

4. Дана оценка эффективности предложенных алгоритмов многоскоростной адаптивной обработки широкополосного траекторного сигнала на основе древовидной структуры набора полосовых фильтров-дециматоров. Показано, что наибольшей гибкостью и точностью настройки обладает структура цифрового приемника, использующая предварительное субполосное разбиение траекторного сигнала.

5. Предложены два способа многоступенчатой адаптации на основе многоскоростной обработки широкополосного траекторного сигнала и алгоритмы их реализации с использованием набора перестраиваемых полосовых фильтров-дециматоров, позволяющие уменьшить вычислительные затраты и увеличить точность настройки системы. Первый способ предполагает многоступенчатую оценку смещения полосы частот траекторного сигнала по ее верхней границе, а второй – многоступенчатую адаптацию на основе комбинированной структуры набора фильтров-дециматоров и алгоритмов фильтрации в частотной области.

6. Предложена методика формализации и решения задачи оптимального проектирования на сигнальных процессорах набора полосовых фильтров-дециматоров с неравнополосными частотными характеристиками. Математически формализована задача оптимального проектирования на сигнальных процессорах многоступенчатой древовидной структуры набора фильтров-дециматоров. Получены аналитические соотношения, устанавливающие связь между различными структурными параметрами и параметрами частотной избирательности многоступенчатой формы реализации набора полосовых фильтров-дециматоров.

7. Проведен оптимальный синтез двух- и трехступенчатых структур набора фильтров-дециматоров с заданными свойствами частотной избирательности и коэффициентом перекрытия АЧХ соседних субполосных каналов, реализуемых на ЦСП ADSP-TS101 TigerSHARC.

8. Приведены оценки вычислительной эффективности алгоритмов много-скоростной адаптивной фильтрации узкополосного и широкополосного траекторных сигналов, реализуемых на ЦСП ADSP-TS101 TigerSHARC. Показано, что для контрольных примеров разработанные алгоритмы и программы позволяют уменьшить вычислительные затраты в 16 - 20 раз.

По результатам проведенных в диссертационной работе исследований можно сделать вывод, что поставленная цель – разработка и исследование методов и алгоритмов адаптивной многоскоростной обработки траекторного сигнала в задачах радиовидения, направленных на повышение качества и скорости формирования РЛИ при одновременной минимизации вычислительных затрат и памяти данных, достигнута. В диссертационной работе решена крупная научно-техническая задача, связанная с созданием эффективного программно-алгоритмического обеспечения и технических средств комплекса бортового радиоэлектронного оборудования многофункциональных самолетов и вертолетов нового поколения.

СПИСОК ОСНОВНЫХ НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

1. Андреев Н.А., Рыбаков В.Ю., Марочкин М.В. Модуль цифровой обработки радиолокационных сигналов МОС 1С000 \\\ Цифровая обработка сигналов, 2004, № 3, с. 47-50.
2. Андреев Н.А., Виговский В.С., Красовский Ю.И., Животов А.В. К вопросу о создании цифровых вычислительных систем для перспективных бортовых радиолокационных станций \\\ Сб. статей «Авионика 2002-2004», М.: Радиотехника, 2005.
3. Андреев Н.А., Рыбаков В.Ю., Марочкин М.В. Модуль цифровой обработки радиолокационных сигналов МОС 3С001 \\\ Цифровая обработка сигналов, 2005, № 4, с. 45-48.
4. Андреев Н.А., Животов А.В., Зеленюк Ю.И. и др. Принципы построения бортового вычислительного комплекса вертолетной РЛС \\\ Труды XI-ой МНТК «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж, 2005.
5. Першин А.С., Андреев Н.А. Вычислительные системы с архитектурой единой коммутируемой вычислительной среды для построения перспективных радиолокационных комплексов \\\ Тезисы доклада на XVIII-ой НТК, НИПИ, Жуковский, 2005.
6. Андреев Н.А., Зеленюк Ю.И., Колодыко Г.Н. и др. Электронная вычислительная машина \\\ Патент № 2272317 от 20.03.2006 г.
7. Андреев Н.А., Марочкин М.В., Рыбаков В.Ю. Устройство цифровой обработки сигналов комбинированного вычислительного комплекса РЛС \\\ Труды XII-ой МНТК «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж, 2006.
8. Андреев Н.А., Рыбаков В.Ю., Марочкин М.В. Модуль цифровой обработки радиолокационного сигнала \\\ Труды 8-й МНТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение-DSPA'2006», Москва, 2006, Т.2, с. 481-484.
9. Андреев Н.А., Марочкин М.В., Рыбаков В.Ю. Программируемый цифровой процессор обработки радиолокационных сигналов \\\ Труды XIV-ой МНТК «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж, 2008.
10. Андреев Н.А., Марочкин М.В., Рыбаков В.Ю. Модуль обработки сигналов на основе цифрового сигнального процессора ADSP-TS201 \\\ Труды 9-й МНТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение-DSPA'2007», Москва, 2006, Т.2, с. 471-474.
11. Андреев Н.А., Витязев С.В., Якунин С.А. Проектирование структуры цифрового приемника траекторного сигнала для режима панорамного обзора \\\ Труды 9-й МНТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение-DSPA'2007», Москва, 2007, Т.2, с. 476-478.
12. Андреев Н.А., Животов А.В., Компаниец Ю.И., Рыбаков В.Ю. Многофункциональный вычислительный комплекс для обработки радиолокационных сигналов \\\ Труды

- 10-й МНТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение-DSPA'2008», Москва, 2008, Т.2, с. 429-431.
13. Витязев В.В., Андреев Н.А. Оптимальное проектирование на сигнальных процессорах многоступенчатой структуры адаптивного узкополосного фильтра-дециматора предварительной обработки траекторного сигнала \ \ Труды 10-й МНТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение-DSPA'2008», Москва, Т.2, с.256-258.
 14. Андреев Н.А., Рыбаков В.Ю., Марочкин М.В. Электронная вычислительная машина \ \ Патент № 2344472 от 20.01.2009 г.
 15. Андреев Н.А., Рыбаков В.Ю., Марочкин М.В. Устройство цифровой обработки сигналов \ \ Патент № 2402807 от 04.05.2009 г.
 16. Андреев Н.А., Витязев С.В., Витязев В.В. Алгоритмы адаптации к уходу доплеровских частот узкополосного траекторного сигнала \ \ Труды 11-й МНТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение-DSPA'2009», Москва, Т.1, с.111-113.
 17. Андреев Н.А., Витязев С.В., Витязев В.В. Алгоритмы адаптивной многоскоростной обработки широкополосного траекторного сигнала \ \ Труды 12-й МНТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение-DSPA'2010», Москва, Т.1, с.171-174.
 18. Андреев Н.А., Витязев С.В., Витязев В.В. Методы и алгоритмы адаптивной многоскоростной обработки траекторного сигнала в задачах радиовидения \ \ Цифровая обработка сигналов, 2010, № 1, с.38-44.
 19. Андреев Н.А. Способы построения структуры адаптивного цифрового приемника траекторного сигнала в режиме панорамного обзора \ \ Цифровая обработка сигналов, 2010, № 2, с.42-46.
 20. Андреев Н.А., Витязев В.В. Оптимальное проектирование на сигнальных процессорах многоступенчатой структуры цифрового приемника узкополосного траекторного сигнала \ \ Цифровая обработка сигналов, 2010, № 2, с.47-52.
 21. Андреев Н.А., Рыбаков В.Ю., Животов А.В., Компаниец Ю.И. Многофункциональный вычислительный комплекс для обработки радиолокационных сигналов \ \ Патент № 2399088 от 10.09.2010 г.
 22. Андреев Н.А., Рыбаков В.Ю., Марочкин М.В. Многопроцессорное устройство цифровой обработки сигналов \ \ Патент № 2399089 от 10.09.2010 г.

Андреев Николай Александрович

**АЛГОРИТМЫ И ЦИФРОВЫЕ УСТРОЙСТВА
МНОГОСКОРОСТНОЙ АДАПТИВНОЙ ОБРАБОТКИ
ТРАЕКТОРНОГО СИГНАЛА**

Специальность: 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы и
устройства телевидения»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 04 марта 2011 г. Формат бумаги 60x84/16

Бумага офсетная. Печать ризографическая Усл.печ.л. 1,0

Тираж 100 экз. Заказ № 1182

Отпечатано в ООО «Информационные технологии»

3900035, г. Рязань, ул. Островского, д. 21/1