

На правах рукописи



РЖАНИКОВА ЕЛЕНА ДМИТРИЕВНА

**МЕТОД СОКРАЩЕНИЯ ВРЕМЕНИ ПЕРЕДАЧИ
ЦИФРОВОГО ВИДЕО С МИКРОБЕСПИЛОТНЫХ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Владимир 2018

Работа выполнена на кафедре радиоэлектронных средств в ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (ВятГУ).

Научный руководитель: **Петров Евгений Петрович**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой радиоэлектронных средств
ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», г. Киров.

Официальные оппоненты: **Орлов Игорь Яковлевич**
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры радиотехники ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»,
г. Нижний Новгород.

Самойлов Сергей Александрович
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиотехники и радиосистем ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Владимир.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет», г. Рязань.

Защита состоится «3» октября 2018 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.025.04 при Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, РТиРС.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» и на сайте <http://diss.vlsu.ru>.

Автореферат разослан «10» июля 2018 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, ФРЭМТ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.025.04.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



А.Г. Самойлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Авиационные беспилотные летательные аппараты (БЛА) в настоящее время получили широкое распространение во многих приложениях гражданского и оборонного значения. В связи с успехами нанотехнологий и бортовых сенсоров классификация БЛА расширилась в область малоразмерных БЛА, таких, как микро БЛА. По оценкам специалистов, имеющих отношение к малоразмерным БЛА, значительную часть в масштабе времени, близком к реальному, объективную информацию о деталях событий, представляющих интерес, получают с малоразмерных БЛА (МБЛА), например, микро БЛА. Появление МБЛА является новым и наиболее интересным явлением в разработках БЛА на малых платформах для многих приложений.

В связи с развитием средств получения многозарядных (восемь и более разрядов) цифровых изображений (МЦИ) высокого разрешения, при создании МБЛА особое внимание уделяется сокращению времени подготовки МЦИ на борту МБЛА к передаче по радиоканалу (РК) и качеству передаваемых МЦИ, что позволяет оперативно проанализировать содержание сцен в МЦИ.

Значительный вклад в разработку методов обработки цифровых изображений внесли российские ученые К.К. Васильев, В.Р. Крашенинников, А.А. Спектор, В.А. Соيفер, В.Н. Васюков, Е.П. Петров и др., и зарубежные ученые А.К. Джайн, К. Абенд, Дж. Вудс, Дж. Безаг, Р. Кашьяп и др.

В настоящее время не существует четкой классификации БЛА по массогабаритным характеристикам. В данной работе под МБЛА будут пониматься миниатюрные БЛА с массой, не превышающей 200 г. МБЛА такого класса имеют радиус действия от 300 м до 1,5 км и максимальное время полета от 10 до 25 минут на высоте от 25 до 300 м.

Одним из основных недостатков МБЛА являются ограниченные энергетические ресурсы на борту МБЛА, не позволяющие реализовать методы сокращения времени обработки (сжатия) МЦИ, применимые на борту БЛА более крупных, чем МБЛА. Чем меньше размеры МБЛА, тем меньше энергетические ресурсы на борту и тем сложнее найти методы сокращения времени подготовки МЦИ к передаче по РК без дополнительных затрат энергетических ресурсов на борту МБЛА.

Поиск методов сокращения времени передачи МЦИ высокого разрешения привел к разработке на основе теории условных марковских процессов новых методов сжатия МЦИ без вычислительных операций, не критичных к разрядно-

сти МЦИ, превосходящих по скорости известные методы сжатия МЦИ — JPEG, JPEG2000, стандартные кодеки H.264, H.265, MPEG, фрактальный и рекурсивный алгоритмы, базирующиеся на спектральных или вейвлет-преобразованиях, требующие для реализации больших временных и энергетических ресурсов. Поэтому перечисленные методы сжатия МЦИ не могут быть реализованы на борту МБЛА. Отсюда следует, что задача разработки новых методов сжатия оригиналов статических и динамических МЦИ на борту МБЛА без искажений и вычислительных операций является актуальной.

Цель работы и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка метода сокращения времени передачи с МБЛА статических и динамических МЦИ, состоящих из ГРДИ, МФМ сигналами в присутствии БГШ и импульсных помех.

Поставленная цель достигается решением следующих основных задач:

1. Разработка метода преобразования статических и динамических МЦИ, состоящих из РДИ, в МЦИ, состоящие из ГРДИ.

2. Разработка на основе теории многомерных цепей Маркова с несколькими ($N > 2$) состояниями математических моделей (ММ) статических и динамических МЦИ, состоящих из ГРДИ (МЦИ из ГРДИ).

3. Разработка и исследование алгоритма двумерной нелинейной фильтрации статических МЦИ из ГРДИ, передаваемых МФМ сигналами по РК, при наличии БГШ и аддитивной смеси БГШ и импульсных помех типа «перец-соль».

4. Разработка и исследование алгоритмов адаптивной двумерной нелинейной фильтрации статических МЦИ из ГРДИ, передаваемых МФМ сигналами, при полном или частичном отсутствии априорных данных о статистических характеристиках оригиналов МЦИ на борту МБЛА при наличии БГШ.

5. Разработка и исследование метода реализации статистической избыточности динамических МЦИ из ГРДИ, передаваемых МФМ сигналами, алгоритмами трехмерной нелинейной фильтрации МФМ сигналов при наличии БГШ.

Методы исследования

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе использовались методы статистической теории связи, теории условных марковских процессов с дискретными аргументами, теории оптимальной нелинейной фильтрации, теории вероятности и математической статистики, статистической теории выбора и принятия решений, линейной и булевой алгебры. При разработке программного обеспечения применялись методы объектно-ориентированного проектирования программных систем.

Научная новизна работы

1. Разработан метод преобразования оригиналов статических и динамических МЦИ из РДИ, в МЦИ из ГРДИ, включающих два и более РДИ, без искажений и вычислительных операций на борту МБЛА, позволяющий сократить время передачи оригиналов МЦИ МФМ сигналами во столько раз, сколько РДИ включено в ГРДИ.

2. Разработаны двумерная и трехмерная ММ МЦИ из ГРДИ, на основе двумерных и трехмерных цепей Маркова с несколькими состояниями ($N > 2$), адекватные оригиналам статических и динамических МЦИ.

3. Разработаны на основе теории многомерных цепей Маркова с $N > 2$ состояниями и исследованы алгоритмы двумерной и трехмерной нелинейной фильтрации статических и динамических МЦИ из ГРДИ, эффективно реализующие статистическую избыточность оригиналов МЦИ для компенсации потерь помехоустойчивости, вызванных применением МФМ сигналов для передачи МЦИ с МБЛА при наличии БГШ и аддитивной смеси БГШ и импульсных помех типа «перец-соль».

4. Разработан адаптивный алгоритм двумерной нелинейной фильтрации статических МЦИ из ГРДИ, при частичном и полном отсутствии априорных данных о статистических характеристиках МЦИ, отличающийся высокой скоростью адаптации в реальном масштабе времени.

5. Результаты исследований разработанного метода сокращения времени передачи статических и динамических МЦИ с компенсацией потерь помехоустойчивости, вызванных применением МФМ сигналов, реализацией статистической избыточности нелинейной фильтрацией МФМ сигналов, подтвердили теоретические предпосылки эффективности предложенного метода, позволившего сократить время передачи статических МЦИ без потерь помехоустойчивости в три раза, а динамических МЦИ — в четыре раза без затрат энергетических ресурсов на борту МБЛА.

Положения, выносимые на защиту

1. Предложенный метод преобразования статических и динамических МЦИ, состоящих из РДИ, в статические и динамические МЦИ, состоящие из ГРДИ, позволяет сократить время передачи с МБЛА по радиоканалу цифровых изображений и видеопоследовательностей.

2. Полученные и экспериментально подтвержденные математические модели преобразованных статических и динамических МЦИ на основе многомерных цепей Маркова позволяют разработать алгоритмы нелинейной фильтрации статических и динамических МЦИ.

3. Разработанный алгоритм двумерной нелинейной фильтрации преобразованных статических МЦИ, передаваемых МФМ сигналами, позволяет повысить помехоустойчивость приема МФМ сигналов при наличии БГШ и импульсных помех типа «перец-соль» за счет эффективной реализации статистической избыточности МЦИ.

4. Алгоритм адаптивной нелинейной фильтрации преобразованных статических МЦИ, передаваемых МФМ сигналами, позволяет повысить помехоустойчивость приема МФМ сигналов при отсутствии априорных данных о статистических характеристиках.

5. Разработанный алгоритм трехмерной нелинейной фильтрации преобразованных динамических МЦИ, передаваемых МФМ сигналами, позволяет повысить помехоустойчивость приема МФМ сигналов при наличии БГШ за счет эффективной реализации статистической избыточности МЦИ.

6. Анализ результатов качественных и количественных исследований разработанного метода сокращения времени передачи с МБЛА статических и динамических МЦИ показал возможность сокращения времени передачи статических МЦИ МФМ сигналами в три раза и динамических МЦИ в четыре раза при полной компенсации потерь помехоустойчивости, вызванных применением МФМ сигналов.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в следующем:

1. Распространена теория условных марковских процессов с дискретными аргументами на представление статических и динамических МЦИ многомерными цепями Маркова с несколькими (более двух) состояниями и на синтез алгоритмов нелинейной фильтрации многопозиционных сигналов, используемых для передачи статических и динамических МЦИ, являющихся двумерными и трехмерными цепями Маркова с состояниями более двух, что позволило расширить класс фильтруемых случайных процессов в задачах сжатия и передачи МЦИ минимальными энергетическими ресурсами.

2. Разработан метод преобразования МЦИ из РДИ, в МЦИ из ГРДИ, число которых меньше, чем РДИ, и на основе многомерных цепей Маркова с несколькими состояниями построены ММ, адекватные статическим и динамическим МЦИ из ГРДИ.

3. Разработаны алгоритмы двумерной и трехмерной нелинейной фильтрации МФМ сигналов, адекватных ГРДИ, реализующие статистическую избыточность оригиналов статических и динамических МЦИ для компенсации потерь помехоустойчивости, вызванных их применением.

4. Проведены исследования метода сокращения времени передачи статиче-

ских и динамических МЦИ из ГРДИ, результаты которых позволили без вычислительных операций и искажений на борту МБЛА сократить время передачи статических МЦИ из ГРДИ в три раза, а динамических МЦИ из ГРДИ в четыре раза без увеличения затрат энергетических ресурсов на борту МБЛА.

5. Практическая значимость работы заключается в исключении вычислительных операций и искажений на борту МБЛА при преобразовании оригиналов МЦИ из РДИ в МЦИ из ГРДИ для передачи по РК и компенсации потерь помехоустойчивости, вызванных применением МФМ сигналов, реализацией статической избыточности оригиналов МЦИ алгоритмами многомерной нелинейной фильтрации МФМ сигналов при априорно известных и неизвестных статистических характеристиках оригиналов МЦИ при наличии БГШ и импульсных помех.

Практическое применение предложенный метод сокращения времени передачи МЦИ с МБЛА с минимальными затратами энергетических ресурсов на борту найдет при разработке миниатюрных БПЛА в различных приложениях.

Достоверность полученных результатов обеспечивается анализом ранее проведенных аналогичных исследований, достоверной информацией об исследуемом предмете, корректным использованием математического аппарата, воспроизводимостью результатов исследования, аналитическим описанием предлагаемых моделей и алгоритмов, сравнением теоретических и экспериментальных результатов, практическим подтверждением.

Внедрение результатов работы. На основе результатов научных исследований, полученных при работе над диссертацией, написано и издано учебное пособие «Алгоритмы сокращения времени передачи многоуровневых цифровых изображений» авторов Е.П. Петрова, Н.Л. Хариной, Е.Д. Ржаниковой, используемое в учебном курсе подготовки магистрантов направления 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» в рамках дисциплины «Статистическая радиотехника».

Апробация работы. Результаты исследований, составляющие основное содержание диссертации, докладывались на 7 международных и 9 всероссийских конференциях, в том числе: XV, XVIII Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA» (Москва, 2013, 2016), III Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» («III Козловские чтения») (Самара, 2013), Всероссийской конференции «Радиоэлектронные средства получения, обработки и визуализации информации» (Нижний Новгород, 2014), XX Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 2014) и

других НТК.

Основные публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 30 работ: из них 9 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 2 статьи в журнале, индексируемом в реферативной базе данных SCOPUS и 19 тезисов докладов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников. Основная часть содержит 125 страниц, 55 рисунков. Список использованных источников включает 85 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснованы актуальность и практическая значимость диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований, приведены достигнутые новые научные результаты и основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** предлагается метод преобразования статических и динамических МЦИ из РДИ, в МЦИ из ГРДИ, число которых меньше, чем РДИ. Используя марковское представление МЦИ, разработаны ММ статических МЦИ из ГРДИ, каждое из которых является двумерной цепью Маркова с несколькими ($N > 2$) состояниями, и ММ динамических МЦИ из ГРДИ, каждое из которых является трехмерной цепью Маркова с несколькими ($N > 2$) состояниями. Процедура получения ГРДИ из двух РДИ восьмиразрядного МЦИ, на примере двух старших РДИ показана на рисунке 1.

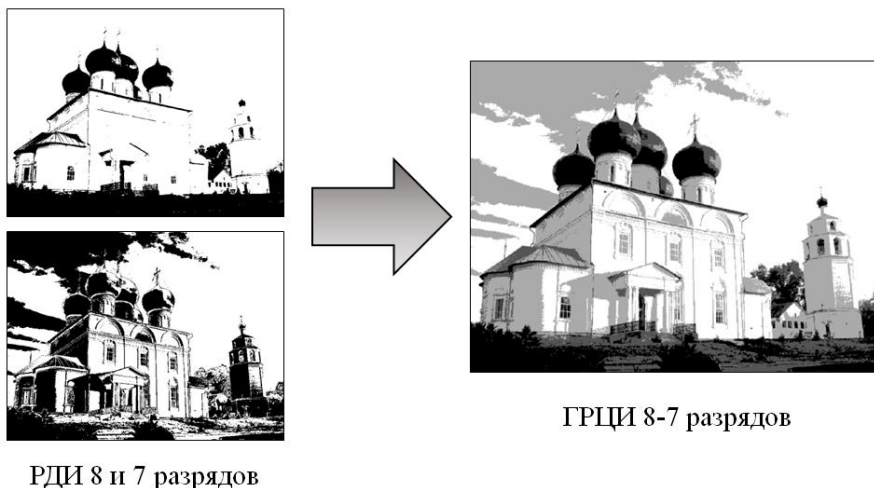


Рисунок 1 – Формирование ГРДИ из двух РДИ

Преобразование МЦИ из РДИ осуществляется на борту МБЛА без вычислительных операций, сохраняется статистическая избыточность оригинала МЦИ, обусловленная пространственной и межразрядной корреляциями пикселей МЦИ, включенных в ГРДИ. Статистическая избыточность ГРДИ является резер-

вом повышения помехоустойчивости приема МЦИ, передаваемых МФМ сигналами, каждый одиночный сигнал которых адекватен комбинации состояний бинарных пикселей РДИ, включенных в ГРДИ.

По своим статистическим характеристикам МЦИ, полученные с МБЛА, хорошо аппроксимируются двумерными цепями Маркова. ММ ГРДИ является двумерной цепью Маркова (рис. 2), каждый пиксель которого формируется на основе суперпозиции двух одномерных ортогональных цепей Маркова с N равновероятными ($p_1 = p_2 = \dots = p_N$) состояниями $M_i (i \in N)$ и матрицами вероятностей перехода из состояния M_i в состояние $M_j (i, j \in N)$ по горизонтали $^1\Pi$ и по вертикали $^2\Pi$ соответственно:

$$^1\Pi = \left\| \pi_{ij}^1 \right\|_{N \times N}, \quad ^2\Pi = \left\| \pi_{ij}^2 \right\|_{N \times N}, \quad (1)$$

удовлетворяющих условию нормировки $\sum_{i=1}^N \pi_{ij}^k = 1, j \in N, k = \overline{1,2}$ и стационарности

$p_i = \sum_{j=1}^N p_j \pi_{ji}^k; i \in N, k = \overline{1,2}$, где π_{ji}^k - элементы транспонированных матриц (1).

Если условная зависимость пикселей на ММ ГРДИ определена от левого верхнего сегмента ММ ГРДИ, то пиксель $M_{i,j} (i \in m, j \in n)$ зависит только от случайных элементов некоторого подмножества $\Lambda_{i,j}$ этого сегмента (рис. 2), называемого окрестностью. Лучшим образом удовлетворяющее условию каузальности является конфигурация окрестности $\Lambda_{i,j} = \{M_{i,j-1}, M_{i-1,j}, M_{i-1,j-1}\}$ (рис. 3).

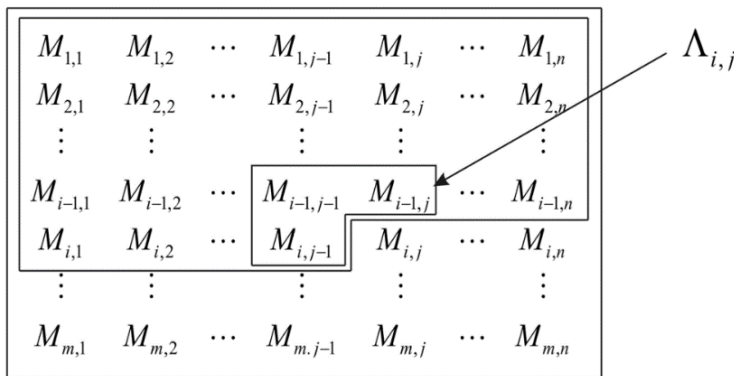


Рисунок 2 – ММ ГРДИ

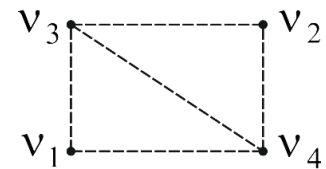


Рисунок 3 – Окрестность пикселя v_4 $\Lambda_{i,j} = \{v_1, v_2, v_3\}$, где приняты обозначения $v_1 = M_{i,j-1}; v_2 = M_{i-1,j}; v_3 = M_{i-1,j-1}; v_4 = M_{i,j}$

Вероятность состояния пикселя v_4 (рис. 3) полностью определяется матрицей вероятностей перехода:

$$\Pi = \left\| \pi_{ijk} \right\|_{N \times N^2} \quad (2)$$

Элементы матрицы Π (2) связаны с элементами матриц (1) следующими соотношениями:

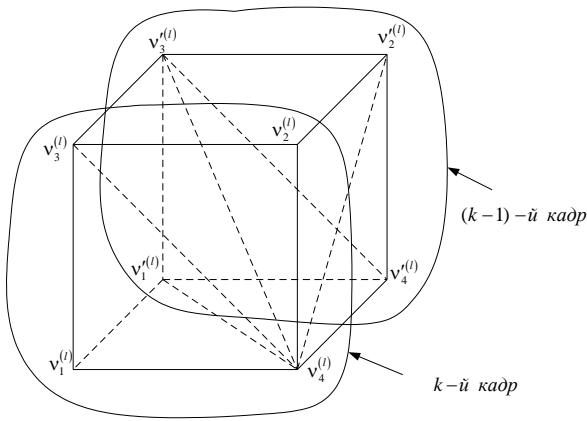
$$\pi_{iii} = \frac{{}^1\pi_{ii} \cdot {}^2\pi_{ii}}{3\pi_{ii}} \quad \pi_{ijj} = \frac{{}^1\pi_{ij} \cdot {}^2\pi_{ij}}{3\pi_{ii}} \quad \pi_{iik} = \frac{{}^1\pi_{ik} \cdot {}^2\pi_{ik}}{3\pi_{ii}} \quad \pi_{iil} = \frac{{}^1\pi_{il} \cdot {}^2\pi_{il}}{3\pi_{ii}}$$

...

$$\pi_{lli} = \frac{{}^1\pi_{ii} \cdot {}^2\pi_{li}}{3\pi_{ll}} \quad \pi_{ljj} = \frac{{}^1\pi_{lj} \cdot {}^2\pi_{lj}}{3\pi_{ll}} \quad \pi_{llk} = \frac{{}^1\pi_{lk} \cdot {}^2\pi_{lk}}{3\pi_{ll}} \quad \pi_{lll} = \frac{{}^1\pi_{ll} \cdot {}^2\pi_{ll}}{3\pi_{ll}}$$

где ${}^3\pi_{ii}$ – элементы дополнительной матрицы ${}^3\Pi = {}^1\Pi \times {}^2\Pi'$.

ММ ВП МЦИ является трехмерной цепью Маркова. Окрестность элемента изображения $v_4^{(l)}$ при моделировании последовательности ГРДИ возрастает до семи соседних пикселей $\Lambda_{i,j,k}^{(l)} = \{v_1^{(l)}; v_2^{(l)}; v_3^{(l)}; v_1'^{(l)}; v_2'^{(l)}; v_3'^{(l)}; v_4'^{(l)}\}$ (рис. 4). Сплошными и пунктирными линиями указаны статистические связи между пикселями РДИ ВП, входящими в окрестность $\Lambda_{i,j,k}^{(l)}$ элемента $v_4^{(l)}$.



$$\begin{aligned} v_1^{(l)} &= \mu_{i,j-1,k}^{(l)}, & v_1'^{(l)} &= \mu_{i,j-1,k-1}^{(l)}, \\ v_2^{(l)} &= \mu_{i-1,j,k}^{(l)}, & v_2'^{(l)} &= \mu_{i-1,j,k-1}^{(l)}, \\ v_3^{(l)} &= \mu_{i-1,j-1,k}^{(l)}, & v_3'^{(l)} &= \mu_{i-1,j-1,k-1}^{(l)}, \\ v_4^{(l)} &= \mu_{i,j,k}^{(l)}, & v_4'^{(l)} &= \mu_{i,j,k-1}^{(l)}. \end{aligned}$$

Рисунок 4 – Окрестность пикселя $v_4^{(l)}$ при моделировании ГРДИ видеопоследовательности МЦИ

Для оценки адекватности математической модели проведено моделирование искусственных изображений размером 2000×2000 с заданными значениями матриц вероятностей перехода по горизонтали и вертикали и получены их оценочные значения. Погрешность усредненных вычисленных оценок матриц вероятностей перехода не превышает 0,21%. Оценки элементов матриц являются несмещенными и асимптотически стремятся к истинным значениям с увеличением статистики.

Во второй главе на основе представления МЦИ набором ГРДИ и теории фильтрации многомерных цепей Маркова разработан алгоритм двумерной нелинейной фильтрации МЦИ из ГРДИ, включающих K РДИ при наличии БГШ. ММ ГРДИ является двумерная цепь Маркова с $N = 2^K$ состояниями. Система рекуррентных уравнений нелинейной фильтрации двумерной цепи Маркова с N состояниями имеет вид:

$$\begin{aligned}
u_{i(k+1)}(v_4) = & \left[f_{(k+1)}(M_i(v_4)) - f_{(k+1)}(M_N(v_4)) \right] + u_{i(k)}(v_1) + \\
& + z_i(u_{(k)}(v_1), {}^1\pi_{ij}) + u_{i(k)}(v_2) + z_i(u_{(k)}(v_2), {}^2\pi_{ij}) - \\
& - u_{i(k)}(v_3) - z_i(u_{(k)}(v_3), {}^3\pi_{ij}), \quad i = \overline{1, N-1}
\end{aligned} \tag{3}$$

где $u_{j(k+1)}(v_4) = \ln \left[\frac{p_{j(k+1)}(v_4)}{p_{N(k+1)}(v_4)} \right]$ ($j = \overline{1, N-1}$); $p_{j(k+1)}(v_4)$ ($j = \overline{1, N}$) – апостериорная вероятность состояния дискретного параметра МФМ сигнала в пикселе v_4 ММ ГРДИ (рис. 3), $f_{(k+1)}(M_j(v_4)) - f_{(k+1)}(M_N(v_4))$ ($j = \overline{1, N-1}$) – разность логарифмов функции правдоподобия состояний дискретного параметра МФМ сигнала в пикселе v_4 ММ ГРДИ; $u_{(k)}(v_i)$ ($i = \overline{1, N-1}$) – совокупность $u_{1(k)}(v_i)$, $u_{2(k)}(v_i)$, ..., $u_{(N-1)(k)}(v_i)$; ${}^3\pi_{ij}$ – элементы дополнительной матрицы ${}^3\Pi = {}^1\Pi \times {}^2\Pi$, $z_j(\cdot)$ – нелинейная функция вида:

$$\begin{aligned}
z_j(u_{(k)}(v_l), {}^l\pi_{ij}) = \\
= \ln \left[\frac{\sum_{i=1, i \neq j}^{N-1} \left\{ \exp(u_{i(k)}(v_l) - u_{j(k)}(v_l)) {}^l\pi_{ij} \right\} + \exp(-u_{j(k)}(v_l)) {}^l\pi_{Nj} + \pi_{jj}}{\sum_{i=1}^{N-1} \left\{ \exp(u_{i(k)}(v_l)) {}^l\pi_{iN} \right\} + \pi_{NN}} \right], \\
(j = \overline{1, N-1}, l = \overline{1, 3}).
\end{aligned} \tag{4}$$

Вся априорная информация о статистической зависимости состояний пикселей МЦИ из ГРДИ сосредоточена в слагаемых вида (4), где ${}^l\pi_{ij}$ ($i, j = \overline{1, N}, l = \overline{1, 3}$) – элементы матриц вероятностей перехода пикселей МЦИ из ГРДИ по горизонтали ${}^1\Pi$, вертикали ${}^2\Pi$ и диагонали ${}^3\Pi$ соответственно.

В качестве критерия различения состояний элементов МЦИ принят критерий максимума логарифма отношения апостериорных вероятностей $u_{j(k)}(v_4)$, в соответствии с которым, если

$$u_{j(k)}(v_4) > u_{i(k)}(v_4); \quad i, j = \overline{1, N-1}; \quad i \neq j, \tag{5}$$

то принимается решение о состоянии элемента изображения $v_4 = M_j$, если все значения $u_{j(k)}(v_4) \leq 0$ ($j = \overline{1, N-1}$), то принимается решение о состоянии элемента изображения $v_4 = M_N$.

Проведены исследования эффективности алгоритмов нелинейной фильтрации 8- и 9-разрядных МЦИ из ГРДИ, включающих два и три РДИ соответственно. Для сравнения проведено моделирование алгоритма двумерной нели-

нейной фильтрации оригиналов МЦИ из РДИ, передаваемых бинарными ФМ сигналами при одинаковом отношении сигнал/шум по мощности на входе нелинейного фильтра ρ_s^2 . Для оценки качества восстановления использовалась метрика СКО. На рис. 5 приведены зависимости α – коэффициента относительного сокращения СКО до и после двумерной нелинейной фильтрации статических МЦИ при различных ρ_s^2 на входе нелинейного фильтра (рис. 5а) и приемного устройства (рис. 5б). График 1 показывает коэффициент сокращения СКО при нелинейной фильтрации МЦИ, переданных бинарными ФМ сигналами, графики 2 и 3 — МЦИ, переданных МФМ сигналами с четырьмя и восемью состояниями фазы соответственно. Отмечается, что при передаче МЦИ МФМ сигналами при ρ_s^2 до -9 дБ эффективность нелинейной фильтрации возрастает за счет реализации статистической избыточности, обусловленной межразрядной корреляцией в МЦИ. При этом потери помехоустойчивости, вызванные применением

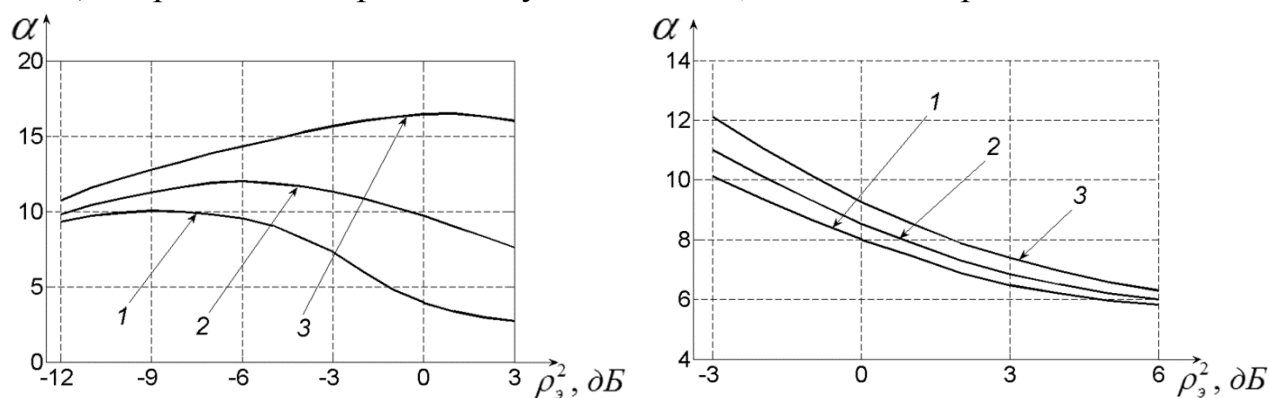


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента сокращения СКО от отношения сигнал/шум на входе:

а) нелинейного фильтра

б) приемного устройства

МФМ сигналов, удалось полностью скомпенсировать нелинейной фильтрацией МЦИ.

Результаты нелинейной фильтрации двумерной цепи Маркова с восемью состояниями при $\rho_s^2 = 0$ дБ на входе приемного устройства приведены на рис. 6. Исходное 8-разрядное полутоновое изображение размером 1500×2000 пикселей, состоящее из четырех ГРДИ, каждое из которых включает два РДИ, приведено на рис. 6а. После того, как каждое ГРДИ было отфильтровано описанным алгоритмом, значение яркости каждого пикселя исходного изображения было восстановлено в 8-разрядное число. На рис. 6 б,в показаны зашумленное и восстановленное изображения и значения СКО.

Разработан комбинированный алгоритм нелинейной фильтрации МЦИ при наличии на входе радиоприемного устройства аддитивной смеси БГШ и импульсных помех типа «перец-соль». В этом случае параметрическая нелинейная филь-

трация менее эффективна, т.к. не подавляет импульсные помехи, а напротив, выделяет их из БГШ как мелкие объекты МЦИ. Для подавления импульсных помех предлагается использовать медианный фильтр, подключенный к выходу нелинейного фильтра. При этом алгоритм фильтрации приобретает комбинированный характер, обеспечивая эффективное подавление обеих помех.



а) исходное 8-разрядное МЦИ



б) зашумленное 8-разрядное МЦИ, СКО=2826



в) восстановленное 8-разрядное МЦИ, СКО=219

Рис. 6 Пример нелинейной фильтрации 8-разрядного МЦИ

Процесс комбинированной нелинейной фильтрации исследован на искусственных и реальных 8-разрядных МЦИ. Моделирование алгоритма показало его высокую эффективность в подавлении БГШ и импульсных помех. На рис. 7 при-

ведены зависимости коэффициента α при различных ρ_3^2 на входе ПУ. График 1 соответствует комбинированной фильтрации с окном медианного фильтра 5×5 , график 2 – комбинированной фильтрации с окном медианного фильтра 3×3 , график 3 – оптимальной фильтрации.

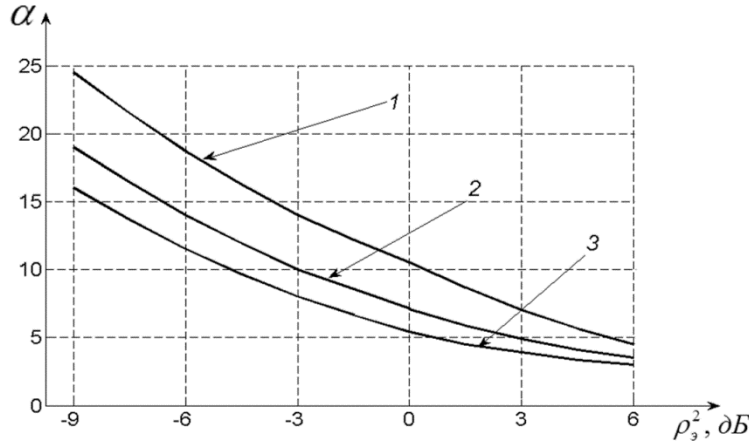


Рисунок 7 – Зависимости коэффициента α при оптимальной и комбинированной фильтрации

В третьей главе разработан адаптивный алгоритм нелинейной фильтрации МЦИ из ГРДИ. При полном или частичном отсутствии априорных данных о статистических характеристиках оригиналов статических МЦИ адаптивный алгоритм позволяет непосредственно в процессе приема МФМ сигналов вычислять недостающие статистические данные и использовать их для повышения качества восстановления МЦИ, искаженных помехами в радиоканале. В основу алгоритма адаптивной нелинейной фильтрации МЦИ из ГРДИ положены уравнения (3), заменив в них априорные вероятности перехода на их оценки, вычисленные по принятым МФМ сигналам:

$$\begin{aligned}
 u_{i(k+1)}(v_4^{(l)}) = & \left[f_{(k+1)}(M_i(v_4^{(l)})) - f_{(k+1)}(M_N(v_4^{(l)})) \right] + u_{i(k)}(v_1^{(l)}) + \\
 & + z_i(u_{(k)}(v_1^{(l)}), {}^1\hat{\pi}_{ij}) + u_{i(k)}(v_2^{(l)}) + z_i(u_{(k)}(v_2^{(l)}), {}^2\hat{\pi}_{ij}) - \\
 & - u_{i(k)}(v_3^{(l)}) - z_i(u_{(k)}(v_3^{(l)}), {}^3\hat{\pi}_{ij}), \quad i = \overline{1, N-1}
 \end{aligned} \tag{6}$$

где ${}^k\hat{\pi}_{ii}$ ($i = \overline{1, N}, k = \overline{1, 3}$) – оценки элементов МВП $\|{}^k\pi_{ii}\|$.

Предложен способ быстрого вычисления оценок статистических характеристик МЦИ на основе принятых МФМ сигналов, адекватных ГРДИ. Оценки МВП по горизонтали $\|{}^1\pi_{ij}\|$ могут быть вычислены по формуле:

$${}^1\hat{\pi}_{ii}^{(l,r)} = 1 - \frac{2p_i}{\hat{\chi}^{(l,r)}}, \quad (i \in N), \tag{7}$$

где $\hat{\chi}^{(l,r)}$ – оценка средней длины цуга – последовательности одинаковых элементов l -го ГРДИ на r -м шаге адаптации; p_i – априорная вероятность состояния M_i , одинаковая для всех ГРДИ ($p_i = 1/N$; $i = \overline{1, N}$). Графики зависимости оценки ${}^1\hat{\pi}_{ii}$ от истинных значений ${}^1\pi_{ii}$ для различных ρ_s^2 на входе приемного устройства представлены на рис. 8.

Для коррекции оценки ${}^1\hat{\pi}_{ii}$ при заданном значении ρ_s^2 может быть использован коэффициент $\gamma = \text{ctg } \theta$, где θ – угол наклона графиков на рис. 6. Скорректированная оценка ${}^1\tilde{\pi}_{ii}$ может быть вычислена с учетом коэффициента γ по формуле

$${}^1\tilde{\pi}_{ii} = 0,25 + \gamma(\hat{\pi}_{ii} - 0,25). \quad (8)$$

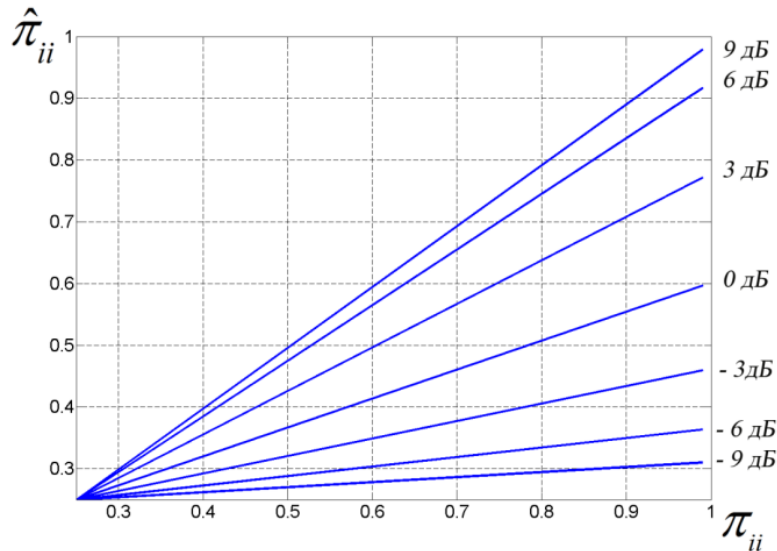


Рисунок 8 – Зависимости оценки $\hat{\pi}_{ii}$ от истинного значения π_{ii} для различных ρ_s^2

Оценка вероятности перехода по вертикали ${}^2\hat{\pi}_{ii}$ в l -м ГРДИ может быть вычислена по формуле:

$${}^2\hat{\pi}_{ii} = \frac{\hat{\pi}_{iii} \cdot (1 - {}^1\hat{\pi}_{ii})}{{}^1\hat{\pi}_{ii} - 4\hat{\pi}_{iii} \cdot {}^1\hat{\pi}_{ii} + \hat{\pi}_{iii}}, \quad (9)$$

где оценки ${}^1\hat{\pi}_{ii}$, $\hat{\pi}_{iii}$ вычисляются по первым строкам принятых ГРДИ. Скорректированные оценки ${}^1\hat{\pi}_{ii}$, ${}^2\hat{\pi}_{ii}$ подставляются в адаптивный алгоритм (6), осуществляя непрерывную подстройку параметров нелинейного фильтра приемного устройства.

Получение эффективных оценок при адаптации достигается в процессе фильтрации первых строк изображения тем быстрее, чем больше отношение сиг-

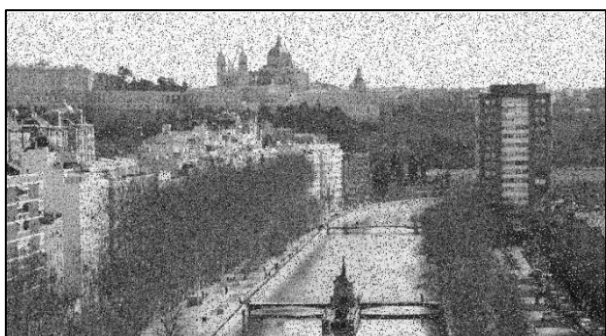
нал/шум. В интервале ρ_s^2 от 3 до -9 дБ за 10 – 50 строк адаптации принятого МЦИ из ГРДИ оценки статистических характеристик МЦИ принимают значения, отличающиеся от среднестатистических не более, чем на 10%.

Моделирование алгоритма показало его высокую эффективность при различных значениях ρ_s^2 . На рис. 10 приведены результаты адаптивной фильтрации для изображения «Город» (рис. 9) при различных ρ_s^2 на входе нелинейного фильтра. На рис. 10 а,в,д приведены фрагменты зашумленных МЦИ, состоящих из ГРДИ с двумя РДИ, при отношениях сигнал/шум по мощности на входе ПУ, соответственно, 0 дБ, -6 дБ и -9 дБ; на рис. 10 б,г,е показаны изображения, полученные в результате адаптивной фильтрации.



Рис. 9 МЦИ «Город»

Анализ изображений на рис. 10 показывает, что процесс адаптации происходит на первых строках изображения тем быстрее, чем больше ρ_s^2 на входе нелинейного фильтра.



а) $\rho_s^2 = 0\text{дБ}$, $CKO = 1779$



б) $CKO = 368$



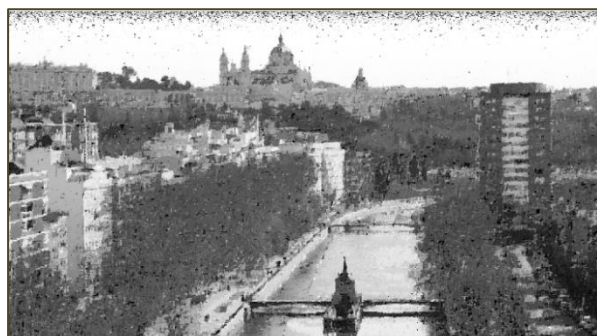
в) $\rho_s^2 = -6\text{дБ}$, $CKO = 4775$



г) $CKO = 767$



д) $\rho_s^2 = -9\text{дБ}$, $\text{СКО} = 6067$



е) $\text{СКО} = 973$

Рис. 10 Результаты адаптивной фильтрации 8-разрядного МЦИ, состоящего из ГРДИ с двумя РДИ

Адаптивный алгоритм практически не уступает оптимальному по критерию СКО при снижении ρ_s^2 до -9 дБ. При меньшем отношении сигнал/шум эффективность алгоритма адаптивной фильтрации заметно снижается вследствие значительной погрешности оценок статистических характеристик принимаемого МЦИ, вызванной БГШ.

В четвертой главе для сокращения времени передачи видеопоследовательности (ВП) оригиналов МЦИ из РДИ, каждое МЦИ ВП перед передачей по РК преобразуется на борту МБЛА в МЦИ из ГРДИ, включающих по два или четыре РДИ, в каждом, например, 8-разрядном МЦИ. При большей разрядности МЦИ ГРДИ может включать более четырех РДИ. Чем больше РДИ объединены в ГРДИ, тем меньше время требуется для передачи по радиоканалу ВП МЦИ из ГРДИ. Статистическая избыточность МЦИ, входящих в ВП, за счет пространственной и межкадровой корреляций МЦИ в исходной ВП оригиналов МЦИ имеет размер реально больший, чем у статических МЦИ, но ограниченный, поэтому потери помехоустойчивости, вызванные применением МФМ сигналов, не всегда могут быть скомпенсированы при большом числе РДИ в ГРДИ. Преобразования ВП МЦИ, состоящих из РДИ, в ВП МЦИ из ГРДИ, не требуют на борту МБЛА вычислительных операций и, следовательно, дополнительных затрат энергетических ресурсов на борту МБЛА.

На основе теории нелинейной многомерной фильтрации цепей Маркова и ММ (рис. 4), синтезирован алгоритм трехмерной нелинейной фильтрации ВП МЦИ из ГРДИ, передаваемых МФМ сигналами, вида:

$$\begin{aligned}
u_{i(k+1)}(v_4) = & \left[f_{(k+1)}(M_i(v_4)) - f_{(k+1)}(M_4(v_4)) \right] + u_{i(k)}(v_1) + z_i(u_{(k)}(v_1), {}^1\pi_{ij}) + \\
& + u_{i(k)}(v_2) + z_i(u_{(k)}(v_2), {}^2\pi_{ij}) + u_{i(k)}(v'_4) + z_i(u_{(k)}(v'_4), {}^4\pi_{ij}) + \\
& + u_{i(k)}(v'_3) + z_i(u_{(k)}(v'_3), {}^7\pi_{ij}) - u_{i(k)}(v_3) - z_i(u_{(k)}(v_3), {}^3\pi_{ij}) - \\
& - u_{i(k)}(v'_1) + z_i(u_{(k)}(v'_1), {}^5\pi_{ij}) - u_{i(k)}(v'_2) + z_i(u_{(k)}(v'_2), {}^6\pi_{ij}), \quad i = \overline{1, N-1},
\end{aligned} \tag{10}$$

где $u_{j(k)}(v_4) = \ln \left[\frac{p_{j(k)}(v_4)}{p_{N(k)}(v_4)} \right]$ ($j = \overline{1, N-1}$); $p_{j(k)}(v_4)$ ($j = \overline{1, N}$) – апостериорная

вероятность состояния дискретного параметра МФМ сигнала в пикселе v_4 ММ ГРДИ, $f_{(k+1)}(M_j(v_4)) - f_{(k+1)}(M_N(v_4))$ ($j = \overline{1, N-1}$) – разность логарифмов функции правдоподобия состояний дискретного параметра МФМ сигнала в пикселе v_4 ММ ГРДИ; $u_{(k)}(v_i)$ ($i = \overline{1, N-1}$) – совокупность $u_{1(k)}(v_i), u_{2(k)}(v_i), \dots, u_{(N-1)(k)}(v_i)$; $z_j(\cdot)$ – нелинейная функция вида:

$$\begin{aligned}
z_j(u_{(k)}(v_l), {}^l\pi_{ij}) = \\
= \ln \left[\frac{\sum_{i=1, i \neq j}^{N-1} \left\{ \exp(u_{i(k)}(v_l) - u_{j(k)}(v_l)) {}^l\pi_{ij} \right\} + \exp(-u_{j(k)}(v_l)) {}^l\pi_{Nj} + \pi_{jj}}{\sum_{i=1}^{N-1} \left\{ \exp(u_{i(k)}(v_l)) {}^l\pi_{iN} \right\} + \pi_{NN}} \right], \tag{10} \\
(j, l = \overline{1, 3})
\end{aligned}$$

Вся априорная информация о статистической зависимости состояний дискретного параметра МФМ сигнала сосредоточена в слагаемых вида (10), где ${}^l\pi_{ij}$ ($i, j = \overline{1, 4}, l = \overline{1, 3}$) – элементы матриц вероятностей перехода элементов ГРДИ по горизонтали ${}^1\Pi$, вертикали ${}^2\Pi$ и диагонали ${}^3\Pi$ соответственно.

В качестве критерия различения состояний дискретного параметра МФМ сигналов, адекватных соответствующим пикселям ГРДИ, примем критерий (5).

Проведены исследования эффективности алгоритмов нелинейной фильтрации ВП 8- и 9-разрядных МЦИ из ГРДИ, включающих два и три РДИ соответственно. Для сравнения проведена нелинейная фильтрация ВП МЦИ из РДИ, передаваемых бинарными ФМ сигналами при одинаковых ρ_s^2 на входах нелинейных фильтров. Для оценки качества восстановления использовалась метрика СКО. На рис. 11 приведены зависимости коэффициента сокращения СКО при трехмерной нелинейной фильтрации ВП МЦИ от отношения сигнал/шум по мощности на входе нелинейного фильтра (рис.11а) и приемного устройства (рис.11б).

График 1 показывает коэффициент сокращения СКО при нелинейной фильтрации ВП МЦИ, переданных бинарными сигналами, графики 2 и 3 — ВП МЦИ, переданных МФМ сигналами с четырьмя и восемью состояниями фазы соответственно. Из сравнения графиков видно, что при передаче ВП МЦИ МФМ сигналами

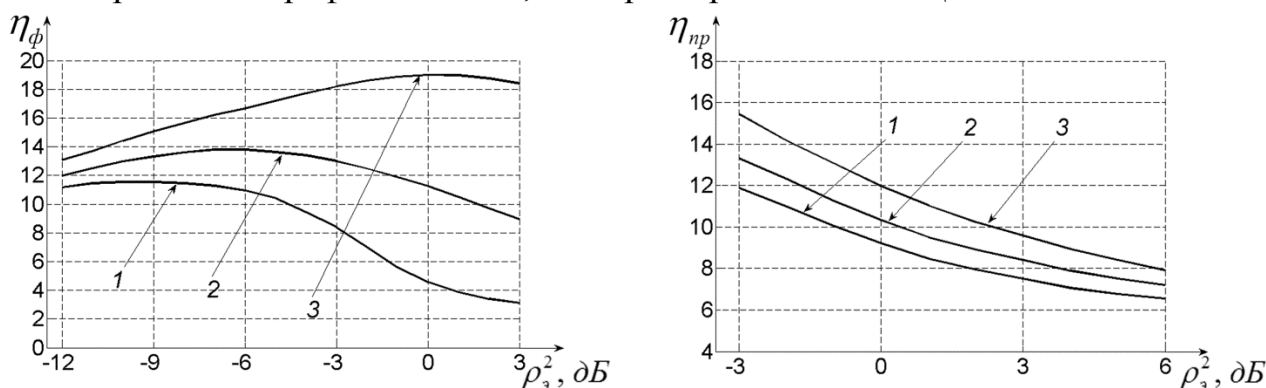


Рисунок 11 – Зависимость коэффициента сокращения СКО от отношения сигнал/шум на входе:

а) нелинейного фильтра

б) приемного устройства

при отношении сигнал/шум по мощности сигнала до -9 дБ эффективность нелинейной фильтрации значительно возрастает за счет реализации статистической избыточности, обусловленной межразрядной и межкадровой корреляциями в ВП МЦИ. Из рис. 11 видно, что потери помехоустойчивости, вызванные применением МФМ сигналов, удалось полностью скомпенсировать трехмерной нелинейной фильтрацией ВП МЦИ.

Эффективность применения разработанного метода проверялась на МБЛА «Hubsan H507D», который рассматривался как модульная платформа. Исключение контроллера оцифровки и сжатия видеопотока и замена его логическим блоком, подключенным к АЦП, позволила на 95% уменьшить количество вычислительных операций, сократить энергопотребление видеоподсистемы бортового оборудования на 50% и пропорционально снизить массу элементов питания передатчика. В целом уменьшение массы МБЛА составило 36 г из исходных 165 г или 22%. Снижение массы бортового оборудования позволяет увеличить время автономной работы МБЛА при сохранении тех же параметров элементов питания силовой установки беспилотника до 8%.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы:

1. Разработан метод преобразования оригиналов МЦИ из РДИ в МЦИ из ГРДИ без вычислительных операций и искажений на борту МБЛА, позволивший сократить время передачи статических и динамических МЦИ с МБЛА в три и четыре раза соответственно;

2. Разработаны на основе цепей Маркова с несколькими состояниями ММ статических и динамических МЦИ из ГРДИ, с высокой адекватностью, подтвержденной совпадением статистических характеристик искусственных и реальных МЦИ;

3. Синтезированы на основе разработанных ММ статических и динамических МЦИ и теории нелинейной фильтрации многомерных цепей Маркова алгоритмы двумерной и трехмерной нелинейной фильтрации МФМ сигналов, используемых для передачи статических и динамических МЦИ из ГРДИ, эффективно реализующие статистическую избыточность оригиналов МЦИ для повышения помехоустойчивости приема МФМ сигналов, достаточную для полной компенсации потерь помехоустойчивости, вызванных их применением;

4. Проведено исследование алгоритмов двумерной нелинейной фильтрации МЦИ из ГРДИ, которое показало, что переход от МЦИ, состоящих из РДИ, к МЦИ из ГРДИ, позволяет сократить время передачи оригиналов статических МЦИ без потерь в помехоустойчивости в два и три раза для 8- и 9-разрядных МЦИ соответственно.

5. Проведено исследование алгоритма двумерной нелинейной фильтрации статических МЦИ из ГРДИ, при наличии БГШ и импульсных помех типа «пересоль», которое показало, что для эффективной борьбы с импульсными помехами целесообразно применять комбинированные алгоритмы фильтрации, включающие алгоритм двумерной нелинейной фильтрации от БГШ и алгоритм медианной фильтрации для борьбы с импульсными помехами, показавшие высокую эффективность подобного сочетания.

6. Разработан адаптивный алгоритм двумерной нелинейной фильтрации МЦИ из ГРДИ, при отсутствии априорно известных статистических характеристик оригиналов МЦИ, для оценки которых применен быстрый метод адаптации, позволяющий вычислять оценки статистических характеристик по 3...10 принятым строкам МЦИ при ρ_s^2 на входе ПУ от +3 до -9 дБ.

7. Разработан метод сокращения времени передачи ВП МЦИ переходом от МЦИ из РДИ к МЦИ из ГРДИ, количество которых меньше, чем РДИ, в число раз, равное количеству РДИ, включенных в ГРДИ.

8. Проведенные исследования метода сокращения времени передачи МЦИ с борта МБЛА показали, что удалось сократить время передачи ВП МЦИ из ГРДИ в два и три раза для статических МЦИ и четыре раза для динамических МЦИ с компенсацией потерь помехоустойчивости, вызванных применением МФМ сигналов за счет реализации статистической избыточности оригиналов МЦИ на борту МБЛА.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендуемых ВАК

1. Петров Е.П. Синтез и исследование алгоритмов фильтрации дискретных марковских процессов с несколькими состояниями / Е.П. Петров, Н.Л. Харина, Е.Д. Ржаникова // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. - №1(9). - 2013. - С. 60-66.
2. Петров, Е.П. Нелинейная фильтрация изображений на основе цепей Маркова с несколькими состояниями / Е.П. Петров, Н.Л. Харина, Е.Д. Ржаникова // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). - 2013. - №4(42). - С. 231-239.
3. Петров, Е.П. Метод сжатия цифровых полутоновых изображений на основе цепей Маркова с несколькими состояниями / Е.П. Петров, Н.Л. Харина, Е.Д. Ржаникова // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). - 2014. - № 3 (45). - С. 159-167.
4. Петров, Е.П. Комбинированная нелинейная фильтрация цифровых изображений большой разрядности / Е.П. Петров, Н.Л. Харина, Е.Д. Ржаникова // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. - 2014. - №3. - С. 37-44.
5. Петров, Е.П. Фильтрация цифровых полутоновых изображений на основе цепей Маркова с несколькими состояниями / Е.П. Петров, Н.Л. Харина, Е.Д. Ржаникова // Цифровая обработка сигналов. - 2014. - № 1. - С. 42-45.
6. Петров, Е.П. Математическая модель цифровых полутоновых изображений на основе цепей Маркова с несколькими состояниями / Петров Е.П., Харина Н.Л., Ржаникова Е.Д. // Нелинейный мир. - 2013. - Т. 11. - № 7. - С. 487-492.
7. Петров, Е.П. Извлечение из шума цифровых полутоновых изображений большой разрядности / Петров Е.П., Харина Н.Л., Ржаникова Е.Д. // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. - 2014. - Т.8. - №3. - С. 11-13.
8. Петров, Е.П. Нелинейная обработка многоуровневых цифровых полутоновых изображений в системах дистанционного зондирования Земли / Е.П. Петров, Н.Л. Харина, Е.Д. Ржаникова // Нелинейный мир. - 2015. - № 6. - С.18-23.
9. Петров, Е.П. Сокращение времени передачи многоуровневых цифровых изображений многофазными сигналами с беспилотного летательного аппарата / Е.П. Петров, Н.Л. Харина, Е.Д. Ржаникова // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. - 2016. - № 3. - С. 74-85.

Статьи в других изданиях

10. Петров, Е.П. Комбинированная нелинейная фильтрация цифровых изображений большой разрядности / Е.П. Петров, Н.Л. Харина, Е.Д. Ржаникова // Машинное обучение и анализ данных. - 2015. - Т. 1. - № 13. - С. 1844-1852.

11. Петров, Е.П. Метод сокращения времени передачи многоуровневых цифровых изображений с беспилотных летательных аппаратов / Е.П. Петров, Н.Л. Харина, Е.Д. Ржаникова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - 2017. - Т. 14. - № 1. - С. 132-140.

12. Петров, Е.П. Метод одновременной передачи групп кадров видео с мини беспилотных летательных аппаратов / Е.П. Петров, Н.Л. Харина, Е.Д. Ржаникова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - 2017. - Т.14. - №2. - С.49-57.

Материалы конференций

13. Ржаникова, Е.Д. Математическая модель простой цепи Маркова с несколькими состояниями / Е.Д. Ржаникова // Сб. статей Всероссийской ежегодной научно-технической конференции «Общество, наука, инновации (НТК-2012)» [Электронный ресурс] Секция «Методы и средства передачи и обработки сигналов», ФПМТ. - Киров, 2012. - Ст. 9.

14. Петров, Е.П. Модель цепи Маркова с несколькими состояниями / Е.П. Петров, Н.Л. Харина, Е.Д. Ржаникова // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии (ФРЭМЭ-2012): Доклады 10-й международной научно-технической конференции. - Владимир, 2012. - Т.1. - С. 211-215.

15. Ржаникова, Е.Д. Моделирование двумерных цепей Маркова с несколькими состояниями / Е.Д. Ржаникова // Сб. статей Всероссийской ежегодной научно-технической конференции «Общество, наука, инновации (НТК-2013)» [Электронный ресурс] Секция «Методы и средства передачи и обработки сигналов», ФПМТ. - Киров, 2013. - С. 1415-1418.

16. Харина, Н.Л. Метод сжатия цифровых полутоновых изображений / Н.Л. Харина, Е.Д. Ржаникова // Сб. статей Всероссийской ежегодной научно-технической конференции «Общество, наука, инновации (НТК-2013)» [Электронный ресурс] Секция «Методы и средства передачи и обработки сигналов», ФПМТ. - Киров, 2013. - С. 1410-1414.

17. Петров, Е.П. Синтез математических моделей и алгоритмов обработки изображений на основе сложных цепей Маркова / Е.П. Петров, Н.Л. Харина, Е.Д. Ржаникова // Образование и наука XXI века – 2012: Материалы VIII международной научно-практической конференции. - София, 2012. - Т.47. С. 38-49.

18. Петров, Е.П. Метод сжатия цифровых полутоновых изображений / Е.П. Петров, Н.Л. Харина, Е.Д. Ржаникова // Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований: Материалы международной научно-практической конференции. - Москва, 2013. - Т.1. - С.131-137.

19. Петров, Е.П. Метод сжатия цифровых полутоновых изображений на основе цепей Маркова с несколькими состояниями / Е.П. Петров, Н.Л. Харина, Е.Д. Ржаникова // Доклады XV Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2013». - Москва, 2013. - Т.2. - С.132-135.

20. Петров, Е.П. Нелинейная фильтрация изображений на основе цепей Маркова с несколькими состояниями / Е.П. Петров, Н.Л. Харина, Е.Д. Ржаникова // Актуальные проблемы ракетно-космической техники (III Козловские чтения). - Самара, 2013. - С. 154-162.

21. Петров, Е.П. Метод сжатия цифровых полутоновых изображений на основе цепей Маркова с несколькими состояниями / Е.П. Петров, Н.Л. Харина, Е.Д. Ржаникова // Актуальные проблемы ракетно-космической техники (III Козловские чтения). - Самара, 2013. - С. 163-170.

22. Петров, Е.П. Фильтрация цифровых полутоновых изображений большой разрядности / Е.П. Петров, Н.Л. Харина, Е.Д. Ржаникова // В сборнике: «Общество, наука, инновации (НПК - 2014) Всероссийская ежегодная научно-практическая конференция»: общеуниверситетская секция, БФ, ГФ, ФЭМ, ФАВТ, ФАМ, ФПМТ, ФСА, ХФ, ЭТФ. Вятский государственный университет. - Киров, 2014. - С. 1403-1408.

23. Петров, Е.П. Адаптивная нелинейная фильтрация изображений на основе цепи Маркова с несколькими состояниями / Е.П. Петров, Н.Л. Харина, Е.Д. Ржаникова // Сб. докладов Всероссийской конференции «Радиоэлектронные средства получения, обработки и визуализации информации – РСПОВИ-2014». - Нижний Новгород, 2014. - С. 146-149.

24. Петров, Е.П. Нелинейная фильтрация цифровых полутоновых изображений большой разрядности / Е.П. Петров, Н.Л. Харина, Е.Д. Ржаникова // В сборнике: «Радиолокация, навигация, связь – XX Международная научно-техническая конференция». - Воронеж, 2014. - С. 194-200.

25. Петров, Е.П. Комбинированная фильтрация цифровых полутоновых изображений большой разрядности / Е.П. Петров, Н.Л. Харина, Е.Д. Ржаникова // В сборнике: «Радиолокация, навигация, связь – XX Международная научно-техническая конференция» - Воронеж, 2014. - С. 201-206.

26. Скимунт, В.К. Оценка влияния увеличения разрядности цифровых полутоновых изображений на их разрешающую способность / Скимунт В.К., Петров Е.П., Харина Н.Л., Ржаникова Е.Д. // Сб. докладов Всероссийской конференции «Радиоэлектронные средства получения, обработки и визуализации информации» РСПОВИ-2014. - Нижний Новгород, 2014. - С. 150-153.

27. Петров, Е.П. Адаптивная нелинейная фильтрация полутоновых изображений / Е.П. Петров, Н.Л. Харина, Е.Д. Ржаникова // Сб. докладов Всероссийской ежегодной научно-практической конференции «Общество, наука, инновации НПК-2015» [Электронный ресурс] Секция «Методы и средства передачи и обработки сигналов», ФПМТ. Киров, 2015. - С. 1433-1437.

28. Петров, Е.П. Сокращение времени передачи цифровых изображений высокого разрешения в системах дистанционного зондирования Земли / Е.П. Петров, Н.Л. Харина, Е.Д. Ржаникова // 18-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA-2016)». - Москва, 2016. - Т.2. - С.671-676.

29. Петров, Е.П. Сокращение времени передачи цифровых изображений высокого разрешения в системах дистанционного зондирования Земли / Е.П. Петров, Н.Л. Харина, Е.Д. Ржаникова // Сб. статей Всероссийской ежегодной научно-практической конференции «Общество, наука, инновации (НПК-2016)» [Электронный ресурс] Секция «Методы и средства передачи и обработки сигналов», ФПМТ. - Киров, 2016. – С. 2512-2518.

30. Петров, Е.П. Метод сокращения времени передачи изображений с беспилотных летательных аппаратов / Е.П. Петров, Н.Л. Харина, Е.Д. Ржаникова // В сборнике: «Радиолокация, навигация, связь – XXIII Международная научно-техническая конференция» - Воронеж, 2017. - С. 49-56.

Свидетельства на программу для ЭВМ

31. Петров, Е.П. Математическая модель цифрового полутонового изображения на основе цепи Маркова с несколькими состояниями / Е.П. Петров, Н.Л. Харина, Е.Д. Ржаникова // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017612704, 2017.

32. Петров, Е.П. Нелинейная фильтрация цифрового полутонового изображения на основе цепи Маркова с несколькими состояниями / Е.П. Петров, Н.Л. Харина, Е.Д. Ржаникова // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017612915, 2017.

Подписано в печать __.__.2018 г.

Формат 60 × 84/16. Печать офсетная. (Бумага для множительных аппаратов)

Тираж 100 экз. Заказ № ____

Из-во Вятского государственного университета

Преображенская ул., 41, Киров, Кировская обл., 610020