

На правах рукописи

Метелев Александр Петрович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ  
МНОГОМЕРНОЙ АДАПТИВНОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ  
ФИЛЬТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Специальность:

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Владимир – 2011

Работа выполнена на кафедре радиоэлектронных средств ФГБОУ ВПО «Вятский государственный университет».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор  
**Петров Евгений Петрович**

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор  
**Костров Виктор Васильевич**

кандидат технических наук  
**Медведев Владимир Петрович**

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Ижевский государственный  
технический университет»

Защита диссертации состоится « 7 » февраля 2012 г. в 14:00 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.

Отзыв, заверенный печатью, просим направлять по указанному адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, Ученому секретарю диссертационного совета Д.212.025.04 Самойлову Александру Георгиевичу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор технических наук, профессор

**Самойлов А. Г.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Интенсивность научных исследований и возросшая сложность решаемых научно-технических задач в настоящее время требует анализа не только одномерных случайных процессов, но и многомерных, например различного рода полей, представленных в виде статических или динамических изображений. Обработка многомерных изображений вызывает большой интерес исследователей самых различных областей: от здравоохранения до различного рода технологических процессов. Для эффективного решения задач обработки динамических изображений необходимы многомерные математические модели (ММ), адекватные реальным изображениям. К настоящему времени работ, посвященных таким ММ, немного. Это в основном работы по ММ, генерирующих многомерные гауссовские марковские цифровые полутоновые изображения (ЦПИ), не всегда адекватные реальным изображениям и имеющие низкую вычислительную эффективность. Среди них можно отметить работы Спектора А.А., Васильева К.К., Бондура В.Г., Виттиха В.А., Сойфера В.А., Хуанга Т.С., Хабиби А. и др.

Наибольшей вычислительной эффективностью и адекватностью реальным динамическим ЦПИ, представленным  $g$ -разрядными двоичными числами, отвечает многомерная ММ на основе многомерных цепей Маркова, разработанная научной школой, возглавляемой Е.П. Петровым.

Многообразие методов обработки динамических ЦПИ и их практические результаты тесно связаны с наличием в ЦПИ статистической избыточности. Проблема использования статистической избыточности динамических ЦПИ с целью повышения помехоустойчивости их приема является актуальной и приводит к необходимости совершенствования известных и разработки новых алгоритмов обработки ЦПИ. При этом для сокращения количества вычислений очень важно получение рекуррентных алгоритмов приема ЦПИ. При цифровой обработке изображений на передающей стороне преобразование непрерывной информации в цифровую можно максимально упростить, а на приемной стороне применить простые алгоритмы, эффективно реализующие статистическую избыточность. Разработку подобных алгоритмов и устройств обработки динамических ЦПИ, в силу специфики их статистических характеристик и ММ, предпочтительней вести на основе теории фильтрации условных марковских процессов, большой вклад в разработку которой внесли Стратонович Р.Л., Тихонов В.И., Амиантов И.Н., Ярлыков М.С., Сосулин Ю.Г., Петров Е.П. и др.

Наибольший интерес сегодня представляет многомерная обработка изображений, приближенная к реальным условиям передачи информации. В тех случаях, когда задачи, решаемые с помощью изображений (аэро- и космические съемки, видеонаблюдение и др.) не имеют априорно известных статистических характеристик принимаемых изображений или они быстро меняются от кадра к кадру и внутри кадра возрастает необходимость в многомерной, адаптивной фильтрации, способной по принятым изображениям вычислить недостающие характеристики и подстроить алгоритм фильтрации под характеристики

принимаемых изображений в реальном масштабе времени. Особенно это важно при ограниченной энергетике на передающей стороне, когда единственным и существенным резервом повышения помехоустойчивости приема ЦПИ является реализация статистической избыточности, которая может быть значительной, особенно, в динамических ЦПИ. Поэтому актуальность разработки и исследования оптимальных и адаптивных алгоритмов многомерной фильтрации динамических ЦПИ несомненна.

**Цель работы.** Целью диссертационной работы является исследование оптимальных и разработка адаптивных алгоритмов многомерной нелинейной фильтрации динамических ЦПИ, представленных многомерными цепями Маркова с несколькими состояниями, при наличии белого гауссовского шума (БГШ).

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Обзор и выбор многомерной ММ ЦПИ, адекватной реальным динамическим ЦПИ, представленных  $g$ -разрядными двоичными числами.

2. Исследование алгоритмов многомерной оптимальной нелинейной фильтрации на основе одной и двух коррелированных видеопоследовательностей ЦПИ, представленных  $g$ -разрядными двоичными числами.

3. Разработка и исследование адаптивных алгоритмов многомерной нелинейной фильтрации динамических ЦПИ с малым временем адаптации.

4. Разработка и исследование комбинированных алгоритмов фильтрации динамических ЦПИ для уменьшения артефактов, подобных импульсным помехам, возникающим при несовпадении априорных и реальных статистических характеристик принимаемых ЦПИ.

**Объектом исследования** являются многомерные ММ и алгоритмы фильтрации многомерных ЦПИ.

**Предметом исследования** являются ММ динамических ЦПИ на основе многомерных многозначных условных марковских процессов, а также алгоритмы нелинейной фильтрации динамических ЦПИ с априорно известными и априорно неизвестными статистическими характеристиками.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач в диссертационной работе использовались методы статистической теории связи, теории условных марковских процессов, 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.

**На защиту выносятся** следующие результаты, развитые или впервые полученные в настоящей работе:

1. Многомерная ММ динамических ЦПИ, представленных  $g$ -разрядными двоичными числами.

2. Рекуррентный алгоритм и соответствующее устройство многомерной нелинейной фильтрации динамических ЦПИ на фоне БГШ.

3. Адаптивный алгоритм многомерной нелинейной фильтрации динамических ЦПИ.

4. Комбинированные алгоритмы многомерной нелинейной фильтрации динамических ЦПИ.

5. Результаты качественных и количественных исследований эффективности разработанных алгоритмов многомерной нелинейной фильтрации динамических ЦПИ.

**Новизна научных результатов** заключается в следующем:

1. Получена многомерная ММ, адекватная реальным статическим и динамическим ЦПИ, позволившая синтезировать эффективные алгоритмы обработки многомерных ЦПИ.

2. Разработаны и исследованы алгоритмы многомерной адаптивной нелинейной фильтрации динамических ЦПИ, отличающиеся высокой скоростью адаптации.

3. Предложены комбинированные алгоритмы фильтрации динамических ЦПИ, позволяющие увеличить эффективность фильтрации ЦПИ при возникновении артефактов, подобных воздействию импульсных помех.

**Практическая значимость.**

1. Предложен подход построения ММ ЦПИ, позволяющий получать ММ произвольной размерности.

2. Разработан метод адаптации, позволяющий получить на 2-3 кадре оценки вероятностей переходов, отличающиеся от среднестатистических не более 10% по всем измерениям.

3. Разработаны комбинированные алгоритмы, позволяющие повысить качество ЦПИ по критерию PSNR на 2-5 дБ.

**Результаты работы внедрены:** в соответствующие разработки прототипов систем обработки видеoinформации ЗАО НПП «Знак» и ФГУП «НИИ СВТ» г. Киров. Также результаты, полученные в данной работе, используются в учебном процессе по дисциплинам “Теория оптимального приема сигналов”, “Телекоммуникационные технологии”. Все результаты внедрения подтверждены соответствующими актами.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих НТК: «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 2009-2011 гг.); «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (Москва, 2010, 2011 гг.); «Наука – производство – технология – экология» (Киров, 2008 г.); «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования земли» (Адлер, 2009 г.); «Информационные системы и технологии» (Н.Новгород, 2009 г.); «Перспективные технологии в средствах передачи информации» (Владимир, 2009, 2011 гг.);

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 16 работ, из них 4 статьи в журналах из списка, рекомендованных ВАК РФ, и 12 публикаций в сборниках тезисов докладов научно-технических конференций, 1 свидетельство о регистрации программного обеспечения.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Она изложена на 119 страницах

машинописного текста, содержит 43 рисунка, библиографический список включает в себя 89 источников.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** содержит обоснование актуальности поставленных в диссертации задач. Во введении проводится краткий обзор существующих работ в области моделирования и фильтрации динамических ЦПИ, отмечаются их достоинства и недостатки. Здесь же определяются цель исследования, научная новизна и практическое значение настоящей диссертации. Приведены сведения об апробации работы и кратко изложено основное содержание диссертации.

**Первая глава.** Для создания и исследования алгоритмов обработки изображений необходимо располагать ММ изображения, адекватной реальным изображениям и имеющей достаточно простое математическое описание. В первой главе производится краткий обзор существующих работ в области моделирования полутоновых изображений, с учётом требований цифрового представления и каузальности.

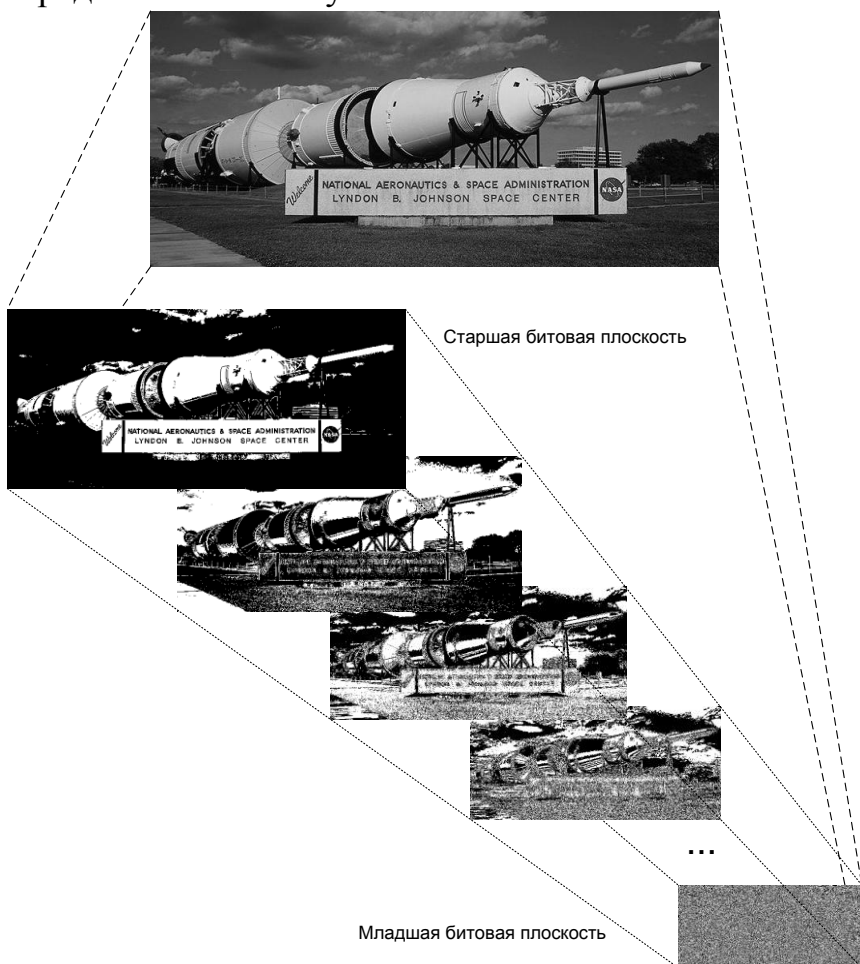


Рис. 1

Показано, что одним из вариантов, удовлетворяющим обоим требованиям, является использование в качестве ММ марковских случайных процессов с дискретными аргументами. Неоспоримым преимуществом данного подхода является также простота реализации модели и возможность увеличения ее размерности.

Будем полагать, что многомерный случайный процесс

$$\mu = \mu_{i,j,\dots,r}; i, j, \dots, r < \infty,$$

представленный двоичными  $g$ -разрядными числами, аппроксимируется многомерной однородной цепью Маркова с  $2^g$  состояниями.

Представляя последовательность наблюдаемых цифровых данных набором из  $g$  разрядных двоичных последовательностей символов, задачу построения ММ многомерного многозначного случайного процесса на основе многомерной однородной цепи Маркова с  $2^g$  состояниями можно свести к более простой задаче построения многомерной ММ двоичных разрядных

последовательностей, на основе многомерной однородной цепи Маркова с двумя равновероятными ( $p_1^l = p_2^l$ ) состояниями  $M_1^l$ ,  $M_2^l$  и матрицами вероятностей перехода (МВП) вида:  $\Pi = \begin{vmatrix} \pi_{11}^l & \pi_{12}^l \\ \pi_{21}^l & \pi_{22}^l \end{vmatrix}$ ,  $l = \overline{1, g}$ . При этом операции

хранения и преобразования МВП размером  $2^g \times 2^g$  по каждому измерению заменяются на операции хранения и преобразования  $g$  МВП размером  $2 \times 2$  по тем же измерениям, что позволяет существенно снизить объем памяти для хранения МВП. Представление 8-разрядного ЦПИ ( $2^8$  уровней яркости) набором из 8 РДИ (8 бинарных битовых плоскостей), иллюстрирующее описанный подход, представлено на рис. 1.

Если каждый двоичный элемент наблюдаемых данных статистически связан лишь с  $Q$  соседними ранее полученными аналогичными элементами случайного многомерного процесса, то такой процесс будет представлять собой  $Q$ -мерную однородную цепь Маркова с двумя состояниями  $M_1^l$ ,  $M_2^l$  и МВП

по каждому измерению:  ${}^r\Pi^l = \begin{vmatrix} {}^r\pi_{11}^l & {}^r\pi_{12}^l \\ {}^r\pi_{21}^l & {}^r\pi_{22}^l \end{vmatrix}$ ,  $r = \overline{1, Q}$ ;  $l = \overline{1, g}$ . В этом случае  $Q$ -

мерную цепь Маркова можно представить как суперпозицию  $Q$  простых однородных цепей Маркова с двумя равновероятными состояниями, т.е. двоичный элемент  $Q$ -мерной цепи Маркова  $v_D^l = \mu_{\underbrace{i,j,k,\dots,r}_Q}^l$ , ( $D = \overline{1, Q+1}$ )

одновременно принадлежит  $Q$  двоичным цепям Маркова. На рис. 2 представлен двоичный элемент  $v_D^l = \mu_{\underbrace{i,j,k,\dots,r}_Q}^l$   $Q$ -мерного пространства с

окрестностью из соседних элементов  $\Lambda_Q^l = \underbrace{v_1^l, v_2^l, \dots, v_r^l}_Q$ , соответствующих

однородной  $Q$ -мерной цепи Маркова.

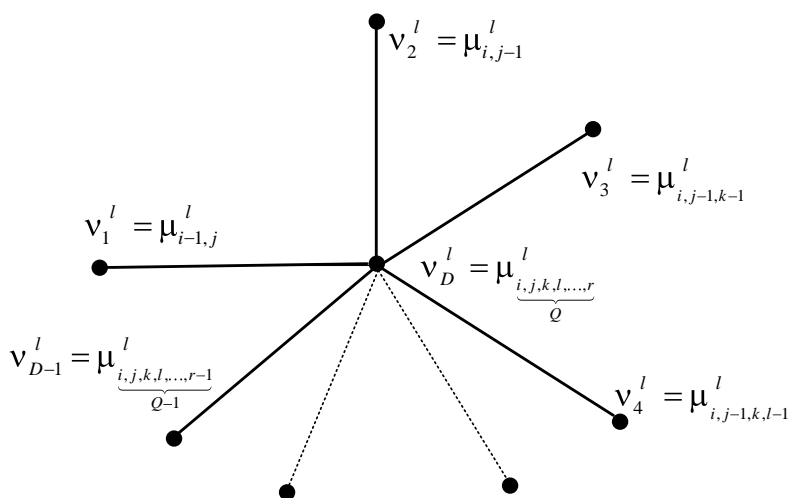


Рис. 2

Для получения алгоритма генерации состояний двоичных элементов  $Q$ -мерной цепи Маркова применен энтропийный подход, который заключается в следующем.

Условная энтропия элемента  $v_D^l = \mu_{\underbrace{i,j,k,\dots,r}_Q}^l$  относительно значений элементов окрестности  $\Lambda_Q^l$  определится как

разность безусловной энтропии элемента  $v_D^l$  и взаимной информации полученной от элементов окрестности  $\Lambda_Q^l$ :

$$H v_D^l \left| v_1^l, \dots, v_r^l \right. = H v_D^l - I v_1^l, \dots, v_r^l = -\log \left( \frac{\prod w \left( v_D^l \left| \underbrace{v_i^l, \dots, v_r^l}_N \right. \right)}{\prod w \left( v_D^l \left| \underbrace{v_i^l, \dots, v_r^l}_S \right. \right)} \right), \quad (1)$$

где  $N = 2k + 1$ ,  $S = 2n$ ; для четного  $Q$ : множества  $k = 0, \overline{\frac{Q-2}{2}}$ ,  $n = 1, \overline{\frac{Q}{2}}$ ; для нечетного  $Q$ : множества  $k = 0, \overline{\frac{Q-1}{2}}$ ,  $n = 1, \overline{\frac{Q-1}{2}}$ ; произведения, обозначенные символом  $\prod$ , вычисляются по всем возможным несовпадающим комбинациям различных подстрочных индексов  $Q$ -мерного случайного поля ( $Q \geq 2$ );  $w v_D^l \left| v_i^l, \dots, v_r^l \right.$  - плотности вероятностей переходов в многомерных цепях Маркова. Плотность вероятности перехода в  $Q$ -мерной двоичной цепи Маркова  $w v_D^l \left| v_i^l, \dots, v_r^l \right.$  можно выразить в форме

$$w \left( v_D^l \left| \underbrace{v_i^l, \dots, v_r^l}_Q \right. \right) = \sum_{i, \dots, k=1}^2 \pi(v_D^l = M_i^l \mid v_1^l = M_j^l; \dots; v_r^l = M_k^l) \delta(v_1^l - M_j^l); \dots; \delta(v_r^l - M_k^l), \quad (2)$$

где  $\delta(\cdot)$  - дельта функция.

Данная ММ является универсальной и может служить основой для построения ММ статических и динамических ЦПИ, представляющие случайные марковские процессы с дискретными аргументами произвольной размерности.

Полагая в (1)  $Q = 4$  ( $k = \overline{0,1}$ ;  $n = \overline{1,2}$ ;  $N = 1$ ;  $N = 3$ ;  $S = 2$ ;  $S = 4$ ) рассмотрим синтез двоичной ММ  $l$ -го РДИ двух коррелированных динамических ЦПИ, представляющих собой четырехмерный случайный марковский процесс.

Пусть  $\mu = \mu_{i,j,k,h}^l$  - четырехмерный случайный марковский процесс с дискретными аргументами ( $i, j, k, h$ ), адекватный статистически связанным последовательностям  $l$ -х РДИ ВП ЦПИ ( $i, j$ -пространственные координаты,  $k$ -координата по времени,  $h$ -координата, определяющая позицию одного динамического ЦПИ относительно другого) с корреляционной функцией вида:

$$r_{i,j,k,h}^l = \sigma_\mu^{2l} \exp\{-\alpha_1^l |f| - \alpha_2^l |q| - \alpha_3^l |s| - \alpha_4^l |p|\}, \quad (3)$$



где  $\sigma_{\mu}^{2l}$  – дисперсия случайного процесса;  $\alpha_i^l$  ( $i = \overline{1,4}$ ) – масштабные множители;  $f, q, s, p$  – шаг корреляции по горизонтали, вертикали, времени и позиции. Такой случайный марковский процесс представляет собой суперпозицию четырех одномерных дискретнозначных марковских процессов с двумя равновероятными состояниями и МВП по четырем координатам (измерениям): по горизонтали -  ${}^1\Pi^l$ ; вертикали -  ${}^2\Pi^l$ ; времени -  ${}^4\Pi^l$ , позиции -  ${}^8\Pi^l$ .

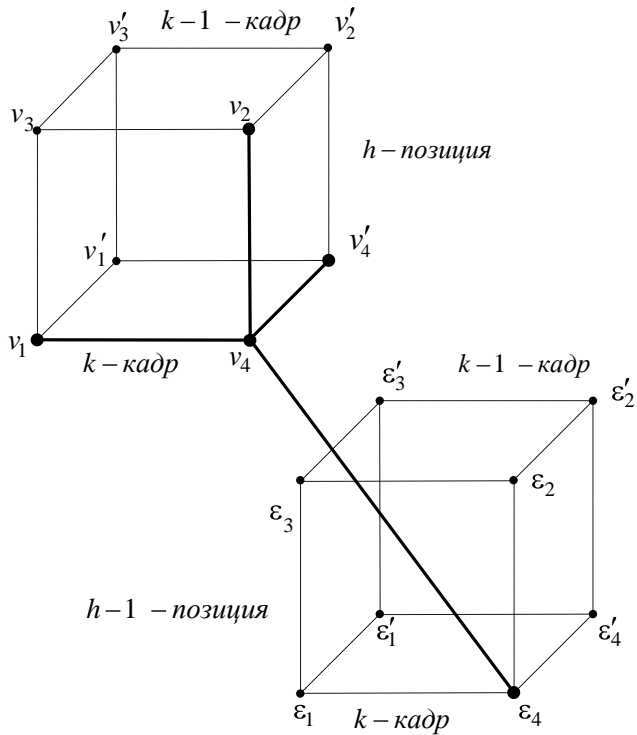


Рис. 3

На рис. 3 представлен фрагмент модели четырехмерного дискретного марковского процесса, где:

$$\begin{aligned} v_1^l &= \mu_{i,j-1,k,h}^l, v_2^l = \mu_{i-1,j,k,h}^l, \\ v_3^l &= \mu_{i-1,j-1,k,h}^l, v_4^l = \mu_{i,j,k,h}^l, \\ v_1'^l &= \mu_{i,j-1,k-1,h}^l, v_2'^l = \mu_{i-1,j,k-1,h}^l, \\ v_3'^l &= \mu_{i-1,j-1,k-1,h}^l, v_4'^l = \mu_{i,j,k-1,h}^l, \\ \varepsilon_1^l &= \mu_{i,j-1,k,h-1}^l, \varepsilon_2^l = \mu_{i-1,j,k,h-1}^l, \\ \varepsilon_3^l &= \mu_{i-1,j-1,k,h-1}^l, \varepsilon_4^l = \mu_{i,j,k,h-1}^l, \\ \varepsilon_1'^l &= \mu_{i,j-1,k-1,h-1}^l, \varepsilon_2'^l = \mu_{i-1,j,k-1,h-1}^l, \\ \varepsilon_3'^l &= \mu_{i-1,j-1,k-1,h-1}^l, \varepsilon_4'^l = \mu_{i,j,k-1,h-1}^l. \end{aligned}$$

Окрестность элемента  $v_4^{(l)}$   $l$ -го РДИ состоит из 15 соседних элементов изображения:

$$\Lambda_{i,j,k,h}^l = v_1^l, v_2^l, v_3^l, v_1'^l, v_2'^l, v_3'^l, v_4'^l, \varepsilon_1^l, \varepsilon_2^l, \varepsilon_3^l, \varepsilon_4^l, \varepsilon_1'^l, \varepsilon_2'^l, \varepsilon_3'^l, \varepsilon_4'^l. \quad (4)$$

Для генерирования искусственного четырехмерного  $l$ -го РДИ необходимо, воспользовавшись аргументом формулы (1) при  $Q=4$ , вычислить МВП четырехмерной цепи Маркова с двумя состояниями вида (5)

$$\mathbf{\Pi}'' = \begin{pmatrix} \pi_{iiii}^l & \pi_{iiij}^l \\ \pi_{iiij}^l & \pi_{iiij}^l \\ \vdots & \vdots \\ \pi_{jjii}^l & \pi_{jjij}^l \\ \pi_{jjij}^l & \pi_{jjii}^l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_1^l & \alpha_1'^l \\ \alpha_2^l & \alpha_2'^l \\ \vdots & \vdots \\ \alpha_{15}^l & \alpha_{15}'^l \\ \alpha_{16}^l & \alpha_{16}'^l \end{pmatrix}, \quad i, j = \overline{1, 2}; i \neq j \quad (5)$$

Значения элементов матрицы  $\mathbf{\Pi}''$  могут быть вычислены в соответствии с независимыми элементами окрестности  $\Lambda_{ijkh}^l$ . При известных значениях матриц

${}^1\Pi^l$ ,  ${}^2\Pi^l$ ,  ${}^4\Pi^l$ ,  ${}^8\Pi^l$ , выражение для вычисления элементов первых двух строк матрицы  $\Pi''$  имеют вид

$$\pi_{iiii}^l = \frac{{}^1\pi_{ii}^l {}^2\pi_{ii}^l {}^4\pi_{ii}^l {}^8\pi_{ii}^l {}^7\pi_{ii}^l {}^9\pi_{ii}^l {}^{10}\pi_{ii}^l {}^{11}\pi_{ii}^l}{{}^3\pi_{ii}^l {}^5\pi_{ii}^l {}^6\pi_{ii}^l {}^{13}\pi_{ii}^l {}^{14}\pi_{ii}^l {}^{15}\pi_{ii}^l {}^{12}\pi_{ii}^l}, \quad \pi_{iiiij}^l = 1 - \pi_{iiii}^l; \quad (7)$$

$$\pi_{jjji}^l = \frac{{}^1\pi_{ij}^l {}^2\pi_{ij}^l {}^4\pi_{ij}^l {}^8\pi_{ij}^l {}^7\pi_{ii}^l {}^9\pi_{ii}^l {}^{10}\pi_{ii}^l {}^{11}\pi_{ii}^l}{{}^3\pi_{ii}^l {}^5\pi_{ii}^l {}^6\pi_{ii}^l {}^{13}\pi_{ii}^l {}^{14}\pi_{ii}^l {}^{15}\pi_{ii}^l {}^{12}\pi_{ii}^l}, \quad \pi_{jjij}^l = 1 - \pi_{jjji}^l; \quad i \neq j.$$

где  ${}^r\pi_{ii}^l$   $i=\overline{1,2}; r=\overline{1,15}$  - элементы МВП в одномерных цепях Маркова с двумя состояниями по горизонтали  ${}^1\Pi^l$ , вертикали  ${}^2\Pi^l$ , времени  ${}^4\Pi^l$ , от позиции к позиции  ${}^8\Pi^l$  и сопутствующих МВП:

$${}^3\Pi^l = {}^1\Pi^l \times {}^2\Pi^l, {}^5\Pi^l = {}^1\Pi^l \times {}^4\Pi^l; {}^6\Pi^l = {}^2\Pi^l \times {}^4\Pi^l; {}^7\Pi^l = {}^3\Pi^l \times {}^4\Pi^l;$$

$${}^9\Pi^l = {}^3\Pi^l \times {}^8\Pi^l; {}^{10}\Pi^l = {}^5\Pi^l \times {}^8\Pi^l; {}^{11}\Pi^l = {}^6\Pi^l \times {}^8\Pi^l; {}^{13}\Pi^l = {}^1\Pi^l \times {}^8\Pi^l;$$

$${}^{14}\Pi^l = {}^2\Pi^l \times {}^8\Pi^l; {}^{15}\Pi^l = {}^4\Pi^l \times {}^8\Pi^l; {}^{12}\Pi^l = {}^1\Pi^l \times {}^2\Pi^l \times {}^4\Pi^l \times {}^8\Pi^l = {}^7\Pi^l \times {}^8\Pi^l.$$

Элементы остальных строк МВП  $\Pi''$  вычисляются с учетом состояний элементов окрестности  $\Lambda_{ijkh}^l$  элемента  $v_4^{(l)}$  (рис.3).

Алгоритм формирования искусственных кадров состоит из следующих этапов:

1. Задаются размер случайного двумерного поля (изображения)  $m \times n$  элементов, длина видеопоследовательности (количество кадров)  $K$  и число позиций (количество видеопоследовательностей)  $H$ , матрицы переходов  ${}^1\Pi^l, {}^2\Pi^l, {}^4\Pi^l, {}^8\Pi^l$  и вычисляются матрицы  ${}^3\Pi^l, {}^5\Pi^l, {}^6\Pi^l, {}^7\Pi^l, {}^9\Pi^l, \dots, {}^{15}\Pi^l$  и  $\Pi''^l$ ;

2. Берется случайное число  $\xi_q (q \leq m \cdot n \cdot K \cdot H)$  равномерно распределенное на интервале  $0,1$ ;

3. Из первого столбца матрицы  $\Pi''^l$  выбирается элемент  $\alpha_s^l (s = \overline{1,16})$ , соответствующий значениям элементов окрестности  $\Lambda_{ijkh}^l$ ;

4. Число  $\xi_q$  сравнивается с выбранным элементом  $\alpha_s^l (s = \overline{1,16})$  и если  $\xi_q \leq \alpha_s^l$ , то элемент изображения  $v_4^l$  принимает значение  $v_4^l = M_1^l = 0$ , в противном случае  $v_4^l = M_2^l = 1$ ;

5. Если  $q \leq m \cdot n \cdot K \cdot H$ , то перехода к п.2, иначе завершение.

На рис. 4 представлены 1, 10 и 25 кадры искусственных коррелированных динамических ЦПИ, полученных на основе ММ РДИ при условии  ${}^1\pi_{ii}^1 = {}^2\pi_{ii}^1 = 0,6$ ,  ${}^1\pi_{ii}^2 = {}^2\pi_{ii}^2 = 0,65$ ,  ${}^1\pi_{ii}^3 = {}^2\pi_{ii}^3 = 0,7$ ,  ${}^1\pi_{ii}^4 = {}^2\pi_{ii}^4 = 0,75$ ,  ${}^1\pi_{ii}^5 = {}^2\pi_{ii}^5 = 0,8$ ,  ${}^1\pi_{ii}^6 = {}^2\pi_{ii}^6 = 0,85$ ,  ${}^1\pi_{ii}^7 = {}^2\pi_{ii}^7 = 0,9$ ,  ${}^1\pi_{ii}^8 = {}^2\pi_{ii}^8 = 0,95$  и  ${}^4\pi_{ii} = {}^8\pi_{ii} = 0,9$ .

Исследование статистических характеристик ММ на ЭВМ показало их адекватность реальным ЦПИ.

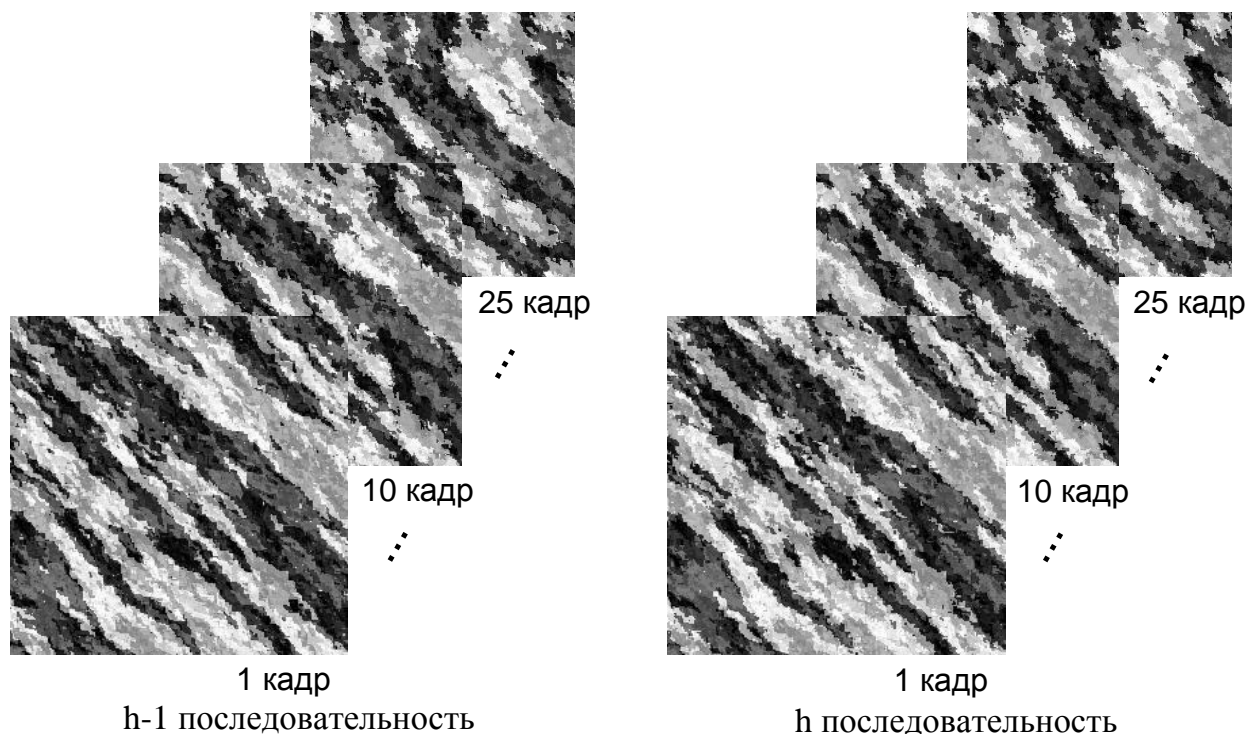


Рис. 4

**Вторая глава.** Во второй главе, используя рассмотренную в первой главе аппроксимацию ВП ЦПИ марковскими случайными процессами, и полагая, что МВП по всем измерениям априорно известны, исследованы рекуррентные уравнения многомерной нелинейной фильтрации одной и двух коррелированных ВП ЦПИ. Предполагается, что двоичные символы разрядов ЦПИ передаются бинарными импульсными сигналами по каналам радиосвязи независимо друг от друга при воздействии аддитивного БГШ  $\eta(t)$  с нулевым средним и дисперсией  $\sigma_\eta^2$ . Система из  $g$  рекуррентных уравнений нелинейной фильтрации элементов  $l$ -х РДИ двух ВП ЦПИ имеет вид:

$$u^l \ v_4^l = \left[ f \ M_1^l \ v_4^l \ -f \ M_2^l \ v_4^l \right] + \sum_{\alpha=1}^8 u_\alpha^l + z_\alpha^l - \sum_{\alpha=9}^{15} u_\alpha^l + z_\alpha^l \geq H, \quad l = \overline{1, g}, \quad (8)$$

где  $u^l \ v_4^l = \ln \frac{p_1^l \ v_4^l}{p_2^l \ v_4^l}$ ,  $l = \overline{1, g}$  – логарифм отношения апостериорных

вероятностей значений двоичных элементов  $l$ -го РДИ в точке  $v_4^{(l)}$ ;

$\left[ f_{k+1}^l \ M_1 - f_{k+1}^l \ M_2 \right]$  – разность логарифмов функций правдоподобия значений

двоичных элементов  $l$ -го РДИ в элементе  $v_4^{(l)}$ ;  $H$  – порог, выбранный в соответствии с критерием идеального наблюдателя ( $H = 0$ );

$$u_\alpha^l = u^l \ v_\alpha^l, \quad \alpha = 1, 2;$$

$$u_\alpha^l = u^l \ v_\alpha^l, \quad \alpha = 3, 4; \quad u_\alpha^l = u^l \ \varepsilon_3^l, \quad \alpha = 5; \quad u_\alpha^l = u^l \ \varepsilon_4^l, \quad \alpha = 6; \quad u_\alpha^l = u^l \ \varepsilon_1^l, \quad \alpha = 7;$$

$$u_\alpha^l = u^l \ \varepsilon_2^l, \quad \alpha = 8; \quad u_\alpha^l = u^l \ v_3^l, \quad \alpha = 9; \quad u_\alpha^l = u^l \ v_1^l, \quad \alpha = 10; \quad u_\alpha^l = u^l \ v_2^l, \quad \alpha = 11;$$

$$u_\alpha^l = u^l \ \varepsilon_1^l, \quad \alpha = 12; \quad u_\alpha^l = u^l \ \varepsilon_2^l, \quad \alpha = 13; \quad u_\alpha^l = u^l \ \varepsilon_3^l, \quad \alpha = 14; \quad u_\alpha^l = u^l \ \varepsilon_4^l, \quad \alpha = 15.$$

$$z_i^l = \ln \frac{{}^r\pi_{\alpha\alpha} + {}^r\pi_{\beta\alpha} \exp -u_i^l}{{}^r\pi_{\beta\beta} + {}^r\pi_{\alpha\beta} \exp u_i^l}, \quad (9)$$

где  $\pi_{\alpha\alpha}, \pi_{\beta\alpha}, \pi_{\beta\beta}, \pi_{\alpha\beta}$  - элементы матриц вероятностей перехода;

$i = 1, 2, 9; r = 1, 2, 3; i = 3, 4, 10, 11; r = 7, 4, 5, 6;$

$i = 5, 6, 12, 13; r = 9, 8, 13, 14; i = 7, 8, 14, 15; r = 10, 11, 12, 15.$

Устройства нелинейной фильтрации были смоделированы на ПК. На рис. 5 показан процесс нелинейной фильтрации ВП ЦПИ “Spaceraft”, искаженное БГШ при  $\rho_s^2 = -15$  дБ. а) исходный 1-й кадр ВП; б) зашумленный 1-й кадр ( $\rho_s^2 = -15$  дБ); в) отфильтрованный 25-й кадр первой ВП; г) отфильтрованный 5-й кадр второй ВП.

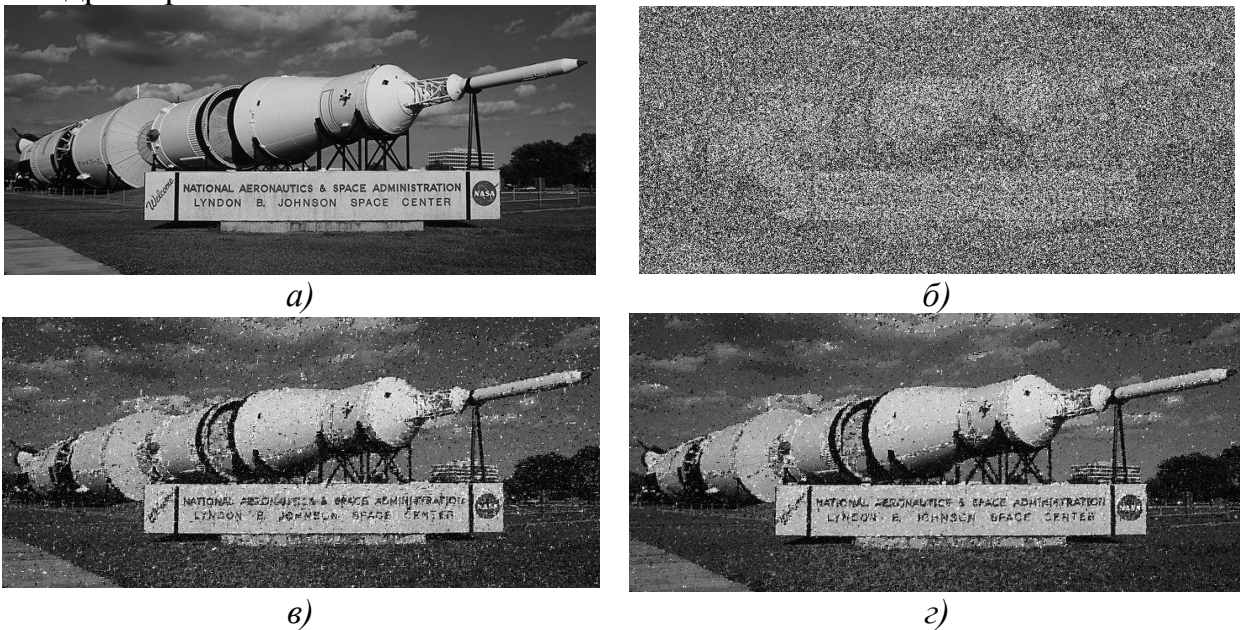


Рис. 5

Таким образом, при четырёхмерной фильтрации ВП ЦПИ восстанавливается быстрее (за меньшее количество кадров), чем при трёхмерной при одинаковом отношении сигнал/шум.

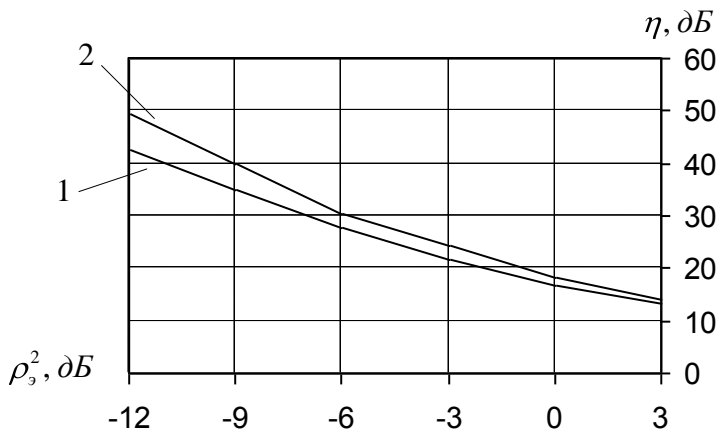


Рис. 6

На рис. 6 показан выигрыш по мощности сигнала  $\eta$  при фильтрации ВП 8-разрядных ЦПИ “Spaceraft” для различных  $\rho_s^2$ . Из графиков виден выигрыш порядка 3-8 дБ при четырёхмерной (график 2) фильтрации ВП ЦПИ относительно трёхмерной (график 1).

**Третья глава.** При передаче по каналу связи ВП ЦПИ на приемной стороне априорные статистические данные о степени корреляции между

элементами передаваемого изображения неизвестны. На основе полученных в предыдущей главе алгоритмов фильтрации разработано адаптивное ПУ многомерной (трех- и четырехмерной) нелинейной фильтрации ВП ЦПИ, позволяющее вычислять недостающие статистические данные в процессе приема.

Заменив в оптимальном алгоритме априорные вероятности перехода на их оценки, получен адаптивный алгоритм нелинейной фильтрации двоичных элементов  $l$ -х РДИ двух статистически связанных ВП ЦПИ, аналогичный уравнению (8).

Основной задачей при разработке адаптивного алгоритма является быстрое вычисление оценок элементов МВП по принимаемому зашумленному ЦПИ для всех четырех координат. Учитывая, что последовательность бинарных элементов  $l$ -го РДИ по строке является цепью Маркова с двумя состояниями  $M_1^{(l)}$  и  $M_2^{(l)}$ , оценка вероятности перехода по горизонтали может быть вычислена по формуле:

$${}^1\hat{\pi}_{ii}^l = 1 - \frac{2p_1^l}{\hat{\chi}^{(l,r)}}, \quad (10)$$

где  $\hat{\chi}^{(l,r)}$  - оценка средней длины последовательности одинаковых элементов  $l$ -го разряда на  $r$ -м шаге адаптации;  $p_1^l$  - априорная вероятность состояний элементов  $l$ -го РДИ.

На основе многомерной ММ (глава 1), содержащей множества элементов  $\psi_1 = v_1^{(l)}, v_2^{(l)}, v_3^{(l)}, v_4^{(l)}$ ,  $\psi_2 = v_1^{(l)}, v_4^{(l)}, v_1'^{(l)}, v_4'^{(l)}$  и  $\psi_3 = v_4^{(l)}, \varepsilon_1^{(l)}, \varepsilon_2^{(l)}, \varepsilon_3^{(l)}$  (рис. 3) вероятности перехода для сложной цепи Маркова можно вычислить в каждом множестве  $\psi_i$  ( $i = \overline{1,3}$ ) по формулам:

$$\pi_{iii} = 1 - \frac{{}^1\pi_{ij} \cdot {}^2\pi_{ij}}{3\pi_{ii}}, \quad \pi_{iii}^* = 1 - \frac{{}^1\pi_{ij} \cdot {}^4\pi_{ij}}{5\pi_{ii}}, \quad \pi_{iii}^{**} = 1 - \frac{{}^1\pi_{ij} \cdot {}^8\pi_{ij}}{13\pi_{ii}}. \quad (11)$$

Преобразовав выражения (11) и подставив в них оценки  ${}^1\hat{\pi}_{ii}$ ,  $\hat{\pi}_{iii}$ ,  $\hat{\pi}_{iii}^*$ ,  $\hat{\pi}_{iii}^{**}$ , получим уравнения для вычисления искомых оценок вероятностей переходов по вертикали  ${}^2\hat{\pi}_{ii}^{(l)}$ , между кадрами  ${}^4\hat{\pi}_{ii}^{(l)}$  и позициями  ${}^8\hat{\pi}_{ii}^{(l)}$ :

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

$${}^8\hat{\pi}_{ii}^{(l)} = \hat{\pi}_{iii}^{**(l)} \frac{1 - {}^1\hat{\pi}_{ii}^{(l)}}{{}^1\hat{\pi}_{ii}^{(l)} - \hat{\pi}_{iii}^{**(l)} (2 \cdot {}^1\hat{\pi}_{ii}^{(l)} - 1)}, \quad (12)$$

где оценки вероятностей перехода  ${}^1\hat{\pi}_{ii}$ ,  $\hat{\pi}_{iii}$ ,  $\hat{\pi}_{iii}^*$ ,  $\hat{\pi}_{iii}^{**}$  вычисляются по первым 2-3 строкам принятых РДИ ВП ЦПИ.

Каждая из оценок  $\hat{\pi}_{ii}$ , полученная таким образом при наличии БГШ  $n(t)$  на входе приемного устройства, при любой статистике будет отличаться от

истинного значения вероятности перехода  $\pi_{ii}$ . Различие между истинным значением  $\pi_{ii}$  и её оценкой  $\hat{\pi}_{ii}$  будет тем больше, чем меньше отношение сигнал/шум  $\rho_s^2$  в элементе  $l$ -го РДИ на входе приемного устройства.

Так как предполагается, что  $\rho_s^2$  известно, т.е. известна вероятность ошибки в бинарном канале  $p_{oui}$ , коррекция оценки  $\hat{\pi}_{ii}$  осуществляется по формуле:

$$\pi_{ii} = \frac{\hat{\pi}_{ii} - 2p_{oui} + 2p_{oui}^2}{1 - 4p_{oui} + 4p_{oui}^2} = \frac{\hat{\pi}_{ii} - 2p_{oui} + 2p_{oui}^2}{1 - 2p_{oui}^2} \quad (13)$$

Оценки вероятностей перехода, вычисленные на текущем шаге адаптации усредняются согласно рекуррентной формуле:

$$\hat{\pi}_{ii}^{(r)} = \frac{(S - 1) \cdot \hat{\pi}_{ii}^{(r-1)} + \hat{\pi}_{ii}^{*(r)}}{S}, \quad (14)$$

где  $\hat{\pi}_{ii}^{*(r)}$  – оценка, вычисленная на текущей строке,  $S$  – параметр, который определяет количество строк изображения, по которым осуществляется усреднение.

Скорректированные оценки  ${}^1\hat{\pi}_{ii}$ ,  ${}^2\hat{\pi}_{ii}$ ,  ${}^4\hat{\pi}_{ii}$ ,  ${}^8\hat{\pi}_{ii}$  подставляются в адаптивный алгоритм, аналогичный (8), осуществляя непрерывную подстройку параметров приемного устройства и фильтруемого многомерного процесса.

На рис. 7 показана зависимость значений оценок элементов  ${}^1\hat{\pi}_{ii}^{(l)}$ ,  ${}^2\hat{\pi}_{ii}^{(l)}$  и  ${}^4\hat{\pi}_{ii}^{(l)}$  от номера шага адаптации  $r$  при  $\rho_{ex}^2 = -6$  дБ (сплошные линии) и  $\rho_{ex}^2 = -12$  дБ (пунктирные линии). На рис. 8 представлен увеличенный фрагмент кадра, на начальных строках которого виден процесс адаптации.

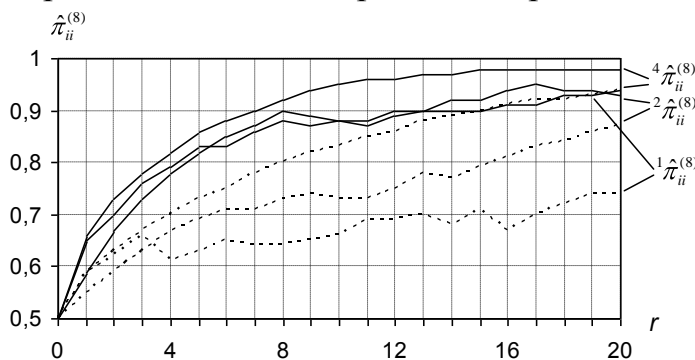


Рис. 7

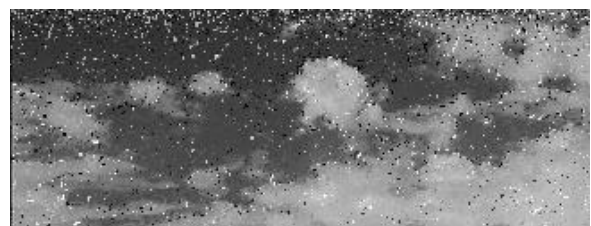


Рис. 8

На рис. 9 показаны значения вероятностей переходов для всех восьми разрядов реального кадра ВП ЦПИ, полученные в процессе адаптации по окончании первой (график 1), пятой (график 2) и двадцатой (график 3) строк, а также усредненные по всему кадру (график 4).

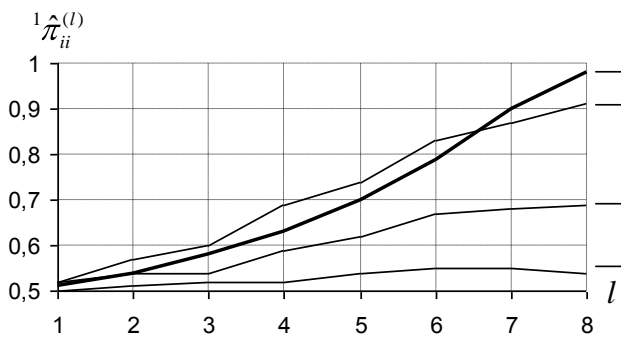


Рис. 9

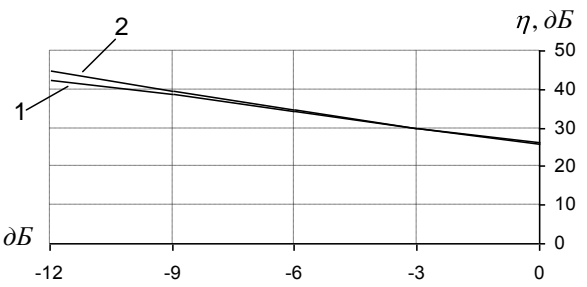


Рис. 10

Выигрыш фильтрации (рис. 10)  $\eta$  статистически связанных ВП ЦПИ оптимальным (известные априорные данные) (график 2) и адаптивным (график 1) алгоритмами при различных  $\rho_s^2$  отличается не более 3 дБ.

**Четвертая глава.** В результате фильтрации оптимальным алгоритмом (8) на восстановленных изображениях частично остаются помехи в виде искаженных пикселей (рис. 5, рис. 8). В четвертой главе исследуются методы, позволяющие улучшить визуальное качество восстановленных ВП ЦПИ.

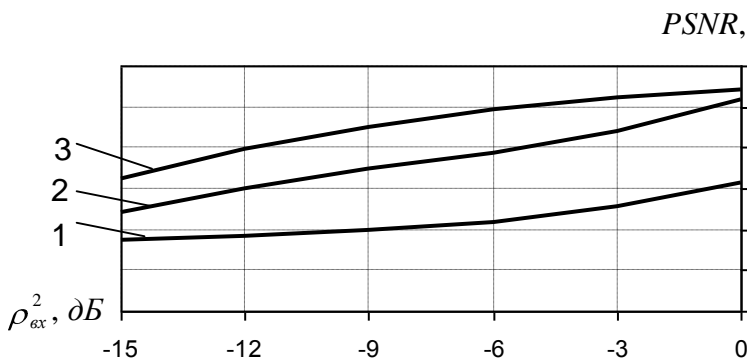
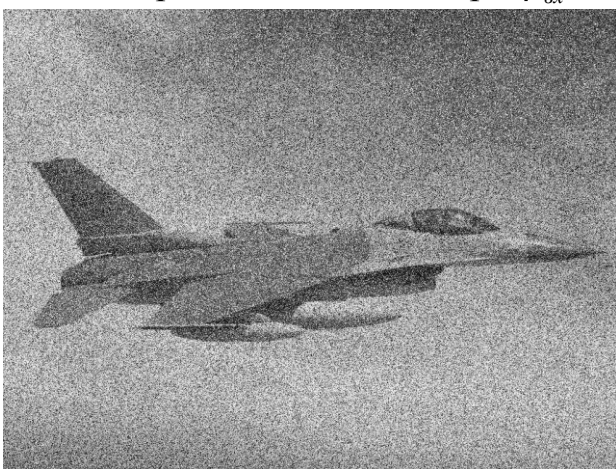


Рис.11

Для устранения «импульсных» искажений предлагается использовать простой в реализации медианный фильтр с апертурой (окном)  $n \times m$  элементов, включаемый непосредственно после нелинейного фильтра.

На рис. 11 представлена зависимость  $PSNR$  от отношения сигнал/шум на входе приемного устройства  $\rho_{вх}^2$  для комбинированного метода (график 3), адаптивной нелинейной фильтрации (график 2) и для зашумленного (необработанного) изображения (график 1). Выигрыш в  $PSNR$  для комбинированного метода при  $\rho_{вх}^2 = -12 \dots 0$  дБ будет составлять  $10 \dots 14$  дБ.



а)



б)



Рис. 12

Кроме медианного фильтра для повышения эффективности фильтрации можно воспользоваться предварительной обработкой кадров ВП ЦПИ, заключающейся в проведении операции «исключающее или» для соседних РДИ. На рис. 12 представлены результаты моделирования предложенных методов. На рис. 12а показан принятый 1-й кадр при  $\rho_{\text{ex}}^2 = -6$  дБ, на рис. 12б – отфильтрованный нелинейным фильтром без дополнительной обработки, на рис. 12в – соседние РДИ обработаны предварительно операцией «исключающее или», рис. 12г – дополнительно обработанные медианным фильтром.

Таким образом, предварительная обработка кадров ВП ЦПИ совместно с медианным фильтром позволяют уже на первом кадре получить визуально удовлетворительный результат.

**В заключении** обобщены основные научные и практические результаты проведенных исследований.

#### **Основные научные результаты:**

1. На основании обзора ММ случайных полей показано, что ММ ЦПИ, основанные на случайных марковских процессах, позволяют довольно просто перейти к ММ большей размерности.

2. Показано, что вычислительные операции на реализацию ММ в расчете на один элемент изображения не зависят от размерности модели и числа элементов по каждому измерению, а объем памяти ЭВМ определяется разрешением моделируемых изображений и числом видеопоследовательностей. Для генерации одного элемента изображения требуется 1 операция сравнения случайного числа с элементом МВП.

3. Модельными экспериментами показана эффективность многомерной (трех- и четырехмерной) нелинейной фильтрации ВП ЦПИ. Использование статистической избыточности элементов изображения позволяет обеспечить на выходе синтезированных ПУ высокое качество восстановления изображений, искаженных БГШ. Так, выигрыш в отношении сигнал/шум для трехмерной фильтрации составил от 13 до 42 дБ в диапазоне отношений сигнал/шум на входе фильтра от 3 до -12 дБ. При четырехмерной фильтрации получен дополнительный выигрыш 2-8 дБ относительно трехмерной. При этом наибольший вклад в результирующий выигрыш вносят старшие разряды ЦПИ,



поскольку в них заметно выше коэффициент корреляции (0,6-0,9) по сравнению с младшими рядами (0,1-0,3).

4. Разработаны и исследованы адаптивные приёмные устройства нелинейной фильтрации ЦПИ, обладающие высокой эффективностью и способностью адаптироваться не только к конкретному изображению, но и к отдельным его фрагментам.

5. Показано, что адаптивный алгоритм практически не уступает неадаптивному по критерию выигрыша в отношении сигнал/шум при входных значениях до -9дБ. При отношении меньше -12дБ, эффективность адаптивной фильтрации заметно уменьшается вследствие высокой погрешности расчета статистических характеристик принимаемых ВП ЦПИ. Усредненные значения выигрыша в отношении сигнал/шум составляют 25-45 дБ при диапазоне входных значений от 0 до -9 дБ.

6. Установлено, что в диапазоне входных значений сигнал/шум от 0 до -9 дБ к 20-40 шагу адаптации оценки элементов МВП принимают значения, отличающиеся от среднестатистических не более 10%.

7. Разработаны и исследованы комбинированные алгоритмы фильтрации, повышающие эффективность фильтрации и улучшающие визуальное качество кадров ВП ЦПИ. По критерию PSNR комбинированный фильтр дает дополнительный выигрыш 2-5 дБ при диапазоне входных значений от 0 до -15 дБ. Предварительная обработка кадров ВП позволяет получить дополнительный выигрыш 3-6 дБ, а также устранить регулярные помехи, вызванные наличием границ перехода яркостей в изображении.

**Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:**

1. Петров Е.П., Медведева Е.В., Метелев А.П. Адаптивная нелинейная фильтрация статистически связанных видеопоследовательностей // Т\_Сomm. Телекоммуникации и транспорт, №5, 2009. – С. 18-21.

2. Петров Е.П., Медведева Е.В., Метелев А.П. Метод синтеза математических моделей видеоизображений на основе многомерных цепей Маркова // Нелинейный мир, № 4, 2011. – С. 213-231.

3. Петров Е.П., Медведева Е.В., Метелев А.П. Метод комбинированной нелинейной фильтрации коррелированных видеоизображений // Нелинейный мир, № 11, 2010. – С. 677-684.

4. Петров Е.П., Медведева Е.В., Прозоров Д.Е., Метелев А.П. Синтез алгоритмов совместной фильтрации дискретного и непрерывных параметров многомерных коррелированных импульсных сигналов // Успехи современной радиоэлектроники, №12, 2011. – С.5-20.

5. Петров Е.П., Медведева Е.В., Метелев А.П. Фильтрация статистически связанных видеопоследовательностей // Информационные системы и технологии: Материалы XV МНТК НГТУ. – Нижний Новгород, 2009. – С. 9-10.

6. Медведева Е.В., Метелев А.П., Петров Е.П., Трубин И.С. Нелинейная многомерная фильтрация цифровых полутонных изображений // Радиолокация, навигация, связь: сб. докл. XV МНТК. – Воронеж, т.1, 2009. – С. 182-192.

7. Метелев А.П., Тимофеев Б.О., Медведева Е.В. Алгоритм сжатия

цифровых полутоновых изображений на основе корреляции разрядных двоичных изображений // Всероссийская НТК «Наука-Производство-Технология – Экология»: сб. матер. – Киров, 2008, т.2. – С. 241-243.

8. Медведева Е.В., Тимофеев Б.О., Метелев А.П. Алгоритм сжатия динамических полутоновых изображений // Физика и технологические приложения волновых процессов: тезисы докладов VII МНТК, посвященной 150-летию со дня рождения А.С. Попова: Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы». – Самара: «Самарское книжное изд-во», 2008. – С. 78-79.

9. Медведева Е.В., Петров Е.П., Метелев А.П. Алгоритмы нелинейной фильтрации видеопоследовательностей на основе скрытых цепей Маркова // Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы 8-ой МНТК ВлГУ. – Владимир: изд-во Владим.гос.ун-та, 2009. – С. 90-93.

10. Petrov E.P., Medvedeva E.V., Metelyov A.P. Transmission of noise latent images // Научно-практическая конференция аспирантов, соискателей, студентов на иностранных языках «Ex Professo»: Сборник материалов ГОУ ВПО «ВятГУ». – Киров: Изд-во «О-Краткое», 2009. – С. 53-54

11. Петров Е.П., Медведева Е.В., Метелев А.П. Адаптивная нелинейная фильтрация сильно зашумленных видеоизображений // Материалы четвертого Белорусского космического конгресса. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, Т.1, 2009. – С. 170-174.

12. Петров Е.П., Медведева Е.В., Метелев А.П. Адаптивная нелинейная фильтрация коррелированных видеопоследовательностей // Материалы VI НТК «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования земли». – М.: 2009, – С. 194-198.

13. Медведева Е.В., Петров Е.П., Метелев А.П. Адаптивная нелинейная многомерная фильтрация видеоизображений // Цифровая обработка сигналов и ее применение: сб. научн. трудов 12-й Международной конференции. – М.: 2010. – С. 97-101.

14. Медведева Е.В., Петров Е.П., Метелев А.П. Повышение помехоустойчивости приема видеоизображений с неизвестными статистическими характеристиками // Радиолокация, навигация, связь: сб. докл. XVI МНТК. – Воронеж, т.1, 2010. – С. 224-230.

15. Медведева Е.В., Харина Н.Л., Метелев А.П. Математические модели видеоизображений на основе многомерных цепей Маркова // Сб. науч. трудов 13-й Междунар. конф. «Цифровая обработка сигналов и ее применение». – М.: 2011. – С. 147-151.

16. Петров Е.П., Метелев А.П., Пестов П.Н. Статистические характеристики цифровых полутоновых изображений // Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы 9-ой МНТК ВлГУ. – Владимир: изд-во Владим.гос.ун-та, 2011. – С. 94-97.

17. Петров Е.П., Медведева Е.В., Харина Н.Л., Метелев А.П. Моделирование коррелированных видеоизображений // Свидетельство о регистрации в Реестре программ для ЭВМ № 2011614908 от 22.06.2011.

Подписано в печать .12.2011

Бумага писчая

Тираж 100 экз.

Текст напечатан с оригинального макета, представленного автором

Формат 60×84/16

Усл.печ.л. 1,0

Зак. №

---

ФГБОУ ВПО «Вятский государственный университет»  
610000, Киров, Московская, 36