

*На правах рукописи*



**ЗЕНИН Виктор Алексеевич**

**АЛГОРИТМЫ СТРУКТУРНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ  
ВИДЕОИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ  
В УСЛОВИЯХ СТАТИСТИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ  
ПОЛУЧАЕМЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (технические системы)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Рязань 2011**

Работа выполнена в Рязанском государственном  
радиотехническом университете

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Еремеев Виктор Владимирович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Бехтин Юрий Станиславович**

кандидат технических наук  
**Чепайкин Алексей Олегович**

Ведущая организация: **ФГУП «Государственный научно-  
производственный ракетно-космический  
центр «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара**

Защита состоится **14 декабря 2011 года в 10 ч** на заседании диссертаци-  
онного совета Д 212.211.01 в Рязанском государственном радиотехническом  
университете по адресу:

**390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Рязанского государст-  
венного радиотехнического университета.

Автореферат разослан 10 ноября 2011 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.211.01  
канд. техн. наук, доцент



**Пржегорлинский В.Н.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В системах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) широкое применение находят видеодатчики, использующие линейки приборов с зарядовой связью (ПЗС-линейки), которые состоят из тысяч фотоприемных ПЗС-элементов. Линейки устанавливаются с небольшим перекрытием в фокальной плоскости датчика перпендикулярно направлению полета спутника. Кадровая развертка изображения осуществляется за счет движения космического аппарата (КА), а строчная - путем периодического опроса ПЗС-линейек. Использование нескольких ПЗС-линейек позволяет многократно расширить полосу обзора и повысить разрешающую способность систем ДЗЗ.

Видеодатчики на основе ПЗС-линейек обладают высокими техническими параметрами. В то же время для них характерны так называемые структурные искажения. Во-первых, ПЗС-элементы отличаются друг от друга передаточными характеристиками (чувствительностью и уровнем темнового сигнала), в результате чего на изображении появляются искажения в виде характерной «полосатости» в кадровом направлении. Более того, некоторые типы фотоприемных элементов в процессе формирования изображения изменяют свою чувствительность, что приводит к изменению интенсивности искажений. Во-вторых, ПЗС-линейки в целом отличаются друг от друга светосигнальными характеристиками. По этой причине возникают искажения в виде яркостных различий так называемых сканов – частей изображения, формируемых вполне определенными ПЗС-линейками. Устранение перечисленных искажений (рис. 1 слева) принято называть структурным восстановлением. Цель такой операции состоит в получении изображения (рис. 1 справа), которое могло бы быть сформировано видеодатчиком с абсолютно идентичными ПЗС-линейками, состоящими из абсолютно идентичных фотоприемных элементов.

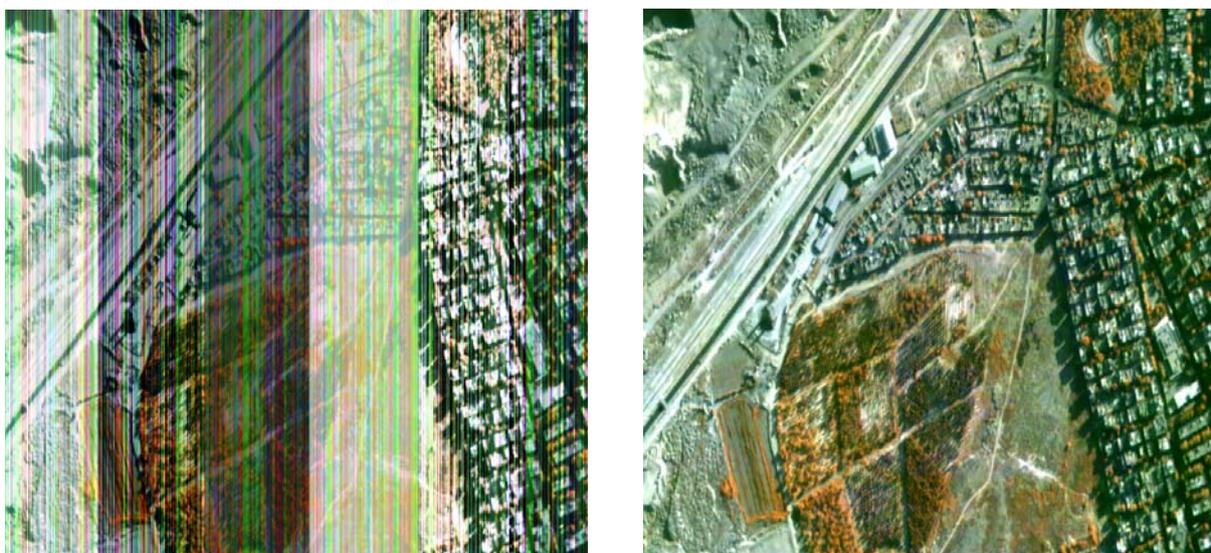


Рис. 1. Изображение до и после структурного восстановления

Традиционный подход к решению этой задачи основан на подаче на вход видеодатчика опорных уровней излучения и анализе выходных сигналов с каждого ПЗС-элемента. В результате осуществляется оценка структурных искажений и их коррекция. Такой подход требует наличия высокостабильной бортовой аппаратуры, что представляет собой сложную техническую проблему.

Кроме этого, поскольку характеристики ПЗС-элементов изменяются во времени, необходимо проведение достаточно частых сеансов калибровки, что приводит к снижению эффективности использования системы ДЗЗ.

Другой подход к решению поставленной задачи основан на статистическом анализе структурно искаженного изображения. В рамках этого подхода разработан ряд алгоритмов, позволяющих выполнить структурное восстановление изображений. Однако известные алгоритмы оказываются неработоспособными в условиях статистической неоднородности изображений:

- когда наблюдаемая сцена содержит существенно различные по яркости объекты (чаще всего это суша, водная поверхность и облака);
- когда параметры ПЗС-элементов значительно изменяются в процессе формирования снимков.

Решению задачи структурного восстановления изображений в этих условиях и посвящена настоящая диссертационная работа.

**Степень разработанности темы.** Значительный вклад в решение проблемы улучшения измерительных свойств изображений внесли отечественные и зарубежные ученые и специалисты: Асмус В.В., Бакланов А.И., Гектин Ю.М., Гомозов О.А., Еремеев В.В., Злобин В.К., Ключников М.В., Колесников В.И., Кондратьев Ю.М., Мятлов Г.Н., Новиков М.В., Новикова Н.Н., Селиванов А.С., Скимунт В.К., Соيفер В.А., Урличич Ю.М., Яковлев С.Г., Hijazi L., Huang T., Jardan L., Kaiser J., Kronberg P., Nilson N., Porez F., Pratt W., Rabiner L., Rosenfeld A., Sylvander S. и др. Их работы составляют научную и методическую основу для решения задач, поставленных в диссертации.

Во многих публикациях отечественных и зарубежных авторов, в частности Гектина Ю.М., Кондратьева Ю.М., Porez F., Sylvander S., Thome K.J. и др., делается упор на структурное восстановление изображений путем наземной и бортовой калибровки ПЗС-элементов. Такой подход обеспечивает приемлемое качество радиометрической коррекции только при наличии в составе бортовых систем КА высокостабильного калибровочного оборудования и выполнении условия неизменности характеристик ПЗС-элементов в процессе формирования изображения.

Другим схожим подходом, рассмотренным в работах Бакланова А.И., Ключникова М.В., Biggar S. F. и др., является калибровка бортовой аппаратуры по опорным наземным полигонам. Основные трудности в его реализации вызваны необходимостью получения нескольких эталонных уровней опорных сигналов. Добиться этого очень сложно, что связано с изменением состояния атмосферы, условий и времени съемки, характеристик полигонов и др.

Поэтому в конце 80-х годов прошлого столетия специалистами Рязанского государственного радиотехнического университета (Еремеев В.В., Злобин В.К., Нелин А.В.) предложен статистический подход к решению задачи структурного восстановления изображений. В его основе лежит предпосылка о том, что при достаточно большом интервале наблюдения статистические характеристики сигналов на входах соседних ПЗС-элементов совпадают, поэтому различие их передаточных характеристик может быть определено на основе со-

поставления параметров выходных сигналов. В дальнейшем статистический подход получил развитие в кандидатских диссертациях сотрудников радиотехнического университета Новоселова В.Г. (1999 г.), Побаруева В.И. (2002 г.), Антонушкиной С.В. (2002 г.), а также в публикациях других авторов: Гектина Ю.М., Гомозова О.А., Колесникова В.И., Новикова М.В., Скирмунта В.К., и др. В этих работах предложены и исследованы различные методы и алгоритмы коррекции структурных искажений, основанные на сопоставлении тех или иных характеристик выходных сигналов ПЗС-элементов в сигнальном, частотном и вероятностном пространствах. Однако предложенные подходы обеспечивают качественное решение поставленной задачи лишь в условиях статистической однородности наблюдаемой сцены. В случаях когда изображение содержит существенно неоднородные по яркости объекты и предпосылка о совпадении статистических характеристик сигналов на входах соседних ПЗС-элементов нарушается, известные алгоритмы оказываются неработоспособными.

Вообще отсутствуют публикации по вопросам коррекции времязависимых структурных искажений, обусловленных значительным изменением передаточных характеристик ПЗС-элементов в процессе формирования изображения. В то же время это явление обнаружено в ряде систем ДЗЗ (например, в датчиках МСУ-МР КА «Метеор-М» и МСУ-ГС КА «Электро-Л»). В данном случае известные решения не обеспечивают качественного структурного восстановления изображений даже при их статистической однородности.

**Целью диссертации** является разработка алгоритмов структурного восстановления информации ДЗЗ, обеспечивающих качественное решение этой задачи в условиях существенной статистической неоднородности изображений и значительного изменения передаточных характеристик ПЗС-элементов в течение сеанса съемки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **основные задачи**:

- провести анализ вопросов структурного восстановления изображений в современных системах ДЗЗ и факторов, снижающих качество этого процесса;
- разработать алгоритмы коррекции структурных искажений на изображениях в условиях их существенной статистической неоднородности;
- разработать алгоритмы коррекции структурных искажений в условиях значительного изменения передаточных характеристик ПЗС-элементов во время сеанса съемки;
- выполнить программную реализацию и апробацию разработанных алгоритмов с привлечением натурной информации от различных систем ДЗЗ.

**Научная новизна** диссертационной работы определяется тем, что в ней впервые предложены и исследованы алгоритмы структурного восстановления изображений в условиях значительной статистической неоднородности наблюдаемой сцены и изменения характеристик ПЗС-элементов в процессе формирования космических снимков.

Конкретно на защиту выносятся следующие новые научные результаты:

- алгоритм структурного восстановления статистически неоднородных изображений, обеспечивающий для каждого ПЗС-элемента равное представительство данных от различных по яркости объектов;
- алгоритм коррекции структурных искажений на основе нормирования эмпирических функций распределения яркости и обработки данных только от одноименных объектов;
- алгоритм коррекции структурных искажений, основанный на кластерном анализе изображений с целью пространственного разделения видеоданных от разных объектов и их независимой обработки;
- алгоритмы статистической коррекции изменяющихся во времени структурных искажений, основанные на кусочно-детерминированном представлении этого процесса по критерию минимума остаточных структурных различий;
- адаптивный алгоритм коррекции групповых времязависимых искажений, вызванных синхронным изменением передаточных характеристик соседних фотоприемных элементов.

Практическая ценность работы состоит в том, что на базе предложенных алгоритмов созданы программные комплексы структурного восстановления изображений, которые в составе систем OrthoNormScan, GeoScan, NormSat, MeteorSat используются для обработки данных ДЗЗ от космических систем «Ресурс-ДК», «Метеор-М» и «Электро-Л».

Реализация и внедрение. Диссертация выполнена в Рязанском государственном радиотехническом университете в рамках НИР 7-06Г, НИР 11-09, НИР 37-09Г, ОКР 4-10, ОКР 30-06, ОКР 10-07.

Результаты работы в виде программных комплексов и эксплуатационной документации внедрены в ОАО «Российские космические системы» (в рамках космической системы «Метеор-М»), ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина» (в рамках космической системы «Электро-Л»).

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на 5 международных и 9 всероссийских научно-технических конференциях, а именно: международных конференциях “Опτικο-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации” (Курск - 2008, 2010), “XXXVI Гагаринские чтения” (Москва - 2010), “Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций” (Рязань - 2008, 2010) и всероссийских конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва - 2008, 2009), «Актуальные проблемы ракетно-космической техники и ее роль в устойчивом социально-экономическом развитии общества» (Самара - 2009), «Интеллектуальные и информационные системы» (Тула - 2007), «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» (Москва - 2009, 2010), «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании» (Рязань - 2007, 2008, 2009).

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 24 работы: 9 статей (в том числе 7 статей по списку ВАК) и 15 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложения, которое содержит документы о внедрении результатов. Основной текст работы содержит 126 с., 37 рисунков и 5 таблиц. Список литературы включает 119 наименований на 13 с.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*В главе 1 выполнен анализ искажающих факторов, которые приводят к значительным структурным искажениям изображений, формируемых современными системами ДЗЗ. Выявлены узкие места существующих подходов по коррекции структурного шума. Обоснованы направления научных исследований по созданию новых алгоритмов высококачественного структурного восстановления изображений в условиях их статистической неоднородности и изменения характера искажений во времени.*

Рассмотрены общие принципы формирования изображений в системах ДЗЗ, представлены математические описания основных звеньев тракта приема и регистрации видеосигнала. Выполнена систематизация радиометрических искажений, возникающих в системах ДЗЗ. В результате выделен класс так называемых структурных искажений, коррекция которых представляет наиболее сложную научно-техническую проблему.

Выполнен сравнительный анализ методов и алгоритмов структурного восстановления, основанных на калибровке видеодатчика и статистическом анализе искаженных изображений. Показано, что статистический подход обладает рядом преимуществ:

- не требует наличия высокостабильной бортовой калибровочной аппаратуры;
- значительно снижает нагрузку на канал связи, так как не требуется передача калибровочной информации;
- потенциально позволяет построить алгоритмы, не критичные к изменению параметров структурных искажений в процессе формирования изображений;
- позволяет выполнить коррекцию существенно нелинейных структурных искажений.

В наиболее общем виде алгоритм статистической коррекции структурных искажений формулируется следующим образом. Рассмотрим изображение  $B(m, n)$ ,  $m = \overline{1, M}$ ,  $n = \overline{1, N}$  ( $m$  и  $n$  - номера столбцов и строк), заданное в виде таблицы отсчетов яркости  $b_{mn}$ . Для определенности будем считать, что  $m$ -й столбец  $B_m$  формируется  $m$ -м фотоприемным элементом ПЗС-матрицы и имеет вполне определенную передаточную характеристику. Из-за неидентичности характеристик ПЗС-элементов возникают структурные искажения в виде вертикальной «полосатости» изображения. Пусть  $F_m(b)$  - эмпирическая функция

распределения яркости, найденная по данным  $m$ -го столбца  $B_m$ . Тогда функция коррекции этого столбца определяется как

$$\varphi_m(b) = b^* = F_{m_0}^{-1}(F_m(b)), \quad m = \overline{1, M}, \quad (1)$$

где  $b$  и  $b^*$  - исходное и скорректированное значения яркости,  $F_{m_0}$  - эталонная функция распределения, найденная по апертуре столбцов, симметрично расположенных относительно  $B_m$ .

При значительной яркостной неоднородности сюжета функции распределения, входящие в апертуру, описывают различные случайные процессы и в общем случае  $F_m(b) \neq F_{m_0}(b)$ . В результате даже при полном отсутствии структурных искажений не выполняется необходимое равенство  $b = b^*$ . Такое же замечание можно сделать и в отношении времязависимых структурных искажений. Этот факт подтверждается экспериментами с привлечением изображений от систем ДЗЗ «Ресурс-О1», «Ресурс-ДК», «Метеор-М», «Электро-Л».

По результатам проведенных исследований определены три направления диссертационного исследования.

*Первое направление* связано с разработкой алгоритмов статистической коррекции структурных искажений на изображениях, содержащих резко неоднородные по яркости объекты. В данной ситуации традиционные статистические алгоритмы не обеспечивают качественное решение рассматриваемой задачи. Обоснована необходимость разработки новых алгоритмов коррекции многокановых изображений с существенно неоднородным по яркости сюжетом. Предложены алгоритмы решения этой задачи, основанные на анализе одноименных объектов, выравнивании представительства данных от статистически разнородных объектов и кластеризации изображений.

*Второе направление* касается вопросов построения алгоритмов коррекции времязависимых структурных искажений. Здесь обоснована необходимость построения адекватных моделей подобных искажений и адаптивных алгоритмов их коррекции.

*Третье направление* связано со структурной организацией и практической реализацией технологий структурного восстановления изображений, оценкой их эксплуатационных характеристик с привлечением натурной информации от систем ДЗЗ «Метеор-М», «Ресурс-ДК» и «Электро-Л».

Все эти вопросы составляют основное содержание диссертации.

**В главе 2** разработаны алгоритмы структурного восстановления статистически неоднородных изображений. Алгоритмы основаны на анализе областей гистограмм, соответствующих одноименным объектам, и кластеризации изображений. Выполнены исследования алгоритмов с привлечением натурной информации от различных систем ДЗЗ.

Разработан алгоритм структурного восстановления, основанный на анализе и сопоставлении статистической информации от одноименных объектов наблюдаемой сцены. Снимку, содержащему существенно неоднородные по яр-

кости объекты, соответствуют гистограммы  $g_m(b)$ ,  $m = \overline{1, M}$ ,  $b = \overline{0, b_{\max}}$ , имеющие ярко выраженную многомодальную форму в виде «горбов», разделенных «впадинами» с  $g_m(b) \approx 0$ . Обычно «горбам» соответствуют участки суши, водной поверхности и облака. Идея алгоритма состоит в том, что на основе анализа гистограмм на изображении выделяются области, соответствующие вполне определенным объектам. После этого выполняется коррекция структурных искажений в пределах выделенных объектов. Для этого для каждого столбца  $B_m$  формируются гистограммы  $g_m(b)$ , а затем эмпирические функции распределения  $F_m(b)$ ,  $m = \overline{1, M}$ . Для значений  $F_m(b) = F_{mp} = p/(P+1)$ ,  $p = \overline{1, P}$ , в табличной форме находятся обратные функции  $F_{mp} \rightarrow b_{mp}$ ,  $m = \overline{1, M}$ ,  $p = \overline{1, P}$ . Принадлежность элемента  $b_{mp}$  «впадине» или «горбу» определяется как

$$r_{mp} = \begin{cases} 2, & \Delta_{mp} \leq \Delta_{m,med} + \Delta_m; \\ 1, & \Delta_{mp} \geq \Delta_{m,med} + \alpha \Delta_m; \\ 0, & \Delta_{m,med} + \Delta_m < \Delta_{mp} < \Delta_{m,med} + \alpha \Delta_m, \end{cases} \quad (2)$$

где  $r_{mp} \in \{2, 1, 0\}$  - признак принадлежности точки  $b_{mp}$  соответственно «горбу», «впадине» или переходному участку;  $\Delta_{m,med}$ ,  $\Delta_{m,min}$ ,  $\Delta_{m,max}$  - соответственно медианное, минимальное и максимальное значения элементов последовательности  $\Delta_{mp} = b_{mp} - b_{m,p-1}$ ,  $p = \overline{2, P}$ ;  $\Delta_m = \Delta_{m,med} - \Delta_{m,min}$ ;  $\alpha$  - коэффициент, характеризующий протяженность «впадины». Считается, что последовательность элементов  $b_{mp}$  принадлежит «впадине», если им соответствуют  $r_{mp} = 1$ , а справа и слева обязательно есть элементы  $b_{mp}$ , для которых  $r_{mp} = 2$ , т.е. принадлежащие «горбам». Затем определяется число «впадин»  $k \in \{1, 2, \dots, K\}$  и их центры по точкам  $b_i$ , принадлежащим  $k$ -й «впадине»,

$$\hat{b}_{mk} = 0,5 \left[ \sum_{i=1}^S (b_{i+1} + b_i)(b_{i+1} - b_i)^2 \right] / \sum_{i=1}^S (b_{i+1} - b_i)^2. \quad (3)$$

Далее для группы столбцов с одинаковыми  $k \in \{1, 2, \dots, K\}$  производится нормировка  $F_m(b)$  так, чтобы скорректированные функции  $F_m^*(b)$  в точках  $\hat{b}_{mk}$  имели бы одинаковые значения  $F_m^*(\hat{b}_{mk}) = \hat{F}_k$ . После этого по аналогии с (1) определяются функции коррекции структурных искажений:  $b^* = F_m^{-1}(F_m^*(b))$ ,  $m = \overline{1, M}$ .

Алгоритм обеспечивает высокое качество коррекции, но требует хотя бы приближенных априорных знаний о средней яркости объектов изображения.

Другой алгоритм структурного восстановления рассчитан на коррекцию изображений, содержащих два значительно отличающихся по яркости объекта

(обычно это суша и водная поверхность). В этом случае не требуется априорная информация о средней яркости этих объектов. Алгоритм основан на преобразовании  $F_m(b)$  в  $F_m^*(b)$ ,  $m = \overline{1, M}$ , таким образом, чтобы последние соответствовали одинаковому представительству данных от первого и второго объектов. Только в этом случае может быть корректно выполнена процедура структурного восстановления. Преобразование выполняется по формуле:

$$F_m^*(b) = \begin{cases} \frac{F_m(b)}{2\rho_m}, & F_m(b) < \rho_m; \\ 1 - \frac{1 - F_m(b)}{2(1 - \rho_m)}, & F_m(b) \geq \rho_m, \end{cases} \quad (4)$$

где  $\rho_m$ ,  $(1 - \rho_m)$  - соответственно доля данных от первого и второго объектов, которые находятся с использованием процедуры обнаружения их границ.

Предложен алгоритм коррекции структурных искажений, основанный на кластерном анализе изображения, в результате чего оно разбивается на различные по яркости объекты. Выделение объектов проводится путем вычисления максимума функции межклассовой дисперсии. Для повышения надежности этой операции введена процедура предварительного снижения влияния структурного шума изображения:

$$b_{mn}^* = b_{mn} - (\bar{b}_m - \tilde{b}_m) + \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\bar{b}_i - \tilde{b}_i), \quad m = \overline{1, M}, n = \overline{1, N}, \quad (5)$$

где  $\bar{b}_m$  - средняя яркость  $m$ -го столбца,  $\tilde{b}_m$  - выделенная из  $\bar{b}_m$  низкочастотная составляющая. Коррекция структурных искажений осуществляется независимо в каждой из выделенных областей на основе (1).

Этот алгоритм позволяет наиболее качественно выполнить структурное восстановление в случае надежной кластеризации объектов. Однако для изображений, на которых границы между объектами «размыты», качество решения поставленной задачи снижается.

Разработан алгоритм коррекции межскановых различий, основанный на анализе перекрывающихся областей соседних сканов. Для этого определяются коэффициенты  $\hat{r}_i$  и  $\hat{c}_i$  относительного линейного соответствия яркостей  $i$ -го и  $(i-1)$ -го сканов,  $i = \overline{2, I}$ . Показано, что коэффициенты функции абсолютной

коррекции сканов можно найти по рекуррентным соотношениям:  $r_i = r_{i-1} \hat{r}_i$ ,  $c_i = c_{i-1} \hat{r}_i + \hat{c}_i$ ,  $i = \overline{2, I}$ . Коэффициенты  $r_1$  и  $c_1$  вычисляются из условий сохранения средней яркости и дисперсии изображений до и после коррекции:

$\sum_{i=1}^I \bar{B}_i = \sum_{i=1}^I (r_i \bar{B}_i + c_i)$ ,  $\sum_{i=1}^I D_i = \sum_{i=1}^I r_i^2 D_i$ , где  $\bar{B}_i$  и  $D_i$  - средняя яркость и дисперсия  $i$ -го скана. Из этих условий следует

$$c_1 = \left( \sum_{i=1}^I (1-r_i) \bar{B}_i - \sum_{i=2}^I S_i \right) / \left( 1 + \sum_{i=2}^I P_i \right), \quad r_1 = \sqrt{\left( \sum_{i=1}^I D_i \right) / \left( D_1 + \sum_{i=2}^I P_i^2 D_i \right)}, \quad (6)$$

где  $P_i = \prod_{j=2}^i \hat{r}_j$ ,  $P_i = P_{i-1} \hat{r}_i$ ,  $P_1 = 1$ ,  $i = \overline{2, I}$ .

На рис. 1 в качестве примера представлен фрагмент исходного (слева) и структурного восстановленного изображения от КА «Ресурс-ДК».

В результате экспериментальных исследований алгоритмов с привлечением информации от систем ДЗЗ «Ресурс-ДК», «Метеор-М» и «Электро-Л» установлено, что точность структурного восстановления составляет порядка 0,2 %.

*В главе 3 рассмотрены алгоритмы коррекции времязависимых структурных искажений на статистически неоднородных изображениях. Разработаны математические модели таких искажений. Спроектированы алгоритмы их коррекции, реализующие полиномиальные и кусочно-линейные модели. Предложен алгоритм коррекции групповых времязависимых искажений. Выполнена апробация предложенных алгоритмов на натурной информации.*

Рассмотренные выше детерминированные модели структурного восстановления изображений не могут быть использованы для коррекции искажений, изменяющихся в процессе формирования изображений. Основная сложность коррекции времязависимых искажений состоит в том, что не известны их математические модели. Более того, различные типы видеодатчиков характеризуются отличающимися по характеру искажениями. Возникает необходимость в разработке различных моделей времязависимых искажений и их исследование для каждой конкретной системы ДЗЗ.

Рассмотрены времязависимые мультипликативная и аддитивная модели структурных искажений, описываемые в виде полинома  $P_m(n)$ , коэффициенты которого определяются соответственно из условий:

$$R_m = \sum_{n=1}^N \sum_{i=-S}^S [b_{mn} P_m(n) - b_{m,n+i}]^2 = \min, \quad R_m = \sum_{n=1}^N \sum_{i=-S}^S [b_{mn} + P_m(n) - b_{m,n+i}]^2 = \min.$$

Эти условия приводят к системам линейных уравнений относительно искомым коэффициентов.

Выполнены исследования этих моделей на натурной информации от различных систем ДЗЗ. Определены области применения рассмотренных моделей.

Выполнена оценка точности полиномиальной модели при наличии на изображениях аддитивного некоррелированного шума  $\varepsilon_{nm}$ . Для этого рассмотрена более общая аддитивно-мультипликативная полиномиальная модель искажений, в которой полиномом  $K_m(n)$  степени  $P$  описывается мультипликативная компонента, а полиномом  $C_m(n)$  - аддитивная. В данном случае коэффициенты этих полиномов определяются из условия:

$$R_m = \sum_{n=1}^N \sum_{i=-S}^S [(b_{nm} + \varepsilon_{nm})K_m(n) + C_m(n) - b_{nm}^*]^2 = \min. \quad (7)$$

Показано, что ошибка, связанная с наличием на изображении шума  $\varepsilon_{nm}$ , составляет  $\Delta = \sum_{n=1}^N \varepsilon_{nm}^2 K_m(n) m^i$ ,  $i = \overline{0, P}$ . Влияние шума усиливается с повышением степени полинома  $K_m(n)$ , поскольку резко возрастает член  $m^i$ , а  $K_m(n) \approx 1$ , поэтому мультипликативная модель, хотя и более адекватно описывающая характер искажений, имеет ограничения в применении. Что касается аддитивной модели, то при большом диапазоне изменения яркости изображения она перестает адекватно описывать характер искажений. Экспериментально установлено, что рассмотренные полиномиальные модели для некоторых типов видеодатчиков при достаточно большой протяженности изображения в кадровом направлении требуют для своего описания использования полиномов высоких степеней, что приводит к снижению качества структурного восстановления. В связи с этим разработаны кусочно-линейные модели времязависимых структурных искажений.

Предложен алгоритм, основанный на кусочно-линейной мультипликативной модели структурных искажений. Он предполагает разбиение столбцов на вполне определенные отрезки, в пределах которых искажение адекватно описывается мультипликативной линейной моделью. Коррекция центрального элемента отрезка выполняется по формуле  $b_{nm}^* = ent(b_{nm} k_{nm} + 0,5)$ . Мультипликативный коэффициент  $k_{nm}$  определяется как

$$k_{nm} = \frac{1}{2a+1} \sum_{q=-S}^S \sqrt{\mu_q} / \sqrt{\mu_0}, \quad (8)$$

где  $\mu_q$  - автокорреляционная функция (АКФ)  $q$ -го столбца апертуры  $q = \overline{-S, S}$  (для центрального корректируемого столбца  $q = 0$ ). То есть  $k_{nm}$  определяется отношением среднего по апертуре значения АКФ к АКФ центрального корректируемого отрезка. В известных алгоритмах  $k_{nm} = \frac{1}{2S+1} \sum_{q=-S}^S \sqrt{D_q} / \sqrt{D_0}$ , где  $D_q$  - дисперсия. При наличии аддитивного шума на изображении  $k_{nm} = \frac{1}{2S+1} \sum_{q=-S}^S \sqrt{D_q + D_{\varepsilon,q}} / \sqrt{D_0 + D_{\varepsilon,0}}$ , т.е. возникает ошибка в определении  $k_{nm}$ . В отличие от этого, использование АКФ вместо дисперсии не приводит к ошибке. Достоинством рассмотренной модели является независимость коэффициентов коррекции от величины темнового тока ПЗС-элемента. В то же время экспериментально установлено, что небольшие ошибки в определении  $\mu_q$  приводят к значимым ошибкам в нахождении  $k_{nm}$ .

Предложена модификация последнего алгоритма, основанная на сопоставлении не АКФ, а средних яркостей  $\bar{b}_q$ , так как визуально структурные искажения воспринимаются именно как неоднородности средней яркости. В данном случае мультипликативный коэффициент находится как

$$k_{nm} = \frac{1}{2a+1} \sum_{q=-S}^S \bar{b}_q / \bar{b}_0 . \quad (9)$$

Несмотря на качественные результаты коррекции с использованием (9), в некоторых случаях данный алгоритм имеет методическую ошибку, прямо пропорциональную темновому сигналу ПЗС-элемента.

Разработан алгоритм коррекции времязависимых структурных искажений, основанный на кусочно-аддитивном представлении искажений вдоль столбца. Для центрального (корректируемого) столбца апертуры и всей апертуры, состоящей из  $2S+1$  соседних столбцов, формируются эмпирические функции распределения кодов яркости  $F_0(b)$  и  $F(b)$ . Далее вычисляются обратные функции в виде таблиц  $F_{0p}(b) \rightarrow b_{0p}$  и  $F_p(b) \rightarrow b_p$ , где  $F_{0p}(b) = F_p(b) = p/(P+1)$ ,  $p = \overline{1, P}$ . Аддитивный коэффициент коррекции для каждого пикселя определяется как  $\Delta_{nm} = \text{med}_{p \in \overline{1, P}}(b_p - b_{0p})$ , а изображение корректируется по соотношению:

$$b_{nm}^* = \text{ent}(b_{nm} + \Delta_{nm} + 0,5), \quad m = \overline{1, M}, \quad n = \overline{1, N}. \quad (10)$$

На рис. 2 представлен пример коррекции фрагмента изображения инфракрасного диапазона от космической системы «Метеор-М» с использованием кусочно-линейной аддитивной модели.

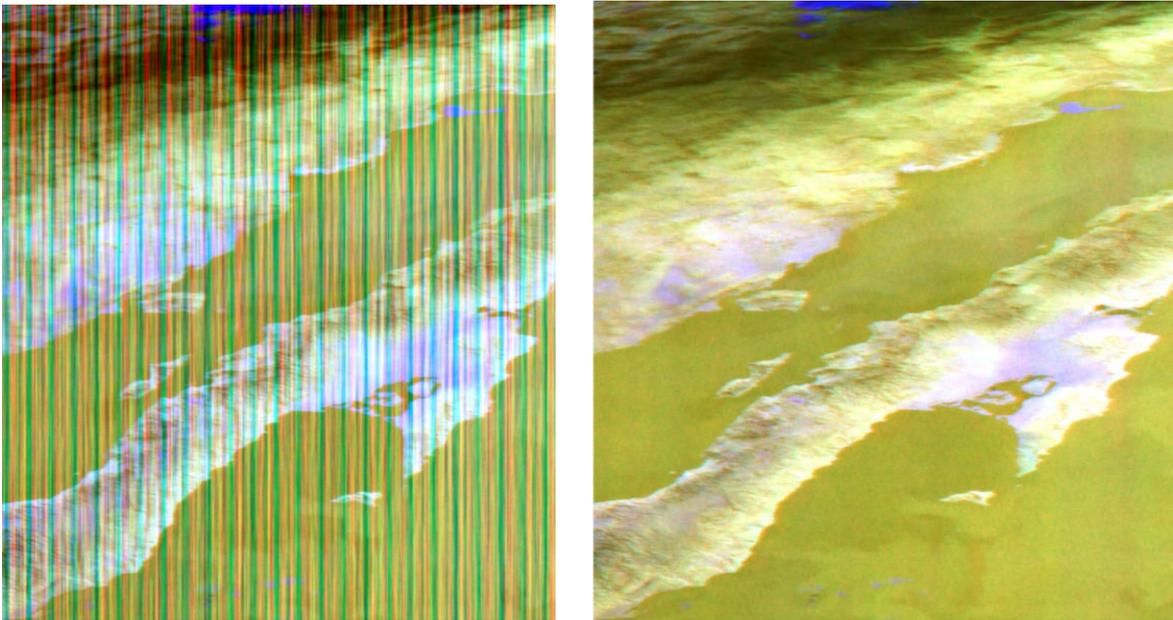


Рис. 2. Пример коррекции времязависимых структурных искажений

Выбор размера апертуры  $(2S+1)$  выполняется эмпирически для каждой конкретной системы ДЗЗ. Экспериментально подтверждено, что чрезмерное увеличение  $S$  приводит к тому, что некоторые объекты воспринимаются как

искажения, а при малых  $S$  структурные искажения корректируются не полностью.

Для некоторых типов датчиков инфракрасного диапазона обнаружены времязависимые групповые искажения, которые проявляются в синхронном изменении яркостных характеристик в целой группе столбцов. Для этого случая предложен адаптивный алгоритм, основанный на динамическом изменении параметра апертуры  $S$  в зависимости от характеристик наблюдаемой сцены. Исходное изображение  $B_{mn}$  корректируется следующим образом:

- с использованием кусочно-линейной аддитивной модели формируется матрица поправок  $H_{mn}$ ,  $m = \overline{1, M}$ ,  $n = \overline{1, N}$ , при малом количестве столбцов в апертуре;

- аналогичным образом формируется матрица поправок  $L_{mn}$ ,  $m = \overline{1, M}$ ,  $n = \overline{1, N}$ , но уже при числе столбцов в апертуре, в несколько раз превышающем ширину групповых искажений;

- для каждого пикселя  $b_{mn}$  изображения вычисляется значение дисперсии кодов яркости окружающих его пикселей  $\sigma^2_{mn}$ , и для всего изображения находится  $\sigma^2_{\max} = \max(\sigma^2_{mn}, m = \overline{1, M}, n = \overline{1, N})$ ;

- коррекция изображения выполняется согласно формуле:

$$b_{nm}^* = b_{nm} + \frac{\sigma^2_{mn}}{\sigma^2_{\max}} H_{mn} + \left(1 - \frac{\sigma^2_{mn}}{\sigma^2_{\max}}\right) L_{mn}, \quad m = \overline{1, M}, \quad n = \overline{1, N}. \quad (11)$$

На большом статистическом материале от КА «Электро-Л» показана высокая эффективность рассмотренного алгоритма в части устранения групповых времязависимых искажений.

*В главе 4 рассматриваются принципы алгоритмической и программной реализации предложенных подходов. Разработана методика оценки уровня остаточных структурных искажений. Предложены организационные, системные и алгоритмические решения по повышению быстродействия разработанных программ и результаты их испытаний на натурной информации.*

Представлена методика оценки качества коррекции структурных искажений, основанная на внесении в незашумленное изображение структурного шума с заданными характеристиками, коррекции этого изображения и сопоставления результата обработки с исходным изображением. В качестве меры сходства выступает дисперсия высокочастотной компоненты разностного изображения, что обусловлено высокочастотной природой структурного шума.

Для программной реализации алгоритмов структурного восстановления обоснованы среда Microsoft Visual Studio 2010 и язык программирования Visual C++. Спроектированный программный комплекс обеспечивает:

- чтение видеоданных из оперативного архива и вычисление необходимых статистических характеристик;

- определение корректирующих функций;

- коррекцию изображений с записью результатов на жесткий диск.

Предложено несколько подходов по высокоскоростной коррекции структурных искажений:

- хэш-тейловая организация памяти;

- многопроцессорная обработка с эффективным применением различных способов распараллеливания вычислений на каждом этапе структурного восстановления изображений;

- эффективное использование кэш-памяти процессора.

Даны рекомендации по адаптации процесса чтения видеоданных для каждой конкретной системы ДЗЗ с учетом механизма хэш-тейловой организации памяти. За счет этого достигнуто ускорение процесса чтения видеоданных в среднем на 46 %. При комбинированном чтении видеоданных, когда один поток программы выполняет чтение изображения, а другие потоки обрабатывают прочитанные данные, скорость структурного восстановления изображения увеличена на 11 % по сравнению с параллельным чтением несколькими потоками. На этапе коррекции изображения максимальную производительность получила параллельная коррекция одной строки несколькими потоками за счет повышения эффективности использования кэш-памяти процессора.

Выполнены исследования производительности программ структурного восстановления при различном числе процессоров. Установлено, что применение более 4 процессоров не дает пропорционального повышения производительности. Так, уже при 4 процессорах достигается повышение производительности лишь в 1,9 раза по сравнению с обработкой на одном процессоре. Это связано с ограниченной скоростью работы внешних накопителей.

В заключительной части диссертации представлены результаты апробации спроектированных алгоритмов и программ структурного восстановления на реальных данных от различных систем ДЗЗ.

Разработанный комплекс программ внедрен в составе изделий «OrthoNormScan», «GeoScan», «MeteorSat-N», «ElectroSat», которые используются в Научном центре оперативного мониторинга Земли, Научно-исследовательском центре космической гидрометеорологии «Планета» для структурного восстановления данных от систем ДЗЗ «Ресурс-ДК», «Метеор-М», «Электро-Л».

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

На основе проведенных исследований решена важная научно-техническая задача, связанная с созданием алгоритмического и программного обеспечения систем структурного восстановления космических изображений в условиях неоднородности наблюдаемого сюжета и изменения характеристик фотоприемных элементов во времени. К основным научным и практическим результатам диссертационной работы относятся:

1. Представлены математические описания основных искажающих факторов, действующих в процессе съемки земной поверхности, и выполнена их систематизация. Выделен класс так называемых структурных искажений, выявляе-

ны недостатки известных алгоритмов их коррекции. Определены направления научных исследований по созданию новых алгоритмов высококачественного структурного восстановления видеoinформации в условиях статистической неоднородности наблюдаемой сцены и изменения характера структурных искажений в процессе формирования изображений.

2. Разработаны алгоритмы коррекции неизменных во времени структурных искажений на изображениях с резко неоднородным по яркости сюжетом. В данном направлении решены следующие задачи.

- Спроектирован алгоритм структурного восстановления статистически неоднородных изображений, основанный на идентификации одноименных объектов и независимой коррекции видеоданных, относящихся к вполне определенным объектам. Алгоритм позволяет качественно выполнить структурное восстановление изображений при наличии хотя бы приближенных априорных знаний о средней яркости объектов изображения.

- Предложен и исследован алгоритм коррекции структурных искажений, ориентированный на обработку изображений, содержащих два класса объектов, резко отличающихся по яркости. Он основан на преобразовании для каждого столбца эмпирических функций распределения яркости так, чтобы они соответствовали одинаковому представительству данных от первого и второго объектов. Алгоритм не требует априорных сведений о средней яркости объектов и обеспечивает точность коррекции порядка 1 градации яркости.

- Разработан алгоритм структурного восстановления снимков, основанный на сегментации изображения на объекты и их отдельной обработке. Этот алгоритм обеспечивает более высокую точность коррекции порядка 0,5 градации яркости, при достаточно высоком уровне различимости объектов.

- Спроектирован алгоритм яркостного выравнивания сканов, основанный на статистическом анализе данных, принадлежащих области перекрытия сканов. В результате отработки алгоритма на натурной информации установлено, что он обеспечивает визуально незаметную границу совмещения сканов.

3. Разработаны алгоритмы коррекции структурных искажений, характер которых изменяется в процессе формирования изображения. Эти алгоритмы основаны на разделении изображения на достаточно малые фрагменты и выполнении процедуры структурного восстановления в пределах каждого из фрагментов. В связи с этим решены следующие задачи.

- Выполнена разработка алгоритмов коррекции, основанных на полиномиальных моделях представления различных по природе времязависимых структурных искажений. Даны рекомендации по выбору той или иной модели искажений (аддитивной, мультипликативной, аддитивно-мультипликативной) в зависимости от конкретной конструкции видеодатчика.

- Спроектированы алгоритмы коррекции времязависимых структурных искажений, которые носят случайный характер и быстро изменяются во времени. Алгоритмы основаны на кусочно-линейном описании искажений, учитывающем характер поведения последних.

- Разработан и исследован алгоритм коррекции групповых структурных искажений в виде синхронного изменения яркости в группе столбцов. Алгоритм основан на адаптации размеров анализируемых фрагментов к характеристикам наблюдаемой сцены и обеспечивает коррекцию групповых искажений до уровня визуальной незаметности.

4. Сформулированы принципы создания программных комплексов структурного восстановления космических изображений. Предложены организационные, системные и алгоритмические подходы для повышения быстродействия и надежности разработанных программных средств. Проведены их натурные испытания на реальных изображениях от космических систем «Ресурс-ДК», «Электро-Л» и «Метеор-М». Разработанные программы в настоящее время эксплуатируются в составе программных комплексов «OrthoNormScan», «GeoScan», «MeteorSat-N», «ElectroSat» в Научном центре оперативного мониторинга Земли и Научно-исследовательском центре космической гидрометеорологии «Планета».

### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Зенин В.А. Исследование алгоритмов радиометрической коррекции изображений неоднородных сюжетов // Тез. докл. XII всерос. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Рязань: РГРТУ, 2007. С. 68-69.

2. Зенин В.А. Оценка уровня шума на изображении при коррекции структурных искажений // Тез. докл. XIII всерос. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Рязань: РГРТУ, 2008. С. 59.

3. Еремеев В.В., Зенин В.А., Князьков П.А. Статистическая оценка степени зашумленности космических изображений земной поверхности // Вестник РГРТУ. Рязань, 2008. №24. С. 3-7.

4. Еремеев В.В., Зенин В.А. Оценка соотношения сигнал/шум систем формирования изображений на основе статистического анализа видеоданных // Тез. докл. VIII междунар. конф. «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации». Курск: КГТУ, 2008. С. 148-150.

5. Зенин В.А., Князьков П.А. Оценка отношения «сигнал/шум» оптико-электронных приборов по изображениям земной поверхности // Тез. докл. 6-й всерос. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2008. С. 211-212.

6. Еремеев В.В., Зенин В.А., Князьков П.А. Оценка степени зашумленности изображений. Рязань: РГРТУ, 2008. 7 с. Деп. в ВИМИ 10.04.08, № ДО-9042.

7. Зенин В.А., Князьков П.А. Оценка отношения «сигнал/шум» оптико-электронных приборов по изображениям земной поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: сб. науч. статей. Выпуск 6. Том I. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 160-166.

8. Еремеев В.В., Зенин В.А. Радиометрическая нормализация изображений от многоматричных сканирующих устройств // Цифровая обработка сигналов. 2009. №3. С. 31-35.

9. Еремеев В.В., Зенин В.А. Статистические модели коррекции структурных искажений на спутниковых изображениях земной поверхности // Цифровая обработка сигналов. 2010. №3. С. 30-36.

10. Зенин В.А. Радиометрическая нормализация многоскановых спутниковых изображений // Тез. докл. XIV всерос. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Рязань: РГРТУ, 2009. С. 306-307.

11. Еремеев В.В., Зенин В.А. Статистическая коррекция структурных искажений на изображениях, содержащих существенно неоднородные по яркости объекты // Информатика и прикладная математика: межвуз. сб. научн. тр. РГУ им. С.А. Есенина. Рязань, 2008. С. 60-63.

12. Еремеев В.В., Зенин В.А., Мятлов Г.Н. Радиометрическая коррекция космических изображений от многоматричных сканирующих устройств // Тез. всерос. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы ракетно-космической техники и ее роль в устойчивом социально-экономическом развитии общества». Самара: ЦСКБ – «Прогресс», 2009. С. 185-186.

13. Зенин В.А. Фильтрация неоднородностей сюжета при радиометрической коррекции спутниковых изображений // Тез. докл. XIV всерос. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Рязань: РГРТУ, 2009. С. 307-308.

14. Еремеев В.В., Зенин В.А. Технология высококачественной радиометрической коррекции структурных искажений на спутниковых изображениях // Тез. докл. 7-й всерос. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2009. С. 314-315.

15. Зенин В.А., Кузнецов А.Е., Побаруев В.И. Алгоритм радиометрической коррекции изображений с неоднородным сюжетом, полученных от космического аппарата «Ресурс-ДК» // Вестник РГРТУ. Рязань, 2008. № 23. С. 43-48.

16. Зенин В.А. Алгоритм автоматической классификации объектов водной поверхности и суши на космических снимках земной поверхности // Тез. всерос. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». М.: РНИИ КП, 2009. С. 156.

17. Зенин В.А. Кластерный алгоритм радиометрической коррекции космических снимков Земли с неоднородным сюжетом // Тез. докл. всерос. науч.-техн. конф. «Интеллектуальные и информационные системы». Тула: ТГУ, 2007. С. 21-24.

18. Еремеев В.В., Зенин В.А. Модели коррекции динамических структурных искажений на космических изображениях // Вестник РГРТУ. Рязань, 2010. № 33. С. 3-7.

19. Зенин В.А. Алгоритм яркостного совмещения изображений, полученных от датчиков сканового типа // Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. «Про-

блемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань: РГРТУ, 2008. С. 111-112.

20. Еремеев В.В., Зенин В.А. Методика оценки интенсивности структурных искажений в оптико-электронных системах формирования изображений // Тез. докл. IX междунар. конф. «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации». Курск: КГТУ, 2010. С. 38-39.

21. Зенин В.А. Информационная технология устранения структурных искажений на космических снимках земной поверхности // Тез. докл. междунар. науч. конф. «XXXVI Гагаринские чтения». Москва: МАТИ, 2010. Т. 8. С. 208.

22. Зенин В.А. Информационная технология коррекции структурных искажений на многоскановых изображениях // Тез. всерос. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». Москва: РНИИ КП, 2010. С. 149-150.

23. Зенин В.А. Коррекция динамических структурных искажений на космических изображениях // Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань: РГРТУ, 2010. С. 78-79.

24. Гектин Ю.М., Егоскин Н.А., Еремеев В.В., Зенин В.А., Москатиньев И.В. Нормализация изображений от геостационарной космической системы наблюдения Земли // Цифровая обработка сигналов. 2011. №3. С. 30-36.

**Зенин Виктор Алексеевич**

**АЛГОРИТМЫ СТРУКТУРНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ  
ВИДЕОИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ  
В УСЛОВИЯХ СТАТИСТИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ  
ПОЛУЧАЕМЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

**А в т о р е ф е р а т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Бумага офисная. Печать цифровая.  
Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет.  
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.