

На правах рукописи



Кавиева Евгения Сергеевна

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ СУБПИКСЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ
ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Специальность 05.13.17 – Теоретические основы информатики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Белгород – 2016

Работа выполнена в ФГАОУ ВПО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», институт инженерных технологий и естественных наук, кафедра информационно-телекоммуникационных систем и технологий

Научный руководитель: **Блажевич Сергей Владимирович**
доктор физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Сирота Александр Анатольевич**
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет», заведующий кафедрой технологий обработки и защиты информации, г. Воронеж

Юдин Дмитрий Александрович
кандидат технических наук,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», старший преподаватель кафедры технической кибернетики, г. Белгород

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет», г. Курск

Защита состоится 8 июня 2016 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.015.14 на базе ФГАОУ ВПО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» по адресу: 308015 г.Белгород, ул. Победы,д.85.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГАОУ ВПО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (НИУ «БелГУ») по адресу: 308015 г.Белгород, ул. Победы,д.85, а также на сайте организации www.bsu.edu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук



А.Г. Жихарев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Важной характеристикой качества изображения является пространственное разрешение, т.е. количество пикселей, которыми оно формируется. Для восприятия большого количества мелких деталей картинки или схемы, требуется высокое пространственное разрешение цифрового изображения. Часто бывает, что пространственное разрешение, которое может обеспечить детектирующая матрица, недостаточно для получения требуемой детализации изображения. Это означает, что нужное цифровое изображение не может быть получено в течение одной съемки, и возникает задача его синтеза на основе группы изображений одной и той же экспозиции, имеющих более низкое разрешение, т.е. так называемая задача «сверхразрешения».

Исследования вопросов повышения разрешения цифровых изображений в течение последних десятилетий велись преимущественно зарубежными учеными (Sung Cheol Park, M. Elad, A. Feuer и др.). Труды отечественных ученых охватывают преимущественно общие вопросы обработки и распознавания цифровых изображений, не включая специализированные методы получения изображений высокого разрешения. Вопросы субпиксельного анализа оставались в стороне от глубоких исследований. В последнее время в этом направлении появились работы российских исследователей, например, (А.Л. Резник, А. А. Сирота, А.В.Ращупкин).

Исследования в области повышения пространственного разрешения цифровых изображений стимулируются тем обстоятельством, что зачастую в научно-технических дисциплинах при решении прикладных задач возникает необходимость работы с высококачественным исходным изображением, а его получение ограничивается использованием фотоматриц низкого разрешения. Проблематичность или даже невозможность использования фотоматриц высокого разрешения, как правило, связана, либо с технологическими препятствиями в их изготовлении (например, для матриц ИК-диапазона), либо с их высокой стоимостью. Поэтому разработка алгоритмических методов улучшения качества и повышения пространственного разрешения цифровых

изображений, получаемых с помощью низкоразрешающей аппаратуры, является актуальной задачей, как в теоретическом, так и в прикладном плане.

Цель работы

Целью диссертационного исследования является разработка и реализация алгоритмов обработки цифровых изображений, повышающих разрешение изображений. В соответствии с целью было выделены задачи:

1. анализ имеющихся способов повышения качества цифровых изображений;

2. разработка и программная реализация алгоритмов сверхразрешения методами:

а) субпиксельного сканирования

б) расфокусировки изображения на регистрирующей матрице.

Научная новизна результатов

Построена математическая модель процесса регистрации группы изображений объекта и синтеза на его основе одного изображения более высокого разрешения: а) Выведено разностное соотношение между значениями смежных пикселей группы изображений низкого разрешения и значениями пикселей изображения высокого разрешения того же объекта; б) определены краевые условия, обеспечивающие определенность задачи синтеза.

1. Разработаны алгоритмы синтеза цифрового изображения высокого разрешения на основе группы изображений более низкого разрешения, полученных субпиксельным сканированием объекта.

2. Разработаны алгоритмы синтеза изображения высокого разрешения на основе группы расфокусированных изображений низкого разрешения, полученные путем маскирования (частичного скрывания изображения) регистрирующей их матрицы.

Научно-практическая значимость

Результаты, приведенные в диссертации, были получены впервые. Практическая значимость данной работы состоит в возможности использования полученных алгоритмов и программ для реализации более эффективных систем дистанционного зондирования Земли. Представленные разработки показывают

возможность существенного повышения разрешения, а, следовательно, и детальность получаемой графической информации, по сравнению с разрешением, которое можно получить при простом использовании регистрирующей матрицы детекторов, даже обладающей предельным на данном этапе развития техники разрешения. Особенно актуальны эти результаты для отечественной науки, т.к. подобные исследования в настоящее время не имеют широкого распространения в нашей стране, в то время, как зарубежные ученые активно ведут работу в этом направлении.

Достоверность научных результатов и выводов

Достоверность сформулированных в диссертации положений и выводов подтверждается экспериментальными результатами, полученными при решении поставленных задач, а также согласованностью полученных экспериментальных результатов с результатами других работ, проводимых в данной области.

Положения, выносимые на защиту

1. Созданы математические модели решения задачи сверхразрешения на основе группы исходный изображений низкого разрешения, полученных методом:
 - а) субпиксельного сканирования;
 - б) регистрации с использованием расфокусировки и маскирования.
2. Алгоритмы решения задачи сверхразрешения методом субпиксельного сканирования изображения в пространственной области с применением специальных краевых условий;
3. Алгоритмы синтеза цифрового изображения высокого разрешения на основе группы расфокусированных изображений низкого разрешения того же объекта, полученных с использованием матрицы детекторов, расположенной за экраном с диафрагмами на расстоянии, определяющим степень используемой расфокусировки;
4. Метод сканирования изображения с эффектом сверхразрешения с использованием группы линеек детекторов, сдвинутых относительно друг относительно друга на заданные количество долей пиксела;

5. Метод получения сверхразрешения сканированием изображения $3 \times n$ рядной линейкой детекторов, расположенных за маской с диафрагмами,

6. Комплекс компьютерные программы, реализующих разработанные алгоритмы синтеза изображения с эффектом сверхразрешения, и результаты численных экспериментов.

Область исследования

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 05.13.17 – «теоретические основы информатики» по следующим областям исследований:

П.5 Разработка и исследование моделей и алгоритмов анализа данных, обнаружения закономерностей в данных и их извлечения разработка и исследование методов и алгоритмов анализа текста, устной речи и изображений;

П.7 Разработка методов распознавания образов, фильтрации, распознавания и синтеза изображений, решающих правил. Моделирование формирования эмпирического знания.

Апробация работы

Основные результаты диссертации были доложены на следующих конференциях:

- Восьмая открытая Всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 2010;

- Девятая открытая Всероссийская конференция «Современные проблемы ДЗЗ из космоса», Москва, ИКИ РАН, 14-18 ноября 2011;

- Научно-техническая конференция «Техническое зрение в системах управления», Москва, ИКИ РАН, 2011;

- Международная конференция «Комплексный анализ и его приложения в дифференциальных уравнениях и теории чисел» Белгород, 17-21 октября 2011.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, из них 4 статей в рецензируемых журналах из перечня рекомендованных ВАК РФ.

Личный вклад автора

Автор внес определяющий вклад в проведении исследований и получении результатов.

Все результаты диссертационной работы получены либо автором самостоятельно, либо при его непосредственном участии.

Методы исследования

Зарубежными учеными (Tsai R.Y., Huang T.S., Park S.C., Гонсалес P.C., Вудс P.E.) представлен целый спектр методов получения изображений с повышением его качества. Если использовать классификацию, предложенную У. Прэттом, то получение сверхразрешения можно отнести к методам реставрации изображений.

Методы повышения разрешения можно классифицировать по разным критериям. Если в качестве основания классификации использовать критерий смещения регистрирующей системы, то выделяют подходы с использованием смещения изображения объекта на фиксирующей его матрице детекторов (motion-based techniques) и подходы без смещения (motion-free approaches). По типу обрабатываемых характеристик изображения можно выделить методы, основанные на использовании частотных характеристик изображения или пространственных характеристик.

В данной работе рассматриваются методы решения задачи сверхразрешения, основанные на смещении изображения объекта на фиксирующей его матрице детекторов с последующей обработкой полученных изображений в пространственной области.

На практике реализация алгоритмов может быть осуществлена на базе различного прикладного программного обеспечения или с использованием систем программирования. В данной работе в качестве средства их практической реализации была применена универсальная программная среда для выполнения математических и технических расчетов Mathcad. Работа в данном математическом пакете позволяет наглядно и компактно (в рамках одного файла) производить сложные многоэтапные преобразования изображений. Однако ни один из представленных в работе алгоритмов не имеет строгой привязки к данной среде реализации.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации составляет 126 страниц основного текста, 40 рисунков, 6 таблиц и список литературных источников, состоящий из 123 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы основные цели работы, указана новизна результатов, приведена структура и содержание диссертации, перечислены защищаемые положения.

Первая глава работы посвящена обзору способов получения, кодирования и имеющихся методов обработки цифровых изображений.

Раздел 1.1. раскрывает вопросы получения и кодирования цифровых изображений. В *разделе 1.1.1.* изложены общие понятия области исследования, кратко описана теория кодирования цифровых изображений, приведены подходы к определению понятия пиксель. В *разделе 1.1.2.* рассмотрены способы получения цифровых изображений высокого разрешения, которые широко используются в системах дистанционного зондирования земли (спутниковая и аэрофотосъемка).

Основой современных сканирующих систем и цифровых фото- и видеокамер являются приемники оптического излучения на основе ПЗС-матриц – специализированных интегральных микросхем, состоящих из светочувствительных фотодиодов. Важной характеристикой таких цифровых фотокамер является физический размер пикселя матрицы. Чем он больше, тем больше фотонов регистрируется в единицу времени, что при прочих равных параметрах позволяет проводить съемку при худших условиях освещенности. Таким образом, повышение разрешения изображений за счет уменьшения физического размера пикселя матрицы будет ухудшать другие характеристики изображений, такие как четкость, контрастность. Как правило, для получения цифровых изображений высокого разрешения в цифровых камерах осуществляется «сшивка» фрагментов изображений, полученных несколькими матрицами.

В разделе 1.2 кратко описываются принципы, лежащие в основе различных методов обработки цифровых изображений с целью их улучшения. Это поэлементная обработка и использование вероятностных характеристик, то есть работа с гистограммами яркости изображения. Это методы изменения контраста, яркости, резкость изображения. Также рассмотрены методы низкочастотной пространственной фильтрация для удаления шума, методы подчеркивания границ.

В разделе 1.3 рассмотрены методы, применяющиеся для реставрации (восстановления) изображений, дано понятие реставрации изображения как восстановления исходного неискаженного изображения с использованием дополнительной информации, приведена классификация искажений изображений, имеющая в своей основе причины возникновения искажений.

В разделе 1.3.1. дан обзор наиболее распространенных методов реставрации изображений. Далее в разделе 1.3.2. Представлен метод изменения размера цифровых изображений (resizing). Он является наиболее близким из существующих методов повышения пространственного разрешения цифровых изображений к субпиксельной обработке. Однако его отличительной особенностью является то, что результат обработки не дает новой информации, или повышения детализации, а лишь улучшает субъективное восприятие изображения.

Раздел 1.4 посвящен субпиксельной обработке цифровых изображений. В разделе определено и обосновано место методов повышения разрешения с использованием субпиксельной обработки в общей классификации методов реставрации, дана теоретическая база для подробного описания методов получения сверхразрешения.

Раздел 1.4.1. описывает подходы к определению понятия «субпиксельная обработка» (sub-pixel с англ. – подпиксель). Соответственно субпиксельная обработка предполагает совершение преобразований изображения на межпиксельном уровне. Существует два близких определения понятия пиксель. С одной стороны, пиксель – наименьший логический элемент изображения, с другой – это наименьшая единица изображения в устройстве вывода графической информации.

Если пиксель единица разрешения устройства вывода, то можно говорить о его внутренней структуре – это триада, позволяющая формировать цветное изображение. Эта структура используется для повышения качества вывода изображений на мониторах небольшого размера (портативный компьютер, электронная книга и др.).

Другой подход к пониманию процесса субпиксельной обработки изображений определяется рассмотрением пикселя как наименьшего логического элемента изображения. В этом случае пиксель не имеет внутренней структуры. Субпиксельная обработка в данном случае предполагает получение нового значения пикселя на основе обработки нескольких других, частично сходных между собой пикселей разных изображений одной и той же экспозиции.

Субпиксельная обработка, основывается на изменении одного параметра цифрового дискретного изображения – пространственного разрешения изображения. При этом данный метод не требует повышения разрешающей способности цифровых камер и является достаточно простым с вычислительной точки зрения.

В *разделе 1.4.2.* произведено подробное описание математической модели обработки цифрового изображения. В задаче получения сверхразрешения рассматриваются несколько изображений объекта b_k , и для k -того изображения имеем определение:

$$b_k = w_k a, \quad (1)$$

Таким образом, исходными данными для рассматриваемых ниже алгоритмов синтеза изображения a со сверхразрешением являются изображения вида b_k . Для определения матрицы a необходимо решить систему уравнений (1).

В *разделе 1.4.3.* дана постановка задачи синтеза изображения со сверхразрешением. Для дальнейшего рассмотрения выбран идеальный случай, когда функция рассеяния точки (PSF) определяет только пикселизацию изображения, т.е. интегрирование по площади пикселя, и сформулирована общая математическая постановка задачи синтеза цифрового изображения высокого разрешения. Так как максимальная детализация растрового

изображения задаётся при его создании исходным количеством точек то, чтобы дополнить количество пикселей, нужна дополнительная информация об изображении. Эта дополнительная информация содержится во взаимных субпиксельных смещениях набора исходных изображений. И задача получения сверхразрешения сводится к поиску алгоритма синтеза изображения высокого разрешения на основе группы исходных изображений. Субпиксельная обработка, таким образом, предполагает получение нового значения пикселя на основе обработки нескольких других, частично сходных между собой пикселей.

В *разделе 1.5.* приведены выводы к главе 1.

Во **второй главе** представлен разработанный метод, который основан на субпиксельной обработке набора изображений с целью синтеза изображения высокого разрешения и предложены компьютерные программы, реализующие этот метод. В *разделе 2.1.* описано несколько простых вариантов метода.

На рисунке 1 приведены схемы исходных изображений, способов наложения и результатов обработки: а), б) исходные изображения одного объекта, полученные при смещении сканирующего элемента (фотокамеры) на половину пикселя по горизонтали и по вертикали, соответственно; в), г) способы наложения изображений для последующей обработки; д) результат обработки двух изображений со схемой наложения в); е) результат обработки четырех изображений с одновременным использованием схем наложения в) и г).

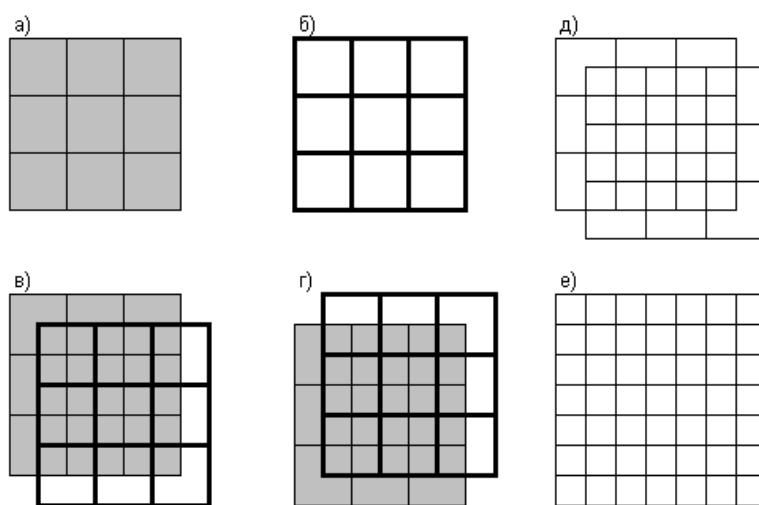


Рисунок 1.

б) изображение, синтезированное из двух исходных; в) изображение, синтезированное из четырех исходных; г) изображение, полученное при фотосъемке с разрешением, равным разрешению синтезированного изображения.

В основе работы данного алгоритма лежит принцип усреднения. Синтезированные изображения получаются слегка размытыми, нечеткими. Эти недостатки можно устранить дальнейшей обработкой: повышением яркости, контрастности, подчеркиванием границ.

В *разделе 2.2* подробно представлен иной способ субпиксельной обработки. В данном случае не используется усреднение. В *разделе 2.2.1* представлена одномерная модель. В *разделе 2.2.2* - восстановление с двукратным увеличением разрешения. В качестве исходных используются четыре изображения низкого разрешения.

На рисунке 4 приведены схемы исходных изображений, способов наложения и результата обработки: а) искомое результирующее изображение, б) одно из исходных изображений; в), г), д), е) способы смещения исходных изображений по отношению к результирующему.

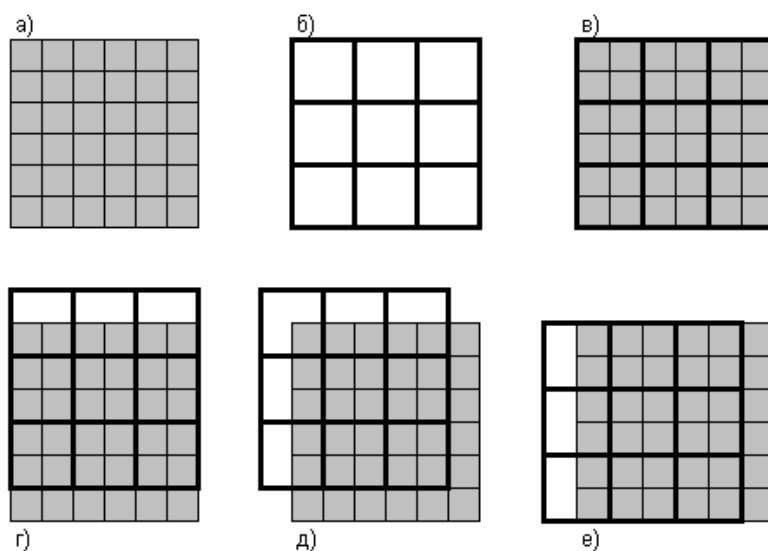


Рисунок 4.

Рисунок 5 демонстрирует результаты работы рассматриваемого алгоритма: а) исходное изображение; б) одно из изображений низкого разрешения; в) восстановленное изображение.



Рисунок 5

Данный способ дает полное восстановление исходного изображения. Полученные результаты демонстрируют существенные преимущества данного метода перед представленными ранее.

В разделе 2.2.3 представлено развитие метода, представленного в разделе 2.2.2, на общий случай $k \cdot k_1$ входных изображений, где k и k_1 коэффициенты уменьшения размеров пикселя по горизонтали и вертикале. Этот метод позволяет получить синтезированное изображение, в котором каждому пикселю исходного изображения соответствует участок размером $k \cdot k_1$ пикселей нового синтезированного изображения.

Обозначим сигнал с одного пикселя матрицы детекторов («большой пиксель»), представляющий интеграл яркости по площади пикселя:

$$b_{i,k} = \int_{y_k}^{y_{k+1}} \int_{x_i}^{x_{i+1}} s(x, y) dx dy \quad (6)$$

Значение пикселя синтезированной матрицы («малый» пиксель) представляет интеграл:

$$a_{n \cdot i+p, m \cdot k+q} = \int_{y_{m \cdot k+q}}^{y_{m \cdot k+q+1}} \int_{x_{n \cdot i+p}}^{x_{n \cdot i+p+1}} s(x, y) dx dy \quad (7)$$

Существует всего четыре разных положения «большого» пикселя с адресом (i, k) смещенного на один «малый» пиксель (рисунок б).

$$b_{11,i,k} + b_{00,i,k} - b_{01,i,k} - b_{10,i,k} = a_{ni,mk} + a_{n(i+1),m(k+1)} - a_{ni,m(k+1)} - a_{n(i+1),mk} \quad (8)$$

Отсюда выразим значение малого пикселя через значения смежных больших и малых пикселей:

$$a_{n(i+1),m(k+1)} = b_{00,i,k} - b_{11,i,k} - b_{01,i,k} + b_{10,i,k} - a_{ni,mk} + a_{n(i+1),mk} + a_{ni,m(k+1)} \quad (9)$$

Выражение (9) является основным для решения задачи синтеза.

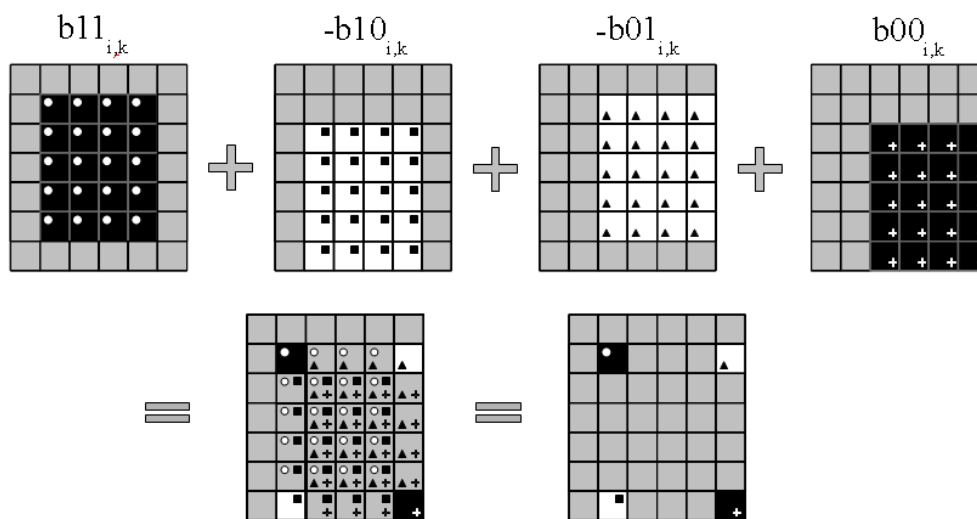


Рисунок 6. Демонстрация вывода основного соотношения задачи.

Используя особенности смещения исходных изображений низкого разрешения можно определить сначала значение одного верхнего левого «малого» пикселя, а затем последовательно всех малых пикселей первой строки, первого столбца, и далее по формуле (9) вычислить значения пикселей всего изображения высокого разрешения.

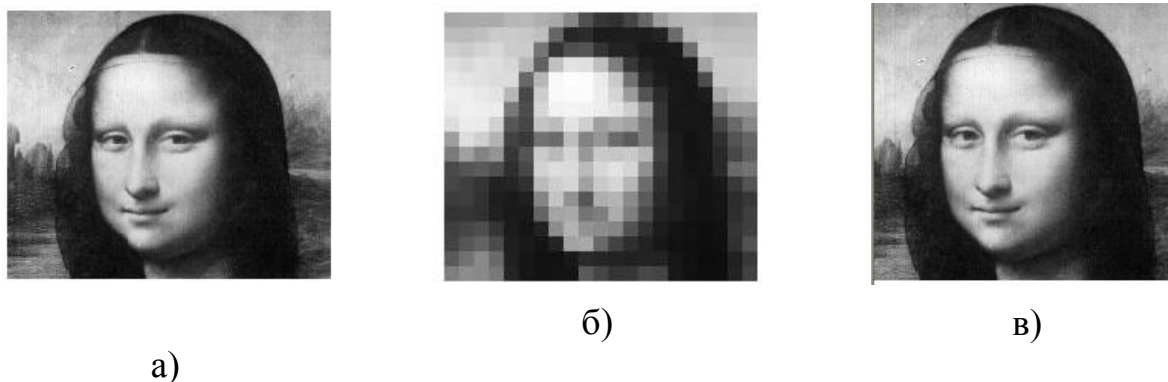


Рисунок 7.

Рисунок 7 демонстрирует результаты синтеза изображения высокого разрешения, проведенного на основе смоделированных сдвинутых цифровых изображений низкого разрешения: а) исходное изображение высокого разрешения; б) одно из смоделированных изображений низкого разрешения; в) изображение, синтезированное из набора смоделированных изображений.

В разделах 2.1-2.2 подробно описаны алгоритмы работы программ, приведены пояснения с демонстрацией листингов фрагментов программ. Продемонстрированы образцы результатов работы программы. Сделаны

выводы о достоинствах, недостатках и возможной области применения методов обработки.

В разделе 2.3. приведены выводы к главе 2.

Третья глава посвящена описанию двух других методов получения изображения со сверхразрешением. Два метода объединены общей особенностью получения исходных изображений. Съемка и сканирование производятся с использованием системы детекторов, расположенной за маской, имеющей решетку диафрагм.

Раздел 3.1.1. демонстрирует общую теорию первого метода и одномерную его модель. Метод предполагает использование в качестве исходных набор расфокусированных изображений объекта. При синтезе результирующего изображения к процедуре суммирования добавляется процесс деконволюции (восстановления резкости).

Принцип повышения разрешающей способности цифрового изображения предлагаемым способом продемонстрируем на одномерной модели (рисунок 8).

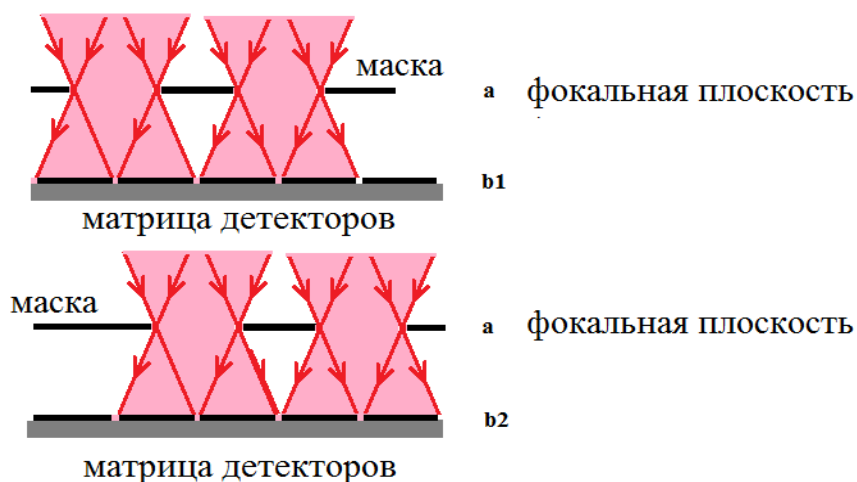


Рисунок 8.

Рисунок 8 демонстрирует модель формирования двух одномерных цифровых изображений удаленного объекта линейкой детекторов: **a** - маска с диафрагмами (щелями); **b1** и **b2** – два различных положения линейки детекторов относительно маски с диафрагмами.

Сигналы детекторов в каждом из двух положении маски представляют расфокусированное изображение фрагментов, вырезаемых диафрагмами из изображения в фокальной плоскости. Расстояние между фокальной

плоскостью и плоскостью линейки детекторов выбираем таким, чтобы расфокусированные изображения соседних фрагментов не пересекались.

Если сигналы реальных детекторов для двух положений маски обозначить соответственно b_{1i} и b_{2i} , а сигналы виртуальных a_i , то для случая, представленного на рисунке 5, эта связь в матричной форме будет иметь вид

$$\begin{pmatrix} a_{1_{4i}} \\ a_{1_{4i+1}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} b_{1_{2i}} \\ b_{2_{2i+1}} \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} a_{2_{4i+2}} \\ a_{2_{4i+3}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} b_{2_{2i+1}} \\ b_{2_{2i+2}} \end{pmatrix} \quad (10)$$

где векторы $\mathbf{b1}$ и $\mathbf{b2}$ представляют свертку соответствующего фрагмента изображения \mathbf{a} на площади диафрагмы с функцией рассеяния точки, характеризующей процесс расфокусировки.

Из полученных сигналов по формулам (10) было синтезировано одномерное изображение $\mathbf{aa}=\mathbf{a1}+\mathbf{a2}$ (сигналы виртуальных детекторов) (рисунок 9).

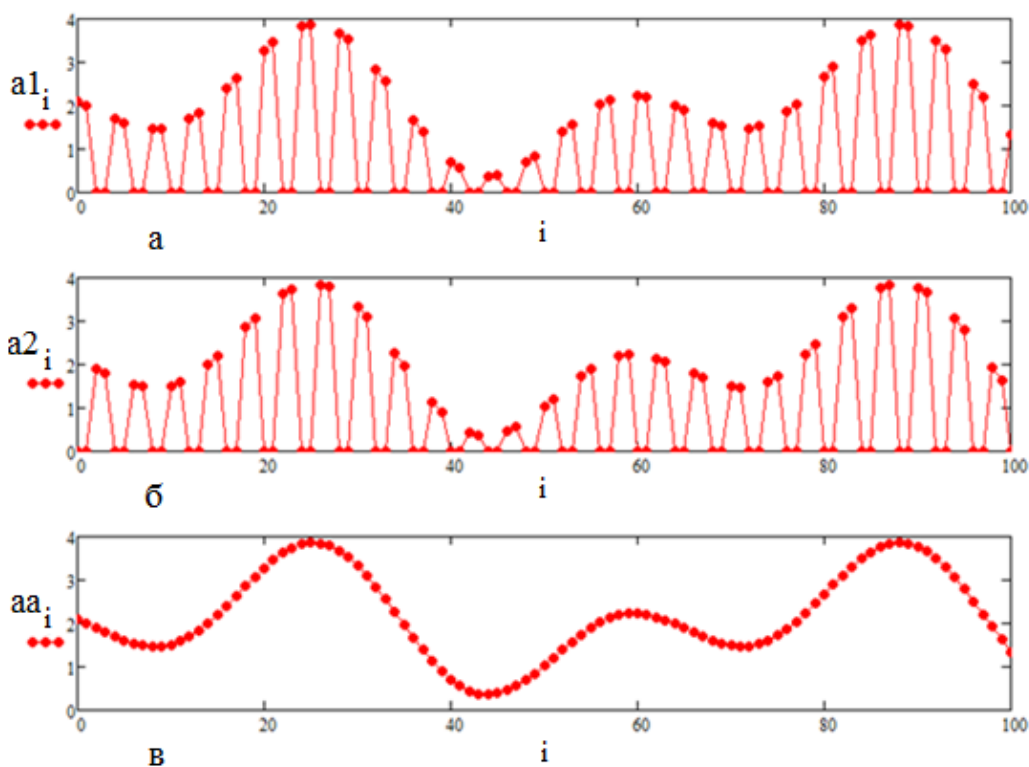


Рисунок 9.

Рисунок 9: синтезированное изображение, снятое виртуальными детекторами, расположенными на маске вместо диафрагм в положении 1 (a), в положении 2 ($б$) и суммарное изображение ($в$)

В данном разделе приведен алгоритм повышения разрешения одномерного изображения, определены положения матрицы с диафрагмами, при которых должна производиться съемка, позволяющая синтезировать изображение, разрешение которого в два раза выше, чем у исходных изображений. Затем представлен метод трехкратного увеличения разрешения. Далее представлен аналогичный метод повышения разрешения двумерного изображения.

В разделах 3.1.2 и 3.1.2. представлено развитие метода на двумерный случай. В разделе подробно описан принцип работы алгоритма, приведены листинги фрагментов программы с пояснениями. Результат работы предложенной программы продемонстрирован на реальных изображениях (рисунок 10): а) исходное изображение высокого разрешения, б) изображение с линейным разрешением втрое меньше исходного, в) результат суммирования входного набора маскированных расфокусированных изображений, г) синтезированное изображение высокого разрешения.

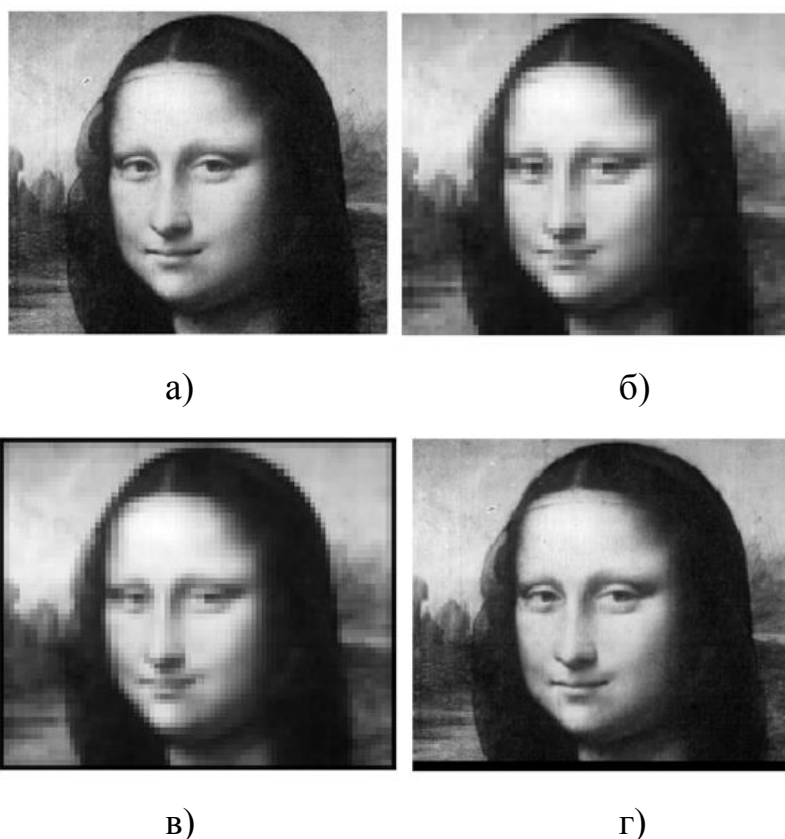


Рисунок 10.

Наиболее явно результат обработки исходных маскированных изображений низкого разрешения виден при сравнении с необработанными изображениями на пиксельном уровне.



Рисунок 11.

В качестве примера на рисунке 11 представлены фрагменты одного из исходных (рисунок 11а – расфокусированное изображение низкого разрешения за маской с диафрагмами) и соответствующего ему обработанного (рисунок 11б – маскированное изображения высокого разрешения), изображений, увеличенные так, чтобы размеры пикселей примерно совпадали.

Увеличенное изображение фрагментов демонстрирует проявление внутренней структуры изображения на площади диафрагм (внутри большого пикселя), а именно, из рисунка видно, что вместо каждого одного пикселя (рисунок 11а) мы получаем 9 новых «малых пикселей» (рисунок 11б). Кроме того, отчетливо видно, что изображение 11б не имеет размытия, связанного с расфокусировкой.

Суммируя набор изображений, фрагмент одного из которых приведен на рисунке (рисунок 11а),

$$AI := \sum_{i=0}^2 \sum_{k=0}^2 \text{ass}(\text{III}_{i,k}, 3, i, k), \quad (11)$$

получаем синтезированное изображение (рисунок 10г), имеющее, для рассмотренного примера, в три раза более высокое линейное разрешение по каждому из направлений. Сравнение проводится с разрешением входных для данной задачи расфокусированных изображений низкого разрешения

Полученные результаты позволяют сделать вывод об эффективности применения представленного выше метода для получения изображения более высокого разрешения, чем доступно, при непосредственной съемке (без маски из диафрагм) с помощью той же регистрирующей матрицы.

Для другого алгоритма, представленного в *разделе 3.2*, исходные изображения – результат сканирования местности. В этом случае съемка производится не фотоматрицей, а сканирующей линейкой.

В *разделе 3.2.1* предложен метод сканирования с использованием специальной линейки за маской с диффрагмами, в котором используется расфокусировка изображения на линейке детекторов.

Сканирование в направлении, указанном стрелками, производится тремя трехслойными линейками детекторов с маской. Система сканирования, состоящая из трех матриц с масками, сдвинутых на один пиксель друг относительно друга. Стрелками указано направление сканирования (рисунок 12).

Сканирование тремя линейками обеспечивает регистрацию и синтез полной картины с разрешением $1/3$ пиксела. Эффективная сканирующая линейка виртуальных (синтезированных) 3×3 малых пикселов в каждой диафрагме представлена на рисунке 13.

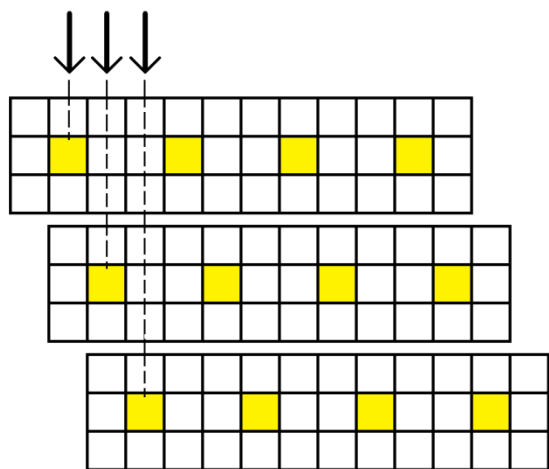


Рисунок 12.

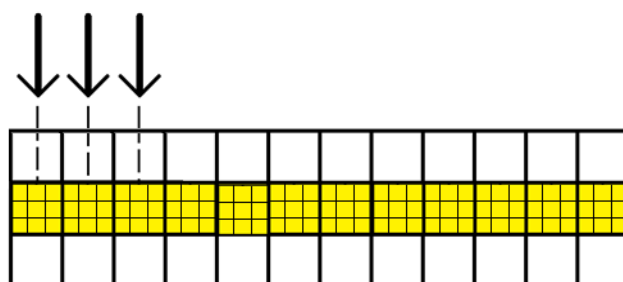


Рис. 13. Эффективная (суммарная) сканирующая линейка, для ДЗЗ с разрешением $1/3$ пиксела.

В *разделе 3.2.2* предлагается использование группы линеек, расположенных с субпиксельными относительными сдвигами. В этом случае маска не используется и регистрируется изображение, сфокусированное на линейке детекторов (рисунок 14).

Алгоритмы решения задач синтеза, составленные в рамках рассматриваемой математической модели (разделы 3.1-3.2) реализованы в виде компьютерных программ, листинги фрагментов которых представлены в главе 3.

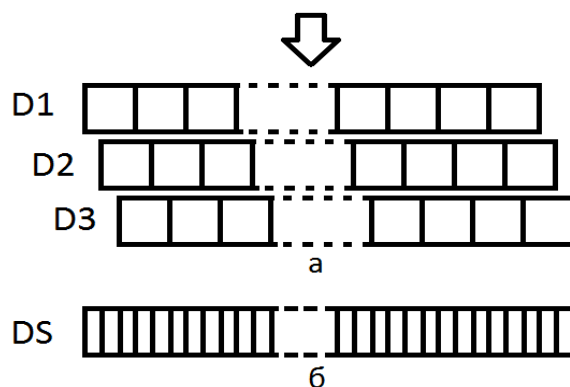


Рисунок 14.

В *Разделе 3.3.* представлены выводы к главе 3.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационного исследования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Построена математическая модель процесса формирования группы изображений объекта и синтеза на его основе одного изображения повышенного разрешения.

2. Разработан алгоритм решения задачи синтеза изображения высокого разрешения на основе серии цифровых изображений низкого разрешения, полученных путем субпиксельных сдвигов регистрирующей матрицы детекторов.

3. Разработан метод получения цифрового изображения высокого разрешения на основе синтеза нескольких расфокусированных изображений объекта низкого разрешения, полученных с использованием матрицы детекторов, расположенной за экраном с диафрагмами на расстоянии от него, определяющим степень расфокусировки.

4. Разработаны варианты указанных выше методов с использованием линейного сканирования изображения группой линеек детекторов, расположенных с относительным сдвигом на долю пикселя (вариант первого метода) или на один пиксель (вариант второго метода).

5. Разработанные в работе алгоритмы решения задач повышения разрешения изображений реализованы в виде программ в среде математического пакета MathCad.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Блажевич С.В., Выбор исходных цифровых космических изображений для синтеза изображения участка поверхности Земли, представляемого в цифровой форме пикселями с существенно меньшей апертурой / С.В. Блажевич, В.Н. Винтаев, Е.С. Селютина, Н.Н. Ушакова // Сб. науч. ст. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса – М.: Москва, «ДоМира», 2011. – том 8, номер 4, С. 39-47.

2. Блажевич С.В., Синтез цифровых изображений субпиксельного уровня разрешения с использованием расфокусировки / С.В. Блажевич, В.Н. Винтаев, Е.С. Селютина, Н.Н. Ушакова // Сб. науч. ст. Техническое зрение в системах управления – М.: Москва, «Ротапринт ИКИ РАН», 2012. С.127-137.

3. Блажевич С.В., Синтез матрицы двумерного изображения со сверхразрешением / С.В. Блажевич, Е.С. Селютина // Журнал «Научные ведомости БелГУ» - Белгород, «Белгород», 2012. – номер 23 (142), выпуск 29, С. 38-49.

4. Блажевич С.В., Повышение разрешения цифровых изображений с использованием субпиксельного сканирования / С.В. Блажевич, Е.С. Селютина // Журнал Научный аспект – Самара, «Инсома-пресс», 2013. – выпуск №1, С. 204-211.

5. Блажевич С.В., / Повышение разрешения цифровых изображений с использованием субпиксельного сканирования / С.В. Блажевич, Е.С. Селютина // Журнал «Научные ведомости БелГУ» - Белгород, «Белгород», 2014. – номер 5 (176), выпуск 34, С. 186-190.

6. Блажевич С.В., Выбор исходных цифровых космических изображений для синтеза изображения участка поверхности Земли, представляемого в цифровой форме с существенно лучшим разрешением / С.В. Блажевич, В.Н. Винтаев, Е.С. Селютина, Н.Н. Ушакова // Сб. тез. восьмой открытой Всероссийской конференции Современные проблемы ДЗЗ из космоса. – М.: Москва, ИКИ РАН, 2010. – С. 24-25.

7. Блажевич С.В., Синтез цифровых изображений субпиксельного уровня разрешения с использованием расфокусировки / С.В. Блажевич, В.Н. Винтаев, Е.С. Селютина, Н.Н. Ушакова // Сб. тез. научно-технической

конференции Техническое зрение в системах управления. – М.: Москва, ИКИ РАН, 2011. – С. 55-56.

8. Блажевич С.В., Методы синтеза матрицы двумерного изображения со сверхразрешением / С.В. Блажевич, Е.С. Селютина // Сб. тез. международной конференции Комплексный анализ и его приложения в дифференциальных уравнениях и теории чисел. – Б.: Белгород, «Политерра», 2011. – С. 29-30.

9. Блажевич С.В., К вопросу о повышении качества космических изображений с использованием методов сверхразрешения / С.В. Блажевич, В.Н. Винтаев, Е.С. Селютина, Н.Н. Ушакова // Сб. тез. девятой открытой Всероссийской конференции Современные проблемы ДЗЗ из космоса. – М.: Москва, ИКИ РАН, 2011. – С. 18.

10. Блажевич С.В., / К вопросу о методах повышения качества цифровых изображений / С.В. Блажевич, Е.С. Селютина // Журнал «Научные ведомости БелГУ» - Белгород, «Белгород», 2015. – №11(208), выпуск 39, стр. 208-222.

Подписано в печать 25.02.2016. Формат 60×90/16.

Гарнитура Times New Roman. Усл. п.л. 1,4. Тираж 100 экз. Заказ 51.

Оригинал-макет подготовлен и тиражирован в ИД «Белгород» НИУ «БелГУ»
308015 г. Белгород, ул. Победы, 85

