

На правах рукописи

Тимановский Алексей Леонидович

**СВЕРХРАЗРЕШЕНИЕ В СИСТЕМАХ
ПАССИВНОГО РАДИОВИДЕНИЯ**

Специальность 05.13.18 – математическое
моделирование, численные методы и комплексы
программ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2007

Работа выполнена в Учебно-научном центре магнитной томографии и спектроскопии МГУ им. М.В. Ломоносова и на кафедре радиофизики физического факультета МГУ.

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук,
профессор Ю. А. Пирогов

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук,
профессор А.С. Беланов

Доктор физико-математических наук,
профессор А.И. Чуличков

Ведущая организация: Институт радиотехники и электроники РАН

Защита диссертации состоится «8» ноября 2007 года в 16:00 часов на заседании Диссертационного Совета Д.501.001.17 в МГУ им. М. В. Ломоносова по адресу: 119992, г. Москва, ГСП, Ленинские Горы, МГУ, физический факультет, ауд. СФА.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2007 г.

Ученый секретарь
Диссертационного Совета Д.501.001.17
доктор физико-математических наук, профессор

П. А. Поляков

Введение

Диссертационная работа посвящена математическому моделированию формирования изображений в системах пассивного радиовидения и численным методам решения задачи восстановления изображения.

Актуальность темы. Актуальность диссертационной работы связана с постепенным расширением списка прикладных областей, где становятся востребованными системы радиовидения, и соответственно ростом интереса к ним. Одновременно с развитием полупроводниковых технологий становится технически возможным построить низкошумящие неохлаждаемые усилители миллиметрового диапазона, что делает радиовидение более доступным. Основные области применения систем радиовидения — это те, где уже традиционно применяются инфракрасные (ИК) методы. Преимуществом радиовидения над ИК системами является всепогодность, т.е. способность получать изображения объектов независимо от погодных условий и времени суток.

Среди практических областей применения радиовидения можно выделить следующие: обеспечение авиационной безопасности, навигация в условиях ограниченной видимости, экологический мониторинг (например спутниковая система предупреждения о лесных пожарах), вулканология, выявление скрытого под одеждой оружия в публичных местах, медицина, пассивная локация произвольных объектов и тому подобные.

В то же время из-за гораздо большей рабочей длины волны системы пассивного радиовидения заметно проигрывают по разрешению оптическим системам ИК и видимого диапазона. В связи с этим выделилось направление по разработке методов повышения разрешения путем математической обработки радиоизображений. Большинство инновационных работ по сверхразрешению было выполнено в контексте радиоастрономии, где имеется своя специфика, а признанного универсального алгоритма обработки для систем радиовидения не существует. Разработка

такого метода способствует более широкому внедрению систем радиовидения.

Вторым существенным недостатком пассивного радиовидения является его низкое быстродействие из-за необходимости накапливать сигнал в каждой точке измерений (обычно 0.1 с). Этот недостаток стараются преодолеть с помощью многоканальных систем, где за одно измерение можно получить сразу несколько пикселей изображения. Такие системы начали разрабатываться сравнительно недавно, и вопросы обработки и повышения разрешения в таких системах пока еще очень неразвиты. В то же время практика показала, что применение в многоканальных системах методов, работающих в одноканальном случае, затруднительно, в связи с чем возникла потребность разработки специальных алгоритмов сверхразрешения, адаптированных для случая многоканальных устройств [6].

Цель работы. Целью работы является разработка методов повышения разрешения одно- и многоканальных систем пассивного радиовидения путем математической обработки выходных сигналов радиометров.

Научная новизна.

1. Произведено сравнение нескольких известных методов восстановления изображения применительно к задачам радиовидения. Изучены их характеристики при обработке реальных сигналов систем пассивного радиовидения различных диапазонов и с отличающимися аппаратными функциями. На основе этих методов разработан улучшенный алгоритм сверхразрешения, а также выработаны рекомендации по его использованию, выбору параметров и применению методов регуляризации.
2. Экспериментально подтверждена зависимость уровня сверхразрешения от соотношения сигнал/шум. Произведено сравнение полученной зависимости с известными теоретическими моделями.
3. Показано, что при сверхразрешении восстанавливаются высшие пространственные частоты, отсутствовавшие в исходном изображении.

4. Рассмотрен вопрос согласованности и корректности последовательного применения метода компенсации динамических искажений и АСР при обработке выходного сигнала радиометров.
5. Рассмотрен вопрос о влиянии формы аппаратной функции на поведение АСР. Установлено, что уровень бокового лепестка оказывает существенное влияние на сходимость АСР.
6. Предложена процедура выбора порога нелинейной фильтрации, оптимального для регуляризации алгоритмов сверхразрешения изображений, полученных в системах пассивного радиовидения.
7. Разработан и опробован на практике метод повышения разрешения в многоканальных системах.

Научная и практическая значимость. Предлагаемый алгоритм имеет большую практическую значимость, так как позволяет повысить разрешение приборов путем математической обработки данных без изменения конструктивных параметров систем — путем уменьшения рабочей длины волны или увеличения апертуры (размеров) системы.

Защищаемые положения.

1. Разработанный алгоритм математической обработки радиометрических изображений, позволяет повысить разрешение за счет учета дополнительных априорных сведений, вытекающих из физических принципов радиометрии. Показано, что физической причиной сверхразрешения является восстановление пространственных частот, ослабленных в необработанном изображении.
2. Предлагаемый метод получения и обработки радиоизображений в многоканальных системах позволяет повысить качество изображения (уменьшить шумы) без увеличения времени сканирования, скомпенсировать нежелательный дрейф радиометров и повысить разрешение получаемых изображений за

счет взаимной компенсации шумов различных радиометров при получении ими сигнала от одной области объекта.

3. Разработанный метод регуляризации решения позволяет стабилизировать поведение АСР при низком отношении сигнал/шум (< 20 дБ) при помощи вэйвлет-шумоподавления. Метод основан на разделении шумовой и полезной составляющих изображения путем нелинейной фильтрации.
4. У предлагаемого АСР выявлено ограничение на форму аппаратной функции: для сохранения эффективности алгоритма уровень бокового лепестка не должен превышать $-15 \div -10$ дБ.
5. Достижимый уровень сверхразрешения в радиовидении определяется отношением сигнал/шум в соответствии с полученными данными и теории и эксперимента. Большее отношение сигнал/шум позволяет достичь более высокого сверхразрешения.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 93 наименования. Общий объем текста — 108 страниц, работа содержит 41 рисунок и 1 таблицу.

Апробация работы и публикации. Разработанные алгоритмы опробованы при обработке экспериментальных данных, полученных с помощью двух установок пассивного радиовидения, используемых в лаборатории микроволновой радиометрии кафедры радиофизики физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова: первая установка — одноканальная система 3-мм диапазона; вторая — одиннадцатиканальная система 8-мм диапазона.

Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались автором на конференции "Радиотелескопы-2002"; IX Всероссийской школе-семинаре "Волновые явления в неоднородных средах" (Московская обл., Звенигород); Международной конференции "Joint 29th International Conference on Infrared and Millimeter

Waves and 12th International Conference on Terahertz Electronics” (University of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany, 2004). Материалы диссертации опубликованы в изданиях: SPIE Proceedings 2002 — 2004; International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2004; ”Журнал радиоэлектроники”, 2004; Вестник МГУ, 2006; Радиотехника, 2006; Известия ВУЗов, ”Радиофизика”, 2006. Материалы работы неоднократно докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры радиофизики МГУ.

1. Получение изображения в одноканальных системах пассивного радиовидения

Первая глава описывает методы получения изображения в системах пассивного радиовидения. После краткого введения и описания принципов работы систем в ней рассмотрен алгоритм обработки сигнала для компенсации динамических искажений, а также описано, как при этом изменяются статистические характеристики сигнала.

Физические принципы формирования изображения в системах пассивного радиовидения. Принцип работы систем пассивного радиовидения основан на фиксации контраста теплового радиоизлучения объектов. Тепловое излучение, описываемое формулой Планка, носит шумовой характер и в миллиметровом диапазоне имеет весьма низкую интенсивность — $\sim 10^{-15}$ (Вт/(Гц·м²)). Для детектирования столь слабых сигналов применяются радиометры — сверхчувствительные приемники, принцип действия которых основан на накоплении полезного сигнала. Контраст получаемого изображения образуется из-за различия коэффициентов отражения и поглощения и температур наблюдаемых предметов.

Предел углового разрешения системы R_φ определяется соотношением апертуры приемной антенны D и рабочей длины волны λ . Оно известно как рэлеевский предел, и под сверхразрешением понимается достижение разрешения выше этого

предела

$$R_{\varphi} \approx 1.22\lambda/D.$$

Скорость получения радиотермоизображения зависит от размера получаемого изображения, скорости механического сканирования и времени интегрирования радиометра, которое является временем получения одного элементарного участка изображения — пиксела и определяет чувствительность системы.

Компенсация динамических искажений. Для уменьшения уровня шума на выходе радиометра, согласования его с динамическим диапазоном и частотой дискретизации АЦП в выходном каскаде радиометра стоит ФНЧ с достаточно большой постоянной времени (~ 1 с). Это приводит к тому, что при работе в динамическом режиме (когда входной сигнал зависит от времени) выходной сигнал получается искаженным. Для устранения этого нежелательного явления используется метод компенсации динамических искажений. В диссертации рассмотрена дисперсия сигнала на выходе этого метода и показано, что в пределе при большой частоте дискретизации сигнала и сохранении конечного числа отсчетов дисперсия эквивалентна дисперсии сигнала после усреднения $k_{\text{эфф}} = k - \frac{2\tau}{T}$ отсчетов. Здесь k — истинное число отсчетов, использованное в методе компенсации динамических искажений; T — период дискретизации; τ — постоянная времени фильтра.

Далее в работе рассмотрено преобразование сигнала в системе пассивного радиовидения и показано, что в силу того, что в радиометрах соотношение полос УВЧ и ФНЧ $\Delta F \cdot \tau \sim 10^8 \div 10^9$, оценка радиояркостной температуры с использованием рассмотренных приборов и алгоритмов является несмещенной и обладает нормальным распределением. Это недостижимо без использования метода компенсации динамических искажений.

2. Алгоритмы сверхразрешения для одноканальных систем

Глава 2 посвящена алгоритмам сверхразрешения изображений, полученных с помощью одноканальных систем. В ней рассмотрено несколько известных линейных

и нелинейных алгоритмов, проведено сравнение их эффективности на основании выработанных критериев. Предложен улучшенный алгоритм сверхразрешения, разработанный на их основе. Проанализирован вопрос о теоретически достижимом пределе сверхразрешения. Описаны результаты применения алгоритмов для обработки тестовых искусственных и экспериментальных изображений 3-мм диапазона.

Постановка задачи. Модель формирования изображения на выходе системы описывается интегральным выражением

$$g(\vec{r}) = \iint f(\vec{\rho})h(\vec{r} - \vec{\rho}) d\vec{\rho} + n(\vec{r}), \quad (1)$$

где $\vec{\rho}$ — двумерный вектор мировых координат; \vec{r} — двумерный вектор в лабораторной системе координат; $f(\vec{\rho})$ — исследуемое распределение радиояркой температуры; $h(\vec{r}, \vec{\rho})$ — аппаратная функция системы; $n(\vec{r})$ — аддитивный шум; $g(\vec{r})$ — результат измерений. Для удобства записи введем более короткую форму записи

$$g = h \otimes f + n. \quad (2)$$

Постановка задачи сверхразрешения заключается в следующем: необходимо, основываясь на экспериментальных данных g , h и, возможно, дополнительной (априорной) информации, получить решение \hat{f} насколько возможно близкое к исходному распределению f . Наиболее распространенной мерой близости является функционал

$$J(\hat{f}) = \left\| g - h \otimes \hat{f} \right\|^2. \quad (3)$$

Известно, что рассматриваемая задача является некорректно поставленной и устойчивого решения без дополнительной регуляризации, как правило, не существует.

Алгоритмы сверхразрешения. В этой части работы рассматриваются несколько методов восстановления изображений. Из линейных методов рассмотрены тихоновская (винеровская) фильтрация, метод наискорейшего спуска, алгоритм Ван

Ситтерта. Из нелинейных — модифицированный метод наискорейшего спуска, модифицированный алгоритм Ван Ситтерта, алгоритм восстановления пространства изображения и алгоритм Люси-Ричардсона. Нелинейные методы используют априорную информацию о положительности температуры, что позволяет повысить точность восстановления.

Предлагаемый алгоритм сверхразрешения. Для применения в системах радиовидения был создан улучшенный алгоритм сверхразрешения, основанный на описанных выше методах, но с внесением существенных изменений для стабилизации решения и повышения качества восстановления. Описанные выше методы используются как ядро АСР для минимизации функционала невязки. В частности наилучшие результаты показал метод $\hat{f}^{i+1} = \hat{f}^i \frac{h^T \otimes g}{h^T \otimes h \otimes \hat{f}^i}$. Дополнительными трудностями, решенными в этом методе были недостаточная устойчивость методов и возникновение ложного ”звона”. Их удалось преодолеть используя специальную процедуру обработки изображения у краев и субпиксельное разбиение при вычислении сверток.

Корректное вычисление сверток. Реальные измерения и вычисления проводятся с дискретными сигналами конечного размера: $g_{i,j}$, $\hat{f}_{i,j}$, $h_{i,j}$. Для того чтобы при вычислениях избежать нежелательного краевого эффекта предлагается использовать метод экстраполяции в котором свертка $b = h \otimes a$ вычисляется по следующей формуле:

$$b_{i,j} = \frac{\sum_{k=i-W_h/2}^{i+W_h/2} \sum_{l=j-L_h/2}^{j+L_h/2} h_{i-k,j-l} a_{k,l} s_{k,l}}{\sum_{k=i-W_h/2}^{i+W_h/2} \sum_{l=j-L_h/2}^{j+L_h/2} h_{i-k,j-l} s_{k,l}}, \quad (4)$$

где W_h , L_h — ширина и высота h , и введена функция $s_{k,l}$, равная единице внутри области определения $a_{k,l}$ и нулю вне её. Легко видеть, что если истинное значение a является константой, то экстраполированное значение будет точно ей равно. Многократные численные эксперименты показали, что такой метод экстраполяции средним взвешенным значением является наилучшим; другие методы приво-

дят к нежелательным артефактам в приграничной области изображения.

Субпикселинг. Из общих принципов работы с дискретными сигналами следует, что частота Найквиста должна быть выше, чем частота среза аппаратной функции при измерении данных и выше максимальной частоты в восстановленном изображении. При применении алгоритмов сверхразрешения может возникнуть ситуация, когда в процессе измерения интервал дискретизации выбран правильно, но при последующей обработке методами сверхразрешения возникают более высокие частоты. В таких ситуациях можно использовать метод субпиксельного разбиения, при котором обработка данных проводится с таким интервалом дискретизации, отличным от исходного, который заведомо достаточен для представления всех пространственных частот промежуточных данных и результирующего изображения. Для этого производится передискретизация в целое число раз (N), то есть интерполяция. Преобразованию подвергается и изображение, которое будет обрабатываться, и аппаратная функция, после чего все численное интегрирование в соответствии с конкретным алгоритмом сверхразрешения проводится уже по новой сетке. На практике вполне достаточно выбрать $N=2$, полагая, что изменение спектра в области высоких пространственных частот достаточно слабо.

Расширение пространственного спектра при сверхразрешении. При использовании нелинейных АСР спектры \hat{F} и G не являются линейно связанными, что в свою очередь говорит о возможности восстановления частот выше частоты среза. Специально подготовленный численный эксперимент подтвердил, что нелинейные методы приводят к обогащению спектра за частотой среза. В качестве исходного сигнала был взят меандр с единичным периодом. Далее моделировался процесс измерения сигнала с помощью неидеального физического прибора путем пропускания сигнала через ФНЧ. Восстановление сигнала производилось методом наискорейшего спуска с ограничением промежуточного результата снизу и сверху.

Предел сверхразрешения. Важным представляется вопрос о достижимом уровне сверхразрешения. Коэффициент сверхразрешения определяется как отношение физического разрешения прибора к разрешению, полученному после обработки данных. Существует несколько теоретических моделей различных авторов, связывающих достижимое сверхразрешение с отношением сигнал/шум. Если использовать шэнноновский подход и теорию информации, то можно получить выражение

$$Sr = \frac{1}{3} \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{P_n} \right) . \quad (5)$$

Задачу сверхразрешения можно рассматривать как задачу математической статистики по оценке неизвестных параметров на основании существующих измерений. Тогда в случае сверхразрешения двух точечных источников одинаковой интенсивности приближенное выражение для коэффициента сверхразрешения будет выглядеть следующим образом:

$$Sr \approx 2.86 \sqrt[4]{\frac{P_s}{P_n}} . \quad (6)$$

Зависимость для параметрических методов лежит существенно выше кривой для общего случая. Это указывает на чрезвычайную полезность априорных данных при восстановлении изображения. Экспериментальная зависимость подтверждает этот тезис — часть полученных точек лежит выше шэнноновской кривой, что доказывает преимущество нелинейных методов и важность априорной информации для достижения высокого разрешения. Ход экспериментальной зависимости при высоком отношении сигнал/шум свидетельствует, что теоретически возможно создание еще более эффективного, сверхразрешающего алгоритма.

Экспериментальные результаты. Для выявления характеристик АСР была проведена серия опытов по обработке следующих данных: 1) искусственно размытое изображение двух точечных источников; 2) тестовые изображения, содержащие компьютерную графику и полутона; 3) реальные радиометрические изображения, полученные с помощью системы пассивного радиовидения 3-мм диапазона.

При обработке изображения точечных источников удалось достичь примерно трехкратного сверхразрешения. В случае реальных радиометрических данных применение АСР снизило норму невязки на 19 дБ. Полученные результаты свидетельствуют о том, что предлагаемый алгоритм действительно позволяет достичь разрешения выше рэлеевского.

3. Вэйвлет-шумоподавление при сверхразрешении

В главе 3 представлен метод стабилизации алгоритмов сверхразрешения путем подавления шумов с помощью нелинейной фильтрации. Метод использует вэйвлет-преобразование для эффективного разделения шумовой и полезной компонент сигнала.

Рассмотрим текущую невязку в итерационных АСР

$$r^i = g - h \otimes \hat{f}^i \equiv n + h \otimes (f - \hat{f}^i). \quad (7)$$

При сверхразрешении \hat{f}^i сходится к некоторой \tilde{f} , которая обеспечивает минимизацию $\|r\|^2$. Идея шумоподавления заключается в том, чтобы разделить вклады n и $h \otimes (f - \hat{f}^i)$ в r^i . Этого можно достигнуть с помощью вэйвлет разложения и нелинейной фильтрации. Тогда подставляя регуляризованную невязку $\tilde{r}^i \approx h \otimes (f - \hat{f}^i)$ вместо r^i , получим итерационную схему, которая будет сходиться к f .

Для разделения сигнала и шума производится классификация коэффициентов разложения путем сравнения их с заданным порогом, который выбирается на основе модели шума. Если коэффициент превышает этот порог, то считается, что он обусловлен полезным сигналом, в противном случае он отбрасывается. Модифицированная формула обратного вэйвлет преобразования выглядит следующим образом:

$$\tilde{r} = c_{(p)} + \sum_{i=1}^p \alpha(w_{(i)}) w_{(i)}, \quad (8)$$

где $\alpha(w_{(i)})$ — множитель, определяющий жесткий порог и равный 0 либо 1, а $c_{(p)}$ и $w_{(1)} \dots w_{(p)}$ собственно вэйвлет-разложение невязки.

Обработка экспериментальных и модельных данных показала, что 1) нелинейное вэйвлет-шумоподавление позволяет регуляризовать поведение АСР при высоком уровне шума; 2) кроме того, оно позволяет поднять качество восстановления изображения за счет разделения шумовой и полезной составляющих сигнала.

4. Влияние боковых лепестков аппаратной функции на АСР

В этой главе исследуются два аспекта влияния боковых лепестков аппаратной функции на сверхразрешение. Первым является непосредственное влияние уровня боковых лепестков аппаратной функции на качество восстановленного изображения при прочих равных условиях. Вторым — влияние отличия уровня боковых лепестков реальной аппаратной функции от используемой в АСР при решении обратной задачи на результат восстановления. Это является частным случаем влияния неизвестных но детерминированных искажений аппаратной функции на возможность решения обратной задачи.

В численных экспериментах показано, что существует предел применимости широко используемых АСР, он составляет $-15 \div -10$ дБ. Следовательно, для обработки изображений при более высоком уровне бокового лепестка, требуется разработка новых методов, оптимизированных для данной ситуации.

5. Получение изображения в многоканальных системах

В главе 5 рассмотрены вопросы получения изображения в многоканальных системах, предложен алгоритм сверхразрешения для этого случая, который учитывает такие особенности, как разные аппаратные функции и различное отношение сигнал/шум в каналах установки. Рассмотрен и решен вопрос об оптимальной схеме сканирования в таких системах с учетом последующего применения АСР.

Принцип формирования изображения. За счет того, что часть сенсоров смещена в сторону от оптической оси, направление максимумов их диаграмм направленности не совпадает. Поэтому совместно N каналов дают N элементов изображения.

Математическая модель формирования изображения (2) перепишется следующим образом (нижний индекс соответствует номеру канала):

$$g_{(k)} = h_{(k)} \otimes f + n_{(k)}.$$

Обобщение алгоритмов сверхразрешения для многоканальных систем. При попытке применить описанные ранее АСР к элементам изображения, полученным разными каналами, был выявлен ряд недостатков. Один недостаток заключается в увеличении роли нежелательных артефактов в приграничной области по сравнению с одноканальным случаем. Второй недостаток заключается в том, что аппаратные функции каналов различны, и это приводит к скачку на стыке областей.

Для того чтобы преодолеть указанные проблемы, потребовалась разработка нового алгоритма обработки данных, учитывающего особенности многоканальных систем. Его ключевой особенностью является то, что ищется одно общее решение \hat{f} , а не набор решений $\hat{f}_{(k)}$ для каждого канала. Или записывая формально, решение ищется путем минимизации функционала $J(\hat{f}) = \sum_{k=1}^N J_{(k)}(\hat{f}) = \sum_{k=1}^N \|g_{(k)} - h_{(k)} \otimes \hat{f}\|^2$, зависящего от общего решения \hat{f} . Ключевым шагом разработанного алгоритма является шаг, на котором в вычисленной оценке $\hat{g}_{(k)}^i$ часть пикселей заменяется реальными данными $g_{(k)}$, именно он отличает этот алгоритм от одноканальных. Это преобразование позволяет преодолеть трудность, связанную с тем, что область $g_{(k)}$ существенно меньше области, в которой ищется решение \hat{f} .

Случай различного уровня шума в каналах установки. Еще одной проблемой, специфичной для многоканальных систем является различный уровень шума в каналах установки. Как было показано в предыдущих разделах, степень сверхразрешения, сходимость АСР и оптимальное число итераций зависит от соотношения энергий сигнала и шума. Поэтому без принятия специальных мер, либо изображение одних каналов будет недоразрешенным, либо изображение других

каналов будет искажено из-за превышения оптимального числа итераций.

Для компенсации более быстрой сходимости одних каналов относительно других можно использовать относительно простой подход. Для этого нужно делать шаг не на вычисленное приращение $\delta \hat{f}^i$, а на меньшую величину, тем самым уменьшая скорость итераций

$$\hat{f}^{i+1} = \hat{f}^i + \alpha_{(k)} \delta \hat{f},$$

где $0 < \alpha_{(k)} < 1$ — коэффициент замедления итераций; $\delta \hat{f}^i$ — приращение на i -ом шаге. Конкретное значение $\alpha_{(k)}$ зависит от соотношения уровней шума и применяемого АСР. Для наименее шумных каналов коэффициент $\alpha_{(k)}$ выбирался равным 1, для остальных — обратно пропорционально уровню шума в них.

$$\alpha_{(k)} = \frac{\|n_{(m)}\|^2}{\|n_{(k)}\|^2},$$

где m — номер канала с наименьшим шумом.

Оптимизация процедур сканирования с учетом последующего сверхразрешения.

Традиционно изображения в многоканальных системах получались таким образом, что каждый канал "снимал" участок изображения строго между соседними каналами, то есть области соседних каналов не перекрывались. При сверхразрешении это создавало уже рассмотренные выше трудности, и хотя новый метод позволяет бороться с ними, но и он, естественно, более эффективен при использовании больших изображений. Еще одна проблема характерна для систем на компенсационных радиометрах. Дело в том, что они подвержены медленному, но достаточно сильному (до десятков К) дрейфу уровня выходного сигнала. Дрейф можно рассматривать как коррелированный шум, который сильно влияет на процесс сверхразрешения. В связи с этими трудностями и особенностями работы рассматриваемого АСР было принято решение производить измерения с большим перекрытием между соседними каналами.

Для того чтобы общее время измерения не увеличилось, время интегрирования при измерении одного пиксела нужно пропорционально уменьшить. Так, если

каждый участок наблюдаемой сцены измеряется M каналами, то время интегрирования для каждого канала нужно уменьшить в M раз. Кроме того, такой подход позволяет повысить общую надежность системы, так как при выходе одного канала из строя не происходит выпадение части данных, а происходит лишь локальное ухудшение отношения сигнал/шум.

С точки зрения теории вероятностей при таком подходе усреднение по времени частично заменяется усреднением по каналам. Пусть входной шум $n_{(k)}$ состоит из "белой" компоненты $\mu_{(k)}$ и сверхнизкочастотной $\nu_{(k)}$: $n_{(k)} = \mu_{(k)} + \nu_{(k)}$. В диссертации показано, что в этом случае дисперсия выходного шума ξ при обычной схеме измерений и ξ' при модифицированной равны

$$D \{ \xi \{ T \} \} = R_{\xi \{ T \}}(0) = \frac{\mu_0}{T} + R_{\nu}(0),$$

$$D \{ \xi' \} = D \left\{ \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \xi \{ T/M \} \right\} = R_{\xi'}(0) = \frac{\mu_0}{T} + \frac{1}{M} R_{\nu}(0).$$

Видно, что дисперсия, обусловленная дрейфовой компонентой, уменьшается в M раз. Таким образом, показано, что сканирование с перекрытием каналов и меньшим временем интегрирования приводит к повышению надежности системы и уменьшению уровня шума, обусловленного дрейфом радиометров.

Основные результаты, полученные в работе

1. Предложен и реализован алгоритм сверхразрешения, который позволяет достичь разрешения выше рэлеевского. Это подтверждено многочисленными опытами по компьютерному моделированию и обработкой экспериментальных данных, полученных с использованием различных установок. Повышение разрешения происходит за счет восстановления высших пространственных частот.
2. Анализ статистических характеристик показал, что для предварительной обработки радиометрического сигнала можно использовать метод компенсации

динамических искажений, так как получаемая с его помощью оценка радиояркостной температуры является несмещенной и обладает нормальным распределением.

3. Экспериментально показано, что степень сверхразрешения зависит от отношения сигнала к шуму, что согласуется с теоретическими представлениями. В то же время характеристики рассмотренных АСР достаточно далеки от теоретического предела. Частично исправить ситуацию помогает метод нелинейного вэйвлет шумоподавления, который уменьшает негативное влияние сильного шума на сходимость АСР. Его применение позволяет стабилизировать решение и достичь лучшего восстановления изображения.
4. Выявлено, что существует предел применимости широко используемых АСР — для обработки изображений при высоком уровне бокового лепестка аппаратной функции требуется создание новых методов, оптимизированных для данной ситуации.
5. Предложен и реализован метод получения радиоизображений в многоканальных системах, в котором применены оптимизированная схема сканирования и разработанный для этого случая алгоритм сверхразрешения. Метод учитывает особенности получаемых в этом случае данных и позволяет избавиться от недостатков, присущих поканальной обработке. Кроме того, предложены методы по стабилизации этого АСР при различном уровне шума в каналах установки. Показано также, что сканирование с перекрытием каналов и меньшим временем интегрирования позволяет повысить надежность системы и уменьшить уровень шумов.
6. Разработан комплекс компьютерных программ, реализующий сбор и обработку данных по предлагаемому алгоритму и их визуализацию.
7. Анализ быстродействия предлагаемого АСР показал, что он пригоден для

использования в системах радиовидения реального времени, где темп обзора сравним с временем реакции человека на предъявляемые стимулы (~ 10 кадров в секунду).

Список публикаций

- [1] Пирогов Ю.А., Гладун В.В., Тищенко Д.А., Тимановский А.Л., Шлемин И.В., Джен С.Ф. Суперразрешение в системах радиовидения миллиметрового диапазона // Журнал радиоэлектроники (<http://jre.cplire.ru>). - 2004. - №3.
- [2] Пирогов Ю.А., Тимановский А.Л. Влияние боковых лепестков диаграммы направленности приемной антенны на суперразрешение в системах пассивного радиовидения // Вест. МГУ, Сер.3. - 2006. - №1, - С.45-48.
- [3] Пирогов Ю.А., Тимановский А.Л. Суперразрешение в системах пассивного радиовидения миллиметрового диапазона // Радиотехника. - 2006. - №3. - С.14-19.
- [4] Пирогов Ю.А., Тимановский А.Л., Гладун В.В. Получение и обработка изображений в системах пассивного радиовидения // Известия ВУЗов "Радиофизика". - 2006. - Том XLIX; №8. - С.664-672.
- [5] Pirogov Y.A., Gladun V.V., Timanovskiy A.L. Radio Thermal Images of Natural Objects in 8-mm and 3-mm Ranges // Int. J. of Infrared and Millimeter Waves. - 2004. - Vol.25(6). - P.989-1001.
- [6] Тимановский А.Л., Пирогов Ю.А., Гладун В.В. Суперразрешение в многолучевой системе радиовидения миллиметрового диапазона // Радиотелескопы РТ-2002: тезисы докладов. - Пущино, 2002. - С.97-98.
- [7] Пирогов Ю.А., Гладун В.В., Тимановский А.Л. Суперразрешение в пассивной локации миллиметрового диапазона // IX Всероссийская школа-семинар

”Волновые явления в неоднородных средах”, секция 5: тезисы докладов. - Звенигород, 2004. - С.38-39.

- [8] Pirogov Y.A., Gladun V.V., Chzhen S.P., Tischenko D.A., Timanovskiy A.L. Radio thermal images of natural objects in 8-mm and 3-mm ranges // Proc. SPIE. - 2002. - Vol.4719. - P.318-326.
- [9] Pirogov Y.A., Gladun V.V., Shlemin I.V., Chzhen S.P., Tischenko D.A., Timanovskiy A.L., Lebedev A.V. Superresolution and coherent phenomena in multisensor systems of millimeter-wave radio imaging // Proc. SPIE. - 2003. - Vol.5077. - P.110-120.
- [10] Pirogov Y.A., Gladun V.V., Tischenko D.A., Timanovskiy A.L. Superresolution in the passive radiovision systems of millimeter-wave range // Proc. SPIE. - 2004. - Vol.5410. - P.299-308.
- [11] Pirogov Y.A., Gladun V.V., Tischenko D.A., Timanovskiy A.L., Shlemin I.V., Cheng S.F. Passive millimeter-wave imaging with superresolution // Proc. SPIE. - 2004. - Vol.5573. - P.72-83.
- [12] Pirogov Yu.A., Gladun V.V., Timanovski A.L. Superresolution in multi-channel passive radiovision systems // Joint 29th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 12th International Conference on Terahertz Electronics: Conference Digest. - Karlsruhe, 2004. - P.747-748.
- [13] Тимановский А.Л. Численные методы восстановления изображений в системах пассивного радиовидения // Препринт Учебно-научного центра магнитной томографии и спектроскопии МГУ № 2/2007.- М.: ЦМТС МГУ, 2007, 20 с.