

На правах рукописи

Лупов Сергей Юрьевич

**ЧАСТОТНО - ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ
ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ
О ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ**

01.04.03 - Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород, 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Канаков Владимир Анатольевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Фидельман Владимир Романович

кандидат физико-математических наук, с.н.с.
Белов Юрий Иванович

Ведущая организация: ОАО «Федеральный научно-производственный центр «Нижегородский научно-исследовательский приборостроительный институт «Кварц» имени А.П. Горшкова»

Защита состоится 14 марта 2012 г. в 16:30 на заседании диссертационного совета Д 212.166.07 при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 1, ауд. 420.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Автореферат разослан «_____» _____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н., доцент



Черепенников В.В.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

МПВВ – модифицированное преобразование Вигнера-Виля

МПО – максимально правдоподобная оценка параметров экспоненциальной модели

ОМПО – метод максимально правдоподобной оценки параметров экспоненциальной модели в скользящем окне

ООЧ – ошибка оценки частоты

ОСШ – отношение сигнал/шум

РПВ – распределение плотности вероятности

ЧВРЭ – частотно - временное распределение энергии

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

При исследовании быстро протекающих газодинамических процессов к числу важнейших характеристик относятся скорости и перемещения границ раздела сред, в которых развивается процесс. В том случае, когда среда является радиопрозрачной, эти характеристики могут быть измерены посредством зондирования среды электромагнитными волнами. Достоинствами радиоинтерферометрического метода измерений, получившего широкое распространение в конце прошлого века, являются непрерывность измерений и отсутствие возмущений, вносимых измерительными средствами в объект исследования (см. например, Михайлов А.Л. и др. Некоторые результаты применения в ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ радиоинтерферометров мм диапазона длин волн для изучения газодинамических процессов//Труды Междунар. конф «VII Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны». Саров. 2005. С. 649-654).

Газодинамические эксперименты, проводимые в Институте экспериментальной газодинамики и физики взрыва (ИФВ РФЯЦ ВНИИЭФ), по оценке метательной способности взрывчатых веществ, интересны тем, что скорость пластины, метаемой продуктами взрыва заряда из тротила, за несколько микросекунд достигает нескольких километров в секунду. Изменение скорости происходит не плавно, а ступеньками. На интерферограмме этот участок занимает менее 10 периодов, и именно он представляет наибольший интерес исследователей.

По отсчетам интерферограммы можно вычислить мгновенную скорость движущейся пластины, используя алгоритм обработки, основанный на понятии «Мгновенная частота аналитического сигнала». Однако как показал опыт проведения измерений, этот простой алгоритм обработки далеко не всегда дает удовлетворительные результаты. Причинами этого обычно являются действие шума приемника, нарушение квадратуры канальных сигналов, возникающее при неидеальном согласовании антенны с зондируемой средой, присутствие в спектре входного сигнала компонент, возникающих из-за многократных отражений радиоволн.

Для анализа таких сигналов могут быть использованы различные методы частотно-временного анализа, но, т.к. в основе таких методов, в явном или неявном виде, лежит дискретное преобразование Фурье, то точность анализа

зависит от количества периодов на исследуемом участке интерферограммы, которое обычно невелико.

Таким образом, проблема частотно-временного анализа интерферограмм о быстропротекающих процессах, к которым относятся газодинамические, является актуальной и требует своего решения.

Целью данной работы является разработка методов частотно-временного анализа коротких реализаций широкополосных ЧМ сигналов, характерных для интерферограмм о газодинамических процессах.

Для достижения поставленной цели в работе были **решены следующие задачи:**

1. Разработаны и реализованы методы частотно-временного анализа коротких реализаций сигналов:
 - основанный на максимально-правдоподобной оценке параметров экспоненциальной модели в скользящем окне (ОМПО);
 - основанный на модификации преобразования Вигнера-Виля (МПВВ);
2. Проведены исследования методов анализа на точность вычисления частотно-временного распределения энергии (ЧВРЭ) ЧМ сигналов;
3. Проведена проверка работоспособности методов на данных, полученных при проведении физического эксперимента;
4. Вычислены ЧВРЭ радиоинтерферограмм, полученных в опытах по метанию стальной пластины продуктами взрыва заряда из тротила;
5. Разработан и реализован алгоритм экстраполяции дополнительных отсчетов, применение которого помогло оценить ЧВРЭ на начальном участке радиоинтерферограммы.

Научная новизна работы

1. Разработан новый метод оценки ЧВРЭ коротких реализаций ЧМ сигналов, основанный на вычислении максимально правдоподобной оценки параметров экспоненциальной модели в скользящем окне;
2. Разработан новый метод оценки ЧВРЭ коротких реализаций широкополосных ЧМ сигналов, основанный на модификации преобразования Вигнера-Виля;
3. Получены оценки точности разработанных методов при анализе ЧМ сигналов;
4. Впервые для увеличения точности ЧВРЭ на начальном участке интерферограммы применен алгоритм экстраполяции, основанный на вычислении параметров экспоненциальной модели методом максимально правдоподобной оценки.

Положения, выносимые на защиту

1. Применение метода максимально правдоподобной оценки параметров экспоненциальной модели в скользящем окне позволило с максимально возможной точностью (по критерию Крамера-Рао) анализировать ЛЧМ сигналы с низкой скоростью изменения частоты.
2. Применение разработанного метода вычисления ЧВРЭ, основанного на модификации преобразования Вигнера-Виля позволило с точностью близкой к максимально возможной (по критерию Крамера-Рао) анализи-

ровать ЛЧМ сигналы с произвольной скоростью изменения мгновенной частоты.

3. Эмпирически полученные зависимости смещения оценки частоты от размера окна в МПВВ позволяют компенсировать методические ошибки при анализе ЧМ сигналов с квадратичным законом изменения мгновенной частоты.
4. Разработанный метод экстраполяции позволяет повысить точность оценки ЧВРЭ на начальном участке интерферограммы, полученной в опыте по метанию пластины продуктами взрыва заряда из тротила.

Практическая и теоретическая значимости работы

1. Разработанные методы частотно-временного анализа применимы для анализа коротких реализаций широкополосных ЧМ сигналов, в том числе интерферограмм газодинамических процессов.
2. Создан программный продукт, в котором реализованы разработанные методы частотно-временного анализа, а также наиболее известные методы спектрального оценивания, применимые как для всего сигнала, так и в скользящем окне.
3. Получены экспериментальные данные о зависимости дисперсии ошибки оценки мгновенной частоты от размера окна и соотношения сигнал/шум, возникающие при анализе ЛЧМ сигналов разработанными методами.
4. Эмпирически получена формула смещения оценки частоты разработанного метода МПВВ, которая позволяет компенсировать методическую ошибку при анализе сигнала с квадратичным законом изменения частоты.

Результаты данного исследования используются при обработке экспериментальных данных, полученных в ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ, в научно-исследовательских работах и учебном процессе в Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского (ННГУ).

Обоснованность и достоверность результатов диссертации

Результаты диссертации согласуются с известными положениями статистической радиофизики, статистической радиотехники, цифровой обработки сигналов. Достоверность полученных результатов и выводов подтверждается данными компьютерного моделирования и экспериментальных исследований на лабораторных макетах.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы представлялись на 5-й, 9-й, 11-й, 14-й научных конференциях по радиофизике (Нижний Новгород, 2001, 2005, 2007, 2010), международных конференциях: «Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны» (Саров, 2005, 2007), «Международная научно - практическая конференция. Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments» (Москва, 2006, 2007, 2010, 2011), Second International Symposium of Trans Black Sea Region on applied electromagnetism (Xanthi Greece, 2000).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 29 работ, в том числе 10 статей в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК, 9 – в сборниках

трудов международных конференций. Список публикаций по теме диссертации с указанием личного вклада соискателя приведен ниже.

Личный вклад автора. 1 работа опубликована соискателем без соавторов, 8 работ в соавторстве со студентами, выполнявшими под его руководством курсовые и дипломные работы. Приведенные в диссертации результаты получены им лично.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 156 наименований. Работа содержит 147 страниц, из которых 124 страницы занимает основной текст.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы, указаны цели и задачи исследования, отражены структура и объем работы.

В первой главе в разделе 1.1 приведены описание работы радиоинтерферометра и алгоритм обработки интерферограмм, основанный на понятии «Мгновенная частота аналитического сигнала». Отмечены недостатки данного алгоритма, связанные с затруднением анализа интерферограмм, имеющих аддитивный шум и дополнительные ЧМ компоненты, возникающие из-за многократных отражений радиоволн. Для обработки таких интерферограмм предложено применять спектрально-временные методы анализа.

В разделе 1.2 сделан обзор классических методов спектрально-временного анализа, таких как оконное Фурье преобразование, преобразование Вигнера-Вилля, вэйвлет преобразование и др. Все рассмотренные методы при вычислении, в явном или не явном виде, используют преобразование Фурье. Такой подход эффективен в вычислительном отношении и обеспечивает получение приемлемых результатов для большого класса сигнальных процессов, однако ему присущ ряд принципиальных ограничений. Наиболее важное из них – это ограничение частотного разрешения. Большинство интерферограмм газодинамических процессов имеет количество периодов, недостаточное для эффективного применения описанных в обзоре методов, поэтому для вычисления частотно-временного распределения разрабатывались методы, основанные на алгоритмах спектрального оценивания высокого разрешения, обзор которых сделан в разделе 1.3.

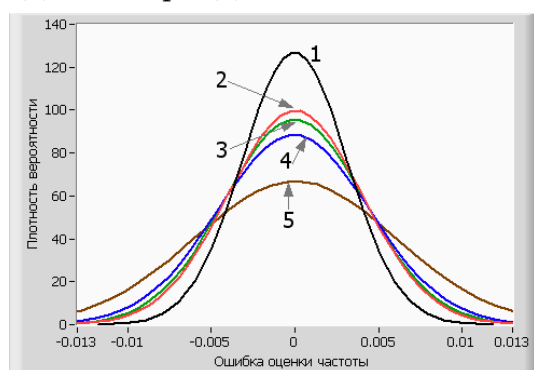


Рис. 1. РПВ ООЧ, вычисленные различными методами

Для сравнения методов спектрального оценивания были получены распределения плотности вероятности ошибки оценки частоты (рис. 1) комплексной экспоненты длиной 25 отсчетов с аддитивным белым гауссовым шумом (отношение сигнал/шум равно 0 дБ), вычисленные методами: 1 – максимально правдоподобной оценки параметров экспоненциальной модели (МПО), 2 – модифицированным ковариационным, 3 – MUSIC, 4 – Берга, 5 – модифицированным методом наименьших квадратов Прони.

При сравнении распределений получилось, что метод МПО имеет самую высокую точность при работе с короткими реализациями гармонических сигналов.

Учитывая эти факторы, метод МПО положен в основу разрабатываемых методов вычисления ЧВРЭ.

Во второй главе описывается разработанный в диссертационной работе метод оценки ЧВРЭ, основанный на вычислении в скользящем окне параметров экспоненциальной модели методом максимально правдоподобной оценки. Метод МПО заключается в аппроксимации отрезка дискретного сигнала $s[n]$ линейной комбинацией p комплексных экспонент (не обязательно ортогональных на данном отрезке) с различными частотами f_k , амплитудами A_k и фазами φ_k , так, чтобы среднеквадратичная ошибка между моделью и сигналом была минимальной:

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |s[n] - \tilde{s}[n]|^2, \quad (1)$$

где

$$\tilde{s}[n] = \sum_{k=1}^p A_k e^{j \cdot (2\pi \cdot f_k \cdot n + \varphi_k)}, \quad n = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (2)$$

— экспоненциальная модель комплексного сигнала.

Минимизировать среднеквадратичную ошибку (1), зависящую от $3 \cdot p$ параметров f_k , A_k , и φ_k , аналитически невозможно. Для поиска оптимальных параметров модели использовался алгоритм оптимизации (в диссертации приведены формулы для аналитического вычисления амплитуд A_k и фаз φ_k , методом оптимизации определяются только частоты f_k).

Для анализа динамики частотных компонент ЧМ сигнала максимально правдоподобная оценка параметров экспоненциальной модели сигнала вычисляется в скользящем окне (ОМПО). Значения амплитуд A_k отображаются на плоскости время-частота.

Для определения влияния белого гауссового шума на точность оценки частоты были проведены измерения для различных ЧМ сигналов, частота которых менялась:

- по линейному закону от -0.25 до 0.25 за 400 и 4000 отсчетов;
- по параболическому закону от 0.2 до -0.2 и обратно за 400 и 800 отсчетов.

Исследования проводились для различных отношений сигнал/шум: 20, 10 и 0 дБ и различных размеров скользящих окон.

Для вычисления распределения плотности вероятности (РПВ) ошибок оценки частоты (ООЧ) сигнал с аддитивным шумом генерировался 10000 раз. Генерация сигнала с последующей обработкой проводилась автоматически с записью результатов (частот основной ЧМ компоненты) в файл, которые в дальнейшем были подвергнуты статистической обработке.

На рис. 2а представлена зависимость стандартного отклонения ООЧ от размера окна N_{win} и от ОСШ для ЧМ сигнала:

$$s[n] = \exp(j \cdot 2\pi \cdot (-0.25 \cdot n + 0.0000625 \cdot n^2)) + \eta[n], \quad n = 0, 1, \dots, 3999, \quad (3)$$

цифровая частота которого меняется по линейному закону от -0.25 до 0.25 за 4000 отсчетов. $\eta[n]$ – комплексный белый гауссов шум.

Графики с высокой точностью аппроксимируются значениями σ_f , вычислен-

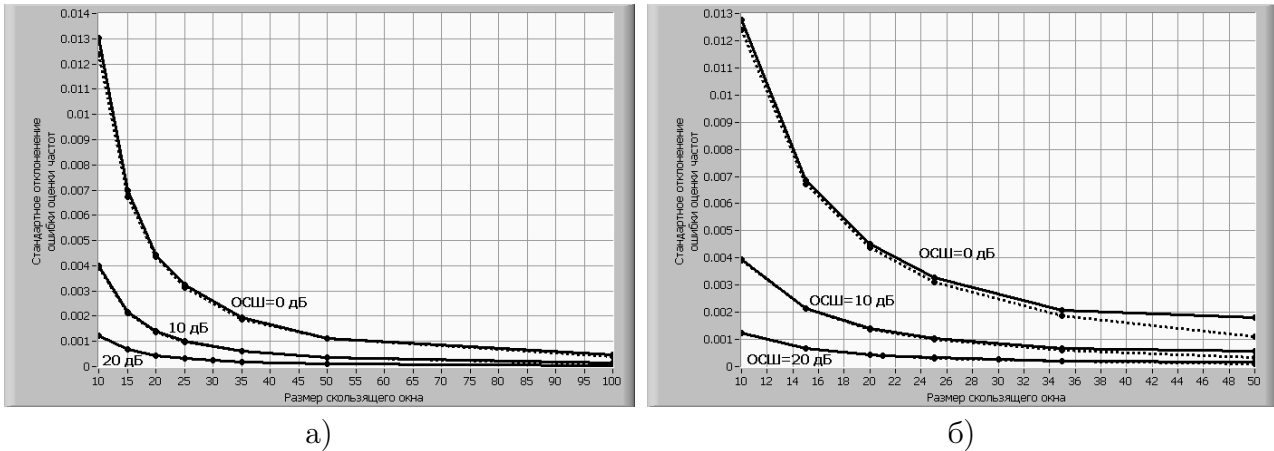


Рис. 2. Зависимости стандартного отклонения ошибки оценки частоты от размера окна N_{win} и от ОСШ для сигнала (3)(рис.2а) и для сигнала (5)(рис.2б)

ными с помощью формулы:

$$\sigma_f^2 = \frac{6}{(2\pi)^2 \nu N_{win} (N_{win}^2 - 1)} \quad (4)$$

(графики σ_f изображены пунктирной линией), которые соответствуют нижней границе дисперсии (критерий Крамера-Рао) оценки частоты для комплексной синусоиды с неизвестными частотами, амплитудами и фазами. Здесь $\nu = A^2/\sigma_\rho^2$ – отношение сигнал/шум, $A = 1$ – амплитуда основной ЧМ компоненты сигнала, σ_ρ^2 – дисперсия шума. Плотности вероятности ООЧ имеют гауссово распределение с вероятностью более 95% по критерию χ^2

На рис. 2б представлена зависимость стандартного отклонения ООЧ от размера окна N_{win} и от ОСШ для ЧМ сигнала:

$s[n] = \exp(j \cdot 2\pi \cdot (-0.25 \cdot n + 0.000625 \cdot n^2)) + \eta[n]$, $n = 0, 1, \dots, 399$, (5)
цифровая частота которого меняется по линейному закону от -0.25 до 0.25 за 400 отсчетов.

Из графиков видно, что при малых размерах окна (до 35 отсчетов) точность оценки соизмерима с потенциальной, полученной из выражения (4) (на графике изображена пунктиром). При увеличении размера окна до 50 отсчетов точность оценки почти не изменяется. При дальнейшем увеличении окна распределение перестает быть гауссовым (на РПВ это проявляется, как расщепление распределения, на ЧВРЭ появляются ложные скачки частоты) Следует отметить, что оценка частоты ЛЧМ сигнала получается несмещенной.

В работе исследовалась работоспособность алгоритма при анализе сигналов, цифровая частота которых меняется по квадратичному закону от 0.2 до -0.2 и обратно за 800 и 400 отсчетов:

$$s[n] = \exp(j \cdot 2\pi \cdot (0.2 \cdot n - 0.001 \cdot n^2 + 8.33 \cdot 10^{-7} n^3)) + \eta[n], \quad n = 0, 1, \dots, 799, \quad (6)$$

$$s[n] = \exp(j \cdot 2\pi \cdot (0.2 \cdot n - 0.002 \cdot n^2 + 3.33 \cdot 10^{-6} n^3)) + \eta[n], \quad n = 0, 1, \dots, 399, \quad (7)$$

На рис. 3 представлены зависимости смещения оценки частоты от размера

окна N_{win} и от положения окна в сигнале (n – номер отсчета анализируемого сигнала, соответствующий центру окна). Смещения оценки частоты не зависят от ОСШ.

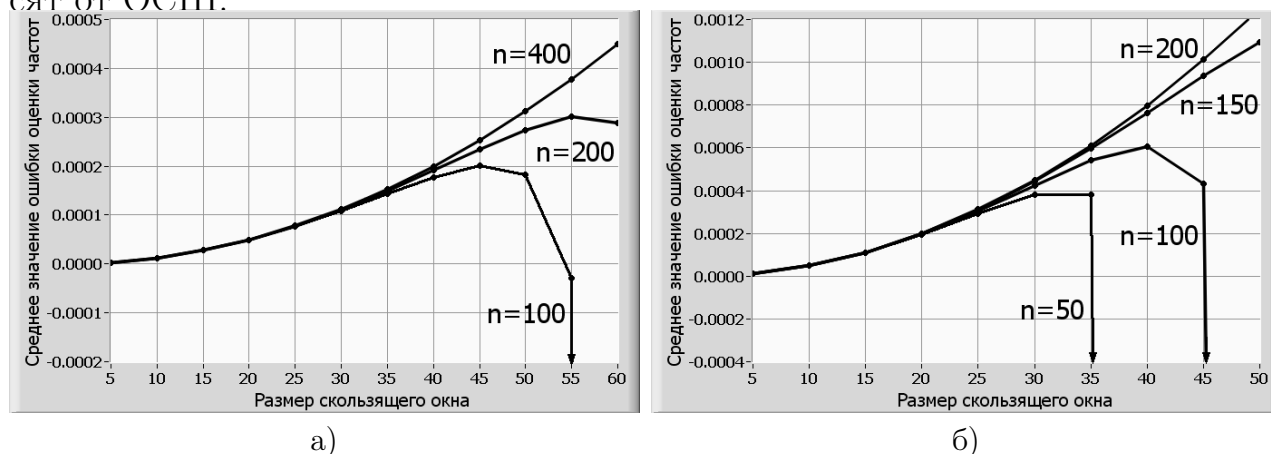


Рис. 3. Зависимости смещения среднего значения ООЧ от размера окна N_{win} для сигнала (6) (рис.3а), и (7) (рис.3б), n – номер отсчета сигнала, соответствующего центру скользящего окна

Кривые, соответствующие центральным отсчетам сигналов, когда скорость изменения мгновенной частоты равна нулю ($n = 200$ – для сигнала (7), $n = 400$ – для сигнала (6)), с высокой точностью аппроксимируются (относительная ошибка аппроксимации не превышает 10^{-4}) выражением:

$$\varepsilon_{sr}[n] = 0.3 \cdot \alpha \cdot N_{win}^2,$$

где α – коэффициент при n^3 в выражениях (7) и (6). При перемещении скользящего окна от центра сигнала к краю, смещение ООЧ уменьшается. Однако возникает риск появления ложного скачка частоты (на графиках кривая движется вертикально вниз), при котором смещение ООЧ увеличивается на 2-3 порядка.

Следует добавить, что плотность вероятности ООЧ для сигналов (7) и (6) имеет гауссово распределение. При малых размерах окна (до 35 отсчетов) дисперсия ООЧ соизмерима с потенциальной (4). С увеличением размера окна дисперсия РПВ ООЧ уменьшается, но возникает риск появления ложного скачка частоты, при котором РПВ перестает быть гауссовым.

В диссертации приведен пример влияния узкополосной помехи на точность оценки частоты метода ОМПО. Ошибка на ЧВРЭ проявляется в виде осцилляций частоты основной ЧМ компоненты, период и амплитуда которых увеличиваются, когда разность частот между помехой и анализируемой компонентой уменьшается. В работе показано, что при увеличении размера окна в методе ОМПО и при увеличении числа поисковых параметров p в модели (2) можно значительно ослабить влияние узкополосной помехи.

Таким образом, проведенные исследования метода ОМПО при анализе ЧМ сигналов с низкой скоростью изменения частоты показали, что ошибка оценки частоты имеет гауссово распределение, независимо от закона изменения частоты и совпадает с нижней границей Крамера-Рао для гармонического сигнала с неизвестными параметрами. При анализе ЛЧМ сигналов с низкой скоростью изменения частоты, оценка получается несмещенной, эффективной и состоятельной. При более сложных законах изменения частоты

появляется смещение оценки. При анализе ЧМ сигналов с высокой скоростью изменения частоты РПВ ООЧ перестает быть гауссовым.

Разработанный во второй главе метод ОМПО позволяет вычислять ЧВРЭ ЧМ сигналов с низкой скоростью изменения частоты.

В третьей главе описывается метод оценки ЧВРЭ, основанный на модификации преобразования Вигнера-Виля.

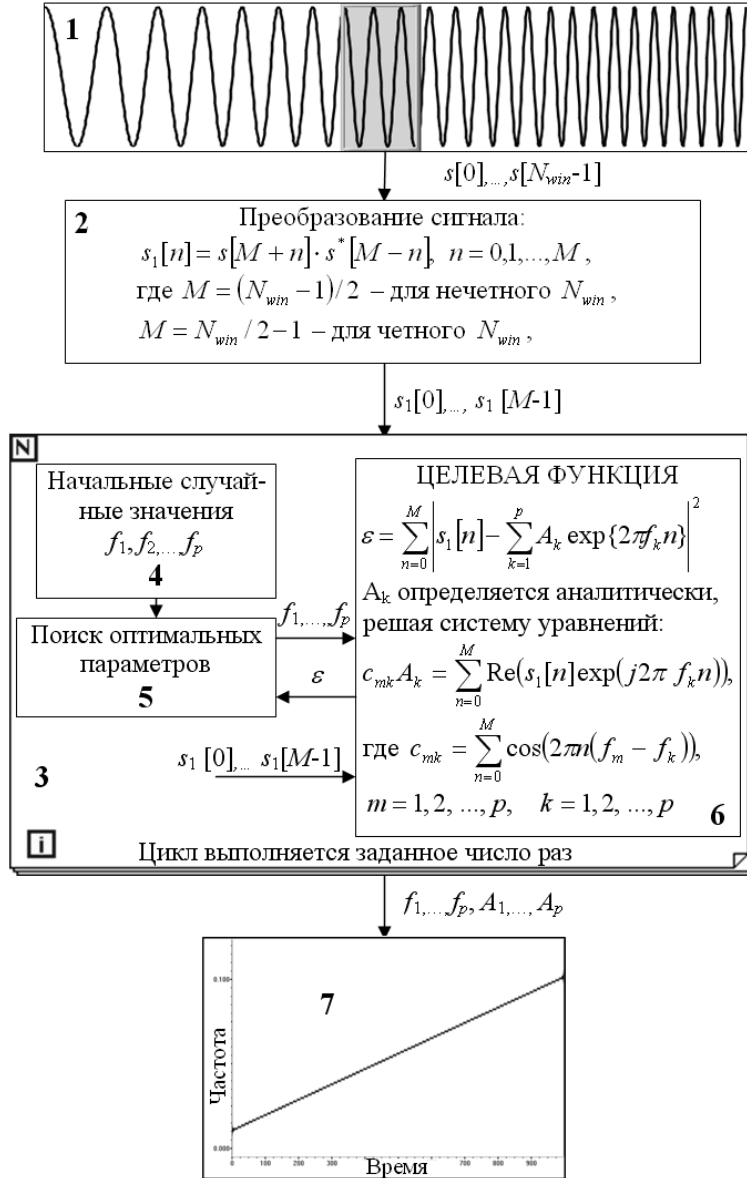


Рис. 4. Блок-схема алгоритма МПВВ

цифровых частот f_k в диапазоне от -0.5 до 0.5 . В блоке 5 производится поиск оптимальных параметров f_k , при которых невязка ε , вычисляемая в целевой функции (блок 6), имеет минимальное значение. Весь этот процесс происходит многократно, сохраняя значения поисковых параметров, при которых целевая функция имеет наименьшее значение. Найденные значения частот вместе со значениями амплитуд передаются в блок 7, в котором отображаются на плоскости время-частота.

Для определения влияния белого гауссова шума на точность оценки частоты были проведены исследования, аналогичные описанным в главе 3.

На рис. 5 представлена зависимость стандартного отклонения

Чтобы повысить точность оценки мгновенной частоты коротких реализаций широкополосных ЧМ сигналов с высокой скоростью изменения частоты, была сделана модификация алгоритма вычисляющего псевдопреобразование Вигнера, заключающаяся в замене БПФ на МПО метод. При этом учитывалось, что псевдопреобразование Вигнера может принимать только действительные значения, что значительно упрощает МПО метод.

На рис. 4 представлена блок-схема алгоритма. Отрезок сигнала $s[n]$, выделенный скользящим окном размером N_{win} отсчетов (блок 1), преобразуют в $s_1[n]$ (блок 2).

Дальнейшая обработка преобразованного сигнала происходит в цикле (блок 3). С помощью генератора случайных чисел (блок 4) задаются начальные значения

ООЧ от размера окна и от ОСШ для ЧМ сигнала (3). Для сигнала (5) зависимости полностью совпадают с приведенными на рис. 5, т.е. при анализе ЛЧМ сигналов дисперсия ООЧ не зависит от скорости изменения частоты, в отличие от метода ОМПО.

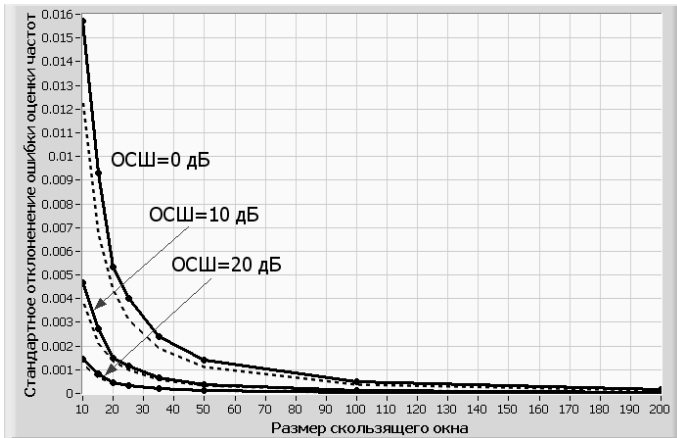


Рис. 5. Зависимости стандартного отклонения ошибки оценки частоты от размера окна и от ОСШ для сигнала (3) и (5)

закону (6) и (7)

Эмпирически полученные зависимости смещения ООЧ от размера окна с высокой точностью аппроксимируются (относительная ошибка аппроксимации не превышает 10^{-2}) выражением:

$$\varepsilon_{sr}[n] = 0.28 \cdot \alpha \cdot N_{win}^2, \quad (8)$$

где α – коэффициент при n^3 в выражениях (7) и (6). и не зависят от ОСШ и, в отличие от метода ОМПО, от положения скользящего окна в сигнале.

Следует добавить, что плотность вероятности ООЧ для сигналов (7) и (6) имеет гауссово распределение. При размере окна до 50 отсчетов зависимости получаются точно такие же, как при анализе ЛЧМ сигналов. При размере окна от 75 до 100 отсчетов и низком ОСШ (0 дБ) точность оценки почти не изменяется, при этом РПВ ООЧ перестает быть гауссовым.

В диссертации приведен пример влияния узкополосной помехи на точность оценки частоты МПВВ. Ошибка на ЧВРЭ проявляется в виде биений частоты основной ЧМ компоненты (аналогично описанной в третьем разделе). В работе показано, что при увеличении размера окна и числа поисковых параметров в МПВВ можно значительно ослабить влияние узкополосной помехи.

Таким образом, проведенные исследования метода при анализе ЧМ сигналов показали, что плотность вероятности ООЧ имеет гауссово распределение, независимо от закона изменения частоты и почти совпадает с нижней границей Крамера-Рао для гармонического сигнала с неизвестными параметрами. При анализе ЛЧМ сигналов с произвольной скоростью изменения частоты оценка мгновенной частоты основной ЧМ компоненты получается несмещенной, эффективной и состоятельной. При более сложных законах изменения частоты основной ЧМ компоненты сигнала появляется смещение оценки не зависящее от ОСШ, причем эмпирически полученная формула может помочь в некоторых случаях компенсировать методическую ошибку. Предложенный

Из графиков видно, что точность оценки соизмерима с потенциальной, полученной из выражения (4) (на графике изображена пунктиром).

Распределения плотности вероятности ООЧ имеют гауссово распределение с вероятностью более 95% по критерию χ^2 .

В работе исследовалась работоспособность алгоритма при анализе сигналов, цифровая частота которых меняется по квадратичному

метод можно использовать для анализа ЧМ сигналов (не только ЛЧМ) с более высокой скоростью изменения частоты, по сравнению с методом ОМПО. Учитывая то, что МПВВ способен работать с более длинными окнами, чем метод ОМПО, это может помочь анализировать сигналы с более мощными шумом и узкополосными помехами.

В первом разделе четвертой главы приведены результаты частотно-временного анализа сигнала, полученного на установке, собраной для тестирования работоспособности методов частотно-временного анализа. Полученный на установке сигнал представляет физическую реализацию всех рассмотренных в предыдущих разделах диссертации тестовых сигналов. С точки зрения проблем обработки, такой сигнал можно считать «эталонным», т.к. период изменения частоты основной ЧМ компоненты не превышает 10 периодов сигнала.

Установка состоит из маятника, в качестве груза которого используется металлическая пластина, микрофона, звуковых колонок и персонального компьютера. Микрофон и колонки соединены с соответствующими входами звукового адаптера на корпусе компьютера. Микрофон располагается между звуковыми колонками, излучающими синусоидальный сигнал, и маятником, так, чтобы звук, излучаемый колонками, отражаясь от качающейся пластины, попадал в него. Сигнал, считанный с микрофона (с частотой дискретизации 44100 Гц), записывается на диск компьютера в виде текстового файла.

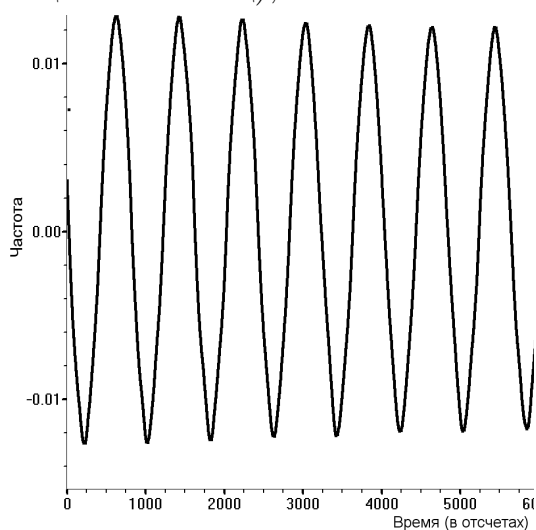


Рис. 6. ЧВРЭ МПВВ ($N_{win} = 160$, $p = 1$) сигнала полученного на установке "Маятник"

Полученный на такой установке сигнал интересен тем, что кроме компоненты на основной частоте, излучаемой колонками, в нем присутствует более слабая частотная компонента отраженного от качающейся со скоростью V пластины звукового сигнала с доплеровским сдвигом частоты, меняющимся по гармоническому закону. Зависимость скорости изменения частоты в точке перехода через "0" (максимальные отклонения маятника) близка к линейной, а в окрестности экстремумов частоты (скорость маятника максимальна) – близка к квадратичной.

Перед вычислением ЧВРЭ выполнялась программная предварительная обработка сигнала, которая заключалась в фильтрации полосовым фильтром (с частотами среза 4 кГц и 5 кГц), квадратурном синхронном преобразовании, децимации (с шагом 50) и удалении постоянной составляющей.

На рис. 6 представлено ЧВРЭ сигнала, полученного на установке, вычисленное МПВВ. В работе показано преимущество МПВВ перед методом ОМПО и алгоритмом, основанном на понятии «Мгновенная частота аналитического сигнала». Установленный в третьей главе закон смещения оценки позволил компенсировать методическую ошибку в точках экстремума частоты.

Во втором разделе четвертой главы приведены результаты частотно-временного анализа радиоинтерферограмм, полученных в опытах по метанию стальной пластины продуктами взрыва заряда из тротила, представленные ИФВ РФЯЦ – ВНИИЭФ. Регистрация процесса производилась при помощи радиоинтерферометра с длиной волны 3.2 мм. Эксперименты интересны тем, что скорость пластины возрастает за несколько микросекунд от 0 до нескольких километров в секунду. Изменение скорости происходит не плавно, а ступеньками, причем изменение скорости происходит за сотые доли микросекунды, что существенно меньше половины периода интерферограммы. Количество периодов в интерферограммах не превышает 40, но наибольший интерес для исследователей представляют начальные участки, на которых мгновенная частота основной компоненты меняется от нулевой до установившейся менее чем за 10 периодов.

На рис. 7 представлено ЧВРЭ сигнала, полученного в одном из опытов, вычисленное МПВВ с размером окна $N_{win} = 170$ и количеством поисковых параметров $p = 3$. По оси ординат отложены цифровые частоты от 0 до 0.015, которые соответствуют скорости пластины от 0 до 6 км/с, по оси абсцисс – время (в отсчетах).

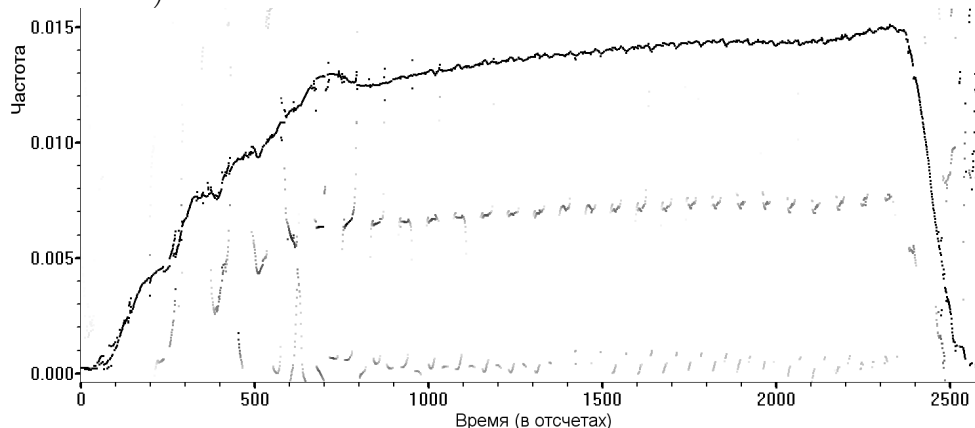


Рис. 7. ЧВРЭ МПВВ ($N_{win} = 170$, $p = 3$)

На ЧВРЭ хорошо видна основная ЧМ компонента, частота которой на начальном участке возрастает ступеньками, что характерно для данного газодинамического эксперимента. Кроме основной ЧМ компоненты на распределении видны побочные продукты, имеющие характерную периодическую структуру, полученные из-за нелинейного преобразования (присутствующего в МПВВ) основной ЧМ компоненты, постоянной составляющей и ЧМ компонент на кратных частотах.

При вычислении ЧВРЭ интерферограммы, полученной в одном из опытов по метанию пластины, начальный участок распределения получился размытым (рис. 8а). Это связано с тем, что, по постановке и специфике опыта, скорость изменения частоты в начальный момент процесса примерно в 2 раза выше, чем в остальных опытах и окно, используемое в методе МПВВ, в этот момент практически полностью перекрывается с началом процесса. Увеличить точность на этом участке можно, если уменьшить амплитуду скачка частоты в начале процесса. Для этого был разработан и реализован алгоритм экстраполяции данных, основанный на методе МПО, использующий информацию

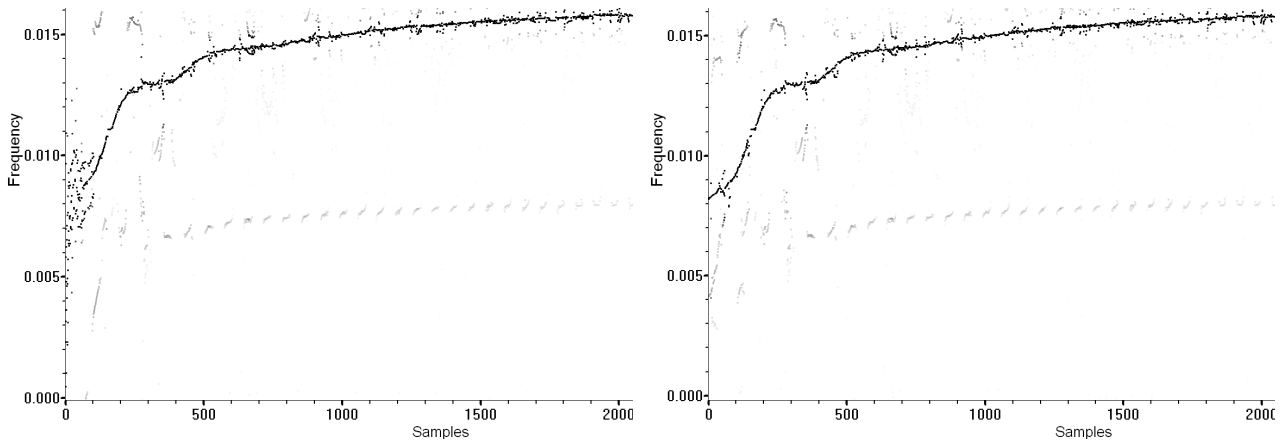


Рис. 8. ЧВРЭ МПВВ ($N_{win} = 300, p = 5$) без экстраполяции (рис. 8а) и с экстраполяцией (рис. 8б) дополнительных начальных отсчетов интерферограммы

о половине периода начального отрезка ЧМ сигнала, который заключается в вычислении оптимальных параметров экспоненциальной модели (2), и экстраполяции недостающих начальных отсчетов, подставив в экспоненциальную модель (2) значения $n = -1, -2, \dots$. Применение данного алгоритма позволило оценить ЧВРЭ на начальном участке интерферограммы (рис. 8б).

В заключении сформулированы основные результаты и краткие выводы из представленной диссертации..

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При выполнении диссертационной работы, для получения оценки мгновенной скорости перемещения газодинамического объекта по мгновенной частоте измеренной интерферограммы, были разработаны 2 метода частотно-временного анализа ЧМ сигналов: основанный на максимально правдоподобной оценке параметров экспоненциальной модели в скользящем окне (ОМПО) и модификации преобразования Вигнера-Виля (МПВВ).

В диссертационной работе проведены исследования созданных методов частотно-временного анализа, которые показали:

- Применение методов для анализа ЛЧМ сигналов позволяет получить несмещенную, близкую к максимально возможной точности (по критерию Крамера-Рао), оценку частоты, не зависящую от положения окна в сигнале. Плотность вероятности ошибки оценки частоты имеет гауссово распределение. Точность анализа ЛЧМ сигналов МПВВ не зависит от скорости изменения частоты.
- При анализе МПВВ ЧМ сигналов с квадратичным законом изменения частоты, оценка частоты получается смещенной. Это смещение пропорционально квадрату длины окна и не зависит от ОСШ и положения скользящего окна в сигнале. Эмпирически полученная формула для оценки смещения мгновенной частоты позволила компенсировать методическую ошибку при вычислении ЧВРЭ данных, полученных в физическом эксперименте.
- Ошибка оценки частоты вызванная узкополосной помехой проявляется в

ЧВРЭ обоих методов в виде осцилляций частоты основной ЧМ компоненты. Уменьшить ошибку можно, увеличив размер окна и количество поисковых параметров в методах.

- Сравнение методов при анализе данных, полученных в физическом эксперименте, показало преимущество МПВВ перед методом ОМПО и алгоритмом, основанном на понятии «Мгновенная частота аналитического сигнала».

Применение МПВВ позволило выявить в ЧВРЭ интерферограмм, полученных в опытах по метанию стальной пластины продуктами взрыва заряда из тротила, характерные детали на начальной стадии газодинамического процесса.

В работе разработан алгоритм экстраполяции, применение которого позволило оценить частоту первой ступеньки ЧВРЭ интерферограммы, полученной в газодинамическом эксперименте с высоким ускорением пластины на начальной стадии процесса.

ПУБЛИКАЦИИ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из списка ВАК

1. Шкелев Е.И., Кисляков А.Г., **Лулов С.Ю.** Методы ослабления эффектов интермодуляции в распределении Вигнера-Вилля // Известия ВУЗов. Радиофизика, 2002. Т. 45. № 5, С. 433-442. (33%)
2. Канаков В.А., **Лулов С.Ю.**, Орехов Ю.И. Родионов А.В. Методы извлечения информации о перемещении границ раздела в газодинамических экспериментах с использованием радиоинтерферометров миллиметрового диапазона длин волн // Известия ВУЗов. Радиофизика, 2008. Т. LI. № 3. С. 234-246. (25%)
3. Шкелев Е.И., **Лулов С.Ю.** Объектно-ориентированная система для спектрально-временного анализа сигналов в базовой полосе частот // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия Радиофизика, 2004. № 1. С. 55-61. (40%)
4. Шкелев Е.И., Кузьмин В.Г., Орлов И.Я., **Лулов С.Ю.**, Алексеев С.В. Система сбора и обработки данных о функциях и состоянии человека // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия Радиофизика, 2004. № 1. С. 47-54. (20%)
5. Бугров В.Н., **Лулов С.Ю.**, Земнюков Н.Е., Корокозов М.Н. Дискретный синтез цифровых рекурсивных фильтров // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2009. № 2. С. 76-82. (25%)
6. **Лулов С.Ю.**, Фрадкина Е.П. Лабораторная установка для учебного курса «Цифровая обработка сигналов» // Открытое образование, 2009. № 5. С. 30-34. (80%)
7. **Лулов С.Ю.**, Серебряков А.М., Фрадкина Е.П. Оценка оптимальных параметров экспоненциальной и синусоидальной моделей отрезка дискретного сигнала // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2011. № 2(1). С. 71-80. (80%)
8. Кисляков А.Г., Шкелев Е.И., **Лулов С.Ю.**, Кислякова К.Г. Параметры астрофизических объектов по данным о модуляции интенсивности их электромагнитного излучения. I Алгоритмы обработки данных наблюдений // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2011. № 2(1). С. 46-54. (25%)
9. **Лулов С.Ю.**, Кривошеев В.И. Модификация преобразования Вигнера - Вилля для анализа интерферометрических данных газодинамических процессов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2011. № 5(3). С. 95-103. (80%)
10. Кривошеев В.И., **Лулов С.Ю.** О некоторых возможностях и проблемах современного цифрового спектрального анализа // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2011. № 5(3). С. 109-117. (20%)

Труды международных конференций

11. Родионов А.В., Канаков В.А., **Лупов С.Ю.** Методы обработки результатов радиоинтерферометрических измерений параметров газодинамических процессов // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: Тр. Междунар. конф. «7 Харитоновские тематические научные чтения». Саров, 2005. С. 680-685. (33%)
12. Канаков В.А., **Лупов С.Ю.**, Пархачев В.В., Родионов А.В. Многомодовая радиоинтерферометрия как средство увеличения числа определяемых параметров // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: Тр. Междунар. конф. «IX Харитоновские тематические научные чтения». Саров, 2007. С. 665-670. (25%)
13. **Лупов С.Ю.**, Фрадкина Е.П. Модификация функции LabVIEW «Downhill Simplex nD» и тестирование её на примере аппроксимации тестовых сигналов суммой синусоид // Сб. тр. междунар. научно-практической конференции «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments». М.: Изд-во РУДН, 2006. С. 278-281. (80%)
14. Косикин С.Н., **Лупов С.Ю.**, Фрадкина Е.П. Получение экспериментальных данных в лабораторных работах по учебному курсу «Цифровая обработка сигналов» // Сб. тр. междунар. научно-практической конференции «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments». М.: Изд-во РУДН, 2008. С. 504-507. (80%)
15. **Лупов С.Ю.**, Евсеев А.П., Fradkin E., Серебряков А.М., Зайцева М.И. Алгоритм восстановления поврежденных участков сигнала // Сб. тр. IX междунар. научно - практической конференции «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments». М.: Изд-во РУДН, 2010. С. 479-481. (70%)
16. **Лупов С.Ю.**, Fradkin E., Серебряков А.М. Алгоритм для вычисления частотно-временного распределения коротких квазигармонических сигналов // Сб. тр. IX междунар. научно - практической конференции «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments». М.: Изд-во РУДН, 2010. С. 482-484. (80%)
17. **Лупов С.Ю.** Модификация преобразования Вигнера-Вилля для анализа коротких широкополосных ЧМ сигналов // Сб. тр. X междунар. научно - практической конференции «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments – 2011». М.: ДМК-пресс, 2011. С. 385-387. (100%)
18. **Лупов С.Ю.**, Седов А.А. Применение алгоритмов экстраполяции при анализе начальных участков радиоинтерферограмм газодинамических процессов // Сб. тр. X междунар. научно - практической конференции «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments – 2011». М.: ДМК-пресс, 2011. С. 388-390. (70%)

Труды региональных конференций

19. Кузьмин В.Г., Кузнецова С.В., **Лупов С.Ю.**, Шкелев Е.И. Особенности спектрально-временных характеристик акустических шумов в области сердца // Труды V научной конф. по радиофизике. Н. Новгород: ТАЛАМ, 2001. С. 148-149. (25%)
20. Канаков В.А., **Лупов С.Ю.**, Родионов А.В. Особенности извлечения информации о параметрах газодинамических процессов методом аппроксимации интерферограмм многопараметрической электродинамической моделью // Труды (девятой) Научной конференции по радиофизике. Нижний Новгород: ТАЛАМ, 2005. С. 102-104. (33%)
21. Канаков В.А., **Лупов С.Ю.**, Родионов А.В. Анализ систематических погрешностей измерений параметров газодинамических процессов радиоинтерферометрическим методом и способы их компенсации // Труды (девятой) Научной конференции по радиофизике. Нижний Новгород: ТАЛАМ, 2005. С. 100-102. (33%)
22. **Лупов С.Ю.**, Канаков В.А., Родионов А.В., Шкелев Е.И., Фрадкина Е.П. Модифицированный алгоритм Вигнера-Вилля для спектрально-временного анали-

за // Труды (девятой) Научной конференции по радиофизике. Нижний Новгород: ТАЛАМ, 2005. С. 152-153. (70%)

23. **Лупов С.Ю.**, Канаков В.А., Родионов А.В., Кривошеев Е.И. Фрадкина Е.П. Применение спектрально-временного анализа для исследования интерферометрических данных // Труды (девятой) Научной конференции по радиофизике. Нижний Новгород: ТАЛАМ, 2005. С. 120-121. (70%)
24. **Лупов С.Ю.**, Фрадкина Е.П., Шахматова Е.А. Лабораторная установка для учебного курса «Цифровая обработка сигналов» // Труды XI научной конференции по радиофизике. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2007. С. 101-102. (80%)
25. **Lupov S.Yu.**, Fradkina E.P. Doppler ratemeter (experimental data for Digital Signal Processing training course) // Proceedings of the 11th Scientific Conference on Radiophysics. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod University Press, 2007. P. 272-273. (50%)
26. Кисляков А.Г., **Лупов С.Ю.**, Ходаченко М.Л., Кислякова К.Г., Ламмер Х. Программы анализа вариаций света звёзд с целью поиска планет // Труды XIV научной конференции по радиофизике. Нижний Новгород: ННГУ, 2010. С. 144-146. (20%)
27. Кисляков А.Г., Ходаченко М.Л., Ламмер Х., **Лупов С.Ю.**, Кислякова К.Г. Активность звезды G7V, связанная с планетой Eхо2b // Труды XIV научной конференции по радиофизике. Нижний Новгород: ННГУ, 2010. С. 146-148. (20%)
Тезисы докладов
28. Orlov I.Ya., Shkelev E.I., Kuzmin V.G., Kuznetsova S.V., **Lupov S.Yu.** A system for studying spectral and temporal characteristics of acoustic cardiosignals // Proceedings of the Second International Symposium of Trans Black Sea Region on applied electromagnetism, Xanthi Greece. 2000. p. 28. (20%)
29. Кисляков А.Г., **Лупов С.Ю.**, Шкелев Е.И. Интермодуляционные искажения в динамических спектрах флуктуаций солнечного радиоизлучения // Тезисы всероссийской астрономической конференции. Санкт-Петербург: Отдел оперативной полиграфии НИИХ СПбГУ, 2001. с. 200. (33%)

Содержание

Список сокращений	5
Введение	6
1. Обзор методов частотно-временного анализа и спектрального оценивания сигналов	13
1.1. Алгоритм обработки интерферограмм, основанный на понятии «Мгновенная частота аналитического сигнала»	13
1.2. Методы спектрально-временного анализа сигналов	16
1.3. Методы спектрального оценивания	24
1.4. Выводы	42
2. Применение метода максимально правдоподобной оценки параметров экспоненциальной модели для анализа ЧМ сигналов	44
2.1. Описание алгоритма	44
2.2. Применение алгоритма для оценки частотно-временного распределения энергии ЧМ сигнала	48
2.3. Вычисление частотно-временного распределения ЧМ сигналов, смоделированных на компьютере	50
2.4. Выводы	74
3. Модификация преобразования Вигнера-Виля для анализа коротких реализаций широкополосных ЧМ сигналов	76
3.1. Описание алгоритма	76
3.2. Тестирование модифицированного преобразования Вигнера-Виля на сигналах, смоделированных на компьютере	85
3.3. Выводы	105
4. Обработка экспериментальных данных	106
4.1. Проверка работоспособности разработанных методов при анализе данных, полученных при проведении физического эксперимента	106
4.2. Обработка интерферометрических данных, полученных в опытах по метанию стальной пластины продуктами взрыва заряда из тротила	115
4.3. Выводы	127
Заключение	128
Список литературы	130

Подписано в печать 06.02.2012 Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 1. Заказ № 83. Тираж 100 экз.

Отпечатано в Центре цифровой печати
Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского
603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23