Сорохтин Михаил Михайлович. Алгоритмы обнаружения и оценивания параметров ФМ-сигналов в условиях ограниченной длины информационных пакетов : диссертация ... кандидата физико-математических наук : 01.04.03 / Сорохтин Михаил Михайлович; [Место защиты: Нижегор. гос. ун-т им. Н.И. Лобачевского].- Нижний Новгород, 2008.- 132 с.: ил. РГБ ОД, 61 08-1/488

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Н.И. ЛОБАЧЕВСКОГО



*На правах рукописи*

04200852148

**Сорохтин Михаил Михайлович**

**АЛГОРИТМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФМ-СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОЙ ДЛИНЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ**

**ПАКЕТОВ**

**ДИССЕРТАЦИЯ на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук**

**Специальность: 01.04.03 - Радиофизика**

Научный руководитель: к.ф.-м.н, доцент **Морозов О.А.**

Н. Новгород, 2008 г.

**СОДЕРЖАНИЕ**

[Содержание 2](#bookmark0)

[Введение 4](#bookmark1)

[Глава 1. Методы оптимального обнаружения и оценивания параметров сигналов 11](#bookmark2)

1. [Современные методы оптимального обнаружения 13](#bookmark3)
2. Постановка задачи оптимального обнаружения 13
3. Проверка статистических гипотез 15
4. Критерии оптимальности обнаружения 17
5. Отношение максимального правдоподобия 18
6. [Синтез оптимальных методов приема сигналов 20](#bookmark6)
7. Корреляционный прием 20
8. Оптимальные и согласованные линейные фильтры 25
9. Квадратурный приемник 29
10. [Алгоритмы детектирования сигналов на основе отношения правдоподобия 31](#bookmark13)
11. Особенности формирования сигналов с фазовой манипуляцией ..32
12. Когерентное детектирование 36
13. Некогерентное детектирование 40
14. Детектирование в условиях «окрашенных» шумов 41
15. Оптимальная обработка в задачах оценки параметров сигналов 43
16. Обобщенный коррелятор 43
17. Функция неопределенности как реализация обобщенного метода максимального правдоподобия 45
18. Непараметрические методы обнаружения и оценки параметров сигналов 48
19. Адаптивные алгоритмы в задачах обработки сигналов 51
20. [Выводы 56](#bookmark24)

Глава 2. Алгоритм обнаружения ФМ-сигналов на основе анализа фазы 58

1. Методы обнаружения сигналов на основе анализа выборки 60
2. Спектральный критерий 60
3. Авторегрессионный критерий 64
4. Математическое моделирование работы методов обнаружения сигналов на основе анализа осциллограммы 67
5. Адаптивный алгоритм обнаружения ФМ-сигналов на основе анализа фазовой траектории 69
6. Демодуляция многопозиционных ФМ-сигналов 70
7. Сегментация модулирующей функции 74
   1. [Результаты математического моделирования работы алгоритмов обнаружения сигналов на основе анализа фазы 78](#bookmark31)
   2. [Выводы 85](#bookmark32)

[Глава 3. Оценка временного и частотного сдвига ФМ-сигналов ограниченной длины 87](#bookmark33)

1. [Модификация метода функции неопределенности для определения временного и частотного сдвига 88](#bookmark34)
2. [Использование нелинейного спектрального преобразования инверсии при получении функции неопределенности 94](#bookmark35)
3. Применение принципа максимума энтропии к спектральному оцениванию 94
4. Нелинейное преобразование инверсии 95
5. [Математическое моделирование работы алгоритма определения временного сдвига 100](#bookmark37)
6. [Выводы 106](#bookmark38)

[Заключение 108](#bookmark39)

[Литература 110](#bookmark40)

[Приложение 1. Существующие схемы демодуляции ФМ-сигналов 119](#bookmark41)

П1.1. Демодуляция сигналов ФМ2 119

П1.2. Демодуляция сигналов ФМ4 119

П1.3. Демодуляция сигналов ФМ8 120

[П1.4. Схема ФАПЧ 121](#bookmark42)

П1.5. Схема Пистолькорса 125

П1.6. Ремодулятор 125

П1.7. Схема Сифорова 126

П1.8. Схема Костаса 127

Приложение 2. Аппаратная реализация разработанных алгоритмов 129

**ВВЕДЕНИЕ**

Задача обнаружения сигналов на фоне помех остается одной из важнейших задач цифровой обработки сигналов и является актуальной во многих прикладных областях [1-12, 19-21, 44-46, 50-54, 66-76]. Проблема эффективного анализа и определения характеристик сигналов, в том числе и априорно неизвестных, в присутствии помех различной природы на сегодняшний день представляет собой не только одно из важнейших направлений исследований теории обнаружения сигналов, но и область активных разработок для многочисленных технических приложений [5-7, 14- 17, 47-53, 61-65]. Различные критерии при проектировании оптимальных устройств обработки сигналов, а также различный характер помех обусловили большое число применяемых для решения данных задач подходов. Для решения многих теоретических и практических задач обработки сигналов в присутствии помех фундаментальное значение имеют работы Д.В. Агеева, П.С. Акимова, Л.С. Гуткина, В.А. Котельникова, Б.Р. Левина, Ю.С. Лёзина, Ю.Г. Сосулина, В.И. Тихонова, Н. Винера, Б. Гоулда, А. Оппенгейма, Л. Рабинера и многих других ученых. Вместе с тем, современный уровень развития техники передачи и обработки сигналов не только ставит новые задачи анализа сложных широкополосных сигналов, но и предоставляет высокопроизводительные схемотехнические решения, позволяющие реализовывать вычислительно ёмкие алгоритмы на компактных, высокотехнологичных встраиваемых вычислительных системах.

Задача обнаружения сигнала содержит в себе две подзадачи - обнаружение сигнала с неизвестными параметрами, на присутствие которого указывают наличие модуляции и уникальной передаваемой последовательности символов, и обнаружение сигнала с известными параметрами на фоне сильных шумов, принимаемого с нелинейными искажениями.

Обе эти подзадачи являются актуальными во многих приложениях.

Обнаружение сигнала с неизвестными параметрами является основной задачей в таких применениях, как связь с космическими объектами, где влияние атмосферы, эффекта Доплера, широкополосного кодирования и низкое отношение сигнал/шум при приеме могут приводить к сильным искажениям сигнала.

Вторая задача, связанная с обнаружением сигнала с известными параметрами на фоне шумов, является актуальной во многих областях прикладной науки - медицинской и технической диагностике, радиолокации, радионавигации, отслеживании перемещений грузов, юстировке космических объектов и многих других. Важной составной частью данной задачи является разработка методов определения взаимной временной задержки между сигналами, распространяющимися по каналам с различными параметрами.

На сегодняшний день общего подхода к определению взаимной временной задержки не существует. В ряде применений для решения задачи традиционно используют сигналы с хорошими корреляционными свойствами [5, 6, 47, 62], например коды Баркера или М-последовательности, и специальные методы обработки, позволяющие повысить отношение сигнал/шум и в ряде случаев уменьшить объем обрабатываемой информации. Оценку временной задержки в задачах определения местоположения источника излучения обычно проводят на основе методов оптимальной (согласованной) фильтрации [3, 7-9, 11-13, 16, 53].

Интенсивное использование современных многоканальных цифровых систем связи с временным разделением каналов приводит к необходимости применения специфических методов обработки сигналов, во многих случаях представляющих собой короткие информационные пакеты с фазовой или частотной манипуляцией в присутствии шумов. Наличие сильных аддитивных и мультипликативных шумов различной природы ограничивает возможность применения традиционных подходов и обуславливает актуальность разработки новых методов решения подобных задач. Основными причинами, усложняющими реализацию алгоритма оценки временной задержки, как правило, являются: низкое (до 0 дБ и ниже) отношение сигнал/шум на входе приемника и влияние относительного движения источника и приемника излучения, которое приводит к смещению оценки временного сдвига. Особенностью разрабатываемых алгоритмов должна быть возможность их реализации на базе программируемой логики и сигнальных процессоров. Такая постановка задачи накладывает ограничение на сложность алгоритма, объем кода и данных, а также время выполнения в соответствии с аппаратными возможностями выбранной для практического применения вычислительной системы.

В соответствии с изложенным выше, *целью диссертационной работы* является разработка цифровых алгоритмов обнаружения и определения параметров сигналов, содержащих короткие информационные пакеты с фазовой манипуляцией. Специфика алгоритмов состоит в необходимости определения параметров сигналов в присутствии аддитивных и мультипликативных шумов высокого уровня в условиях неточного, например вследствие влияния эффекта Доплера, знания несущей частоты. Особое внимание уделено требованию простой и эффективной реализации алгоритмов для работы в режиме реального времени с использованием встраиваемых вычислительных систем на базе цифровых сигнальных процессоров (ЦСП) и программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) [26, 27,28-35].

*Актуальность работы.* Задачи обнаружения и определения параметров многоканального распространения сигналов (взаимной временной задержки, частотного сдвига) имеют большое значение во многих областях прикладной физики и техники. В частности, методы определения временной задержки между принятыми сигналами являются основой для решения задач определения местоположения объектов излучения. Основные трудности при решении поставленной задачи на основе традиционных корреляционных методов и согласованной фильтрации связаны с изменением параметров обрабатываемых сигналов, например смещением и масштабированием спектра. Традиционно компенсация подобных искажений производится введением в алгоритм обработки перебора по частоте (обобщенный метод максимального правдоподобия, реализуемый в данном случае методом вычисления функции неопределенности Вудворда), что является вычислительно емкой процедурой. В связи с этим актуальной является задача сокращения объема вычислений в подобных алгоритмах. Использование нелинейной обработки в задаче компенсации спектрального сдвига позволяет добиться большего разрешения при работе с короткими сигналами, характерными для современных многоканальных систем связи с временным уплотнением каналов.

*Научная а практическая ценность.* При использовании методов обнаружения и декодирования сигналов, разработанных для применения в области радиосвязи на сигналы часто накладываются достаточно жесткие требования низкого уровня шумов и малых нелинейных искажений. Использование сигналов для передачи информации в условиях неуверенного приема или интенсивного воздействия помех, а также при передаче по каналу с использованием широкополосного кодирования, диктует необходимость разработки алгоритмов обнаружения, декодирования и определения параметров сигналов, адаптирующихся к специфической шумовой ситуации. Другим недостатком известных алгоритмов демодуляции ФМ-сигналов являются трудности при их применении к многопозиционным видам фазовой манипуляции.

При решении задачи определения взаимной временной задержки сигналов методом вычисления функции неопределенности для обеспечения требуемой точности оценки необходимо обрабатывать большие объемы данных. При аппаратной реализации это приводит к существенному увеличению требований к объему памяти вычислительной системы и ее высокой производительности, достаточной для выполнения вычислений в режиме реального времени.

В диссертационной работе предложен адаптивный алгоритм обнаружения и декодирования многопозиционных ФМ-сигналов, устойчивый к воздействию аддитивных и мультипликативных шумов. В работе предложен алгоритм определения временной задержки сигналов на основе модификации метода вычисления функции неопределенности, позволяющий значительно снизить требования к вычислительной системе. Предложенная модификация позволяет уменьшить объем памяти и вычислений, требуемых для обработки сигнала, с сохранением точности результата, что является важным фактором при реализации алгоритма с использованием встраиваемых вычислительных систем.

*Научная новизна работы.* В диссертационной работе для решения задачи обнаружения и декодирования ФМ-сигналов предложены адаптивный алгоритм подстройки фазы и адаптивный алгоритм временной автоподстройки. Первый предназначен для выделения модулирующей последовательности для различных видов фазовой манипуляции и снижает вероятность искажения данных вследствие явления «обратной работы» при значительном уровне фазового шума и девиации несущей частоты. Второй алгоритм предназначен для локализации моментов начала и окончания сигнала и поддержания символьной синхронизации в принимаемом сигнале; поддержание символьной синхронизации уменьшает вероятность таких искажений принимаемого кода, как «вставки» и «выпадания» символов при нестабильности частоты передачи.

Для решения задачи определения временного сдвига между каналами распространения сигнала в диссертационной работе предложен алгоритм на основе вычислительно эффективной модификации метода нелинейного спектрального оценивания при реализации метода функции неопределенности. Предложенные модификации позволяют повысить устойчивость к воздействию шумов, а также достигнуть более высокой точности оценок для сигналов, содержащих короткие блоки данных.

*Апробация работы.* Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались:

* на всероссийской научно-технической конференции «Информационные системы и технологии». Нижний Новгород, НГТУ, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005 гг;
* на V, VI, VII, VIII и IX международных конференциях «Цифровая обработка сигналов и ее применение». Москва, 2003, 2004,2005, 2006, 2007 гг;
* на II межрегиональной конференции «Новейшие информационные технологии - инструмент повышения эффективности управления». Н.Новгород, 2002 г;
* на девятой нижегородской сессия молодых ученых. Дзержинск, 2004 г;
* на X и XII международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, Электротехника и Энергетика». Москва, 2004, 2006 гг;
* на VIII, IX, X, XI и XII научных конференциях по радиофизике. Нижний Новгород, РФ ННГУ, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008 гг;

и были опубликованы в статьях:

* в журнале «Вестник Нижегородского университета им.

Н.И. Лобачевского». Серия «Инновации в образовании», 2002, серия «Радиофизика», 2004 и серия «Физика твердого тела», 2005;

* в журнале «Радиотехника и электроника», 2007;
* в журнале «Известия ВУЗов. Радиофизика», 2007.

*Основные положения, представляемые к защите:*

* цифровой алгоритм обработки сигнала, предназначенный для обнаружения пакетов с многопозиционной фазовой манипуляцией, включающий в себя:
* алгоритм адаптивной подстройки фазы для демодуляции и восстановления модулирующей последовательности многопозиционных ФМ-сигналов в условиях фазового шума и девиации несущей частоты;
* адаптивный алгоритм временной автоподстройки для обнаружения начала и окончания модулированного сигнала, определения частоты передачи символов и поддержания символьной синхронизации для правильного декодирования без «вставок» и «выпаданий» символов в условиях нестабильности частоты передачи;
* результаты моделирования и исследования устойчивости работы алгоритма обнаружения и декодирования ФМ-сигналов по отношению к уровню аддитивных и мультипликативных шумов;
* алгоритм определения временного и частотного сдвига между реализациями ФМ-сигнала, принятыми по разным каналам, обладающим различными параметрами, на основе модификации метода функции неопределенности с уменьшением объема вычислений и введением нелинейной спектральной обработки неитерационным методом;
* результаты моделирования устойчивости работы алгоритмов определения временной задержки на основе нелинейного спектрального оценивания в условиях аддитивных и мультипликативных шумов различного уровня.

*Содержание работы.* Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных литературных источников и двух приложений.

*Первая* глава содержит краткий обзор актуальных в настоящее время задач, связанных с обнаружением и оценкой параметров сигналов. Рассматриваются методы оптимальной (согласованной) фильтрации, подходы на основе обобщенного «кросс-коррелятора» и функции неопределенности, также связанные с ними алгоритмы, традиционно применяемые для решения задач обнаружения и определения временной задержки сигналов при многоканальном распространении в условиях неточного знания несущей частоты. Рассмотрены непараметрические методы обнаружения сигналов, основанные на подсчете нуль-пересечений и прочих статистик. Приводится краткое описание преимуществ и недостатков, присущих традиционным методам, а также специфические условия и характерные требования, предъявляемые в настоящее время к разработке и тестированию алгоритмов оценки параметров сигналов.

Во *второй* главе проводится обзор характеристик сигналов, типично используемых в многоканальных системах связи, и обосновывается необходимость разработки специфического алгоритма для обработки таких сигналов. Предлагается ряд критериев обнаружения начала и окончания ФМ- сигналов с неизвестными параметрами, основанных на анализе выборки и спектрограммы. Надежность предложенных критериев исследуется методом математического моделирования.

Предлагается адаптивный алгоритм обнаружения и декодирования сигналов с фазовой манипуляцией, универсальный по отношению к виду фазовой манипуляции. Алгоритм включает в себя два фильтра. Адаптивный алгоритм подстройки фазы (фильтр фазовой автоподстройки) предназначен для восстановления модулирующей последовательности многопозиционного ФМ-сигнала в условиях фазового шума и значительной девиации несущей частоты. Адаптивный алгоритм временной автоподстройки (фильтр временной автоподстройки) предназначен для обнаружения начала и окончания ФМ-сигналов и для повышения точности деления сигнала на символьные сегменты в целях надежного выделения модулирующих символов. Адаптивный характер позволяет избежать «вставок» и «выпаданий» символов при сильной девиации частоты передачи информации.

В главе приводятся результаты сравнительного статистического исследования предложенного алгоритма. Были исследованы зависимости вероятности ошибочного принятия символа от отношения сигнал/шум для аддитивного шума при постоянном уровне фазового шума и девиации несущей частоты. Исследование проводилось для сигналов с двумя видами модуляции — ФМ2 и ФМ4. Для сравнения выбран часто используемый адаптивный алгоритм - схема Костаса. В результате сравнения выявлен выигрыш в надежности предложенного алгоритма.

*Третья* глава посвящена решению задачи обнаружения и определения параметров распространения сигнала с известными параметрами в канале с нелинейными искажениями и сильными шумами. В данной главе предложена модификация метода функции неопределенности Вудворда и алгоритм определения временного и частотного сдвига между каналами распространения сигнала на основе вычислительно эффективного метода нелинейного спектрального оценивания.

Использование децимации при подготовке выборки к спектральному преобразованию уменьшает объем необходимых вычислений и памяти, а также увеличивает помехоустойчивость алгоритма за счет частичной неявной фильтрации шумов.

Использование в рамках построения сечения функции неопределенности нелинейного спектрального оценивания позволяет получить оценки с большим разрешением при малой длительности анализируемых сигналов. Для нелинейного спектрального оценивания предлагается использовать модификацию метода максимальной энтропии на основе прямого неитерационного получения множителей Лагранжа.

Предлагаемый в данной главе алгоритм исследован методами математического и имитационного моделирования: исследована его

надежность по отношению к уровню аддитивных и мультипликативных шумов. Исследование произведено как для алгоритма на основе линейного спектрального оценивания, так и для нелинейного. В результате сравнения выяснено, что для коротких сигналов в достаточно сильных шумах нелинейный алгоритм дает выигрыш в надежности обнаружения.

В *заключении* содержится сводка основных результатов, и даются выводы по работе в целом.

В *приложении 1* приводится описание нескольких часто используемых схем демодуляции ФМ-сигналов.

В *приложении 2* приводится описание аппаратной реализации предлагаемых в данной работе цифровых алгоритмов обнаружения сигналов и определения временного и частотного сдвига. Приводятся архитектура аппаратно-программного комплекса, сведения об использованных встраиваемых вычислительных системах и краткие технические данные.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Основные результаты, полученные в диссертационной работе, состоят в следующем:

* разработан алгоритм обнаружения и декодирования фазоманипулированных сигналов, включающий в себя:
* адаптивный алгоритм фазовой автоподстройки для демодуляции многопозиционных фазоманипулированных сигналов в условиях фазовых шумов и девиации несущей частоты;
* адаптивный алгоритм временной автоподстройки для принятия решения об обнаружении сигнала с фазовой манипуляцией и поддержания символьной синхронизации в условиях нестабильности частоты передачи;
* алгоритм обнаружения и декодирования исследован методами математического моделирования; произведено сравнительное моделирование алгоритма для сигналов с модуляцией ФМ2 и ФМ4 и проанализирована зависимость вероятности ошибочного принятия символа от отношения сигнал/шум; для сравнения использован метод фазовой автоподстройки частоты, реализованный в схеме Костаса;
* предложена модификация метода функции неопределенности Вудворда для решения задачи определения временного и частотного сдвига между реализациями сигнала, прошедшими по каналам с различными параметрами, из которых одна содержит сильные аддитивные и мультипликативные шумы и может сопровождаться смещением и масштабированием спектра в результате влияния эффекта Доплера. В работе предложены следующие модификации:
* переход от полного вычисления функции неопределенности во всем интервале временных и частотных сдвигов к построению сечения позволяет многократно уменьшить требуемый для решения задачи объем вычислений без потери точности;
* введение децимации с приведением длины выборки к стандартному постоянному значению позволяет уменьшить объем вычислений для спектрального преобразования и зафиксировать требования к объему памяти, необходимому для вычислений на встроенных системах, а также увеличить устойчивость к воздействию аддитивных шумов за счет частичной неявной фильтрации;
* использование нелинейного спектрального оценивания при вычислении функции неопределенности позволяет достигнуть большего разрешения при компенсации частотного сдвига при обработке сигналов коротких информационных пакетов;

• предложенный алгоритм определения временного и частотного сдвига исследован методами математического моделирования; моделирование производилось для сравнения линейного и нелинейного алгоритмов на сигналах с модуляцией ФМ2 и ФМ4 различной длительности, для различных значений уровня аддитивных и мультипликативных шумов; по результатам сделан вывод об обоснованности применения нелинейной модификации для сигналов с ограниченным объемом информации на фоне достаточно сильного шума (отношение сигнал/шум меньше О дБ).

Предложенные алгоритмы позволяют повысить надежность обнаружения коротких сигналов систем связи на фоне аддитивных и мультипликативных помех, снижают требования по объему вычислений и памяти, необходимых для определения параметров распространения и за счет нелинейной обработки позволяют получить более точные оценки частотного сдвига. Разработанные алгоритмы допускают эффективную реализацию с использованием встраиваемых вычислительных систем на базе цифровых сигнальных процессоров и программируемых логических интегральных схем.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Марпл C.JI. Цифровой спектральный анализ и его приложения. - М.: Мир, 1990.-584 с.
2. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. - М.: Радио и связь, 1989. - 440 с.
3. Hippenstiel R.D. Detection Theory. Applications and Digital Signal Processing. CRC Press. 2002.
4. Madisetti V.K., Williams D.B. The Digital Signal Processing Handbook. CRC Press. 1998.
5. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. - М.: Радио и связь, 1985. - 384 с.
6. Гангмахер В.Е., Быстров Н.Е., Чеботарев Д.В. Шумоподобные сигналы. Анализ, синтез, обработка - СПб.: Наука и техника, 2005. — 400 с.
7. Акимов П.С., Евстратов Ф.Ф., Захаров С.И. и др. Обнаружение радиосигналов. /Под ред. Колосова А. А. - М.: Радио и связь, 1989. - 288 с.
8. Лезин Ю.С. Введение в теорию и технику радиотехнических систем. М.: Радио и связь, 1986. - 279 с.
9. Акимов П.С, Бакут П.А., Богданович В.А. и др. Теория обнаружения сигналов. / Под ред. Бакута П.А. - М.: Радио и связь, 1984. - 440 с.
10. Ташлинский А.Г. Оценивание параметров пространственных деформаций последовательностей изображений. Ульяновский Государственный технический университет. - Ульяновск: УлГТУ, 2000. - 132 с.
11. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. - М.: Радио и связь, 1983. — 320 с.
12. Тихонов В.И., Кульман Н.К. Нелинейная фильтрация и квазикогерентный прием сигналов. - М.: Сов. радио, 1975. - 704 с.
13. Турин Г.Л. Согласованные фильтры. //Зарубежная радиоэлектроника, 1961. №3. С. 30-63.
14. Апорович А.Ф., Чердынцев В.А. Радиотехнические системы передачи информации: [Учебное пособие для радиотехнич. спец. вузов] - Мн.: Выш. шк., 1985. -215 с.
15. SteberJ.M. The Communication Edge. PSK Demodulation. Part 1,2. [www.wi.com](http://www.wi.com).
16. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр.: Пер. с англ. - М.: Вильямс, 2003. - 1104с.
17. Томаси У. Электронные системы связи. М.: «Техносфера». 2007. - 1358 с.
18. Тепляков И.М., Рощин Б.В., Фомин А.И., Вейцель В.А. Теория передачи сигналов. / Под ред. Теплякова И.М. - М.: «Радио и связь», 1982. - 264 с.
19. Carter G.C.ed. Special issue о time delay estimation //IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing. Vol. 29. № 3. PI 2. 1981.
20. Knapp C.H., Carter G.C. The generalized correlation method for estimation of time delay. //IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing. Vol. ASSP-24. Aug. 1976.-C. 320-326.