

50



На правах рукописи

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Borodich'.

Бородич Ёла Юлиановна

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОБНАРУЖЕНИЯ
СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРИ
ПАНОРАМНОМ ОБЗОРЕ ШИРОКОЙ ПОЛОСЫ ЧАСТОТ

Специальность: 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства
телевидения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

05 ДЕК 2008

Санкт-Петербург – 2008

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете "ЛЭТИ" им. В.И.Ульянова (Ленина)

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор В. А. Богданович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор В. В. Леонтьев

кандидат технических наук, профессор В. А. Аладинский

Ведущая организация Новосибирский государственный
технический университет

Защита диссертации состоится «17» декабря 2008 года в 15.00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.03 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Авторсферат разослан «14» ноября 2008 года.

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций



С. А. Баруздин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Под панорамным обзором понимается наблюдение за радиоэфиром в широком диапазоне частот, он включает в себя большое количество этапов и требует использования целого ряда алгоритмов. В диссертационной работе рассмотрены задачи панорамного обзора, связанные с обнаружением сигналов в широкой полосе частот.

Как правило, в широкой полосе частот на фоне аддитивного шума присутствуют несколько узкополосных радиосигналов. Априорные сведения о количестве сигналов, их несущих частотах, способе и параметрах модуляции отсутствуют. В связи с тем, что узкополосные сигналы хорошо разделяются по частоте, решение задач панорамного обзора производится в частотной области.

Существующий опыт практического использования традиционных алгоритмов панорамного обзора показывает недостаточную устойчивость их показателей качества в современной радиоэлектронной обстановке (РЭО).

В широком частотном диапазоне одновременно на разных частотах существуют источники радиоизлучений, которые по мощности отличаются друг от друга на порядки. Поэтому при обнаружении слабых сигналов в широкой полосе необходимо производить подавление внеполосных помех.

Традиционно с этой целью применяют метод временного окна. Одним из основных его недостатков является невозможность адаптации к существующей РЭО. Это приводит к энергетическим потерям по полезному сигналу, которых можно было бы избежать при избирательном подавлении. В связи с этим разработана методика, которая позволяет проводить адаптивное подавление внеполосных помех и за счет этого повышать вероятность обнаружения полезного сигнала, является актуальной и востребованной задачей.

Характеристики традиционных алгоритмов обнаружения при панорамном приеме в широком частотном диапазоне существенно ухудшаются при расширении спектра сигнала за счет модуляции. Для увеличения эффективности панорамного обзора следует использовать алгоритмы обнаружения, показатели качества которых не зависят от формы сигнала. Поэтому в работе рассмотрена задача синтеза алгоритма обнаружения сигнала с априорно неопределенной формой при наличии внеполосных помех.

В настоящее время помимо традиционных узкополосных сигналов все чаще используются сигналы от источников, работающих в режиме псевдослучайной перестройки рабочей частоты (далее сигналов с ППРЧ). В диссертационной работе подробно рассмотрены представленные на настоящий момент в литературе методы обнаружения сигналов с ППРЧ. Эти подходы либо не учитывают возможности наличия в наблюдаемой выборке мешающих сигналов со стационарной несущей частотой, либо используют пространственные параметры для устранения таких сигналов.

Основываясь на наблюдениях современной РЭО можно заключить, что ситуация работы сигнала с ППРЧ в широкой полосе частот при отсутствии мешающих сигналов является маловероятной. Для устранения мешающих сигналов на основе

оценок направления требуется наличие сложной антенной системы. В то же время проблема обнаружения сигналов с ГПРЧ в сложной РЭО требует решения и в тех случаях, когда нет возможности использования антенных систем. В связи с этим задача разработки алгоритма обнаружения сигналов с ГПРЧ на фоне шума и мешающих сигналов без использования оценок направления является актуальной.

Цель работы. Целью диссертационной работы является повышение эффективности обнаружения сигналов при наличии внеполосных помех. Повышение эффективности обнаружения сигналов априорно неопределенной формы, т. е. при неопределенности типа и параметров модуляции. Повышение устойчивости обнаружения сигналов с ГПРЧ к наличию мешающих сигналов без использования оценок направления прихода сигналов.

Основные методы исследования. Для решения поставленной задачи применялись методы оптимального статистического синтеза, теории проверки статистических гипотез и теории инвариантности. Экспериментальные исследования выполнены методом полунатурного моделирования с использованием записей сигналов широкополосных приемников.

Научная новизна. Разработана методика подавления внеполосных помех при панорамном обзоре, которая позволяет повысить вероятность обнаружения сигнала при наличии мощных мешающих сигналов. Разработан алгоритм обнаружения сигнала с априорно неопределенной формой при панорамном обзоре, который позволяет повысить устойчивость характеристик алгоритма к изменениям формы сигнала. Разработан алгоритм обнаружения сигнала с ГПРЧ при наличии мешающих сигналов, который не требует проведения оценок направления прихода сигналов.

Основные положения, выносимые на защиту:

- методика подавления внеполосных помех в широком диапазоне частот при априорной неопределенности параметров мешающих сигналов;
- алгоритм обнаружения сигнала априорно неопределенной формы при наличии внеполосных помех;
- алгоритм обнаружения сигнала с ГПРЧ при наличии мешающих сигналов.

Практическая ценность работы состоит в повышении вероятности обнаружения сигналов при наличии внеполосных помех, за счет применения алгоритма подавления, адаптивного к параметрам существующих мешающих сигналов; повышении вероятности обнаружения сигнала априорно неопределенной формы; решении задачи обнаружения сигналов с ГПРЧ при наличии мешающих сигналов и без использования оценок направления.

Внедрение результатов работы осуществлено на ФГУП «НИИ «Вектор» (г. СПб) в ряде инициативных научно-исследовательских работ, а также в ОКР на предприятии ОАО «Интелтех» (г. СПб).

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы представлялись и обсуждались:

- на VIII международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2006», Новосибирск, 2006 г.;

- на 61 научно-технической конференции, посвященной Дню радио, Спб, СПБГЭТУ «ЛЭТИ», 2006 г.;
- на конференции «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж, 2007 г.;
- на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава СПБГЭТУ «ЛЭТИ», 2007, 2008 гг.

Публикации. По теме работы опубликовано 9 научных работ, из них 5 статей (4 статьи опубликованы в научных изданиях, определенных ВАК) и 4 публикации в материалах международных и российских научно-технических конференциях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 50 наименований. Основная часть работы изложена на 130 страницах машинописного текста. Работа содержит 66 рисунков и 4 таблицы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определено направление исследований, обоснована их актуальность, сформулирована цель диссертационной работы, отмечена ее практическая значимость.

В первой главе приведено описание задач панорамного обзора, рассматриваемых в работе, и определены методы их решения.

Во второй главе предложена методика подавления внеполосных помех при панорамном обзоре, основанная на применении принципа инвариантности.

Спектр одиночного фрагмента дискретной синусоиды является периодической непрерывной функцией частоты, которая имеет лепестковую структуру. При решении задачи обнаружения сигнала в заданной частотной области боковые лепестки от переадач, несущие частоты которых находятся за пределами области обнаружения, являются внеполосными помехами. Традиционно для подавления внеполосных помех применяются временные окна. В этом случае перед расчетом дискретного преобразования Фурье (ДПФ) наблюдаемая выборка умножается на оконную функцию, которая должна спадать к краям сегмента, что приводит к снижению уровня боковых лепестков. В работе предложен альтернативный способ.

Для того чтобы не затенять сути разработанной методики подавления, она представлена на примере задачи обнаружения на заданной частоте f гармонического сигнала с неизвестной фазой при наличии внеполосных помех и белого гауссовского шума. Основным требованием к методике подавления является независимость характеристик обнаружения сигнала при наличии помех от их параметров.

Методика подавления внеполосных помех заключается в следующем:

1. Выборка η из помехи в частотной области представляется как линейная комбинация комплексных базисных сигналов e_j , $j = \overline{1, p}$, которые определяют подпространство помех L , т.е. помеха аппроксимируется в виде

$$\eta(\vartheta) = \sum_{j=1}^p \vartheta_j e_j, \quad \vartheta \in \Upsilon = \{ \vartheta : \operatorname{Re} \vartheta_j \in (-\infty, +\infty), \operatorname{Im} \vartheta_j \in (-\infty, +\infty), j = \overline{1, p} \}, \quad (1)$$

где ϑ_j , $j = \overline{1, p}$ – априорно неопределенные комплексные коэффициенты.

Для построения ортонормированного базиса в качестве исходных линейно независимых векторов в частотной области были приняты спектры усеченных во времени гармонических сигналов с частотами τ_j , $j = \overline{1, p}$, их протяженность по частоте ограничена интервалом $[f - NC, f + NC]$. Параметры τ_j , $j = \overline{1, p}$, NC , p подпространства L являются варьируемыми.

2. Производится выбор параметров подпространства L , для этого решается задача многопараметрической оптимизации. Минимизируются потери по полезному сигналу при обеспечении необходимого уровня подавления помех. Для этого предложено использовать метод последовательных приближений.

3. В соответствии с общей методикой синтеза равномерно наиболее мощных (РМН) инвариантных алгоритмов обнаружения сигналов отыскивается оптимальный алгоритм обнаружения сигнала при наличии внеполосных помех в классе тех алгоритмов, которые не зависят от параметров внеполосных помех.

В соответствии с представленной методикой в главе 2 получен РНМ алгоритм обнаружения гармонического сигнала, инвариантный к параметрам внеполосных помех. Для преодоления априорной неопределенности параметров помех она представлена в форме воздействия на наблюдаемую выборку преобразования из группы преобразований сдвига, относительно которой семейство распределений наблюдаемой выборки является симметричным. Найден максимальный инвариант (МИ) группы преобразований сдвига, который не зависит от параметров помехи. Согласно принципу инвариантности инвариантный алгоритм выражается через МИ. Показано, что распределение МИ обладает монотонным отношением правдоподобия, следовательно, полученный инвариантный алгоритм является РНМ.

Решающая функция этого алгоритма имеет вид

$$\varphi(\mathbf{X}) = \begin{cases} 1, & \langle \mathbf{X}, \mathbf{s} - \hat{\mathbf{s}} \rangle \geq C(\alpha) \\ 0, & \langle \mathbf{X}, \mathbf{s} - \hat{\mathbf{s}} \rangle < C(\alpha) \end{cases}, \quad \hat{\mathbf{s}} = \sum_{j=1}^p \langle \mathbf{s}, \mathbf{e}_j \rangle \mathbf{e}_j \quad (2)$$

где \mathbf{X} – наблюдаемая выборка в частотной области, \mathbf{s} – заданный вектор, определяющий форму спектра сигнала, вектор $\hat{\mathbf{s}}$ – ортогональная проекция вектора \mathbf{s} в подпространство L .

Порог $C(\alpha)$ задается в виде $C(\alpha) = C'(\alpha)\hat{\sigma}$, где $C'(\alpha)$ – пороговая константа, которая вычисляется исходя из заданного уровня вероятности ложной тревоги α , $\hat{\sigma}$ – оценка уровня шума, разработанная на предприятии ФГУП «НИИ Вектор», обеспечивающая стабильное значение вероятности ложной тревоги при наличии сигнальных компонент в полосе панорамного обзора.

В работе показано, что алгоритм (2) обеспечивает инвариантность вероятности ложной тревоги и правильного обнаружения к воздействию внеполосной помехи. А так же, что в случае полной априорной неопределенности расположения частот мешающих сигналов, разработанный алгоритм (2) при использовании соответств-

вующего подпространства \mathbf{L} не выигрывает и не проигрывает методу временного окна (для конкретизации рассмотрено окно Наттолла).

Предложенная методика подавления помех, в отличие от метода временного окна при наличии информации о частотах и уровнях мешающих сигналов, позволяет ее использовать путем соответствующего выбора параметров NC , p , τ_j , $j = \overline{1, p}$ и обеспечить подавление только в заданной частотной области. В результате появляется возможность построения адаптивного алгоритма подавления.

Полезный сигнал «маскируется» помехами, возникающими от мощных мешающих сигналов, параметры которых могут быть оценены. В связи с этим предложено производить оценивание несущих частот мешающих сигналов и их уровней по ДПФ наблюдаемой выборки. После этого с использованием предложенной методики организовывать подавление помех только от соответствующих мешающих сигналов.

Работа адаптивного алгоритма рассмотрена на конкретном примере. В наблюдаемой выборке присутствуют два мешающих сигнала, один справа и один слева от полезного сигнала. Оценки несущих частот, проведенные по ДПФ, составляют $f_1 = f - 5$, $f_2 = f + 7$ (частота дана относительно шага ДПФ), а отношение помеха/шум 70 дБ и 85 дБ соответственно.

Подавление помех следует обеспечить в областях $[f_1 - \delta; f_1 + \delta]$ и $[f_2 - \delta; f_2 + \delta]$, где δ – ошибка оценивания частоты. Уровень необходимого подавления 80 дБ и 95 дБ для боковых лепестков левого и правого мешающих сигналов соответственно.

В результате вариации получены следующие параметры искомого подпространства \mathbf{L} : $NC=11$, $p=13$ и $\tau = f + (-6.04; -5.75; -5.3; -4.85; -4.4; -4; 6; 6.25; 6.6; 7; 7.4; 7.75; 8)$. Энергетические потери по полезному сигналу составили 0.8 дБ. Показано, что вероятность ложной тревоги обладает необходимой устойчивостью к наличию помех.

Проведено сравнение характеристик алгоритмов обнаружения с адаптивным подавлением по оценкам, с подавлением окном Наттолла и потенциально-оптимального алгоритма в случае отсутствия помех. Эти характеристики приведены на рис. 1.

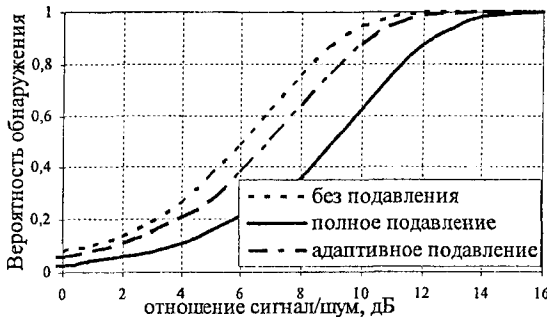


Рис. 1. Зависимость вероятности обнаружения от отношения сигнал/шум

Адаптивный алгоритм при вероятности обнаружения 0.8 по пороговому отношению сигнал/шум выигрывает у алгоритма с подавлением окном 2 дБ и проигрывает потенциально-оптимальному 1дБ.

Таким образом, используя адаптивный алгоритм подавления помех с учетом оценок параметров мешающих сигналов можно существенно повысить эффективность обнаружения и приблизить характеристику обнаружения алгоритма с подавлением помех к характеристике потенциально-оптимального в случае отсутствия помех алгоритма.

В третьей главе проведена разработка и исследование интервального алгоритма обнаружения сигналов при панорамном приеме в широком диапазоне частот.

Традиционно при панорамном приеме обнаружение в частотной области производится при помощи сравнения модуля одного спектрального коэффициента ДПФ с порогом. В работе представлены исследования точечного алгоритма, которые показывают, что при появлении модуляции его эффективность резко падает, т. е. точечный алгоритм неустойчив к изменению формы спектра сигнала. С целью устранения этого недостатка была проведена разработка интервального алгоритма обнаружения, который выносит решение по результату анализа нескольких спектральных коэффициентов ДПФ.

Выборка полезного сигнала представлена в виде

$$\mathbf{S}(\lambda, \theta) = \lambda \sum_{l=1}^L \theta_l \psi_l, \quad \lambda > 0, \quad \theta \in \Theta = \{\theta: \|\theta\| = 1\} \quad (3)$$

где параметр θ априорно не определен и зависит от формы сигнала, λ – энергетический параметр сигнала, L – размер частотного интервала, ψ_l – заданные комплексные ортонормированные базисные векторы. В качестве базиса $\psi_l, l = \overline{1, L}$ были приняты спектры усеченных во времени гармонических сигналов с частотами f_l .

Задача обнаружения была сформулирована как задача проверки статистических гипотез относительно наблюдаемой выборки в виде

$$H_0: \mathbf{X} = \xi + \eta(\vartheta), \quad \vartheta \in \Upsilon \text{ (сигнал отсутствует);}$$

$$H_1: \mathbf{X} = \mathbf{S}(\lambda, \theta) + \xi + \eta(\vartheta), \quad \lambda > 0, \quad \theta \in \Theta, \quad \vartheta \in \Upsilon \text{ (сигнал присутствует).}$$

В качестве критерия оптимальности алгоритма использовался критерий Неймана-Пирсона. Для преодоления априорной неопределенности формы сигнала был использован байесовский подход при неизвестном распределении вероятности параметра θ . Для подавления внеполосной помехи $\eta(\vartheta)$ использовалась методика представленная во второй главе. Для каждой гармонической составляющей сигнала $\psi_l, l = \overline{1, L}$ был задан ортогональный базис $\{\mathbf{e}_j\}, j = \overline{1, p}$ подпространства помех \mathbf{L}_l .

Решающая функция искомого алгоритма принимает вид

$$\varphi(\mathbf{X}, L) = \begin{cases} 1, & \sqrt{\sum_{i=1}^L |\langle \mathbf{X}, \tilde{\psi}_i \rangle|^2} \geq C(\alpha) \\ 0, & \sqrt{\sum_{i=1}^L |\langle \mathbf{X}, \tilde{\psi}_i \rangle|^2} < C(\alpha) \end{cases}, \quad \tilde{\psi}_i = \frac{\psi_i - \hat{\psi}_i}{\|\psi_i - \hat{\psi}_i\|}, \quad i = \overline{1, L}, \quad (4)$$

где $\tilde{\psi}_i$ – ортогональная проекция вектора ψ_i в подпространство помех L_i , порог $C(\alpha) = C'(\alpha)\hat{\sigma}$, где $C'(\alpha)$ – пороговая константа, которая вычисляется исходя из заданного уровня вероятности ложной тревоги α , $\hat{\sigma}$ – оценка уровня шума, аналогичная используемой в выражении (2). Показано, что алгоритм (4) является РИМ алгоритмом. Его структурная схема представлена на рис. 2.

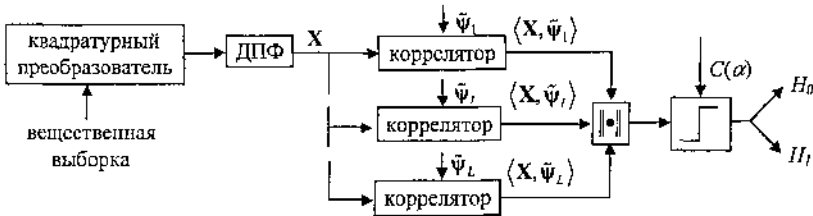


Рис. 2. Структурная схема алгоритма (4)

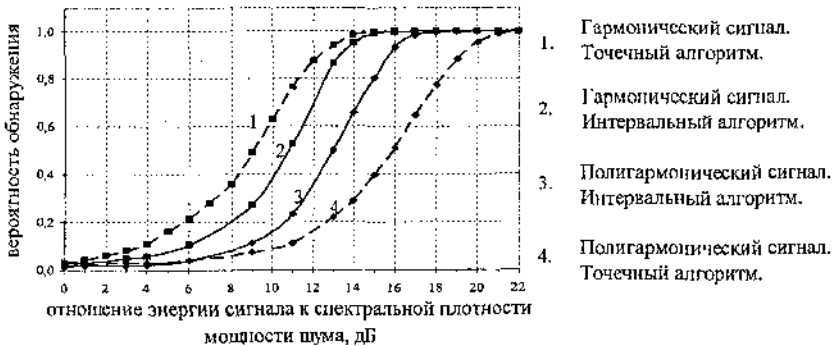


Рис. 3. Зависимость вероятности обнаружения от отношения сигнал/шум

В третьей главе для размера интервала $L = 15$ построены такие базисы пространства L_i , $i = \overline{1, 15}$, которые подавляют внеполосные помехи, возникающие от мешающих сигналов с несущими частотами, расположенными вне интервала обнаружения. Показано, что подавление составляет не менее 100 дБ. Энергетические потери по полезному сигналу, при его проектировании в ортогональные дополнения к пространствам помех, в зависимости от номера коррелятора изменяются от 1.1 дБ до 2 дБ.

Было проведено сравнение точечного алгоритма обнаружения с подавлением внеполосных помех при помощи временного окна Наттолла и интервального ал-

горитма обнаружения (с параметром $L = 15$) с использованием разработанной методики подавления (при вероятности ложной тревоги 0.01). Рассмотрены гармонический сигнал и полигармонический сигнал из 13-ти гармоник той же энергии. На рис. 3 представлены соответствующие кривые.

Кривые 1, 4 на графике – это характеристики обнаружения гармонического и полигармонического сигналов точечным алгоритмом. Видно, что изменение формы сигнала ведет к ухудшению порогового отношения сигнал/шум при вероятности обнаружения 0.8 приблизительно на 7 дБ. Кривые 2, 3 – это характеристики обнаружения гармонического и полигармонического сигналов интервальным алгоритмом. Здесь изменение формы сигнала приводит к значительно меньшему снижению эффективности обнаружения. Так потери по пороговому отношению сигнал/шум при вероятности обнаружения 0.8 составляют около 2.3 дБ.

Итак, полученные характеристики показывают, что эффективность интервального алгоритма значительно меньше зависит от формы сигнала, чем эффективность точечного алгоритма.

В работе представлено исследование интервального и точечного алгоритмов обнаружения по записям реальных сигналов КВ диапазона. Рассмотрены сигналы одинаковой энергии, разной ширины и формы спектра, принимаемые в полосе 100 кГц. В таблице приведены значения вероятности правильного обнаружения для алгоритма (4) при отношении сигнал-шум 18 дБ и различных значениях ширины интервала обнаружения L .

| № | сигнал | полоса, Гц | Вероятность обнаружения сигналов | | | |
|---|--------------|------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|
| | | | Размер интервала обнаружения, L | | | |
| | | | 1 | 9 | 15 | 21 |
| 1 | ЧМ2 | 200 | 1 | 0.9 | 0.8 | 0.7 |
| 2 | ЧМ2 | 980 | 0.5 | 0.7 | 0.8 | 0.7 |
| 3 | ФМ2 | 3000 | 0.2 | 0.6 | 0.8 | 0.7 |
| 4 | ФМ многокан. | 2400 | 0.1 | 0.5 | 0.6 | 0.6 |
| 5 | ЧМ многокан. | 2600 | 0.2 | 0.5 | 0.6 | 0.6 |

Из таблицы видно, что для сигналов с широким спектром (№2-5) вероятность обнаружения при использовании интервального алгоритма значительно выше, чем при использовании традиционного точечного алгоритма. У сигнала №1 основная энергия сосредоточена в одном спектральном коэффициенте, поэтому для него точечный алгоритм является наиболее эффективным. Таким образом, при использовании интервального алгоритма эффективность обнаружения узкополосного сигнала №1 несколько снижается, а эффективность обнаружения сигналов с широким спектром №2-5 существенно увеличивается.

Четвертая глава работы посвящена разработке и исследованию алгоритма обнаружения сигнала с ИПРЧ.

Метод ППРЧ является методом расширения спектра сигнала, который обеспечивается путем скачкообразного изменения несущей частоты в выделенном для работы системы радиосвязи диапазоне. На рис. 4 в частотно-временном представлении схематически изображен сигнал с ППРЧ и два стационарных (по частоте) мешающих сигнала. Участок сигнала с ППРЧ, соответствующий работе на постоянной частоте, называют частотным элементом или посылкой.

В качестве наблюдаемого процесса была принята аддитивная смесь сигнала с ППРЧ, белого гауссовского шума и произвольного количества узкополосных сигналов с постоянной несущей частотой, которые выступают в роли мешающих. Для выявления наличия сигнала с ППРЧ время наблюдения T должно быть в несколько раз больше, чем время одной посылки τ . Временное разрешение ΔT (равное длительности участка наблюдаемой выборки, по которому рассчитывается спектр) должно быть в несколько раз меньше интервала τ .

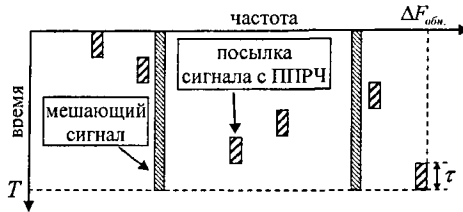


Рис. 4. Частотно-временное представление сигнала с ППРЧ

Одним из отличительных признаков сигнала с ППРЧ от мешающих сигналов является длительность существования сигнала на одной частоте. Если бы сигнал с ППРЧ и мешающие сигналы были одного уровня, то оценку длительности сигнала на одной частоте можно было бы проводить по среднему значению наблюдаемой выборки на этой частоте. Однако уровни сигнала с ППРЧ и мешающих сигналов могут различаться на несколько порядков. Ослабление такого дестабилизирующего фактора как уровень сигналов может позволить произвести разделение сигналов на длительные и кратковременные сигналы. С этой целью было предложено использовать редукцию наблюдаемых данных.

Для редукции наблюдаемых данных был использован интервальный алгоритм обнаружения, представленный в главе 3. Редуцированные данные обозначены через матрицу \mathbf{Z} размером $N_c \times N_u$, где $N_c = \lceil T / \Delta T \rceil$, N_u — количество частотных интервалов обнаружения на рассматриваемой полосе частот $\Delta F_{обн.}$. Матрица \mathbf{Z} является последовательностью независимых случайных величин $z_{n,q}$, принимающих значение 1 с вероятностью $p_{n,q}$ и значение 0 с вероятностью $1 - p_{n,q}$, $n = \overline{1, N_c}$, $q = \overline{1, N_u}$. Этап получения частотно-временной матрицы решений \mathbf{Z} для краткости назван этапом «бинарного квантования».

В работе предложено проводить обнаружение посылки сигнала с ППРЧ независимо для каждого $q = \overline{1, N_c}$, затем эти решения объединять и принимать решение о наличии целого кадра сигнала с ППРЧ.

При наличии в фиксированном частотном интервале q только шума все вероятности $p_{n,q} = \alpha$, $n = \overline{1, N_c}$, где α – вероятность ложной тревоги интервального алгоритма обнаружения (используемого при бинарном квантовании), α является управляемым параметром. При априорной неопределенности мощности шума применение эффективных и состоятельных оценок параметра масштаба шума на этапе бинарного квантования обеспечивает стабильное значение α .

В случае наличия в интервале q мешающего сигнала со стационарной несущей частотой вероятности $p_{n,q} > \alpha$, $n = \overline{1, N_c}$, неизвестны и могут различаться.

При наличии в интервале q посылки сигнала с ППРЧ длительности τ вероятности $p_{j,q} > \alpha$, $j = \overline{m+1, m+R}$ неизвестны и могут различаться, а вероятности $p_{i,q} = \alpha$, $i = \overline{1, m}$, $i = \overline{m+R+1, N_c}$, где R – количество сегментов длительности ΔT , на интервале τ , m – соответствует началу посылки сигнала с ППРЧ и принимает произвольное значение на множестве $m = \overline{1, N_c - R}$. При синтезе алгоритма было положено, что R известно. На практике при обнаружении сигнала с ППРЧ используют априорную информацию о длительности посылок, которая доступна из предыдущих наблюдений или параллельно проводят обнаружение для различных значений параметра R .

В работе была рассмотрена возможность синтеза многоальтернативного алгоритма обнаружения посылки сигнала с ППРЧ в классической постановке, который наряду с обнаружением устанавливает время начала посылки сигнала с ППРЧ. Для семейства распределений вектора $\mathbf{Z}^{(q)}$ не удалось выделить нетривиальную достаточную статистику. Следовательно, для вычисления отношений правдоподобия многоальтернативного алгоритма необходимо задавать все вероятности $p_{n,q}$, $n = \overline{1, N_c}$, а оснований для их задания нет. Поэтому не предоставляется возможности построения РНМ алгоритма относительно вектора параметров $\mathbf{r}^{(q)} = \{p_{n,q}, n = \overline{1, N_c}\}$.

На этом основании было предложено отказаться от определения временного положения посылки и синтезировать алгоритм инвариантный к перестановкам случайных величин $z_{n,q}$, $n = \overline{1, N_c}$. При обеспечении инвариантности к перестановкам, обеспечивается и инвариантность по отношению к параметру m .

Инвариантный алгоритм обнаружения зависит от наблюдаемой выборки только через МИ, а для группы перестановок величин $z_{n,q}$, $n = \overline{1, N_c}$ МИ является статистика вида

$$U_q(z_{n,q}) = \sum_{n=1}^{N_c} z_{n,q}. \quad (5)$$

Используемая инвариантность избыточна, т. к. происходит потеря того признака, что для сигнала с ППЧ значения $z_{j,q} = 1$ сгруппированы в области $j = \overline{m+1, m+R}$, а не распределены равномерно от 1 до N_c . Однако иначе построить алгоритм обнаружения не удалось. В главе 4 приведен способ снижения ложных срабатываний алгоритма на разбросанные единицы, основанный на медианной фильтрации.

В случае наличия только шума в интервале q распределение P_{00} статистики (5) сводится к биномиальному. В случае наличия мешающих сигналов для устранения неопределенности параметров $P_{n,q}$, $n = \overline{1, N_c}$ был использован минимаксный подход. Положено, что вероятности $P_{n,q} = \gamma > \alpha$, $n = \overline{1, N_c}$, где γ – заданная величина, которая соответствует некоторому наихудшему значению параметров $P_{n,q}$, $n = \overline{1, N_c}$. Таким образом, распределение P_{01} статистики (5) в случае наличия в интервале q мешающего сигнала также сводится к биномиальному.

Посылку сигнала с ППЧ, в силу кратковременности можно считать стационарным сигналом, поэтому принято, что вероятности $P_{j,q} = \beta > \alpha$, $j = \overline{m+1, m+R}$, где параметр β – априорно не определен. В работе получено выражение для распределения P_{11} статистики (5) в случае наличия в интервале q сигнала с ППЧ.

Задача обнаружения посылки сигнала с ППЧ разделена на 2 этапа. На первом этапе принимается решение о том, содержится ли в частотном интервале q какой-либо сигнал. Затем, если сигнал обнаружен, наблюдаемая выборка обновляется, и на втором этапе определяется, является ли сигнал мешающим со стационарной несущей частотой или сигналом с ППЧ. Задача сформулирована в виде проверки статистических гипотез.

Первый этап:

$$H_{00}: P(U_q) \in \{P_{00}(U_q|\alpha), \alpha > 0\}, \quad (9)$$

$$H_{10}: P(U_q) \in \{\mu_0 P_{01}(U_q|\gamma) + (1 - \mu_0) P_{11}(U_q|\alpha, \beta), \alpha > 0, \gamma > \alpha, \beta > \alpha, 0 \leq \mu_0 \leq 1\},$$

где параметр μ_0 априорно не определен и соответствует вероятности наличия мешающего сигнала.

$$\text{Второй этап: } H_{01}: P(U_q) \in \{P_{01}(U_q|\gamma), \gamma > \alpha\} \quad (10)$$

$$H_{11}: P(U_q) \in \{P_{11}(U_q|\alpha, \beta), \alpha > 0, \beta > \alpha\}.$$

Введены следующие обозначения $P_{x,mr,0}$ – заданный уровень вероятности ложной тревоги первого этапа, $P_{x,mr,1}$ – второго этапа. Решающие функции первого и второго этапов алгоритма имеют вид соответственно

$$\varphi_0 = \begin{cases} 1, & U_q > h_0 \\ \delta_0, & U_q = h_0 \\ 0, & U_q < h_0 \end{cases}, \quad h_0, \delta_0: \sum_{U_q=h_0+1}^{N_c} P_{00}(U_q|\alpha) + \delta_0 P_{00}(h_0|\alpha) = P_{л.тр.0}, \quad (11)$$

$$\varphi_1 = \begin{cases} 1, & U_q < h_1 \\ \delta_1, & U_q = h_1 \\ 0, & U_q > h_1 \end{cases}, \quad h_1, \delta_1: \sum_{U_q=0}^{h_1-1} P_{01}(U_q|\gamma) + \delta_1 P_{01}(U_q|\gamma) = P_{л.тр.1}. \quad (12)$$

Показано, что алгоритмы (11), (12) являются равномерно оптимальными алгоритмами по минимаксному критерию относительно параметров $\alpha, \beta, \gamma, \mu_0$.

Двухэтапный алгоритм обнаружения посылки сигнала с ППРЧ выражается в виде

$$\bar{\varphi} = \begin{cases} 1, & \varphi_0 = 1 \text{ и } \varphi_1 = 1 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}. \quad (13)$$

Вероятность обнаружения посылки сигнала с ППРЧ предложенного двухэтапного алгоритма (13) задается формулой

$$D = \left[\sum_{U_q=h_0+1}^{N_c} P_{11}(U_q|\alpha, \beta) + \delta_0 P_{11}(h_0|\alpha, \beta) \right] \left[\sum_{U_q=0}^{h_1-1} P_{11}(U_q|\alpha, \beta) + \delta_1 P_{11}(h_1|\alpha, \beta) \right]. \quad (14)$$

В главе 4 показано, что верхняя граница вероятности ложной тревоги алгоритма (13) имеет вид $\tilde{F} = \mu_1 P_{л.тр.0} + (1 - \mu_1) P_{л.тр.1}$, где μ_1 — априорно неопределенная вероятность отсутствия мешающего сигнала при отсутствии посылки сигнала с ППРЧ. Ввиду неопределенности вероятности μ_1 целесообразно обеспечить инвариантность верхней границы \tilde{F} относительно данной вероятности. Это требование выполняется тогда и только тогда, когда имеет место равенство $P_{л.тр.0} = P_{л.тр.1} = P_{л.тр.}$.

Двухэтапный алгоритм обнаружения посылки сигнала с ППРЧ требует обновления выборки между этапами, что не всегда может быть реализовано на практике. Поэтому в работе предложен одноэтапный алгоритм, близкий по эффективности к двухэтапному алгоритму. Решающая функция этого алгоритма имеет вид (длительность выборки равна длительности выборки одного этапа предыдущего алгоритма)

$$\varphi_2 = \begin{cases} 1, & h_0 < U_q < h_1 \\ \delta_0, & U_q = h_0 \\ \delta_1, & U_q = h_1 \\ 0, & (U_q < h_0) \vee (U_q > h_1) \end{cases}, \quad (15)$$

где $h_0, h_1, \delta_0, \delta_1$ вычисляются в соответствии с (11), (12) при $P_{л.тр.0} = P_{л.тр.1} = P_{л.тр.}$.

Показано, что при $\alpha \ll \gamma$ вероятность ложной тревоги алгоритма (15) приближается к своей верхней границе и примерно равна заданному значению $P_{л.тр.}$. Эта верхняя граница определяется выражением

$$P_{л.тр.} + \mu_1 \delta_1 P_{00}(h_1|\alpha) + (1 - \mu_1) \delta_0 P_{01}(h_0|\gamma).$$

Были проведены исследования разработанных алгоритмов, которые показали, что при $\alpha < 0.3$ и $\alpha \ll \gamma$ вероятность ложной тревоги стабильна и соответствует заданному значению. Например, при $\alpha = 0.01$ и $\gamma > 0.1$ вероятность ложной тревоги равна заданному значению $P_{л.тр.} = 0.1$. Так же показано, что если реальный параметр помехи превышает заданное значение γ (по которому рассчитывался порог), то вероятность ложной тревоги не увеличивается. Например, при $\alpha = 0.01$, $\gamma = 0.4$, $P_{л.тр.} = 0.1$ и фактическом значении параметра помехи $\tilde{\gamma} = 0.45$ вероятность ложной тревоги составляет 0.01.

На рис. 5 представлены характеристики алгоритмов (13) и (15) (кривые для них совпадают). Эти зависимости показывают, что при увеличении вероятности β появления единицы при бинарном квантовании сигнала с ППРЧ вероятность обнаружения посылки сигнала с ППРЧ возрастает. Кроме того, вероятность обнаружения увеличивается при снижении вероятности α .

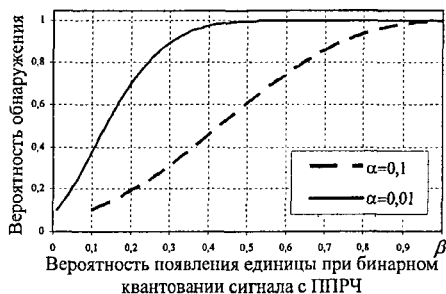


Рис. 5. Характеристики алгоритмов (13) и (15)

После принятия решения об обнаружении посылки сигнала с ППРЧ в каждом частотном интервале рассматриваемого диапазона, полученные решения объединяются, и принимается решение о наличии целого кадра сигнала с ППРЧ.

С целью проверки работоспособности разработанного алгоритма обнаружения сигнала с ППРЧ в реальных условиях было проведено его исследование по сигналу с ППРЧ, работающему на фоне реального шума и мешающих сигналов в КВ диапазоне. Сигнал с ППРЧ, полученный от имитатора гармонического сигнала, суммировался с реальными сигналами КВ диапазона, и эта сумма использовалась в качестве наблюдаемой выборки.

Были просмотрены различные участки КВ диапазона шириной 100 кГц в разное время суток. Установлено, что при работе сигнала с ППРЧ в тех диапазонах,

где присутствуют до 20-ти различных сигналов связи, разработанный алгоритм обладает достаточной для практики эффективностью. Так при отношении сигнал/шум 28 дБ вероятность обнаружения лежит в интервале от 0.8 до 1, при этом обеспечивается стабильное значение вероятности ложной тревоги.

Разработанный алгоритм обнаружения сигналов с ППРЧ допускает реализацию на основе существующей элементной базы. Он был внедрен в разработки предприятия ФГУП «НИИ Вектор», в частности в опытные образцы изделий, которые прошли успешные испытания.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Предложена методика подавления внеполосных помех при панорамном приеме в условиях априорной неопределенности параметров мешающих сигналов. Эта методика, в отличие от метода временного окна, позволяет организовывать подавление помех только от мешающих сигналов, расположенных в заданной частотной области, причем для разных областей может быть задана различная степень подавления, в результате чего удается снизить энергетические потери полезного сигнала. Показано, что полученная методика предоставляет возможность построения адаптивного алгоритма подавления с учетом оценивания параметров мешающих сигналов и существенно повысить вероятность обнаружения слабых сигналов. Алгоритм обнаружения с адаптивным подавлением выигрывает у алгоритма с подавлением окном по пороговому отношению сигнал/шум порядка 2+2.5 дБ. Отношение помеха/шум может иметь значение порядка 80 дБ.
2. Разработан алгоритм обнаружения сигнала априорно неопределенной формы при наличии внеполосных помех, который является интервальным, т. е. выносит решение по результату анализа нескольких спектральных коэффициентов. Например, современная КВ радиосвязь представляет собой прежде всего передачу данных в канале 3 кГц, в связи с этим при обнаружении в КВ диапазоне имеет смысл проводить анализ в этом интервале. Исследование интервального алгоритма по записям реальных сигналов показало, что его эффективность значительно меньше зависит от формы сигнала, чем эффективность традиционного точечного алгоритма. Интервальный алгоритм по сравнению с точечным алгоритмом позволяет повысить вероятность обнаружения сигналов с широким спектром со значения 0.2 до значения порядка 0.7.
3. Получено решение задачи обнаружения сигнала с ППРЧ на фоне мешающих сигналов, которое не требует проведения оценок направления прихода сигналов. Выполнены исследования данного алгоритма обнаружения по сигналу с ППРЧ, работающему на фоне реального шума и мешающих сигналов КВ диапазона. Согласно этим исследованиям при отношении сигнал/шум порядка 25 дБ обеспечивается вероятность правильного обнаружения больше 0.8 при вероятности ложной тревоги 0.01. Причем, вероятность ложной тревоги практически не зависит от наличия мешающих сигналов. Предприятием ФГУП «НИИ Вектор» разработанный алгоритм обнаружения сигнала с ППРЧ был реализован в опытных образцах изделий, которые успешно прошли испытания.

**Опубликованные научные работы по теме диссертации
в изданиях, определенных ВАК**

1. Бородич Ё. Ю. Метод подавления внеполосных помех при спектральном анализе, основанный на принципе инвариантности// Научный вестник НГТУ, 2007. – № 2, С. 15–24.
2. Бородич Ё. Ю. Разработка алгоритма обнаружения сигнала в частотном интервале при условиях априорной неопределенности распределения энергии сигнала по частоте и наличия помех // Известия СПб ГЭТУ «ЛЭТИ» (Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета), 2006, №2, С. 12-18.
3. Бородич Ё. Ю. Применение принципа инвариантности при обнаружении сигнала в частотном интервале // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2008, № 2, том 4, С.111-114.
4. Бородич Ё. Ю. Разработка и исследование алгоритма обнаружения сигналов с ППРЧ// Научный вестник НГТУ, 2008. – № 1, С. 57–67.

и в других изданиях

5. Богданович В. А., Бородич Ё. Ю. Применение принципа инвариантности при спектральном анализе с помощью ДПФ// Доклады АН ВШ РФ, 2006, №1. С.85–92
6. Богданович В. А., Бородич Ё. Ю. Разработка и исследование интервального алгоритма обнаружения, инвариантного к распределению энергии сигнала по частоте// Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2006: Материалы VIII международной конференции, Новосибирск, 26-28 сентября 2006 в 7 томах. т. 4. /Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2006. С.13–19.
7. Богданович В. А., Бородич Ё. Ю. Обнаружение сигнала с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты // 61 научно-техническая конференция, посвященная Дню радио: Материалы конференции, СПб, апрель 2006/ СПб, Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ» » (Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет), 2006, С. 32-34.
8. Бородич Ё. Ю. Обнаружение гармонического сигнала при наличии внеполосных помех с неопределенными параметрами // Радиолокация, навигация, связь 2007: Материалы XIII международной конференции, Воронеж, 17-19 апреля 2007 в 3 томах, /Воронеж: изд-во ВГУ, 2007, т. 1, С. 21-26
9. Bogdanovich V. A., Borodich Y. J. Development and Analysis of Interval Detection Algorithm Invariant to Signal Energy Frequency Distribution (Разработка и исследование интервального алгоритма обнаружения, инвариантного к распределению энергии сигнала по частоте)// 2006 8-th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering APEIE-2006. September 26 - 28, 2006, Novosibirsk, Russia. Proceedings in 7 Volumes. V.1. - Novosibirsk: NSTU, Russia. - P. 92 - 93. IEEE Catalog Number 06EX1470. ISBN 5-7782-0662-3.

Подписано в печать 10.10.08. Формат 60*84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ 63.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии Издательства СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5