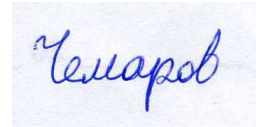


На правах рукописи



Чемаров Алексей Олегович

СОВМЕСТНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ И ФАЗОВОЕ ПЕЛЕНГОВАНИЕ
ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ ОБЗОРЕ В
ШИРОКОЙ ПОЛОСЕ ЧАСТОТ В УСЛОВИЯХ АПРИОРНОЙ
НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ СИГНАЛЬНО-ПОМЕХОВОЙ ОБСТАНОВКИ

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2009

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

Научный руководитель – кандидат технических наук,
доцент М. Е. Шевченко

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Ю. С. Юрченко
кандидат технических наук А. Н. Симонов

Ведущая организация Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Защита диссертации состоится 10 февраля 2010 года в 14:00 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, СПб, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан 17 декабря 2009 года.

Учёный секретарь совета по защите докторских и кандидатских диссертаций



С. А. Баруздин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Для современных мобильных систем радиомониторинга при панорамном обзоре требуются быстродействующие алгоритмы совместного обнаружения и пеленгования источников радиоизлучения (ИРИ) в широкой полосе частот, обеспечивающие устойчивые и достоверные оценки частоты и угловых координат (УК) ИРИ в условиях сложной и априорно неопределённой сигнально-помеховой обстановки, которая характеризуется:

- неизвестным количеством присутствующих в полосе обзора сигналов от ИРИ;
- априорной неопределённостью параметров сигналов (их уровней, частот, ширины спектров и УК);
- возможным перекрытием спектров сигналов вследствие несоблюдения регламента радиосвязи, наличия внеполосных излучений, неблагоприятного расположения ИРИ близких частот относительно средства радиомониторинга, радиоэлектронной борьбы;
- возможным наличием сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ);
- неизвестной степенью загруженности полосы обзора (ЗПО);
- неизвестным уровнем шума.

В существующих радиопеленгационных системах процессы обнаружения и оценивания УК обычно разделены, что ограничивает возможности таких систем по скорости обзора частотного диапазона и определению УК кратковременных сигналов. Также не учтено возможное перекрытие спектров соседних сигналов по частоте, не стабилизированы характеристики обнаружения при высокой загруженности полосы обзора, отсутствует возможность обнаружения и определения УК нескольких ИРИ с ППРЧ.

Существующие системы в сложной сигнально-помеховой обстановке не обеспечивают устойчивые показатели качества – вероятность правильного обнаружения и точность пеленгования. Поэтому для радиомониторинга требуются работоспособные при перекрытии спектров сигналов алгоритмы совместного обнаружения и определения УК сигналов при обработке выходных процессов (ВП) панорамного радиоприёмного устройства (ПРПУ), реализуемые в масштабе реального времени.

Совмещение процессов обнаружения и определения УК позволяет:

- повысить скорость обзора частотного диапазона по сравнению с традиционными методами, в которых обнаружение в широкой полосе частот, существенно превышающей полосу сигналов, и пеленгование на фиксированной частоте производятся различными устройствами или на основе анализа различных принятых данных;
- обнаруживать ИРИ с ППРЧ и определять их УК;
- определять УК источников кратковременных сигналов, длительность которых не превосходит времени, требуемого для настройки пеленгатора на заданную частоту при традиционном разделении функций обнаружения в широкой полосе и пеленгования.

Цель работы. Целью диссертационной работы является разработка и исследование реализуемого в масштабе реального времени алгоритма совместного обнаружения и фазового оценивания УК ИРИ при одновременном обзоре в широкой полосе частот при сложной сигнально-помеховой обстановке для мобильного радиопеленгатора с трёхэлементной антенной решёткой (АР).

Основные методы исследования. Для решения поставленной задачи применены методы цифровой обработки сигналов, теории проверки статистических гипотез, линейной алгебры и статистической радиотехники. Экспериментальные исследования выполнены на базе статистических моделей и с использованием записей реальных сигналов. Проведены полевые испытания макета обнаружителя-пеленгатора.

Научная новизна состоит в предложенном алгоритме совместного обнаружения и формирования достоверных оценок УК ИРИ фазовым методом в широкой полосе частот при перекрытии спектров сигналов и неизвестных частотах сигналов в условиях априорной неопределённости уровня шума и неопределённой ЗПО.

Основные положения, выносимые на защиту:

- правило формирования оценок фазовых сдвигов сигналов между элементами АР (ЭАР), которое позволяет сформировать достоверные оценки УК ИРИ фазовым методом при перекрытии спектров сигналов;
- правило принятия решения о наличии составляющих более одного сигнала в частотном отсчёте спектрограмм, которое допускает любую корреляцию составляющих различных сигналов, присутствующих в частотном отсчёте;
- правило принятия решения о наличии составляющих одного и того же сигнала в различных частотных отсчётах спектрограмм, которое позволяет определить занятый сигналом интервал частот;
- квантильная оценка уровня шума по цензурированной выборке отсчетов периодограммы Бартлетта, оптимальная по критерию минимума максимальной относительной ошибки, которая стабилизирует характеристики обнаружения в условиях априорной неопределённости ЗПО.

Практическая ценность работы состоит в повышении достоверности выносимых мобильным малобазовым радиопеленгатором оценок УК ИРИ в случае перекрытия спектров сигналов и при высокой загруженности частотного диапазона; в обнаружении и определении УК с высокой скоростью обзора частотного диапазона без использования традиционной многоканальной аппаратуры; в стабилизации характеристики обнаружения в условиях неопределённой ЗПО и уровня шума.

Достоверность результатов работы подтверждается аналитическими выводами, модельными экспериментами и полевыми испытаниями макета обнаружителя-пеленгатора.

Внедрение результатов работы осуществлено на ФГУП «НИИ «Вектор» (г. С-Петербург) в проводимых НИР, а также при модернизации изделий предприятия «Жасмин – 2М» и «Жасмин – СПВ».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы представлялись и обсуждались на следующих конференциях и симпозиумах:

- XIII международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж, 2007 г.;
- научно-технические конференции профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2007, 2008 и 2009 г.;
- научно-технические конференции СПбНТОРЭС, посвящённые Дню радио, С-Петербург, 2008 и 2009 г.;
- международные симпозиумы по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии, С-Петербург, 2007 и 2009 г.;
- конференция «Научно-технические проблемы в промышленности», посвящённая 100-летию ФГУП «НИИ «Вектор», С-Петербург, 2008 г.

Публикации. По теме работы опубликовано 13 научных работ, из них 7 статей (6 статей опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК) и 6 публикаций в материалах конференций.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, включающего 51 наименование, и приложения. Основная часть работы изложена на 119 страницах машинописного текста. Приложение насчитывает 7 страниц. Работа содержит 88 рисунков и 8 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определено направление исследований, обоснована их актуальность, сформулирована цель диссертационной работы, отмечена её практическая значимость, дан краткий обзор содержания работы.

В первой главе представлена модель трёхэлементной АР, приведена модель наблюдаемых данных и сформулирована решаемая задача.

Однозначное определение двумерных УК – пеленга и угла места радиопеленгатором с круговой зоной действия возможно при использовании трёхэлементной АР, состоящей из идентичных ненаправленных ЭАР. С целью равномерной по пеленгу точности пеленгования ЭАР расположены в вершинах равностороннего треугольника.

При условии узкополосности присутствующих в полосе настройки ПРПУ сигналов для малобазовой АР модель отсчётов комплексных огибающих ВП каналов ПРПУ, образованных квадратурными составляющими, выглядит следующим образом:

$$x_{t_a}(t) = \text{Re}(x_{t_a}(t)) + j\text{Im}(x_{t_a}(t)), \quad x_{t_a}(t) = \eta_a(t) + \sum_{k=1}^K s_k(t \cdot \tau) \cdot e^{j\Phi_{a,k}},$$

$$t = 1 \dots N \cdot P, \quad a = 1 \dots 3 \quad (1),$$

где: N и P – целые, a – номер канала ПРПУ (и соответствующего ЭАР), $\eta_a(t)$ – отсчёты реализации белого гауссовского шума, s_k – реализация k -го сигнала в 1-ом канале РПУ, K – количество сигналов в полосе настройки, τ – ин-

тервал дискретизации, $\Phi_{a,k}$ – фазовый сдвиг несущей k -го сигнала в a -ом канале ПРПУ относительно 1-го канала.

$$\Phi_{1,k} = 0, \quad \Phi_{2,k} = 2\pi\lambda/l \cdot \cos(\varphi_k) \cdot \cos(\theta_k), \quad \Phi_{3,k} = 2\pi\lambda/l \cdot \cos(\varphi_k - \pi/3) \cdot \cos(\theta_k),$$

где λ – длина волны; l – расстояние между ЭАР.

С целью разделения присутствующих в полосе настройки сигналов по частоте используется частотно-временное представление наблюдаемых дан-

$$\text{ных (1): } x_a(i, p) = \sum_{t=1}^N x_{t_a}(t\tau + Np\tau) w(t) e^{-j2\pi it/N}, \quad i = 0 \dots N-1, \quad p = 0 \dots P-1,$$

где X_a – спектрограмма наблюдаемых данных в a -ом канале, N – размер ДПФ, P – количество спектральных функций, $w(t)$ – взвешивающая временная оконная функция.

Из свойства линейности преобразования Фурье следует:

$$x_a(i, p) = \sum_{k=1}^K e^{j\Phi_{a,k}} s_{1,k}(i, p) + \eta_a(i, p),$$

$$s_{1,k}(i, p) = \sum_{t=1}^N s_k(t\tau + Np\tau) w(t) e^{-j2\pi it/N},$$

где $s_{1,k}(i, p)$ – представление k -го сигнала в спектрограмме первого канала ПРПУ, $\eta_a(i, p)$ – составляющая реализации шума в спектрограмме a -го канала.

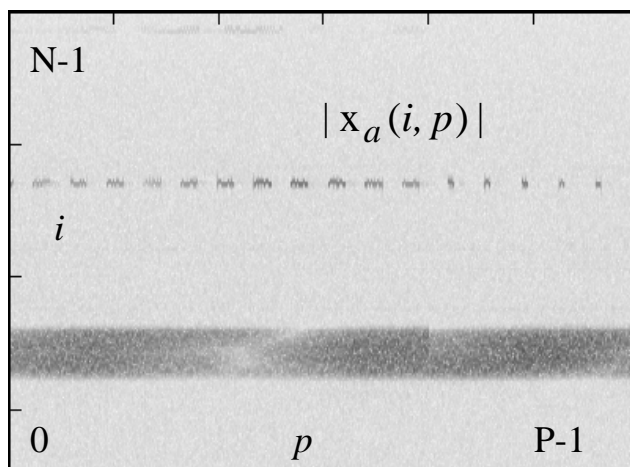


Рис. 1. Спектрограмма ВП канала ПРПУ

Отсчёты спектрограмм по временной координате объединены в вектор:

$$\mathbf{x}_a(i) = \sum_{k=1}^K e^{j\Phi_{a,k}} \mathbf{s}_{1,k}(i) + \boldsymbol{\eta}_a(i), \quad \mathbf{s}_{1,k}(i) = (s_{1,k}(i, 0), \dots, s_{1,k}(i, P-1)),$$

$$\boldsymbol{\eta}_a(i) = (\eta_a(i, 0), \dots, \eta_a(i, P-1)). \quad (2)$$

Так как полоса каналов ПРПУ на порядки превышает ширину спектра сигналов s_k и ширину главного лепестка спектра оконной функции $w(t)$, то при наличии шума полагается, что представления сигналов в спектрограмме занимают ограниченные интервалы на дискретной шкале частот: $\mathbf{s}_{1,k}(i) = \mathbf{0}$, $i < i_{\text{нач},k} \vee i > i_{\text{кон},k}$; $[i_{\text{нач},k}, i_{\text{кон},k}]$ – частотный интервал, в котором присутствует k -ый сигнал.

Задача сводится к обнаружению присутствующих в наблюдаемых данных (1) сигналов, определению положений сигналов на оси частот $[i_{\text{нач},k}, i_{\text{кон},k}]$ и УК их ИРИ при априорно неизвестных уровнях, формах сигналов, неизвестном уровне присутствующего в наблюдаемых данных аддитивного гауссовского шума. Помехами для сигнала являются также присутствующие в полосе обзора сигналы, спектры которых могут перекрывать спектр данного.

Вторая глава посвящена обзору существующих алгоритмов совместного обнаружения и определения УК ИРИ в широкой полосе обзора. Представлены результаты обработки модели наблюдаемых данных (1) при трёхэлементной АР (см. рис. 1) по существующим алгоритмам, таким как ESPRIT, MUSIC, метод максимального правдоподобия.

Показано, что при наличии в полосе обзора сигналов с перекрывающимися спектрами совместное обнаружение и достоверное определение УК ИРИ на основе ESPRIT-подхода при трёхэлементной АР невозможно. Для обеспечения заданной разрешающей способности по частоте и вследствие априорно неизвестных положений сигналов на оси частот, ширины их спектров определение УК по методу MUSIC, методу максимума правдоподобия и по фазовому методу производилось на основе анализа реализации наблюдаемых данных в каждом частотном отсчёте (ЧО) спектрограмм (2), для которого принято решение о наличии сигнальных составляющих.

Методы MUSIC и максимума правдоподобия требуют численного поиска, поэтому не реализуемы в реальном масштабе времени при одновременном обзоре в широкой полосе частот и не работоспособны при перекрытии спектров более двух сигналов. Кроме того, метод MUSIC не применим при наличии в ЧО коррелированных составляющих сигналов двух ИРИ. Определение УК по фазовому методу в ЧО, в которых присутствуют составляющие более одного сигнала, также ведёт к недостоверным оценкам УК.

Точность определения УК ИРИ по рассмотренным методам соответствует потенциальной границе Крамера-Рао, но только при отсутствии перекрытия спектра сигналов. Реализация фазового метода в реальном масштабе времени не требует существенных вычислительных ресурсов, но с целью исключения недостоверных оценок УК по фазовому методу требуется предварительное определение ЧО, не содержащих составляющих более одного сигнала.

Третья глава посвящена разработке и исследованию алгоритма совместного обнаружения и фазового оценивания УК ИРИ при одновременном обзоре в широкой полосе частот для трёхэлементной АР.

Структурная схема алгоритма представлена на рис. 2. Исходными данными алгоритма являются отсчёты комплексных огибающих ВП линейных трактов приёмника (ЛТП), образованных АЦП и квадратурными преобразователями (КП). Далее выполняется преобразование наблюдаемых данных в частотно-временное представление, оценивается уровень шума, производится обнаружение частотных составляющих сигналов; определяются ЧО, в которых присутствуют составляющие одного сигнала; на основе проверки принадлежности составляющих в соседних ЧО одному сигналу формируются оценки частотных интервалов сигналов $[i_{нач,k}^{\wedge}, i_{кон,k}^{\wedge}]$ и оценки УК $\{\hat{\varphi}_k, \hat{\theta}_k\}$ фазовым методом.

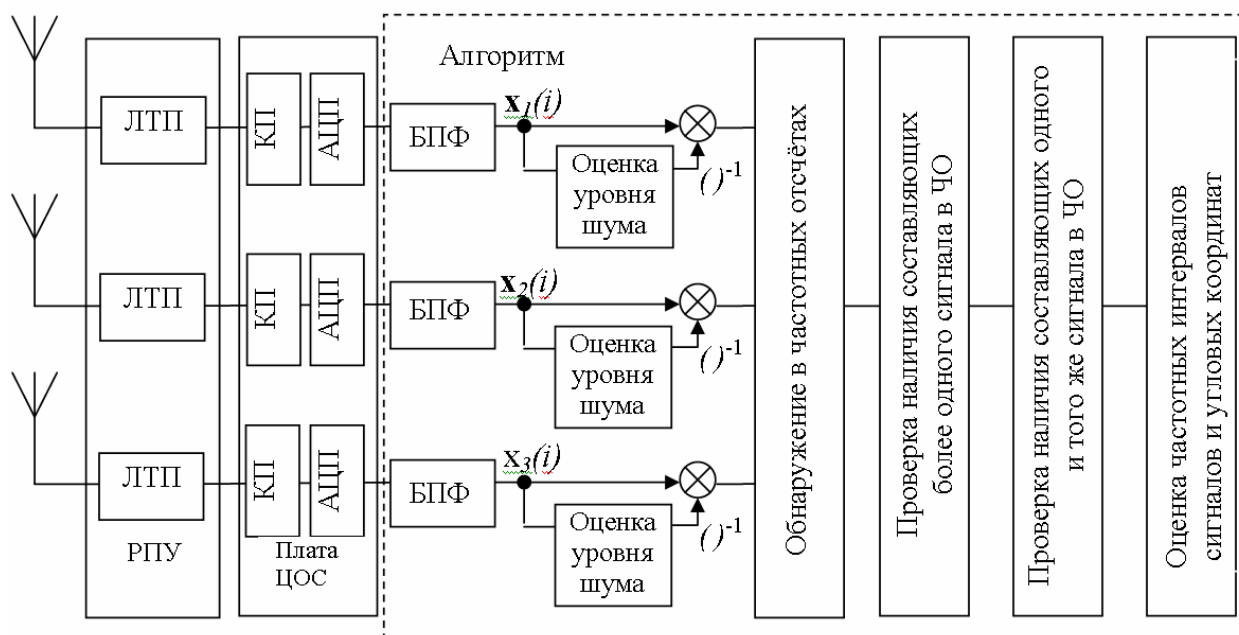


Рис. 2. Структурная схема алгоритма

Для определения уровня шума в каналах разработана устойчивая при ЗПО до 80% квантильная оценка уровня шума по цензурированной выборке отсчётов (“цензурированная квантильная оценка” – ЦКО) периодограммы Бартлетта (ПБ), отсчёты которой $V_a(i) = \|\mathbf{x}_a(i)\|^2 / P$.

Разработанная ЦКО формируется следующим образом:

- 1) Определение выборочного квантиля отсчётов s_{n1} порядка $v1$ ($n1 = N \cdot v1$);
- 2) Расчёт порога цензурирования $A_1 \cdot s_{n1}$;
- 3) Определение порядка $v2$ максимального выборочного квантиля, не превышающего порог цензурирования $A_1 \cdot s_{n1}$;
- 4) Расчёт порядка квантиля $v3 = A_2 \cdot v2$, $A_2 \leq 1$;
- 5) Формирование ЦКО уровня шума, как значения s_{n3} ($n3 = N \cdot v3$), умноженного на коэффициент пропорциональности: $\hat{\delta}_{\text{цко}}^2 = A_3 \cdot s_{n3}$.

Относительная ошибка ЦКО:

$$\xi_{\text{цко}}(v1, A_1, A_2, A_3, P, q, r) = |A_3 \cdot F_{1\delta}^{-1}(A_2 \cdot F_{1\delta}(A_1 \cdot F_{1\delta}^{-1}(v1))) - 1|,$$

где r – доля содержащих сигнальные составляющие ЧО в спектрограммах, т. е. ЗПО; $F_{1\delta}$ – функция распределения нормированного к уровню шума отсчёта ПБ. При выводе $F_{1\delta}$ использована следующая модель отсчётов спектрограмм:

$$x_a(i, p) = \begin{cases} \delta_p, & \text{сигнал отсутствует} \\ \delta_p + a_p, & \text{сигнал присутствует} \end{cases},$$

где δ_p и a_p – независимые комплексные нормально распределённые центрированные случайные величины с СКО δ и $q \cdot \delta$ соответственно; тогда при $N \gg 1$ и $2P \gg 1$ производится аппроксимация:

$$F_{1\delta}(z) = (1-r)\Phi\left(\frac{z-1}{1/\sqrt{P}}\right) + r\Phi\left(\frac{z-(1+q^2)}{\sqrt{1+q^4}/\sqrt{P}}\right),$$

где $\Phi(\cdot)$ – интеграл вероятности, q – отношение “сигнал/шум”.

Выбор параметров $v_{10}, A_{10}, A_{20}, A_{30}$ произведён по минимаксному критерию при неизвестных q и r , $q = 0 \dots 10^6$, $r = 0 \dots 0.8$:

$$\max_{\substack{r \in [0, 0.8], \\ q = 0 \dots 10^6}} \xi(v_{10}, A_{10}, A_{20}, A_{30}, q, r) \Big|_P = \min_{\substack{v_1, A_1, \\ A_2, A_3}} \max_{\substack{r \in [0, 0.8], \\ q = 0 \dots 10^6}} \xi(v_1, A_1, A_2, A_3, q, r, v) \Big|_P,$$

т. е. при требовании минимума максимальной относительной ошибки ЦКО уровня шума при любой возможной ЗПО от 0 до 80% и при любых отношениях “сигнал/шум” от 0 до 10^6 .

Получены значения оптимальных по минимаксному критерию параметров $v_{10}, A_{10}, A_{20}, A_{30}$ для различного количества P спектральных функций в спектрограммах. При $P = 20$, относительная ошибка ЦКО уровня шума не превосходит 4,3%. При исследовании ЦКО по имитационным моделям наблюдаемых данных (1) относительная ошибка ЦКО не превосходила 3%. При применении ЦКО уровня шума к реальным выходным процессам ПРПУ в условиях различной ЗПО установлено соответствие ЦКО визуальной оценке.

В работе показано, что используемая в настоящее время медианная оценка уровня шума и, в общем случае, квантильные оценки обладают большими относительными ошибками в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки при высокой ЗПО. Предложен способ оценки уровня небелого шума, основанный на применении ЦКО к различным частотным интервалам и интерполяции полученных оценок.

При использовании модели наблюдаемых данных (1) для каждого i -го ЧО справедливы три гипотезы: $H0_i$ – отсутствуют сигнальные составляющие, $H1_i$ – присутствует составляющая одного сигнала, $H2_i$ – присутствуют составляющие двух и более сигналов.

$$H0_i : \mathbf{x}_a(i) = \boldsymbol{\eta}_a(i),$$

$$H1_i : \mathbf{x}_a(i) = e^{j\Phi_{a,k}} \mathbf{s}_{1,k}(i) + \boldsymbol{\eta}_a(i),$$

$$H2_i : \mathbf{x}_a(i) = \sum_{k=1}^{K(i)} e^{j\Phi_{a,k}} \mathbf{s}_{1,k}(i) + \boldsymbol{\eta}_a(i),$$

где $K(i)$ – количество сигналов, составляющие которых присутствуют в i -ом ЧО спектрограммы.

Для обеспечения заданной разрешающей способности по частоте и по причине априорно не известной ширины спектров обнаруживаемых сигналов производится обнаружение сигнальных составляющих в каждом ЧО по правилу энергетического обнаружения с применением критерия Неймана-Пирсона:

$$V(i) \geq \alpha \Rightarrow H1_i \vee H2_i, \quad V(i) < \alpha \Rightarrow H0_i, \quad (3)$$

где $V(i) = \frac{1}{3} \sum_{a=1}^3 V_a(i) / \hat{\delta}_a^2$, $\hat{\delta}_a^2$ – ЦКО уровня шума в a -ом канале; $\hat{H}0_i$, $\hat{H}1_i$ и $\hat{H}2_i$ – решения в пользу соответствующих гипотез, α – порог обнаружения.

Для ЧО, в которых по (3) обнаружены сигнальные составляющие, производится проверка наличия составляющих нескольких сигналов:

$$D/m \leq \gamma \cdot \hat{\delta}^2 / P \quad \wedge \quad \lambda_2(i) \leq \alpha_\lambda \Rightarrow \hat{H}1_i; \quad \text{иначе} \Rightarrow \hat{H}2_i, \quad (4)$$

где $m = \sum_{a=1}^3 \frac{\|\mathbf{x}_a(i)\|^2}{3P}$ – усреднённая по каналам мощность реализаций наблюдаемых данных в i -ом ЧО; $D = \sum_{a=1}^3 \frac{(\|x_a(i)\|^2 / P - m)^2}{3}$ – дисперсия выборки из трёх величин, являющихся мощностями реализаций наблюдаемых данных i -го ЧО в каналах; $\hat{\delta}^2 = \frac{1}{3} \sum_{a=1}^3 \hat{\delta}_a^2$; $\lambda_2(i)$ – второе по величине собственное число корреляционной матрицы $\mathbf{R}_\delta(i)$ нормированных к уровню шума наблюдений в i -ом ЧО, $\mathbf{R}_\delta(i) = \frac{1}{P} \mathbf{X}_\delta(i) (\mathbf{X}_\delta^*(i))^T$, $\mathbf{X}_\delta(i) = (\mathbf{x}_1(i) / \sqrt{\hat{\delta}_1^2}, \mathbf{x}_2(i) / \sqrt{\hat{\delta}_2^2}, \mathbf{x}_3(i) / \sqrt{\hat{\delta}_3^2})^T$; пороги принятия решения γ и α_λ устанавливаются по заданной вероятности ошибочного решения о наличии в ЧО составляющих нескольких сигналов.

Правило принятия решения (4) разработано для случая априорной неопределённости коэффициента корреляции составляющих различных сигналов, которые могут присутствовать в ЧО. На рис. 3 линиями уровня показаны вероятности принятия решения в пользу $\hat{H}2_i$, принятого на основе анализа собственных чисел (рис. 3.а)

$$\lambda_2(i) > \alpha_\lambda \Rightarrow \hat{H}2_i \quad (5)$$

и на основе анализа дисперсии мощностей наблюдаемых данных в ЧО (рис. 3.б)

$$D/m > \gamma \cdot \hat{\delta}^2 / P \Rightarrow \hat{H}2_i. \quad (6)$$

Графики получены при коэффициенте корреляции присутствующих в ЧО составляющих двух сигналов равном 0.4, при фиксированных УК ИРИ одного сигнала $\varphi_1 = 180^\circ$ и $\theta_1 = 40^\circ$, уровнях составляющих сигналов в данном ЧО $q_1(i) = q_2(i) = 10$; УК ИРИ второго сигнала обозначены на осях. $q_k(i) = \|\mathbf{s}_{1,k}(i)\|^2 / \delta^2 P$ – отношение средней мощности составляющей k -го сигнала в i -ом ЧО к мощности шума (ОСШ). При уменьшении коэффициента корреляции сигнальных составляющих вероятность решения $\hat{H}2_i$ по (5) возрастает, при увеличении возрастает вероятность решения $\hat{H}2_i$ по (6). Не зависимо от значения коэффициента корреляции сигнальных составляющих вероятность

принятия решения $\hat{H}2_i$ по (4) возрастает при увеличении мощностей сигнальных составляющих и при увеличении углового расстояния между ИРИ.

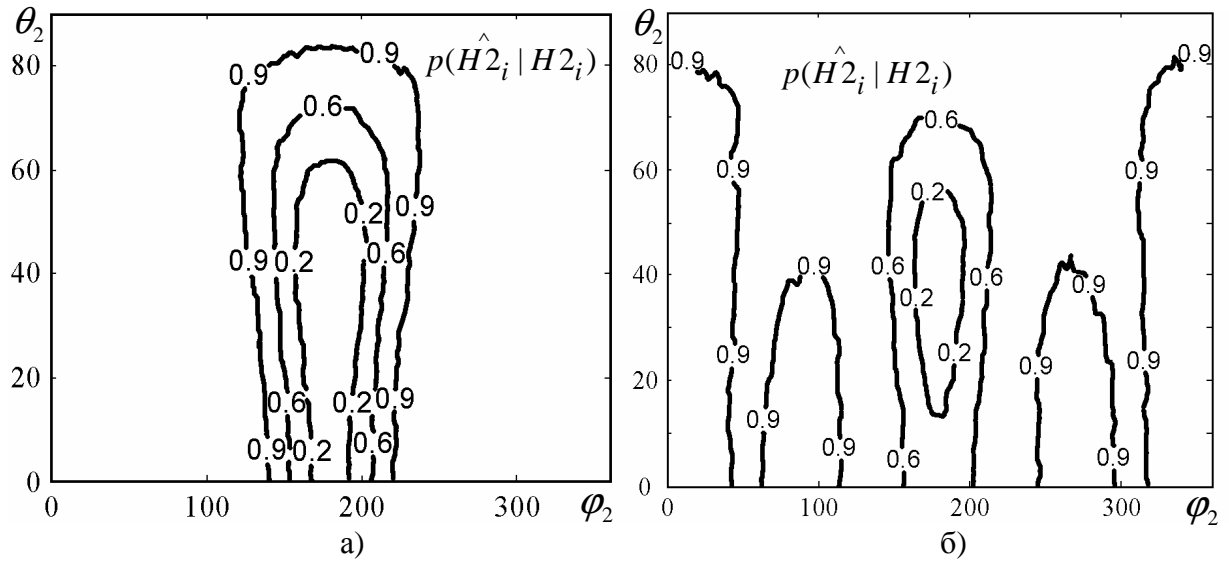


Рис. 3. Зависимость вероятности принятия решения о наличии в ЧО составляющих более одного сигнала от УК ИРИ второго сигнала при фиксированных УК ИРИ первого

Представленные в работе результаты применения правила (4) к записям реальных сигналов свидетельствуют, что решение о наличии более одного сигнала принималось для ЧО, содержащих боковые спектральные составляющие соседних по частоте сигналов, и для ЧО, в которых присутствуют немодулированные несущие (коррелированные сигналы) нескольких вещательных станций.

Помимо правила принятия решения о наличии в ЧО спектрограмм составляющих более одного сигнала в третьей главе представлено правило принятия решения о наличии составляющих более одного сигнала в отсчёте спектральной функции.

Для i -го и j -го ЧО спектрограмм, в каждом из которых присутствуют составляющие одного сигнала, возможны две гипотезы: $H1_{ij}$ – ЧО содержат составляющие одного и того же k -го присутствующего в наблюдаемых данных сигнала, $H2_{ij}$ – ЧО содержат составляющие разных k -го и m -го сигналов.

$$H1_{ij}: \mathbf{x}_a(i) = e^{j\Phi_{a,k}} \mathbf{s}_{1,k}(i) + \boldsymbol{\eta}_a(i), \quad \mathbf{x}_a(j) = e^{j\Phi_{a,k}} \mathbf{s}_{1,k}(j) + \boldsymbol{\eta}_a(j),$$

$$H2_{ij}: \mathbf{x}_a(i) = e^{j\Phi_{a,k}} \mathbf{s}_{1,k}(i) + \boldsymbol{\eta}_a(i), \quad \mathbf{x}_a(j) = e^{j\Phi_{a,m}} \mathbf{s}_{1,m}(j) + \boldsymbol{\eta}_a(j).$$

Для рассматриваемых ЧО формируются оценки фазовых сдвигов между ЭАР несущей радиочастоты присутствующих в данных ЧО сигнальных составляющих:

$$\begin{aligned} \Phi_2(\hat{i}) &= \arg(\langle \mathbf{x}_2(i), \mathbf{x}_1(i) \rangle), & \Phi_3(\hat{i}) &= \arg(\langle \mathbf{x}_3(i), \mathbf{x}_1(i) \rangle), \\ \Phi_2(\hat{j}) &= \arg(\langle \mathbf{x}_2(j), \mathbf{x}_1(j) \rangle), & \Phi_3(\hat{j}) &= \arg(\langle \mathbf{x}_3(j), \mathbf{x}_1(j) \rangle), \end{aligned}$$

В работе показано, что разности оценок фазовых сдвигов между соответствующими ЭАР

$$\Delta\hat{\Phi}_{2ij} = \hat{\Phi}_2(i) - \hat{\Phi}_2(j) \text{ и } \Delta\hat{\Phi}_{3ij} = \hat{\Phi}_3(i) - \hat{\Phi}_3(j)$$

являются коррелированными случайными величинами с коэффициентом корреляции 0.5, и при превышающем порог обнаружения (3) уровне спектральных составляющих их закон распределения можно считать нормальным. С целью декорреляции производится линейное преобразование:

$$\Phi_{+ij} = \Delta\hat{\Phi}_{2ij} + \Delta\hat{\Phi}_{3ij}, \quad \Phi_{-ij} = \Delta\hat{\Phi}_{2ij} - \Delta\hat{\Phi}_{3ij}.$$

При $H1_{ij}$ Φ_{+ij} и Φ_{-ij} – независимые центрированные гауссовские случайные величины:

$$H1_{ij}: \Phi_{+ij} = N_{1ij}(0, \sqrt{3}\delta_\Delta), \quad \Phi_{-ij} = N_{2ij}(0, \delta_\Delta),$$

где $N(m_N, \delta_N)$ – случайная величина, распределённая по нормальному закону со средним m_N и СКО δ_N ; $\delta_\Delta = \frac{1}{\sqrt{q_k(i)P}} + \frac{1}{\sqrt{q_k(j)P}}$. В случае $H2_{ij}$ наличия в рассматриваемых ЧО составляющих разных сигналов Φ_{+ij} либо Φ_{-ij} имеет математическое ожидание, обусловленное разностью фазовых сдвигов:

$$H2_{ij}: \Phi_{+ij} = \Phi_2(i) - \Phi_2(j) + \Phi_3(i) - \Phi_3(j) + N_{1ij}(0, \sqrt{3}\delta_\Delta), \\ \Phi_{-ij} = \Phi_2(i) - \Phi_2(j) - \Phi_3(i) + \Phi_3(j) + N_{2ij}(0, \delta_\Delta),$$

где $\delta_\Delta = \frac{1}{\sqrt{q_k(i)P}} + \frac{1}{\sqrt{q_m(j)P}}$. Проверка наличия в двух ЧО составляющих одного

и того же сигнала сводится к проверке наличия нулевого математического ожидания у любой из двух независимых гауссовских случайных величин Φ_{+ij} и Φ_{-ij} , аналогичной правилу обнаружения сигнала неизвестной формы по критерию Неймана-Пирсена в случае выборки из двух наблюдаемых отсчётов.

$$(\Phi_{+ij} / \sqrt{3}\delta_\Delta)^2 + (\Phi_{-ij} / \delta_\Delta)^2 \leq \rho \Rightarrow \hat{H}1_{ij}, \\ (\Phi_{+ij} / \sqrt{3}\delta_\Delta)^2 + (\Phi_{-ij} / \delta_\Delta)^2 > \rho \Rightarrow \hat{H}2_{ij}, \quad (7)$$

где $\hat{H}1_{ij}$ и $\hat{H}2_{ij}$ – решения в пользу соответствующих гипотез, порог принятия решения ρ выбирается по заданной вероятности верного принятия решения о наличии в двух ЧО составляющих одного и того же сигнала. Правило (7) является оптимальным по критерию минимума вероятности ошибочного решения о наличии составляющих одного и того же сигнала при заданном уровне вероятности верного решения.

Участвующие в формировании δ_{Δ} ОСШ $q(i)$ и $q(j)$ неизвестны. Их эффективными состоятельными оценками являются нормированные к уровню шума значения соответствующих ЧО суммарной по трём каналам ПБ:

$$q_k^{\wedge}(i) = \sum_{a=1}^3 \|\mathbf{x}_a(i)\|^2 / 3P / \hat{\delta}^2,$$

в данной работе в качестве оценки уровня шума $\hat{\delta}^2$ используется ЦКО.

На рис. 4.а представлена вероятность верного принятия решения по (7) о наличии составляющих разных сигналов с близкими УК в i -ом и j -ом ЧО $\hat{H}2_{ij} | H2_{ij}$ в зависимости от ОСШ.

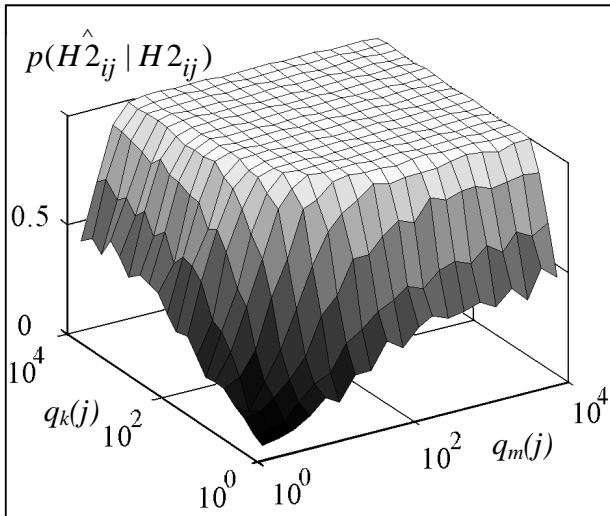


Рис. 4.а. Зависимость вероятности принятия верного решения о наличии в двух ЧО составляющих разных сигналов от ОСШ составляющих. $\varphi_k = 180$, $\varphi_m = 185$, $\theta_k = 20$, $\theta_m = 40$, $l/\lambda = 0.4$

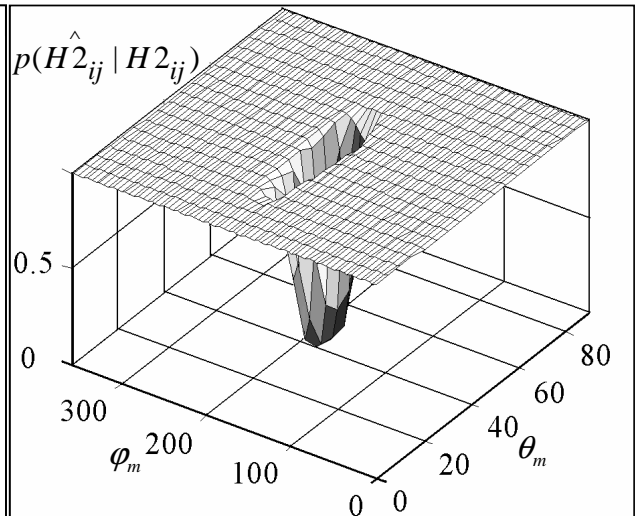


Рис. 4.б. Зависимость вероятности принятия верного решения о наличии в двух ЧО составляющих разных сигналов от УК ИРИ одного из сигналов. $\varphi_k = 180$, $\theta_k = 45$, $q_k(j) = 10$, $q_m(i) = 10$, $l/\lambda = 0.4$

На рис. 4.б представлена вероятность верного решения $\hat{H}2_{ij} | H2_{ij}$ по (7) в зависимости от УК ИРИ второго сигнала при фиксированных УК ИРИ первого.

Оценкой положения k -го сигнала на дискретной оси частот спектрограмм является частотный интервал $[i_{нач,k}^{\wedge}, i_{кон,k}^{\wedge}]$, для которого выполняется условие:

$$\forall i \geq i_{нач,k}^{\wedge}, i < i_{кон,k}^{\wedge} \hat{H}1_i \exists j > i, j \leq i_{кон,k}^{\wedge} : \hat{H}1_j \wedge \hat{H}1_{ij} \wedge j - i < N_{\Delta}, \quad (8)$$

т. е. внутри которого присутствуют расположенные не дальше интервала N_{Δ} ЧО, для которых принято решение о наличии составляющих одного и того же сигнала. Интервал N_{Δ} следует устанавливать равным возможному расстоянию на дискретной оси частот между соседними спектральными составляющими реальных сигналов. В диапазоне коротких волн N_{Δ} выбирается соответствующим полосе 500 Гц.

Оценки фазовых сдвигов несущей k -го сигнала между ЭАР формируются из частотно-временного представления наблюдаемых данных (2) с учё-

том только тех ЧО в частотном интервале сигнала, для которых принято решение о наличии составляющих данного сигнала:

$$\Phi_{a,k}^{\wedge} = \arg \left(\sum_{i=i_{нач,k}^{\wedge}}^{i_{кон,k}^{\wedge}} \sum_{\substack{\exists j: j < i_{кон,k}^{\wedge} \\ \hat{H}1_j, \hat{H}1_{ij}}} \langle \mathbf{x}_a(i), \mathbf{x}_1(i) \rangle \right), \quad a = 2, 3.$$

Производится фазовое оценивание УК ИРИ k -го сигнала:

$$\begin{aligned} \hat{\varphi}_k &= \text{atan}(\hat{\Phi}_{3,k} - \hat{\Phi}_{2,k}/2, \sqrt{3} \hat{\Phi}_{3,k}/2), \\ \hat{\theta}_k &= \arccos(\sqrt{(2\hat{\Phi}_{3,k} - \hat{\Phi}_{2,k})^2/3 + \hat{\Phi}_{2,k}^2})/2\pi l / \lambda. \end{aligned} \quad (9)$$

В работе показано, что точность оценки УК по (9) соответствует потенциальной границе Крамера-Рао в случае отсутствия перекрытия спектра k -го сигнала спектрами других сигналов. Появление помех со спектрами, перекрывающими спектр сигнала, ведёт к увеличению СКО оценок УК ИРИ сигнала, при этом математические ожидания оценок соответствуют УК ИРИ.

На рис. 5 представлены результаты обработки имитационной модели наблюдаемых данных (1) по разработанному алгоритму (см. рис.3), включающему ЦКО уровня шума, правила (4) и (7), оценки УК (9) при следующих параметрах модели: $N=4096$, $P=20$, $1/\tau=160$ кГц, $l/\lambda=1/3$, длительность наблюдаемых данных 0.5 с. Номера ЧО в полосе пропускания ЛТП шириной 100 кГц пересчитаны в соответствующие частоты, обозначенные на осях абсцисс, относительно центральной частоты настройки ПРПУ. На рис. 5. б приведена ПБ реализации наблюдаемых данных, обозначены участки на оси частот, содержащие составляющие нескольких сигналов. На рис. 5.а показаны истинные УК ИРИ присутствующих в наблюдаемых данных сигналов (пеленги – кружками, углы места – крестиками). Отрезками, положения которых по оси частот соответствуют определённому по (8) интервалам сигналов на оси частот, обозначены оценки УК ИРИ обнаруженных сигналов (пеленги с кружками в концах, углы места – без). Перекрытие спектров сигналов (рис. 5.а) не ведёт к недостоверным оценкам УК (рис. 5.б). В случае полного перекрытия спектра сигнала составляющими других сигналов оценки УК его ИРИ не выносятся (см. сигналы в районе 1200-го и 3200-го ЧО), но принимается решение о наличии составляющих нескольких сигналов в соответствии с (4).

Помимо обработки модели наблюдаемых данных в работе представлены результаты применения разработанного алгоритма (см. рис. 2) к записям реальных ВП трёхканального ПРПУ, при этом оценки УК присутствующих в полосе настройки ИРИ соответствовали УК, определённому по географическим координатам передатчиков, независимо от наличия соседнего либо перекрывающего по частоте сигнала.

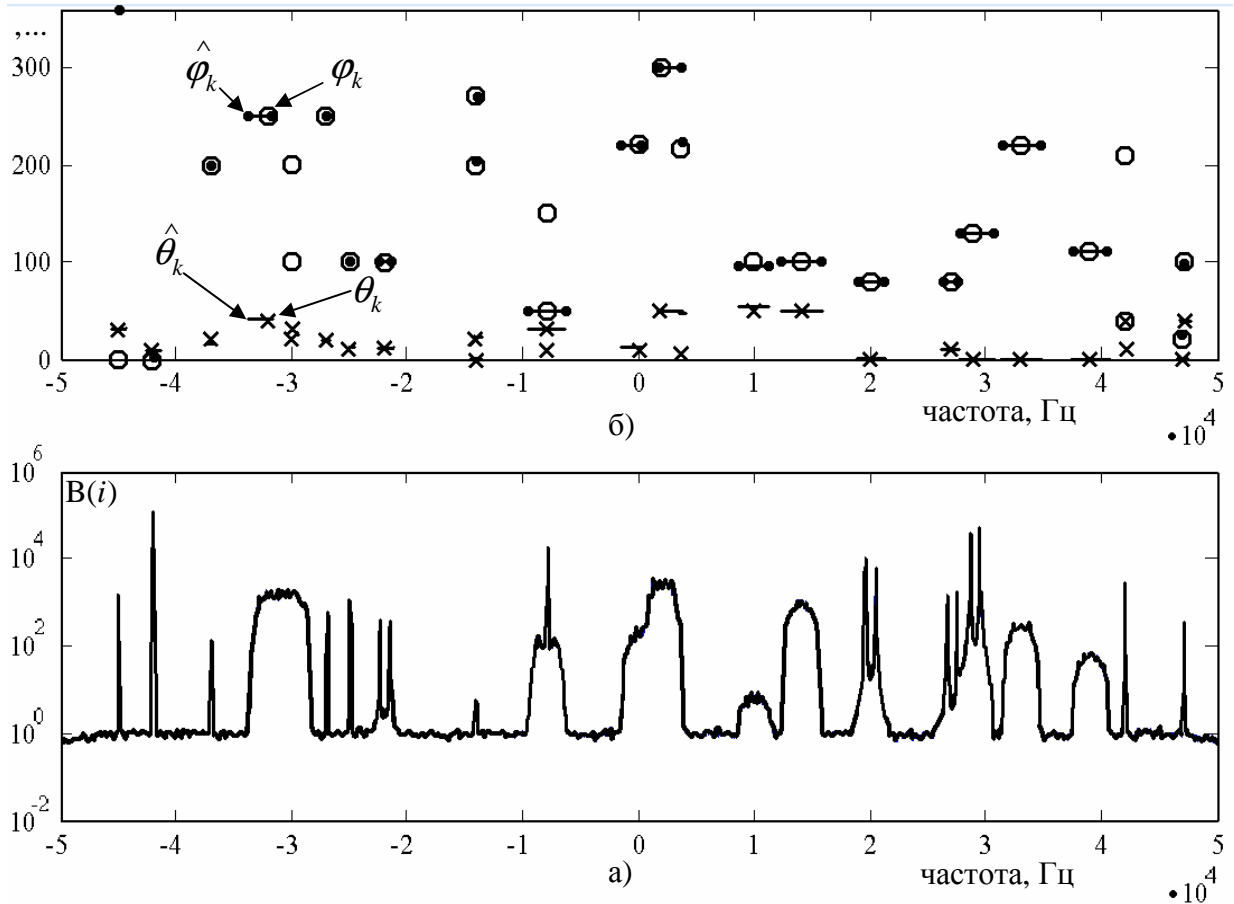


Рис. 5. Частотно-азимутальная, угломестная панорама и ПБ модели ВП ПРПУ

Программная реализация алгоритма в масштабе реального времени произведена в макете обнаружителя-пеленгатора, состоящем из ЭВМ с ЦП “Pentium-III 800 МГц”, платы цифровой обработки сигналов, используемой в качестве трёхканального КП и АЦП, трёхканального когерентного ПРПУ, подключённого через трёхкоаксиальный кабель к активным вибраторным антеннам. На рис. 6 представлен снимок дисплея макета при настройке на участок декаметрового диапазона вещательных станций в режиме отображения частотной и частотно-азимутальной панорамы. Длительность наблюдаемых данных 0.5 с, полоса пропускания трактов ПРПУ 100кГц, шаг сетки частот 40 Гц ($N=4096$, $P=20$), расстояние между ЭАР 6.4 м, центральная частота настройки ПРПУ 11700 кГц. Номера ЧО пересчитаны в соответствующие значения частот.

Рис. 6 иллюстрирует, что положения сигналов на оси частот соответствуют визуальной оценке, в том числе у перекрывающихся по частоте сигналов (см. сигналы в районе 11680 кГц и 11745 кГц).

Инструментальная точность пеленгования макета измерена с использованием имитатора ИРИ и составила 3° ; эксплуатационная среднеквадратическая ошибка пеленгования, измеренная без отбраковки оценок пеленга по сигналам более 90-ста вещательных станций, составляет 5° . Вынесенные обнаружителем-пеленгатором оценки углов места ИРИ декаметрового диапазона, расположенных на расстоянии 100 – 600 км, соответствуют углам места ИРИ средней зоны.

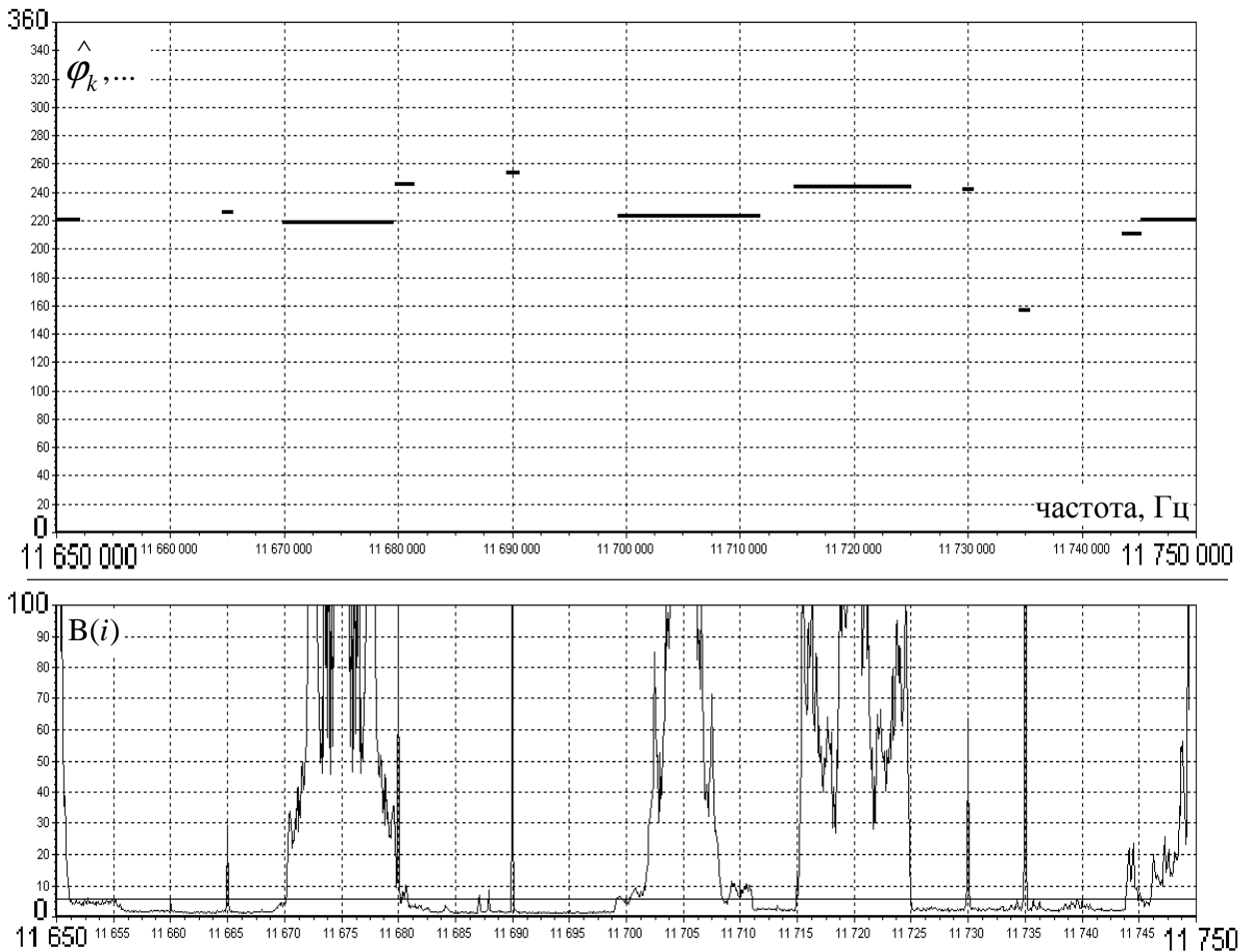


Рис. 6. Снимок дисплея макета

В работе представлены результаты совместного обнаружения и пеленгования двух ИРИ ППРЧ-сигналов, одновременно присутствующих в диапазоне вещательных станций. Решения о наличии ППРЧ-сигналов принимаются при превышении порога в отсчёте гистограммы пеленгов ИРИ, обнаруженных по разработанному алгоритму.

Предложен удобный для обработки формат сохранения результатов обнаружения-пеленгования в режиме сканирования, определены характеристики макета, вынесены практические рекомендации для использования макета, предложена и реализована методика калибровки приёмных трактов.

Загруженность ЦП ЭВМ макета составляет 40%, при существующей элементной базе возможно увеличение ширины полосы одновременного обзора в масштабе реального времени до 1 МГц при использовании одной ЭВМ с сохранением разрешающей способности по частоте 100 Гц, точности пеленгования и чувствительности обнаружителя-пеленгатора.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Разработана и исследована устойчивая к ЗПО квантильная оценка уровня шума по цензурированной выборке отсчётов ПБ с применением мини-максного критерия. В работе оптимальность данной оценки обеспечивается в диапазоне ЗПО от 0 до 80%, при этом относительная ошибка оценки не превышает 4%. Показано, что относительная ошибка данной оценки в условиях высокой ЗПО на порядок меньше относительных ошибок квантильных оценок и, в частности, используемой в настоящее время медианной оценки.
2. Разработано и исследовано правило принятия решения о наличии составляющих более одного сигнала в ЧО спектрограмм ВП каналов ПРПУ, работоспособное при любой корреляции составляющих разных сигналов, возможно присутствующих в ЧО. Применение данного правила позволяет получить информацию о частотах, на которых присутствуют составляющие более одного сигнала и избежать формирования УК ИРИ методами, не допускающими перекрытия спектров сигналов. Представлены зависимости вероятностей решения по данному правилу от отношения “сигнал/шум” и УК ИРИ.
3. Разработано и исследовано правило принятия решения о наличии составляющих одного и того же сигнала в различных ЧО спектрограмм, оптимальное по критерию минимума вероятности ошибочного решения о наличии составляющих одного и того же сигнала при заданном уровне вероятности верного решения. Разработанное правило позволяет в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки определить положения сигналов на оси частот при близком (по сравнению с шириной спектров сигналов) расположении спектров сигналов либо их перекрытии.
4. Разработано и исследовано правило формирования оценок фазовых сдвигов сигналов между ЭАР, которое позволяет сформировать достоверные оценки УК ИРИ фазовым методом при перекрытии спектров сигналов и априорно неизвестном положении сигналов на оси частот. Оценки УК в соответствии с фазовым методом выносятся в явном виде без численного поиска, что допускает его реализацию в масштабе реального времени при одновременном обзоре в широкой полосе частот.
5. В макете обнаружителя-пеленгатора программно реализован алгоритм совместного обнаружения и фазового оценивания УК при одновременном обзоре в широкой полосе частот. Проведены полевые испытания макета, определены его характеристики, предложена методика калибровки, произведено совместное обнаружение и пеленгование ИРИ с ППРЧ. По итогам испытаний разработаны практические рекомендации для включения обнаружителя-пеленгатора в состав мобильных комплексов радиомониторинга в качестве поста совместного обнаружения и оценки направлений ИРИ. Результаты испытаний свидетельствуют о работоспособности разработанного алгоритма в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки, в том числе при перекрытии спектров сигналов.

Опубликованные научные работы по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Чемаров А. О. Обнаружитель-пеленгатор с широкой полосой одновременного обзора на трехэлементной антенной решетке // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2008. Вып. 2. С. 52–57.
2. Чемаров А. О. Широкополосный мобильный поисковый радиопеленгатор // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2008. Вып. 6. С. 53–60.
3. Чемаров А. О., Шевченко М. Е. Алгоритм фазового пеленгования в широкой полосе обзора с проверкой перекрытия сигналов по частоте // Цифровая обработка сигналов, 2009, № 1, с.11–17.
4. Чемаров А. О. Мобильный поисковый радиопеленгатор с широкой полосой одновременного обзора для сложной сигнально-помеховой обстановки // Вопросы радиоэлектроники. Серия общетехническая. 2009. Вып. 2. С. 55 – 64.
5. Чемаров А. О. Квантильная оценка уровня шума периодограммы Бартлетта для частотного радиомониторинга // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2009. Вып. 1. С. 61–66.
6. Чемаров А. О. Квантильная оценка уровня шума периодограммы Бартлетта для частотного радиомониторинга // Информация и космос, 2009, № 3, с. 30–35.

и в других изданиях

7. Чемаров А. О. Устойчивая оценка уровня шума для систем радиомониторинга // Известия государственного электротехнического университета. 2008. № 1. С. 35–39.
8. Устойчивая оценка уровня шума для систем радиомониторинга / А. О. Чемаров // Радиолокация, навигация, связь: Сборн. докл. XIII Междунар. Науч.-техн. конф., Воронеж, 17-19 апр. 2007 / Изд. Воронежского НИИ Связи, 2007, Т.3. С 2168–2173.
9. Метод совместного частотного обнаружения и оценивания угловых координат при трёхэлементной антенной решётке / А. О. Чемаров // 7-й международный симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии: Труды симпозиума, Санкт-Петербург, 26-29 июня 2007 / Изд. СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2007, С. 141–144.
10. Обнаружитель-пеленгатор с широкой полосой одновременного обзора и принятием решения о наличии нескольких сигналов на одной частоте при трёхэлементной антенной решётке / А. О. Чемаров // 63-я Научно-техническая конференция СПбНТОРЭС, посвящённая Дню радио, С-Петербург, апр. 2008 / Изд. СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2008, С. 40–42.
11. Мобильный поисковый радиопеленгатор с широкой полосой одновременного обзора / А. О. Чемаров, И. В. Немировский // Научно-технические проблемы в промышленности: Труды конференции., С-Петербург, 12-14 ноября 2008 / Изд. ООО “Политехника-сервис”, 2008, С. 82–86.
12. Цензурированная квантильная оценка уровня шума периодограммы Бартлетта для частотного радиомониторинга / А. О. Чемаров // 64-я Научно-техническая конференция СПбНТОРЭС, посвящённая Дню радио, С-Петербург, апр. 2009, Изд. СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2009. С. 21–22.
13. A. Chemarov, “The Signal Detection/Direction Finding Algorithm in a Wide Simultaneous Scan Band” (Алгоритм обнаружения сигналов и оценки направлений при одновременном обзоре в широкой полосе), 8-th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, EMC-2009, p. 71–74, St.-Petersburg, Russia, June 16–19, 2009.