

На правах рукописи



Орлов Вячеслав Викторович

**АЛГОРИТМЫ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
СИГНАЛОВ АТМОСФЕРИКОВ В СПЕКТРАЛЬНОМ БАЗИСЕ
ФУРЬЕ**

Специальность 05.12.04 -

«Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Рязань 2007

Работа выполнена
в Государственном образовательном учреждении
высшего профессионального образования
«Рязанский государственный радиотехнический университет»
на кафедре радиотехнических устройств

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Паршин Юрий Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент
Ключко Владимир Константинович;

кандидат технических наук
Елинский Игорь Валентинович

Ведущая организация: ОАО «Корпорация Фазотрон-НИИР»
НИИ «Рассвет» г. Рязань

Защита состоится 11 мая 2007 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.211.04 в Рязанском государственном радиотехническом университете по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Рязанского государственного радиотехнического университета.

Автореферат разослан 4 апреля 2007 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1, РГРТУ, диссертационный совет Д 212.211.04.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



А.Г. Борисов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Атмосферикари - электромагнитное излучение грозовых разрядов (ГР) - являются представителями класса импульсных сигналов природного происхождения. Радиотехнические устройства обработки сигналов атмосфериков (СА) находят широкое применение на транспортных, взрывоопасных и пожароопасных объектах для предупреждения грозовой опасности, а также в целях экологического мониторинга.

Проблеме обработки СА посвящены работы И.И. Кононова, В.Д. Степаненко, С.М. Гальперина, Н.А. Файзулина, М.С. Александрова, В.А. Епанечникова, Ю.Н. Паршина, М.А. Юмана, Е.П. Крайдера, Д.Е. Проктора и других ученых. В известных работах наиболее остро ставится вопрос об оценивании дальности до ГР.

Обработка СА затрудняется неопределенностью формы и неизвестными моментами появления сигналов. Для решения данной задачи используются многопунктовые и однопунктовые, активные и пассивные, алгоритмы ближней и дальней зон и т.д. Однако известные алгоритмы не учитывают в комплексе неопределенность формы СА, различия облачных и ГР облако-Земля, их протяженность в пространстве, высоту точки наблюдения и наличие шумов.

Неопределенность формы сигналов, наличие шумов и помех в сверхнизкочастотном диапазоне являются одними из отличительных особенностей задач обработки СА, решаемых методами статистической радиотехники. Методы статистической обработки сигналов во временном и спектральных базисах нашли отражение и развитие в работах отечественных и зарубежных ученых: В.А. Котельникова, Б.Р. Левина, А.М. Трахтмана, А.П. Трифонова, В.И. Тихонова, Ю.Г. Сосулина, В.Г. Гусева, М.С. Бартлетта, Г. Ван Триса, Д. Бриллинджера, К.Р. Рао и др.

В связи с быстрым развитием средств цифровой техники и широкими возможностями обработки сигналов на их основе актуальна разработка алгоритмов обработки СА, использующих дискретное представление процессов. Обработка информации в спектральном базисе Фурье обусловлена вычислительной эффективностью компенсации сосредоточенных по спектру помех, фильтрации сигналов и выполнения линейных операций интегрирования и дифференцирования, в частности при описании трасс распространения СА. Значительное разнообразие вариантов пространственной ориентации ГР обуславливает необходимость оценивания множества параметров СА, характеризующих положение разрядов.

Вышесказанное подтверждает актуальность разработки и исследования алгоритмов многопараметрической обработки СА в спектральном базисе Фурье и радиотехнических устройств, реализованных на их основе, с использованием методов статистической радиотехники, обеспечивающих инвариантность к изменению формы реализаций СА, учет типа и пространственной

протяженности ГР, высоты точки наблюдения, что в совокупности позволяет повысить эффективность обработки СА.

Основной **целью данной работы** является повышение эффективности обработки СА радиотехническими устройствами путем синтеза однопунктовых алгоритмов обнаружения и многопараметрического оценивания СА в спектральном базисе Фурье.

Задачи исследований

1. Разработка математической модели СА в спектральном базисе Фурье, включающей стохастическую, учитывающую в среднем неопределенность в форме обрабатываемых сигналов, и квазидетерминированную, описывающую положение пространственно протяженных произвольно ориентированных линейных ГР с учетом высоты точки наблюдения, составляющие, где линейный разряд рассматривается как аппроксимация ГР со сложной пространственной конфигурацией.

2. Синтез и анализ оптимального алгоритма совместного обнаружения на основе критерия Неймана-Пирсона и максимально-правдоподобного оценивания вектора параметров (далее - алгоритма многопараметрического оценивания) СА в базисе Фурье на основе разработанной математической модели с учетом шумов наблюдения.

3. Разработка алгоритма адаптации при многопараметрическом оценивании СА в базисе Фурье на фоне стационарных сосредоточенных по спектру помех.

4. Разработка инвариантного относительно плотности распределения вероятностей (ПРВ) шумов с фиксированной формой спектральной плотности мощности (СПМ) для вероятности ложной тревоги (ВЛТ) алгоритма обнаружения СА.

5. Экспериментальное исследование полученных алгоритмов обработки СА с помощью численного имитационного моделирования и натуральных испытаний.

Методы исследований. При проведении исследований по диссертационной работе использовались методы статистической радиотехники, математической статистики, спектрального анализа и матричного исчисления. Анализ полученных решений проводился с использованием аналитических методов, численного имитационного моделирования и натурального эксперимента.

Научная новизна. В рамках данной работы получены следующие новые научные результаты.

1. Разработана математическая модель СА в спектральном базисе Фурье, учитывающая в среднем неопределенность в форме обрабатываемых сигналов на основе стохастического описания токового момента ГР, положение пространственно протяженных произвольно ориентированных линейных разрядов и значение высоты точки наблюдения с помощью уравнений распростра-

нения электромагнитного поля (ЭМП) при квазидетерминированных параметрах.

2. Синтезирован алгоритм однопунктового совместного обнаружения на основе критерия Неймана-Пирсона и многопараметрического оценивания СА в спектральном базисе Фурье с использованием разработанной математической модели, позволяющий проводить оценивание параметров сигналов, полностью характеризующих положение линейных пространственно протяженных произвольно ориентированных ГР, и повысить точность их оценивания по сравнению с известными алгоритмами.

3. Исследовано влияние границ частотного диапазона принимаемых СА на погрешность оценивания их параметров с использованием уравнений для границ Рао-Крамера.

4. Разработан алгоритм адаптации при оценивании вектора параметров СА в базисе Фурье на фоне стационарных сосредоточенных по спектру помех.

5. Разработан инвариантный относительно ПРВ шумов с фиксированной формой СПМ для ВЛТ алгоритм обнаружения СА.

Практическая значимость и внедрение результатов работы. Представленные в работе алгоритмы и структурные схемы радиотехнических устройств обработки сигналов могут найти применение в системах метеонавигации, грозопредупреждения и экологического мониторинга, а также в устройствах обработки сигналов с датчиков звуковых и электромагнитных колебаний. Реализация результатов исследований позволит повысить точность оценивания параметров СА по сравнению с существующими алгоритмами, в том числе на фоне стационарных сосредоточенных по спектру помех; оценивать параметры, полностью характеризующие положение произвольно ориентированных пространственно протяженных линейных ГР; реализовывать эффективные обнаружители СА.

Результаты диссертационной работы внедрены в разработку изделия по Государственному оборонному заказу №5145 от 02.06.2004 под шифром «Родонит», а также в учебный процесс ГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет», что подтверждается соответствующими актами.

Достоверность и обоснованность основных результатов диссертационной работы обеспечиваются применением при разработках и исследованиях методов, которые базируются на основе статистической теории обнаружения и оценивания сигналов; согласованием результатов, полученных временными и спектральными алгоритмами; сходимостью в частных случаях полученных и известных результатов; работоспособностью алгоритмов, показанной на основе натурных испытаний.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Алгоритм однопунктового совместного обнаружения на основе критерия Неймана-Пирсона и многопараметрического максимально-правдоподобного

оценивания СА в спектральном базисе Фурье с использованием разработанной математической модели, позволяющий проводить оценивание параметров сигналов, полностью характеризующих положение линейных пространственно протяженных произвольно ориентированных ГР, исключить вычислительно затратные операции обращения матриц и вычисления определителей и повысить точность оценивания дальности в 1,5-11 раз по сравнению с импульсным *ЕН*-методом на основе фильтров антитрасс.

2. Алгоритм адаптации при многопараметрическом оценивании СА в базисе Фурье на фоне сосредоточенных по спектру помех, обладающих интервалом стационарности, на порядок большим, чем длительность принимаемых сигналов, позволяющий повысить точность оценивания дальности до ГР в 1,1-2,0 раза.

3. Инвариантный относительно ПРВ шумов с фиксированной формой СПМ алгоритм обнаружения СА, обеспечивающий постоянство ВЛТ и позволяющий снизить в 6,0-9,8 раз вычислительные затраты на обнаружение по сравнению с синтезированным оптимальным алгоритмом обнаружения.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 7-я всероссийская научно-техническая конференция (НТК) студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании», Рязань, РГРТА, 2002 г.; 38, 39-я НТК РГРТА, Рязань, РГРТА, 2004, 2006 гг.; всероссийская научно-практическая конференция «Радиолокационная техника-2004: устройства, станции, системы», Муром, МЗРИП, 2004 г.; 3-я международная НТК «Авиация и космонавтика-2004», Москва, МАИ, 2004 г.; 13, 14-я международные НТК «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций», Рязань, РГРТА, 2004, 2005 гг.; 17-я всероссийская НТК студентов, молодых ученых и специалистов «Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы-2004», Рязань, РГРТА, 2004 г.; 23-й всероссийский симпозиум «Радиолокационное исследование природных сред», С. Петербург, НИЦ-2 4-ЦНИИ МО РФ, 2005 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 работ. Из них 3 статьи в межвузовских и ведомственных сборниках научных трудов, 1 в журнале, включенном в перечень ВАК, и 9 тезисов докладов на конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 112 наименований и трех приложений. Диссертация содержит 150 страниц, в том числе 131 страницу основного текста, шесть таблиц и 37 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации и определены цели и задачи работы. Представлены новые научные результаты, полученные

в работе, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены основные свойства ГР, используемые в диссертационной работе, к которым отнесено следующее:

- основными видами ГР являются облачные и разряды облако-Земля, имеющие пространственную протяженность единицы километров;

- поведение токов разряда во времени представляет собой сложный процесс, который на примере ГР облако-Земля может быть представлен действием отдельных стримерной и лидерной стадий, стадии обратных ударов, финальной стадии, формирующих сложные импульсные сигналы;

- основная энергия ГР лежит в диапазоне частот от сотен герц до десятков килогерц, причем форма кривой спектральной плотности зависит от априори неизвестного типа ГР.

Проведен анализ известных моделей СА и отмечено, что широко применяемая модель ГР в виде диполя Герца, ток которого описывается неслучайной функцией, не учитывает пространственную протяженность ГР и неопределенность формы СА, а фрактальная модель не отвечает требованию конструктивности, обладая вычислительной сложностью при восстановлении в точке наблюдения фрактальной структуры разряда, которая не является информативной для широкого круга практических задач. Указана целесообразность синтеза математической модели СА в спектральном базисе Фурье, учитывающей в среднем априорную неопределенность в форме обрабатываемых сигналов, положение пространственно протяженных произвольно ориентированных линейных ГР и высоту точки наблюдения для дискретных значений частот.

Проведен анализ известных методов оценивания параметров СА и установлено:

- наибольший интерес для практического применения и исследований представляют одноpunktовые методы пассивной обработки СА в ближней зоне;

- описанные одноpunktовые методы пассивной обработки СА в ближней зоне не учитывают в комплексе неопределенность формы СА, пространственную протяженность и ориентацию ГР, подъем точки наблюдения на определенную высоту, наличие шумов наблюдения.

Проведен анализ статистических методов, предназначенных для обнаружения сигналов и оценки параметров с учетом различного количества априорной информации, в результате которого сделан вывод, что целесообразно проводить совместное обнаружение на основе критерия Неймана-Пирсона и максимально-правдоподобное оценивание вектора параметров СА.

Наличие априорной неопределенности относительно потенциальных помех наблюдения показывает целесообразность разработки алгоритма адаптации при многопараметрическом оценивании СА в базисе Фурье.

Во второй главе рассматриваются вопросы, посвященные оптимальной

обработке СА в спектральном базисе Фурье. Разработана математическая модель СА, которая учитывает неопределенность в форме обрабатываемых сигналов на основе предлагаемого стохастического описания спектра токового момента ГР с помощью нормированных независимых случайных величин χ_n и ψ_n , нормальность которых подтверждается натурными исследованиями:

$$m_c(j\omega_n) = \sqrt{\frac{d_s(\omega_n)N}{2}} (\chi_n + j\psi_n), \quad n=1, \dots, N,$$

где $d_s(\omega_n)$ - дискретный спектр мощности токового момента ГР, включающий информацию о длине линейного разряда l , N - количество отсчетов, необходимое для полного описания СА. Пространственная протяженность ГР отображается совокупностью излучающих ЭМП отрезков длиной l/Γ , равномерно расположенных вдоль линейного ГР, одинаково ориентированных в пространстве и имеющих одинаковые токовые моменты $m_c(j\omega_n)$. Количество аппроксимирующих отрезков Γ выбирается с учетом требуемой точности представления СА и выполнимости модельных представлений диполя Герца для каждого излучателя.

Параметры пространственной ориентации заложены в квазидетерминированной составляющей модели СА, использующей вектор $L(\alpha, \beta) = \|\sin\alpha \cos\beta, \sin\alpha \sin\beta, \cos\alpha\|^\Gamma$, определяющий проекции линейного ГР на координатные оси, и матрицы $F_e(j\omega_n, \rho_\gamma, \varphi_\gamma, z_\gamma, z_r)$ и $F_h(j\omega_n, \rho_\gamma, \varphi_\gamma, z_\gamma, z_r)$, описывающие трассы распространения ЭМП для каждой из Γ проекций излучателей с учетом высоты точки наблюдения z_r и полученные для плоской модели Земли с бесконечной проводимостью без учета влияний атмосферы и ионосферы, где $P_\gamma = \|\rho_\gamma, \varphi_\gamma, z_\gamma, \alpha, \beta, l\|$ - координаты γ -го излучателя. Необходимая связь элементов и функций от элементов вектора P_γ с вектором оцениваемых параметров СА $P = \|\rho, \varphi, z_d, \alpha, \beta, l\|$ (рис. 1), включающим информацию о координатах центра линейного ГР, отражена следующими выражениями:

$$\rho_\gamma = \sqrt{\rho^2 + \frac{2\rho l \sin\alpha}{\Gamma} (\cos\varphi \cos\beta + \sin\varphi \sin\beta) \left(\gamma - \frac{\Gamma+1}{2}\right) + \frac{l^2 \sin^2\alpha}{\Gamma^2} \left(\gamma - \frac{\Gamma+1}{2}\right)^2},$$

$$\sin\varphi_\gamma = \rho \sin\varphi / \rho_\gamma + l \sin\alpha \sin\beta / (\rho_\gamma \Gamma) [\gamma - (\Gamma+1)/2],$$

$$\cos\varphi_\gamma = \rho \cos\varphi / \rho_\gamma + l \sin\alpha \cos\beta / (\rho_\gamma \Gamma) [\gamma - (\Gamma+1)/2], \quad z_\gamma = z_d + l \cos\alpha / \Gamma [\gamma - (\Gamma+1)/2].$$

Результирующее поле в точке наблюдения представляется в виде суперпозиции ЭМП от Γ диполей Герца

$$\begin{aligned} E(j\omega_n, \mathbf{P}) &= \left\| e_x(j\omega_n, \mathbf{P}), e_y(j\omega_n, \mathbf{P}), e_z(j\omega_n, \mathbf{P}) \right\|^T = \\ &= m_c(j\omega_n) \sum_{\gamma=1}^{\Gamma} F_e(j\omega_n, \rho_\gamma, \varphi_\gamma, z_\gamma, z_r) L(\alpha, \beta), \\ H(j\omega_n, \mathbf{P}) &= \left\| h_x(j\omega_n, \mathbf{P}), h_y(j\omega_n, \mathbf{P}), h_z(j\omega_n, \mathbf{P}) \right\|^T = \\ &= m_c(j\omega_n) \sum_{\gamma=1}^{\Gamma} F_h(j\omega_n, \rho_\gamma, \varphi_\gamma, z_\gamma, z_r) L(\alpha, \beta), \quad n = 1, \dots, N, \end{aligned} \quad (1)$$

где $E(j\omega_n, \mathbf{P})$ и $H(j\omega_n, \mathbf{P})$ - соответственно электрические и магнитные векторы принимаемого в точке наблюдения ЭМП.

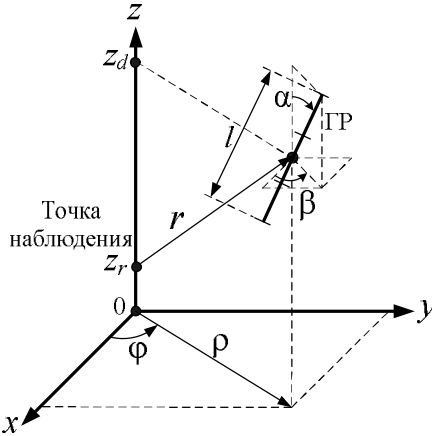


Рис. 1

Синтезирован алгоритм совместного обнаружения на основе критерия Неймана-Пирсона и многопараметрического оценивания СА на фоне шумов в базе Фурье с использованием разработанной математической модели.

Максимально-правдоподобная оценка вектора \mathbf{P} определяется решением экстремальной задачи:

$$\hat{\mathbf{P}} = \arg \max_{\tilde{\mathbf{P}} \in \mathfrak{Z}} \lambda(\mathbf{Y}, \tilde{\mathbf{P}}), \quad (2)$$

где \mathfrak{Z} - непрерывное или дискретное множество оцениваемых параметров СА, $\tilde{\mathbf{P}}$ - гипотетические па-

раметры, $\lambda(\mathbf{Y}, \tilde{\mathbf{P}})$ - натуральный логарифм условного отношения правдоподобия, $\mathbf{Y}(j\omega_n) = \| y_i(j\omega_n), i = 1, \dots, m \|^T = \theta S(j\omega_n, \mathbf{P}) + \Xi(j\omega_n)$ - комплексный спектр многомерного сигнала на входе устройства обработки, θ - параметр обнаружения, $S(j\omega_n, \mathbf{P}) = \left\| \begin{matrix} k_e(j\omega_n) E(j\omega_n, \mathbf{P}) \\ k_h(j\omega_n) H(j\omega_n, \mathbf{P}) \end{matrix} \right\|$ - наблюдаемый спектр СА, $k_e(j\omega_n)$ и $k_h(j\omega_n)$ - коэффициенты передачи датчиков ЭМП, образующих систему для приема m компонент СА (1), случай $m = 6$ соответствует приему всех компонент, $\Xi(j\omega_n) = \| \xi_i(j\omega_n), i = 1, \dots, m \|^T$ - гауссовские независимые

шумы наблюдения со спектром мощности g_{Ξ} . С учетом особенностей предложенной математической модели спектр мощности СА представляется эрмитовой матрицей специального вида:

$$\begin{aligned} G_S(j\omega_n, P) &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} M \left\{ S(j\omega_n, P) S(j\omega_n, P)^H \right\} = \\ &= d_s(\omega_n) \sum_{\gamma=1}^{\Gamma} Q(j\omega_n, P_{\gamma}) \sum_{\gamma=1}^{\Gamma} Q(j\omega_n, P_{\gamma})^H = W(j\omega_n, P) W(j\omega_n, P)^H, \end{aligned}$$

где $\|\bullet\|^H$ - операция эрмитова сопряжения, $W(j\omega_n, P) = \|w_i(j\omega_n, P), i=1, \dots, m\| = \sqrt{d_s(\omega_n)} \sum_{\gamma=1}^{\Gamma} Q(j\omega_n, P_{\gamma})$ - вектор, характеризующий

СА, $Q(j\omega_n, P_{\gamma}) = \|q_i(j\omega_n, P_{\gamma}), i=1, \dots, m\| = \left\| \begin{matrix} k_e(j\omega_n) F_e(j\omega_n, \rho_{\gamma}, \phi_{\gamma}, z_{\gamma}) L(\alpha, \beta) \\ k_h(j\omega_n) F_h(j\omega_n, \rho_{\gamma}, \phi_{\gamma}, z_{\gamma}) L(\alpha, \beta) \end{matrix} \right\|$ - вектор, учитывающий квазидетерминированную составляющую модели СА.

Используя свойства матрицы $G_S(j\omega_n, P)$ и известную лемму об изменении обратной матрицы при малоранговой модификации, в процессе вывода уравнения для натурального логарифма условного отношения правдоподобия исключаем вычислительно затратную операцию обращения матриц, а полученное равенство $\det\{g_{\Xi} I + G_S(j\omega_n, P)\} = g_{\Xi}^{m-1} [g_{\Xi} + \text{tr}\{G_S(j\omega_n, P)\}]$, где I - единичная $m \times m$ -матрица, $m \geq 2$, $\det\{\|\bullet\|\}$ и $\text{tr}\{\|\bullet\|\}$ - определитель и след матрицы, позволяет отказаться от операции вычисления определителей. Натуральный логарифм условного отношения правдоподобия представляется:

$$\lambda(Y, \tilde{P}) = \sum_{n=1}^N \left\{ Y(j\omega_n)^H \frac{G_S(j\omega_n, \tilde{P})}{g_{\Xi} [g_{\Xi} + \text{tr}\{G_S(j\omega_n, \tilde{P})\}]} Y(j\omega_n) - \ln [g_{\Xi} + \text{tr}\{G_S(j\omega_n, \tilde{P})\}] \right\} + N \ln g_{\Xi}. \quad (3)$$

Обнаружение ведется на основе решающего правила по критерию Неймана-Пирсона, при котором значения статистики обнаружения сравниваются с порогом h_b , выбираемым из условия равенства вероятности события

$$\max_{P \in \mathfrak{S}} \lambda(Y, \tilde{P}) \geq h_b \Big|_{\theta=0} \quad \text{заданному значению ВЛГ: } \max_{P \in \mathfrak{S}} \lambda(Y, \tilde{P}) \stackrel{d_0}{<} h_b, \text{ где } d_0 \text{ и } d_1$$

d_1 - решения об отсутствии или наличии СА в обрабатываемой реализации $Y(j\omega_n)$.

Синтезированный алгоритм совместного обнаружения и многопараметрического оценивания СА может быть реализован устройством, структурная

схема которого приведена на рис. 2, где фильтр имеет передаточную характеристику $\frac{W(j\omega_n, \tilde{\mathbf{P}})^H}{\sqrt{g_{\Xi} [g_{\Xi} + \text{tr}\{G_S(j\omega_n, \tilde{\mathbf{P}})\}]}} N$, ПУ – пороговое устройство, $\tilde{\mathbf{P}}_i \in \mathfrak{Z}$ – набор векторов просматриваемых значений параметров СА, обеспечивающий требуемую точность оценивания при определенных аппаратно-временных затратах.

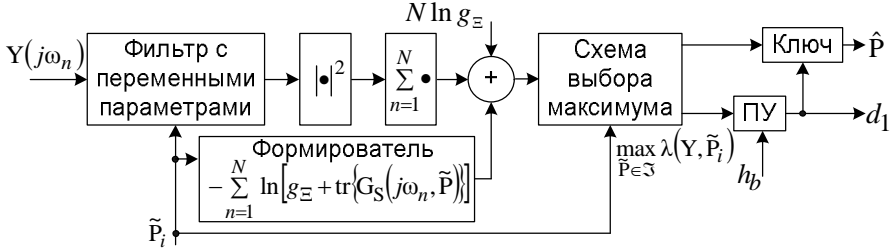


Рис. 2

Разработана методика анализа алгоритма обнаружения СА на основе решающей статистики (3), состоящая из следующих шагов.

1. Задаются необходимые исходные данные.

2. Находятся собственные векторы матрицы $\frac{G_S(j\omega_n, \tilde{\mathbf{P}})}{g_{\Xi} [g_{\Xi} + \text{tr}\{G_S(j\omega_n, \tilde{\mathbf{P}})\}] N}$:

$$X_i(j\omega_n, \tilde{\mathbf{P}}) = \|x_{ip}(j\omega_n, \tilde{\mathbf{P}}), p=1, \dots, m\|, \quad x_{ip}(j\omega_n, \tilde{\mathbf{P}}) = \frac{k_p g_{\Xi} [g_{\Xi} + \text{tr}\{G_S(j\omega_n, \tilde{\mathbf{P}})\}] N}{w_p^*(j\omega_n, \tilde{\mathbf{P}})},$$

$$\sum_{p=1}^m k_p = 0 \quad \text{для } i=1, \dots, m-1, \quad x_{ip}(j\omega_n, \tilde{\mathbf{P}}) = \frac{w_p(j\omega_n, \tilde{\mathbf{P}})}{g_{\Xi} [g_{\Xi} + \text{tr}\{G_S(j\omega_n, \tilde{\mathbf{P}})\}] N} \quad \text{для}$$

$i=m$, где $(\bullet)^*$ - операция комплексного сопряжения.

3. Из линейно независимых столбцов формируется вспомогательная матрица

$$V(j\omega_n, \tilde{\mathbf{P}}) = \|b_{ip}(j\omega_n, \tilde{\mathbf{P}}), i, p=1, \dots, m\| = \|X_1^T(j\omega_n, \tilde{\mathbf{P}}) \quad X_2^T(j\omega_n, \tilde{\mathbf{P}}) \quad \dots \quad X_m^T(j\omega_n, \tilde{\mathbf{P}})\|^{-1}.$$

4. Вычисляется характеристическая функция суммы независимых случайных величин $\sum_{n=1}^N Y(j\omega_n)^H \frac{G_S(j\omega_n, \tilde{\mathbf{P}})}{g_{\Xi} [g_{\Xi} + \text{tr}\{G_S(j\omega_n, \tilde{\mathbf{P}})\}] N} Y(j\omega_n)$:

$$\varphi_N(\theta, j\nu, P, \tilde{P}) = \frac{1}{\prod_{n=1}^N [1 - j2\nu\sigma(\theta, \omega_n, P, \tilde{P})^2]},$$

$$\text{где } \sigma(\theta, \omega_n, P, \tilde{P})^2 = \frac{\text{tr}\{G_S(j\omega_n, \tilde{P})\}^2}{2g_{\Xi}^2 [g_{\Xi} + \text{tr}\{G_S(j\omega_n, \tilde{P})\}]^2} \times \\ \times \left[\theta d_s(\omega_n) \left| \sum_{i=1}^m b_{mi}(j\omega_n, \tilde{P}) \sum_{\gamma=1}^{\Gamma} q_i(j\omega_n, P_{\gamma}) \right|^2 + g_{\Xi} \sum_{i=1}^m |b_{mi}(j\omega_n, \tilde{P})|^2 \right].$$

5. Определяется функция ПРВ статистики (3) без учета квазидетерминированного слагаемого $N \ln g_{\Xi} - \sum_{n=1}^N \ln [g_{\Xi} + \text{tr}\{G_S(j\omega_n, \tilde{P})\}]$:

$$w_s(\theta, P, \tilde{P}, \lambda) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_N(\theta, j\nu, P, \tilde{P}) \exp\{j\nu\lambda\} d\nu.$$

6. Определяются качественные характеристики обнаружителя:

$$p_f = \int_{h_b}^{\infty} w_s(\theta, P, \tilde{P}, \lambda) d\lambda \Big|_{\theta=0} - \text{ВЛТ и } p_m = \int_{-\infty}^{h_b} w_s(\theta, P, \tilde{P}, \lambda) d\lambda \Big|_{\theta=1} - \text{вероятность}$$

пропуска сигнала, где h_b - значение порога с учетом квазидетерминированного слагаемого.

Для проведения анализа предельной погрешности алгоритма многопараметрического оценивания СА получены уравнения для границ Рао-Крамера. На их основе исследовано влияние границ частотного диапазона принимаемых СА на погрешность оценивания параметров. Установлено, что существуют отдельные участки спектра, наиболее сильно влияющие на величины ошибок оценивания параметров СА. Проведенные исследования показали зависимость положения этих наиболее информативных участков спектра в принимаемом диапазоне частот от конкретных значений элементов вектора P , что позволяет проектировать радиотехнические устройства с более узкой полосой, предназначенные для оценивания параметров СА в определенных диапазонах значений. Когда априори неизвестные оцениваемые параметры СА лежат в широких пределах, целесообразно использовать весь доступный диапазон частот, что делает в этом случае «широкополосные» методы более предпочтительными по сравнению с «узкополосными» при оценивании вектора параметров СА. По этой же причине в условиях действия сосредоточенных по спектру помех целесообразно проводить адаптивную обработку СА.

Отмечен однотипный -возрастающий или убывающий характер изменения величин ошибок оценивания всех параметров СА при однотипном изменении

влияющего фактора, в данном случае значений границ обрабатываемого частотного диапазона.

Третья глава посвящена обработке СА в условиях статистической априорной неопределенности. Разработан алгоритм адаптации при многопараметрическом оценивании СА в базисе Фурье на фоне стационарных сосредоточенных по спектру помех:

$$\hat{P} = \arg \max_{P \in \mathcal{Z}} \tilde{\lambda}(Y, \tilde{P}), \quad n = 1, \dots, N, \quad (4)$$

где в выражении для натурального логарифма условного отношения правдоподобия

$$\tilde{\lambda}(Y, \tilde{P}) = \sum_{n=1}^N \left[Y(j\omega_n)^H \frac{\hat{G}'_{\Xi}(j\omega_n)^{-1} G_S(j\omega_n, \tilde{P}) \hat{G}'_{\Xi}(j\omega_n)^{-1} N^{-1}}{1 + W(j\omega_n, \tilde{P})^H \hat{G}'_{\Xi}(j\omega_n)^{-1} W(j\omega_n, \tilde{P})} Y(j\omega_n) - \right. \\ \left. - \ln \det \{ \hat{G}'_{\Xi}(j\omega_n) + G_S(j\omega_n, \tilde{P}) \} + \ln \det \{ \hat{G}'_{\Xi}(j\omega_n) \} \right] \quad (5)$$

в качестве матрицы спектра мощности помех и шумов на основании адаптивного байесовского подхода используется ее асимптотически эффективная и состоятельная периодограммная оценка $\hat{G}'_{\Xi}(j\omega_n) =$

$$= \left\| \hat{g}'_{\Xi ip}(j\omega_n), i, p = 1, \dots, m \right\| = \frac{1}{vN} \sum_{l=1}^v \Xi'_l(j\omega_n) \Xi'_l(j\omega_n)^H, \text{ полученная усреднением}$$

по v классифицированным реализациям спектра помех и шумов с учетом коэффициентов передачи датчиков ЭМП $\Xi'(j\omega_n) = \left\| \xi'_i(j\omega_n), i = 1, \dots, m \right\|^T$ по методу Бартлетта, позволяющему получать робастные спектральные оценки в условиях статистической априорной неопределенности. Объем обучающей выборки v устанавливается с учетом свойств конкретной помеховой обстановки, в частности интервала стационарности помех. Данный подход позволяет эффективно осуществлять оценивание параметров СА на фоне сосредоточенных по спектру помех с достаточно четкими спектральными линиями, что показано в четвертой главе на основании экспериментальных данных.

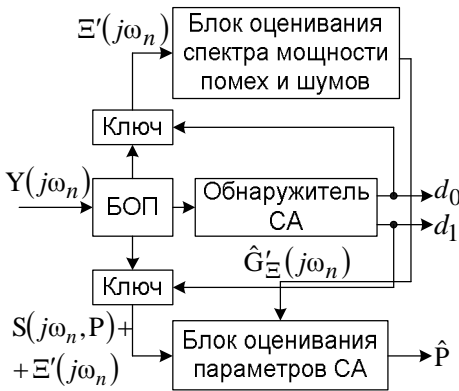


Рис. 3

новки, в частности интервала стационарности помех. Данный подход позволяет эффективно осуществлять оценивание параметров СА на фоне сосредоточенных по спектру помех с достаточно четкими спектральными линиями, что показано в четвертой главе на основании экспериментальных данных.

Предложенный алгоритм может быть реализован устройством, структурная схема которого приведена на рис. 3, где БОП – блок

оперативной памяти.

Для уменьшения вычислительных затрат на обнаружение СА, что актуально в случае затяжных грозовых явлений со значительным изменением пространственного положения грозовых облаков, и стабилизации ВЛТ, что важно при реализации необслуживаемых модулей устройства обработки и в условиях редких гроз, проведена разработка инвариантного относительно ПРВ шумов с фиксированной формой СПМ для ВЛТ алгоритма обнаружения СА математико-эвристическим методом. При разработке за основную особенность принята сложная импульсная форма обнаруживаемых СА, а также то, что шумы в каналах приема статистически независимы. Решающая статистика обнаружения:

$$s_d = \sum_{i=1}^m \sum_{p=i}^m \sum_{n=0}^{M-1} \left[\frac{|\hat{r}_{cip}(n\Delta t)|}{\hat{\sigma}_i \hat{\sigma}_p} \right]^h, \quad (6)$$

где M – число дискретных отсчетов во временной реализации входных сигналов, $\Delta t \leq \frac{\pi}{\omega_h}$ – шаг дискретизации по времени, ω_h – верхняя граничная частота обрабатываемых сигналов. Взятие модуля от оценок элементов корреляционной матрицы входных сигналов

$$\hat{r}_{cip}(n\Delta t) = \frac{1}{M} \sum_{l=0}^{M-1} \{y_{ti}(l\Delta t) - \hat{m}_i\} \{y_{tp}[(l+n)\Delta t] - \hat{m}_p\},$$

где $\hat{m}_i = \frac{1}{M} \sum_{l=0}^{M-1} y_{ti}(l\Delta t)$, $\hat{\sigma}_i^2 = \frac{1}{M-1} \sum_{l=0}^{M-1} [y_{ti}(l\Delta t) - \hat{m}_i]^2$ – оценки математических ожиданий и дисперсий входных сигналов обнаружителя $y_{ti}(l\Delta t)$, $i = 1, \dots, m$, $p = i, \dots, m$, позволяет оценивать величину корреляции независимо от знаков сигналов, а показатель степени $h > 0$ определяет чувствительность статистики (6) к импульсным процессам тем выше, чем больше h .

ВЛТ обнаружителя, построенного на основе центрированной и нормированной статистики s_d , не зависит от мощности шумов. Статистика (6) при фиксированной форме СПМ статистически независимых в каналах приема шумов определяется только значениями M , k , Δt и h и, следовательно, является инвариантной относительно ПРВ шумов с фиксированной формой СПМ для ВЛТ.

Методом численного имитационного моделирования показано, что обнаружитель, построенный на основе статистики (6), имеет выигрыш в среднем по вероятности правильного обнаружения в 2,6 раза по сравнению с обнаружителем на основе схемы фильтр-квадратор-интегратор, где фильтр обладает прямоугольной амплитудно-частотной характеристикой в полосе сигналов и неизменными параметрами. Моделирование проводилось для биэкспонен-

циальной модели Брюса-Голда тока ГР при приеме на фоне гауссовских независимых шумов наблюдения, значения параметров СА принимались равномерно распределенными в диапазонах $\rho = 1-100$ км, $\varphi = -180...180^\circ$, $z_d = 0,5-1,5$ км, $\alpha = -90...90^\circ$, $\beta = -90...90^\circ$, $l = 1-3$ км. Значения порогов обнаружения выбирались с учетом обеспечения ВЛТ не более 0,01 при изменении интенсивности шумов в 1,3 раза.

Рассмотрены реализации алгоритмов оптимальной и адаптивной обработки, инвариантного обнаружения СА на базе современных цифровых сигнальных процессоров фирмы «Analog Devices» и «Texas Instruments». Показано, что разработанные алгоритмы обработки СА в состоянии функционировать в режиме реального времени на базе рассмотренных процессоров и алгоритм инвариантного обнаружения требует в 6,0-9,8 раза меньше элементарных (сложение и умножение) вычислительных операций, чем оптимальный алгоритм обнаружения в базе Фурье, а синтезированный алгоритм многопараметрического оценивания СА в базе Фурье требует в 5,3-10,2 раза меньше элементарных вычислительных операций на реализацию, чем импульсный *ЕН*-метод на основе фильтров антитрасс.

В четвертой главе приводятся методики и результаты проведенных экспериментальных исследований полученных алгоритмов. Для проведения натурных испытаний была разработана и реализована установка обработки СА с удаленным доступом (рис. 4), с помощью которой были накоплены базы данных СА и помех, используемые в работе.

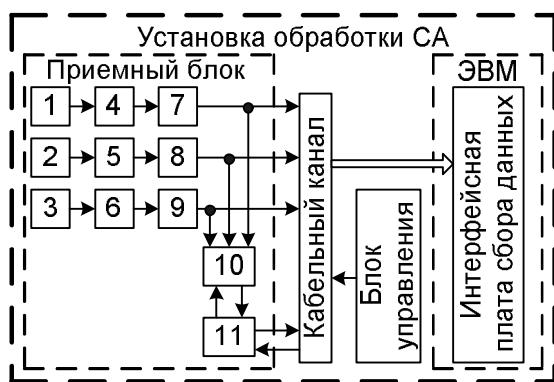


Рис. 4

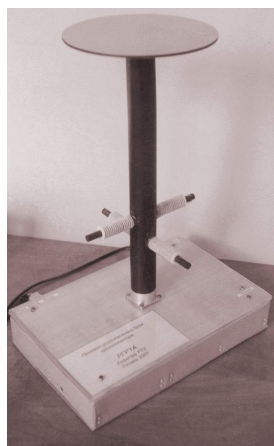


Рис. 5

Установка состоит из ЭВМ, блока управления, кабельного канала и приемного блока СА в полосе частот 0,1-35,5 кГц (рис.5), в состав которого входят: 1-ненаправленный датчик вертикальной компоненты электрического поля

конденсаторного типа; 2 и 3 - датчики ортогональных составляющих горизонтальной компоненты магнитного поля рамочного типа; 4, 5, 6 - согласующие и усилительные устройства; 7, 8, 9 - полосовые фильтры; 10 - обнаружитель; 11 - устройство синхронизации и управления.

Методом численного имитационного моделирования показано, что погрешность оценивания дальности до ГР облако-Земля в диапазоне значений 1-100 км широко известного и используемого импульсного *ЕН*-метода на основе фильтров антитрасс в 1,5-11 раз больше, чем синтезированного алгоритма многопараметрического оценивания СА (2), (3) при равных условиях. Анализ погрешности оценивания только параметра ρ обуславливался отсутствием доведенных до практической реализации алгоритмов, предусматривающих совместное оценивание дополнительных параметров СА.

Методом натурального эксперимента на основе 35 записей СА от одной грозы, в которые входили отобранные с помощью алгоритма многопараметрического оценивания сигналы от ГР облако-Земля, показана эффективность синтезированного алгоритма (2), (3) по оцениванию дальности до ГР с использованием альтернативного метода оценивания по тем же экспериментальным данным - импульсного *ЕН*-метода на основе фильтров антитрасс. Расхождение оценок, полученных данными методами, составило 2,6 км, значения выборочных средних - соответственно: 10 и 8,5 км.

Проведено исследование эффективности оценивания дальности до ГР на фоне стационарных сосредоточенных по спектру помех с использованием алгоритма адаптации при многопараметрическом оценивании СА (4), (5), которое позволяет сделать вывод, что применение данного подхода приводит к повышению точности оценивания в 1,1-2,0 раза по сравнению с вариантом без адаптации. На основе экспериментальных данных установлено, что количество обучающих реализаций, необходимое для преодоления априорной неопределенности относительно характеристик помех, составляет порядка 10.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы.

1. На основе натуральных исследований и известных представлений о распространении ЭМП разработана математическая модель СА в спектральном базисе Фурье, включающая стохастическую и квазидетерминированную составляющие и учитывающая важные при обработке СА особенности: неопределенность в форме сигналов, положение и пространственную протяженность произвольно ориентированных линейных ГР, высоту точки наблюдения.

2. Синтезирован оптимальный алгоритм совместного обнаружения и многопараметрического оценивания СА на фоне шумов в базисе Фурье с использованием разработанной математической модели, позволяющий проводить оценивание параметров сигналов, полностью характеризующих положение линейных пространственно протяженных произвольно ориентированных ГР, повысить точность их оценивания и реализуемость по сравнению с

известными алгоритмами.

3. Разработана методика анализа синтезированного алгоритма обнаружения СА в базе Фурье.

4. Получены уравнения, описывающие границы Рао-Крамера для алгоритма многопараметрического оценивания СА, и на их основе исследовано влияние границ частотного диапазона принимаемых сигналов на погрешность оценивания параметров. Установлено, что существуют некоторые отдельные участки спектра, наиболее сильно влияющие на величины ошибок оценивания параметров СА.

5. Предложен алгоритм адаптации при оценивании вектора параметров СА в базе Фурье на фоне сосредоточенных по спектру помех, обладающих интервалом стационарности, на порядок большим, чем длительность принимаемых сигналов, позволяющий повысить точность оценивания параметров СА. На основе экспериментальных данных установлено, что количество обучающих реализаций, необходимое для преодоления априорной неопределенности относительно характеристик помех, составляет порядка 10.

6. Разработан алгоритм обнаружения СА на фоне шумов с фиксированной формой СПМ, инвариантный относительно ПРВ шумов, позволяющий снизить вычислительные затраты на обнаружение и обеспечивающий постоянство ВЛТ.

В приложения помещены: список сокращений и условных обозначений, выражения для производных, используемых при анализе алгоритма многопараметрического оценивания СА, и акты о внедрении результатов диссертационной работы.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Орлов В.В. Определение влияния фильтра высоких частот на характеристики сигналов в грозолокации// Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании: Тезисы докладов 7-й ВНТК. - Рязань: РГРТА, 2002. - С. 75-77.

2. Паршин Ю.Н., Орлов В.В. Адаптивное подавление помех в грозолокации// Радиолокационная техника 2004: устройства, станции, системы. Программа конференции и тезисы докладов НПК.-Муром: МЗРИП, 2004.-С.20-21.

3. Паршин Ю.Н., Орлов В.В. Определение расстояния до грозового разряда в спектральном базисе// Авиация и космонавтика-2004: Тезисы докладов 3-й МНТК. - М.: МАИ, 2004. - С. 16.

4. Орлов В.В. Модель токового момента в задаче локации грозовых разрядов в базе Фурье// Информационный подход в естественных, гуманитарных и технических науках: Материалы МНК. Ч. 2. - Таганрог: ТРГУ, 2004. - С. 69-70.

5. Орлов В.В. Определение местоположения грозовых разрядов на основе обработки сигналов атмосфериков в базе Фурье//Биотехнические, медицин-

ские и экологические системы и комплексы 2004: Тезисы докладов 17-й ВНТК студентов, молодых ученых и специалистов. - Рязань: РГРТА, 2004. - С. 92-93.

6. Орлов В.В. Спектральная модель электромагнитного поля грозовых разрядов в точке наблюдения// Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: Материалы 13-й МНТК. - Рязань: РГРТА, 2004. - С. 179-180.

7. Паршин Ю.Н., Ксендзов А.В., Орлов В.В. Методы оптимизации пространственных структур радиосистем// Информационно-телекоммуникационные технологии: Тезисы докладов ВНТК. - Сочи: МЭИ (ТУ), 2004. - С. 80-82.

8. Паршин Ю.Н., Орлов В.В. Анализ эффективности оценивания дальности до грозовых разрядов в зависимости от рабочей полосы частот// Методы и устройства формирования и обработки сигналов в информационных системах: Межвуз. сб. научн. тр. - Рязань: РГРТА, 2004. - С. 41-47.

9. Паршин Ю.Н., Орлов В.В., Бобровников Р.А. Адаптивное подавление помех в грозолокации// Методы и устройства передачи и обработки информации: Межвуз. сб. научн. тр. - СПб.: Гидрометеиздат, 2004. - Вып. 6. - С. 167-173.

10. Паршин Ю.Н., Орлов В.В. Пассивная пространственно-спектральная радиолокация грозовых разрядов// Радиолокационное исследование природных сред: Сб. научн. тр. – СПб.: Гидрометеиздат, 2005. - Вып.5. - С. 529-535.

11. Орлов В.В. Совместное обнаружение и оценивание параметров сигналов атмосфериков// Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: Материалы 14-й МНТК. - Рязань: РГРТА, 2005. - С. 191-192.

12. Паршин Ю.Н., Орлов В.В. Многопараметрическое оценивание сигналов атмосфериков в спектральной области// Вестник РГРТА. - Рязань: РГРТА, 2006. - Вып.17. - С. 26-31.

13. Паршин Ю.Н., Орлов В.В. Многопараметрическая обработка сигналов от грозовых разрядов в спектральном базисе Фурье// Авиация и космонавтика-2006: Тезисы докладов 5-й МНТК. - М.: МАИ, 2006. - С. 97.

Орлов Вячеслав Викторович

Алгоритмы многопараметрической обработки
сигналов атмосфериков в спектральном базисе Фурье

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 29.03.07. Формат бумаги 60x84 1/16.
Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 2000.

Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Отпечатано в НПЦ «Информационные технологии»
г. Рязань, ул. Островского, 21/1. Тел.: (4912) 98-69-84.