

На правах рукописи

ДУБРОВИН НИКОЛАЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**АЛГОРИТМЫ ПАССИВНОЙ ПЕЛЕНГАЦИИ ИСТОЧНИКОВ
РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ КОРОТКОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА**

Специальность: 05.12.14 – «Радиолокация и радионавигация»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2012

Работа выполнена на кафедре «Радиолокация и радионавигация»
Московского авиационного института (национального исследовательского
университета)

Научный руководитель: Гаврилов Константин Юрьевич, доктор
технических наук, Московский авиационный
институт (национальный исследовательский
университет), декан факультета
«Радиоэлектроника летательных аппаратов»
МАИ

Официальные оппоненты: Юдин Василий Николаевич, доктор
технических наук, профессор, Московский
авиационный институт (национальный
исследовательский университет), профессор

Лузинов Владимир Александрович,
кандидат технических наук, ЗАО «Радий ТН»
старший научный сотрудник

Ведущая организация: ФГУП «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга»

Защита состоится «25» декабря 2012 года в 10:00 на заседании
диссертационного совета Д 212.125.03 при Московском авиационном
институте по адресу: 125993 г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
авиационного института.

Автореферат разослан « » ноября 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

д.т.н., доцент

Сычёв М. И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

В коротковолновом (КВ) диапазоне радиоволн (частоты 3...30 МГц) имеется большое многообразие источников радиоизлучений (ИРИ). Это мобильные системы радиосвязи наземного, авиационного и морского базирования, станции передачи метеопрогнозов, системы дипломатической связи, системы для передачи связи мобильных подразделений специального назначения и др.

Следует отметить, что современные КВ радиокommunikационные системы стали достойной альтернативой спутниковой и сотовой систем связи в районах, где использование последних либо невозможно, либо экономически не целесообразно. Кроме того, КВ системы являются, как правило, автономными, обеспечивая независимость от местной коммуникационной инфраструктуры.

В системах КВ радиосвязи применяются узкополосные сигналы АМ, FM, сигналы с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ) с шириной спектра до 100 кГц. Используемые мощности передатчиков составляют от 0,01 до 10 кВт, а дальность радиосвязи доходит до нескольких тысяч километров.

Для решения различных гражданских, поисковых, антитеррористических и военных задач весьма актуальными являются задачи мониторинга КВ диапазона с целью обнаружения, классификации (распознавания), пеленгации и определения местоположения различных ИРИ в этом диапазоне радиоволн. Многими российскими и зарубежными производителями выпускаются комплексы контроля радиоизлучений и пеленгования ИРИ в КВ диапазоне. Одной из важнейших характеристик таких комплексов является эксплуатационная точность пеленгования ИРИ, которая определяет многие другие характеристики данного комплекса или системы в целом – это точность определения местоположения ИРИ (при

использовании метода триангуляции или пеленгации в двух плоскостях), возможность радиоподавления, радиоперехвата и др. При этом в качестве метода пеленгации используется корреляционно-интерферометрический метод.

Анализ характеристик существующих комплексов радиоконтроля и пеленгования для КВ диапазона – «РДС-16К», «АРК-НП1», «Rohde & Schwarz DD01A», «KRP-KW8M» и др. – показывает, что среднеквадратическая ошибка (СКО) пеленгации находится в пределах 0,25...5 град. и в значительной степени зависит от вида и размеров антенной системы. Существенное влияние на точность пеленгации оказывает также длительность обработки сигнала, которая для различных комплексов пеленгования находится в пределах 0,1...10 мс. Требование снижения длительности обрабатываемого сигнала обусловлено использованием сигналов с ППРЧ, для которых работа на одной частоте может длиться менее 10 мс. Использование многоэлементной антенной системы с числом антенн более 10 и разнесение их на расстояние до 50...100 м позволяет повысить точность пеленгации, однако существенно снижает мобильность и время развертывания комплекса.

Таким образом, при разработке новых или модернизации существующих комплексов пеленгования КВ диапазона весьма актуальной является задача оптимизации вида и размеров антенной системы (с точки зрения числа и расположения отдельных антенн), обеспечивающих заданную точность пеленгования при минимальных размерах и числе антенн. При этом следует учитывать, что расположение отдельных антенн на большой площади в значительной степени зависит от условий конкретного места развертывания – наличия зданий и построек, неровностей грунта, свойств почвы и т.д. Не менее важным является также выбор и оптимизация алгоритма обработки сигнала с учетом влияния погрешностей измерений и обработки сигнала, вносимых на всех этапах приема. Комплексный подход к разработке алгоритма пеленгации, одновременно учитывающий

конфигурацию антенной системы и все погрешности обработки сигнала, позволяет повысить инструментальную точность пеленгации, приблизив ее к потенциально достижимой.

Цель работы

Разработка оптимальных и квазиоптимальных алгоритмов пеленгации ИРИ КВ диапазона, позволяющих достичь наивысшую точность пеленгации с учетом особенностей конкретной местности развертывания антенной системы, а также обеспечивающих возможность измерения дальности до ИРИ при однопозиционном и стационарном расположении комплекса пеленгования.

Задачи работы

1. Синтез оптимального алгоритма пеленгации ИРИ, представленного в виде модели узкополосного случайного процесса, на основе метода максимального правдоподобия (ММП).
2. Расчет потенциальной точности пеленгации на основе неравенства Крамера-Рао.
3. Анализ источников погрешностей определения пеленга ИРИ в реальных комплексах пеленгования.
4. Проведение натурного эксперимента по пеленгации ИРИ КВ диапазона для определения инструментальной точности пеленгации и сравнения ее с потенциальной.
5. Разработка алгоритмов пеленгации ИРИ с использованием искусственной нейронной сети (ИНС).
6. Анализ работы пеленгатора ИРИ КВ диапазона на основе ИНС и сравнение его с пеленгатором на основе ММП.
7. Разработка алгоритма измерения дальности до ИРИ КВ диапазона при однопозиционном и стационарном расположении комплекса пеленгования с учетом особенностей отражения радиоволн от ионосферы.
8. Проведение натурного эксперимента по измерению дальности до ИРИ КВ диапазона и оценка полученной точности измерений.

Методы исследования

В работе использованы методы математической статистики и теории вероятности, методы статистической радиотехники, методы цифровой обработки сигналов, методы обработки информации с помощью ИНС, методы математического моделирования на ПЭВМ, методы проведения натурного эксперимента с аппаратурой пеленгации ИРИ КВ диапазона.

Научная новизна работы

1. Разработана методика оценки пеленга сигнала ИРИ на основе метода максимального правдоподобия.
2. Получено аналитическое выражение для расчета потенциальной точности пеленгования ИРИ, заданного в виде узкополосного случайного процесса, при произвольном расположении отдельных элементов антенной системы на поверхности земли.
3. Разработана методика обработки измерений пеленга в условиях аномальных выбросов измерений при малом значении отношения сигнал-шум (ОСШ), позволившая существенно увеличить точность измерений пеленга сигнала, приблизив ее к потенциальной.
4. Разработана методика измерения дальности до ИРИ КВ диапазона на основе оценки разности хода лучей, пришедших в точку приема при однократном и двукратном отражении от ионосферы.

Практическая ценность результатов работы

1. Комплекс программ, разработанных на основе синтезированного в работе алгоритма пеленгации, реализован в фазовых пеленгаторах РДС-16К, РДС-8К, РДС-4К КВ диапазона.
2. Методика анализа потенциальной точности позволяет определять на заданной местности расположение точек приема, обеспечивающее наивысшую точность пеленгации.

3. Экспериментальные данные по оценке точности пеленгования, подтверждающие справедливость полученных в работе формул для потенциальной точности пеленгования.
4. Алгоритмы и программы определения пеленга источника радиоизлучений при произвольной конфигурации антенной системы на основе искусственных нейронных сетей.
5. Методика проведения и результаты натурального эксперимента, позволившего определить точность измерения дальности разработанных алгоритмов в условиях многолучевого распространения радиоволн.

Основные положения, выносимые на защиту

1. В комплексах пеленгования источников радиоизлучения (ИРИ) КВ диапазона использование квазиоптимальных алгоритмов пеленгации на основе метода максимального правдоподобия с отбраковкой аномальных измерений позволяет получить точность пеленгации на 10...15% хуже потенциальной, вычисленной на основе неравенства Крамера-Рао.
2. Для существующих ИРИ КВ диапазона при использовании в процессе обработки дополнительно 2...3 гармоник полезного сигнала точность пеленгации может быть увеличена в 1,2...1,5 раза в зависимости от соотношения мощностей основной и дополнительных гармоник.
3. Трехслойная нейронная сеть прямого распространения при оптимизации параметров сети и обучающей выборки реализует алгоритм пеленгации ИРИ, для которого среднеквадратическая ошибка пеленгации уступает потенциально достижимой не более 5%.
4. Разработанная методика оценки дальности до ИРИ, использующая в качестве дополнительного параметра измерения разности хода лучей, позволяет реализовать оценку дальности в условиях, когда измерение угла места прихода радиоволн производится с низкой точностью.

Публикации

По основным результатам выполненных в диссертации исследований опубликовано 4 работы, из них 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ и тезисы докладов на 2-х научных конференциях.

Апробация работы

Материалы диссертационной работы обсуждались на: 9-й Международной конференции и выставке «Цифровая обработка сигналов и ее применение», Москва, 28-30 марта 2007; 3-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь» ИРЭ РАН, 26-30 октября 2009 г.

Объем и структура работы

Диссертационная работа изложена на 114 машинописных страницах и состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка литературы, включая работы автора.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Изложены сведения об источниках радиоизлучения КВ диапазона. Приведен обзор современных комплексов пеленгования КВ диапазона. Обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы. Представлены новые научные результаты, описана практическая ценность результатов работы, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена синтезу и анализу алгоритмов пеленгации. Синтез алгоритма пеленгации проведен на основе метода максимального правдоподобия.

Антенная система комплекса пеленгования состоит из N элементов в виде ненаправленных антенн – точек приема (ТП), расположенных на плоскости с координатами (X_i, Y_i) , $i = \overline{1, N}$ (см. рис. 1).

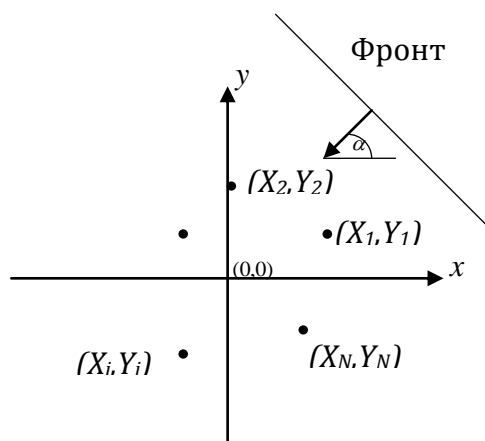


Рис. 1. Расположение пеленгационной системы на плоскости.

Временное описание полезного сигнала имеет вид:

$$s_i(t) = \sum_{m=1}^M a_m \cos(\omega_m(t - \tau_i) + \varphi_m), \quad t \in [0, T_H], \quad (1)$$

где M – число когерентных составляющих; T_H – время наблюдения; a_m – случайные амплитудные множители когерентных составляющих сигнала, имеющие распределение Рэлея и независимые по $m = \overline{1, M}$; φ_m – случайные равномерно распределенные начальные фазы когерентных составляющих, независимые по $m = \overline{1, M}$; ω_m – круговая частота m -й гармоники сигнала;

$$\tau_i = -(X_i \cos(\alpha) + Y_i \sin(\alpha))/c \quad (2)$$

– временные задержки полезного сигнала в i -й ТП, отсчитываемые относительно фазового центра антенной системы $O(0,0)$; c – скорость распространения радиоволн; α – угол прихода сигнала, подлежащий определению.

Для описания наблюдений и полезного сигнала используется представление узкополосного случайного процесса с помощью комплексных амплитуд:

$$\dot{U}_{mi}(t) = b_{mi} e^{j\nu_{mi}}, \quad (3)$$

$$\dot{S}_{mi}(t) = a_m e^{j\varphi_m} e^{-j\omega_m \tau_i}. \quad (4)$$

Синтез алгоритма пеленгации проводится с помощью метода максимального правдоподобия, для которого получено выражение для логарифма отношения правдоподобия (ЛОП):

$$l_m(\alpha) = \frac{|Z_m|^2}{4 \left(1 + \frac{q_0^2}{2}\right)} - \ln \left(1 + \frac{q_0^2}{2}\right), \quad (5)$$

где Z_m – комплексный весовой интеграл:

$$|Z_m|^2 = \left(\frac{T_H}{N_0}\right)^2 \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^N b_{mi} b_{mk} \cos[(v_{mi} + \omega_m \tau_i) - (v_{mk} + \omega_m \tau_k)]. \quad (6)$$

В качестве оценки пеленга используется значение:

$$\hat{\alpha} = \arg \max_{\alpha} l(\alpha), \quad (7)$$

которое находится путем определения глобального максимума ЛОП с помощью численных методов.

На основе неравенства Крамера-Рао получено выражение для потенциальной точности пеленгации:

$$\frac{1}{\sigma_{\hat{\alpha}}^2} = \frac{q_0^4}{N^2} \frac{1}{(4 + 2q_0^2)} h_{ac}(\alpha_0) \sum_{m=1}^M a_m^2 \left(\frac{\omega_m}{c}\right)^2, \quad (8)$$

где

$$h_{ac}(\alpha_0) = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N [(X_i - X_k) \sin \alpha_0 - (Y_i - Y_k) \cos \alpha_0]^2 \quad (9)$$

- множитель антенной системы, зависящий от геометрических свойств антенной системы и истинного пеленга α_0 . В (8) значение $\sigma_{\hat{\alpha}}$ характеризует среднеквадратическую ошибку (СКО) оценки пеленга $\hat{\alpha}$.

$$q_0^2 = \frac{T_H N}{N_0}$$

- нормированное значение отношения сигнал-шум; N_0 – спектральная плотность белого гауссовского шума.

Полученные в работе соотношения (8), (9) использованы для расчетов потенциальной точности пеленгации систем с различной конфигурацией (расположением) приемных антенн: эквидистантная антенная решетка (АР); крест Миллса; кольцевая АР. Особое внимание уделено анализу наиболее популярных на практике кольцевых АР с различным числом колец и точек приема в каждом кольце.

Проведено сравнение потенциальной точности пеленгации с результатами математического моделирования (компьютерного эксперимента), которое показало хорошее согласование экспериментальной и потенциальной точностей пеленгации (отличие менее 20%) при больших значениях ОСШ – более 10 дБ. С уменьшением значения ОСШ (менее 6...10 дБ в зависимости от вида антенной системы) графики имеют сильное расхождение, что связано с появлением аномальных ошибок при моделировании из-за ложных локальных максимумов функции ЛОП.

Глава 2 посвящена исследованию источников погрешностей пеленгации ИРИ, приводящих к отличию потенциальной и реальной точностей пеленгации. Проведен анализ следующих источников погрешностей пеленгации ИРИ:

1. Погрешности измерения амплитуд b_{mi} ($i=1, \dots, N$) комплексных огибающих наблюдаемого процесса.
2. Погрешности измерения фаз ν_{mi} ($i=1, \dots, N$) комплексных огибающих наблюдаемого процесса.
3. Погрешности измерения фазовых сдвигов $\omega\tau_i$ ($i=1, \dots, N$) сигнала в точках приема, отсчитываемые относительно фазового центра антенной системы.

Причинами отклонения фазовых сдвигов от расчетных значений являются:

- 1) погрешности измерения координат фазовых центров (X_i, Y_i) точек приема, $i = 1, \dots, N$;
- 2) погрешности измерения длин соединительных кабелей точек приема и центрального пункта обработки информации.

Наибольший вклад в погрешность пеленгации ИРИ вносят погрешности измерения фаз. В работе показано, что требование обеспечения СКО измерения пеленга не хуже $0,1^\circ$ соответствует требованию к ошибке измерения фазы не хуже $0,3^\circ \approx 0,005$ рад. Это возможно при значениях ОСШ не менее 45 дБ, которое на практике обычно не достигается из-за ограниченности времени наблюдения (накопления сигнала) значениями $T_n = 10^{-5} \dots 10^{-2}$ с.

Для обеспечения такой же точности пеленгации (СКО не хуже $0,1^\circ$) СКО измерения координат фазовых центров ТП и длин соединительных кабелей при отсутствии других составляющих погрешности должна быть не хуже 0,04 м.

Показано, что использование дополнительных гармоник полезного сигнала, приводящее к повышению результирующего значения ОСШ, позволяет при равенстве амплитуд используемых гармоник числом M уменьшить СКО пеленгации в \sqrt{M} раз. В реальных условиях с учетом неравномерности амплитуд гармонических составляющих сигнала для оценки пеленга рекомендуется использовать не более $M=3 \dots 4$ гармоник. При этом СКО пеленгации может быть уменьшена примерно на 30...50 %. Использование гармоник, отличающихся по мощности от основной более, чем на 4...6 дБ, нецелесообразно, так как приводит к повышению точности пеленгации менее, чем на 10 %.

В работе для оценки реальной точности пеленгации разработанного алгоритма проведен натурный эксперимент при использовании комплекса пеленгования КВ диапазона, развернутого на полигоне ЗАО «Радий ТН» (г.

Москва, район Солнцево). Антенная система экспериментального полигона с расположением 16-и антенных элементов на участке поверхности, размером 200x146 кв. м, представлена на рис. 2.



Рис. 2. Расположение на карте местности комплекса пеленгования на базе антенно-фидерной системы РДС-16К.

В качестве источника пеленгуемого радиосигнала использовался выносной гетеродин с рабочей частотой 20,12 МГц.

При малых значениях ОСШ (менее 5...10 дБ) реальная точность пеленгации оказывается существенно хуже потенциальной, причем это отличие с уменьшением значения ОСШ возрастает. Причиной этого является появление аномальных измерений, проводимых по локальным (боковым) максимумам функции ЛОП, которые при малых значениях ОСШ могут быть больше основного максимума. С целью уменьшения влияния этого фактора и повышения точности пеленгации в работе предложена модификация метода МП с отбраковкой аномальных измерений. При этом отбраковке (отбрасыванию) подвергаются 5...10 % измерений, имеющих наибольшие отклонения от среднего значения. Предложенный метод позволяет примерно на 10 % повысить точность измерений при малых значениях ОСШ.

Результаты потенциальной (расчетной) и экспериментальной СКО пеленгации в зависимости от значения ОСШ представлены на рис. 3, который иллюстрирует высокую эффективность модифицированного метода МП практически во всем диапазоне значений ОСШ.

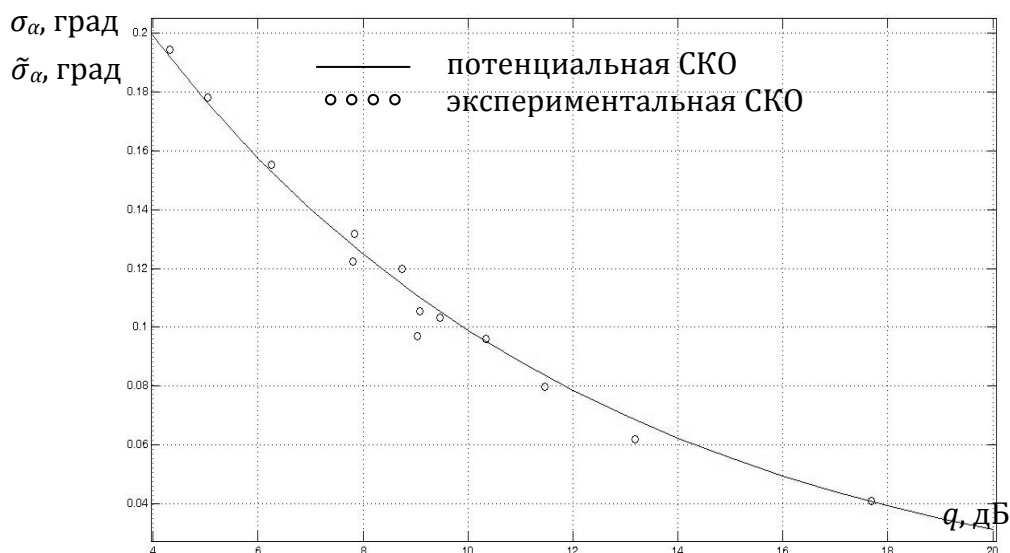


Рис. 3. Зависимость СКО пеленгации от значения ОСШ.

В **Главе 3** разработана методика создания и обучения нейросетевого пеленгатора на основе искусственной нейронной сети (ИНС) типа многослойного перцептрона. В качестве входных признаков ИНС используются измеренные значения относительных фаз полезного сигнала в N точках приема. Показано, что удовлетворительная работа трехслойного ИНС-пеленгатора (с одним скрытым слоем) возможна в случае, когда его обучение производится на интервале углов, составляющем некоторую часть окружности. Это условие связано с необходимостью отсутствия разрывов в аппроксимируемой функции зависимости пеленга от фазовых сдвигов в ТП.

Создание, обучение и тестирование рассмотренной ИНС проведены в среде MATLAB. При обучении использовались «зашумленные» измерения и для уменьшения СКО пеленгации обученной ИНС проводилась оптимизация таких параметров, как число нейронов скрытого слоя m_2 , число обучающих образов K_0 и степень «зашумленности» обучающих выборок (значение ОСШ q^2). Наилучшие показатели качества работы ИНС-пеленгатора были достигнуты при значениях $m_2 = 300$, $K_0 = 900$ и $q^2 = 31$ дБ, а время обучения на процессоре Intel Core 2 Duo – 2,66 GHz составило 3 мин. 40 с.

Анализ работы ИНС-пеленгатора проводился методом математического моделирования путем оценки СКО пеленга при различных значениях ОСШ и использовании антенной системы типа кольцевой антенной решетки с $N=8$ ТП.

Проведено сравнение ИНС-пеленгатора и ММП-пеленгатора (на основе алгоритма, разработанного в Главе 1), которое показало, что величина среднего значения СКО пеленга (при усреднении по диапазону истинных значений углов пеленга) для первого из них проигрывает около 3...5 %. Величину проигрыша в точности оценки пеленга ИНС-пеленгатора относительно оптимального алгоритма можно уменьшить путем оптимизации параметров сети и множества обучающих образов.

Глава 4 посвящена решению проблемы определения дальности R до ИРИ в КВ диапазоне при использовании однопозиционных измерений с помощью неподвижного комплекса пеленгования. Проведен анализ распространения пространственных радиоволн КВ диапазона, в результате которого получены следующие данные.

1. На земной поверхности существуют области, в которые сигнал от ИРИ поступает после одно- и двукратного отражения от ионосферы. Проведены расчеты размеров таких областей с учетом высоты отражающего слоя H ионосферы и частоты полезного сигнала. Показано, что в точке приема пространственных радиоволн КВ диапазона возможно измерение разности хода ΔR лучей, претерпевших одно- и двукратное отражение, которая вычисляется по формуле

$$\Delta R = 4\sqrt{[H + R_3(1 - \cos(\gamma/2))]^2 + [R_3 \sin(\gamma/2)]^2} - 2\sqrt{[H + R_3(1 - \cos \gamma)]^2 + [R_3 \sin \gamma]^2} \quad (10)$$

где R_3 – радиус Земли; 2γ – угловая мера дуги (в радианах), определяющей расстояние R до ИРИ на поверхности Земли, т.е.

$$R = 2\gamma \cdot R_3. \quad (11)$$

2. Высота отражающего слоя H ионосферы для известного угла места β прихода радиоволн в точку приема, отсчитываемого относительно поверхности земли, и известного значения рабочей частоты f_0 может быть рассчитана путем численного решения уравнения Смита

$$f_0 = f \frac{\sqrt{1 + 3,8(H_B / R_3)}}{\sqrt{\sin^2 \beta + 2(H_B / R_3) \sin^2 \beta + 1,8(H_B / R_3)}} \quad (12)$$

с учетом высотно-частотной характеристики $H_B = H_B(f)$ ионосферы (ионограммы), определяющей зависимость высоты отражающего слоя H_B ионосферы при вертикальном зондировании от частоты f зондирующего сигнала.

3. Для радиоволны, пришедшей в точку приема в результате однократного отражения от ионосферы, возможно измерение угла места β путем нахождения максимума функции ЛОП в двумерной плоскости (α, β) . При этом СКО σ_β измерения угла места, полученная из неравенства Крамера-Рао, определяется соотношением

$$\sigma_\beta = \sigma_\alpha / \sin \beta, \quad (13)$$

где σ_α – СКО измерения пеленга α . Из (13) следует, что для встречающихся на практике значений $\beta \approx 5^\circ \dots 30^\circ$ СКО измерения угла места оказывается хуже СКО измерения пеленга в $2 \dots 12$ раз.

Из геометрического описания распространения пространственных лучей получено соотношение

$$H = R_3 \sin \gamma [\operatorname{tg}(\gamma + \beta) - \operatorname{tg}(\gamma / 2)], \quad (14)$$

которое при измеренных (или вычисленных) значениях H и β позволяет на основании оценки угла γ определить дальность R согласно (11).

В работе рассмотрены три метода оценки дальности до ИРИ:

- метод I – на основе измерения угла места и разности хода лучей;
- метод II – на основе измерения угла места и высоты отражающего слоя ионосферы;
- метод III – на основе измерения разности хода лучей и высоты отражающего слоя ионосферы.

Для реализации вычислений при использовании каждого из указанных методов необходимо численное решение системы двух либо трех нелинейных уравнений в виде (10), (12), (14). Такие вычисления проводились в среде MATLAB. В таблице 1 приведены примеры результатов численных расчетов значений H , γ и R при исходных значениях угла места β и рабочей частоты f_0 .

Таблица 1. Результаты численных расчетов.

Исходные значения		Результат численных расчетов		
Рабочая частота f_0 , МГц	Угол места β , град.	Высота ионосферы H , км	Угол γ , град.	Дальность R , км
10	5	119,72	7,0845	1577,3
	10	122,40	4,925	1096,5
	15	126,3	3,7073	825,367
	20	235	5,0011	1113,4
20	5	236,9	11,154	2483,2
	10	249,8	8,614	1917,8
	15	312,24	7,95	1770,0
	20	544,10	10,022	2231,3

Результаты численных расчетов позволили определить влияние погрешностей измерений значений β , ΔR и H на погрешность оценки

искомой дальности R . Обеспечение относительной СКО измерения дальности около 10 % требует относительных СКО измерения угла места в диапазоне 15...30 % и разности хода лучей в районе 10...25 %. Наибольший вклад в погрешность измерения дальности вносит измерение высоты ионосферы, погрешность которого на практике составляет величину 10...50 %.

Проведен натурный эксперимент по оценке дальности до ИРИ, находящегося на расстоянии 850 км от комплекса пеленгования КВ диапазона с 16-ю антенными элементами (см. рис. 2). Результаты эксперимента показали, что методы I и II имеют близкие по точности характеристики и обеспечивают относительную погрешность измерения дальности в районе 20 %. Отдать предпочтение какому-либо из этих методов нельзя из-за невысокой достоверности истинной дальности до ИРИ (истинное удаление ИРИ от места развертывания комплекса пеленгования известно с точностью $\pm 10\%$). При этом следует отметить, что метод I, в отличие от метода II, позволяет получать оценку дальности в условиях, когда измерение угла места прихода радиоволн проводится с низкой точностью.

Аномальное значение дальности, полученное с помощью метода III (ошибка измерения около 100 %), объясняется тем, что для расчета дальности использовалось измерение только одного параметра – разности хода лучей, а остальные значения – β , H и γ – определялись путем численных расчетов. Меньшее, по сравнению с методами I и II, количество информации, используемой для расчета дальности до ИРИ, привело к получению аномального расчетного значения угла места $\beta = 9,7^\circ$, тогда как его истинное значение примерно равно 23° .

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

Основными результатами диссертации являются:

1. На основе метода максимального правдоподобия проведен синтез алгоритма пеленгации источников радиоизлучения при произвольной конфигурации антенной системы, осуществляющей пассивный прием радиоволн КВ диапазона.
2. С помощью неравенства Крамера-Рао получено аналитическое выражение для потенциальной точности пеленгации. Проведены расчеты потенциальной точности пеленгации антенных систем с различным расположением точек приема.
3. Методом компьютерного моделирования проведен анализ точности пеленгации для различных антенных систем с кольцевым расположением точек приема. Получены результаты сравнения экспериментальной и потенциальной точностей пеленгации.
4. Проведен анализ источников погрешностей пеленгации ИРИ, основными из которых являются ошибки измерений фаз полезного сигнала в точках приема.
5. Показано, что использование дополнительных M гармоник полезного сигнала, приводящее к повышению результирующего значения ОСШ, позволяет уменьшить СКО пеленгации в \sqrt{M} раз. На практике с учетом неравномерности амплитуд гармонических составляющих сигнала целесообразно использование 2...3 дополнительных гармоник, которые позволяют уменьшить СКО пеленгации в 1,2...1,5 раза.
6. Проведен натурный эксперимент пеленгации источников радиоизлучения на испытательном полигоне с 16-и элементной антенной системой, показавший хорошее согласование экспериментальной и потенциальной точностей пеленгации, отличие которых не превышает 10...20%.
7. Разработана модификация метода максимального правдоподобия с отбраковкой аномальных измерений при вычислении пеленга источников радиоизлучения. Предложенный метод позволяет

примерно на 10% повысить относительную точность измерений при малых (менее 5...10 дБ) значениях ОСШ.

8. Разработана методика создания и обучения нейросетевого пеленгатора на основе ИНС типа многослойного персептрона. Проведена оптимизация параметров ИНС – числа нейронов скрытого слоя, числа обучающих образов, значения ОСШ при формировании обучающих образов, обеспечивающих минимальное значение СКО оценки пеленга. Методом компьютерного моделирования показано, что точность ИНС-пеленгатора оказывается хуже потенциальной не более чем на 3...5%.
9. Проведен анализ распространения пространственных радиоволн КВ диапазона, показавший возможность определения дальности до ИРИ с помощью однопозиционной неподвижной системы пеленгации. Предложен новый метод измерения дальности до источников радиоизлучения в КВ диапазоне, основанный на совместном измерении угла места и разности хода лучей, претерпевших одно – и двукратное отражение от ионосферы.
10. Проведен натурный эксперимент по оценке дальности до источников радиоизлучения с помощью комплекса пеленгования с 16-ю антенными элементами. Показано, что рассмотренные в работе методы позволяют измерить дальность до источника радиоизлучения в КВ диапазоне с относительной точностью 20% (в эксперименте удаление до источника составляло 850 км).

Список публикаций по теме диссертации

1. Гаврилов К.Ю., Дубровин Н.А. Пеленгация источника некогерентного радиосигнала методом максимального правдоподобия // 9-я Международная конференция и выставка «Цифровая обработка сигналов и ее применение», 28-30 марта 2007, г. Москва, Россия. Выпуск IX-1, с. 232-236.

2. Гаврилов К. Ю., Дубровин Н. А. Экспериментальное исследование точности пассивной пеленгации источника радиоизлучения // Информационно-измерительные и управляющие системы, т. 7, № 1, 2009. С.42-48.
3. Дубровин Н.А. Применение высокочувствительных активных антенн в комплексах пеленгования КВ диапазона // Антенны, 2008, вып. 3(130), с. 21-25.
4. Дубровин Н. А. Измерение дальности до источников радиоизлучений КВ диапазона пассивным локатором при многолучевом распространении радиоволн // Тезисы докладов 3-ей Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь» ИРЭ РАН, 26-30 октября 2009 г., с. 208-213.

Патенты и авторские свидетельства

1. Дубровин Н. А. Никишов А.В., Никишов Д.В., Ражев А. Н., Гандурин В. А. Воздушная система связи (приемный пул) // Патент на полезную модель № 73141, 2008.
2. Дубровин Н. А. Никишов А.В., Никишов Д.В., Ражев А. Н., Гандурин В. А. Воздушная система связи (передающий пул) // Патент на полезную модель № 73140, 2008.
3. Дубровин Н. А. Никишов А.В., Никишов Д.В., Ражев А. Н., Гандурин В. А. Устройство пассивного обнаружения целей // Патент на полезную модель № 73108, 2008
4. Дубровин Н. А. Никишов А.В., Никишов Д.В., Ражев А. Н., Гандурин В. А. Бортовой комплекс системы связи // Патент на полезную модель № 73139, 2008.