

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.396

Каирхан
Шынгыс

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В ПРИЕМНОЙ МНОГОЛУЧЕВОЙ
АНТЕННОЙ РЕШЕТКЕ С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ
ПОМЕХ

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра техники и технологии

по специальности 1-39 81 03

«Информационные радиотехнологии»

_____ Ш. Каирхан

Научный руководитель
Козлов Сергей Вячеславович
доктор технических наук, доцент

Минск 2018

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования — приемная многолучевая антенная решетка.

Предмет исследования — алгоритмы функционирования приемной многолучевой антенной решетки (МЛАР) с пространственной компенсацией помех (ПКП).

Целью диссертационного исследования является обоснование одноэтапного алгоритма обработки сигналов в приемной многолучевой антенной решетке с пространственной компенсацией помех.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1) анализ особенностей построения и обработки сигналов в приемных многолучевых антенных решетках средств радиомониторинга.

2) разработка математической модели обработки сигналов в приемных МЛАР с суммарно-разностной обработкой и компенсацией помех.

3) исследование углочастотных характеристик лучей МЛАР с суммарно-разностной обработкой и компенсацией помех и эффективности применения адаптивных МЛАР в условиях сложной радиоэлектронной обстановки.

4) разработка рекомендации по практическому применению алгоритмов обработки сигналов в приемных МЛАР средств радиомониторинга.

В процессе диссертационных исследований использовались методы теорий адаптивных антенн, линейной фильтрации, компьютерного моделирования и статистической обработки результатов экспериментальных исследований.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время требования к системам радиомониторинга в части достоверного обнаружения источников радиоизлучения (ИРИ), определения их радиотехнических параметров и географических координат существенно возрастают. Система радиомониторинга должна обеспечить надежное функционирование в условиях насыщенной радиоэлектронной обстановки при наличии сотен ИРИ с импульсным, квазинепрерывным и непрерывным излучением в широком (до кругового) секторе работы на дальностях до сотен километров.

Одной из важнейших задач средства радиомониторинга является определение угловых координат источников радиоизлучения. Это позволяет определять географические координаты ИРИ в пространственно-распределенной системе радиомониторинга с использованием триангуляционного метода. В сверхвысококачастотном диапазоне для пространственной селекции ИРИ и определение их угловых координат традиционно используются многолучевые антенные решетки (МЛАР). Направление на источник радиоизлучения определяется с точностью до ширины луча МЛАР при отсутствии функциональной обработки или суммарно разностным методом при наличии функциональной обработки.

В ряде практически важных случаев наряду с полезным сигналом в пределах луча МЛАР системы радиомониторинга присутствуют мощные мешающие сигналы, принимаемые по соседним лучам МЛАР. Эти мешающие сигналы могут затруднить правильное обнаружение и определение угловых координат полезных сигналов. Обеспечение высокой помехоустойчивости МЛАР средств радиомониторинга достигается за счет внедрения оптимальных и квазиоптимальных алгоритмов обработки принимаемых сигналов. К их числу относятся алгоритмы пространственной компенсации помех, воздействующих по боковым и скатам главного лепестка диаграмм направленности основных каналов пеленгатора, и алгоритмы, реализующих современные методы «сверхразрешения» источников радиоизлучения.

К специфике применения алгоритмов пространственной компенсации в МЛАР средств радиомониторинга следует отнести: относительное небольшое 8-16 число приемных элементов МЛАР; широкий, сотни МГц – единицы ГГц требуемый диапазон функционирования. В ряде случаев целесообразно отказаться от реализации двухэтапного алгоритма в пользу одноэтапного, предполагающего разделение заданного диапазона частот на ряд поддиапазонов с формированием векторов весовых коэффициентов

адаптированных приемных каналов для каждого из поддиапазонов. Указанные алгоритмы в известной литературе не исследованы. Это не позволяет обосновывать требования к приемным МЛАР систем радиомониторинга и проводить их конструирование. Это определяет актуальность и практическую значимость диссертационного исследования, направленного на обоснование исследования эффективности алгоритма обработки сигналов в адаптивных многолучевых антенных решетках.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность проблемы, отмечается новизна, формулируется цель и задачи работы, кратко излагается содержание диссертации и основные научные результаты исследований.

В первой главе рассматриваются результаты обзора литературы по теме диссертации, конкретизируются задачи работы, определяется структура методического обеспечения исследований.

В обзоре литературы рассмотрены характерные тенденции развития радиоэлектронных средств и систем. Установлено, что для средств радиолокации в современных условиях характерно расширение ширины спектра зондирующих сигналов до значений десятки-сотни МГц с одновременным увеличением длительности одиночных зондирующих сигналов до десятков-сотен мкс в сочетании с использованием режимов быстрой перестройки несущей частоты. Для средств радиосвязи и радиолиний управления объектами характерно использование режимов программной перестройки несущей частоты с числом скачков до $10^3 \dots 10^4$ имп./с при одновременном увеличении рабочего диапазона частот до сотен МГц. Указанные особенности приводят к высокой вероятности одновременного наличия на входе средства радиомониторинга в общей полосе частот двух и более сигналов РЭС-объектов радиомониторинга.

Вторая глава посвящена разработке математической модели обработки сигналов в приемных МЛАР. Рассматривается цифровая, относительно малоэлементная (с числом элементов $N = 8 \dots 32$) пеленгационная (в одной плоскости) адаптивная МЛАР с ПКП и суммарно-разностной обработкой.

Модель разработана в среде компьютерной математики *MathCad* и позволяет:

рассчитывать математические ожидания и среднеквадратические отклонения оценок пеленгов ИРИ;

рассчитывать мощности сигналов ИРИ на выходах лучей АМЛАР;

визуализировать ДН адаптированных приемных каналов в декартовой (в координатах "азимут – ДН по мощности) и полярной системах координат;

выбрать на основе проведенных расчетов рациональные параметры обработки.

Блок-схема имитационной математической модели приведена на рисунке 1

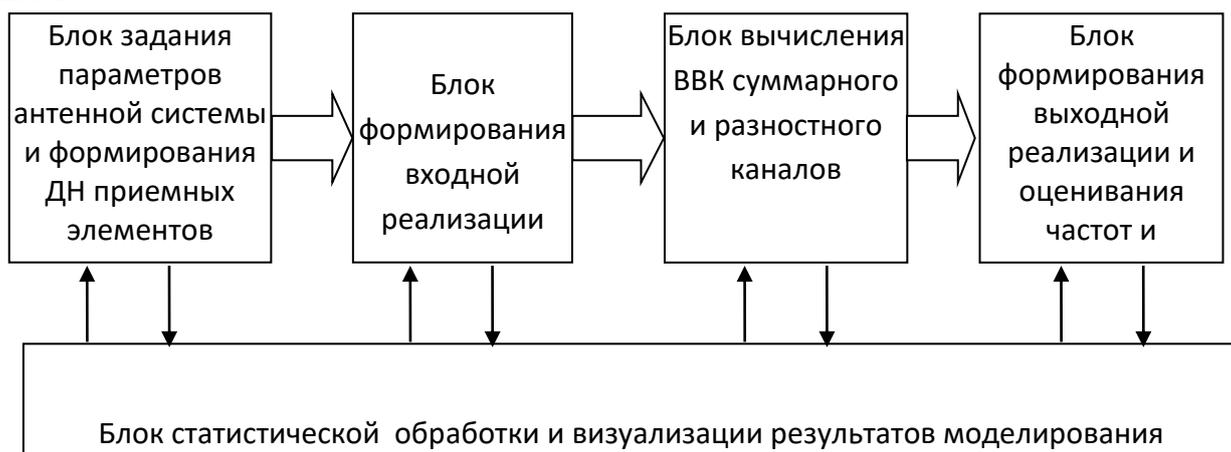


Рисунок 1 - Блок-схема имитационной математической модели

В блоке задания параметров антенной системы и формирования ДН приемных элементов осуществляется расчет координат приемных элементов многолучевой антенной решетки и диаграмм направленности элементов.

В блоке формирования входной реализации осуществляется формирование дискретных отсчетов входной реализации. Мощность внутренних шумов приемных каналов принята равной единице.

В блоке формирования выходной реализации и оценивания частот и пеленгов сигналов в лучах формируются сигналы суммарного и разностного подканала в каждом луче.

В блоке статистической обработки и визуализации осуществляется построение ДН адаптированных приемных каналов и расчет требуемых статистических характеристик

Полученные значения ДН, измеренных пеленгов и результат статистической обработки могут быть выведены на экранные графики и в файл.

В третьей главе приведены результаты исследования углочастотных характеристик лучей МЛАР. Основной целью исследования углочастотных характеристик лучей АМЛАР было выявление закономерностей изменения (смещения) адаптированных лучей от величины отклонения частоты $f_{\text{дд}}$ "полезного" ИРИ от частоты f_0 , на которой выставлены ограничения в алгоритме адаптации. На рисунке 2 в качестве примера приведен вид амплитудной ДН третьего луча АМЛАР (выставленного в направлении $\alpha_{\text{эз}} = -22,5^\circ$) для различных значений несущей частоты (частота выставления ограничений 10 ГГц), позволяющие выявить наличие примерно линейного

смещения максимума луча при смещении частоты ИРИ правее и левее частоты выставления ограничений.

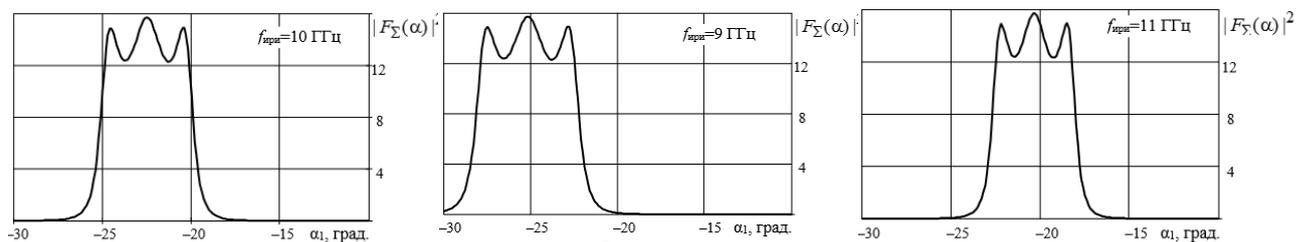


Рисунок 2 - Вид амплитудной ДН третьего луча АМЛАР для различных значений несущей частоты

На рисунке 3 приведено семейство пеленгационных характеристик АМЛАР с $N=8$ приемными элементами для различных частот $f_{\text{ИРИ}}$.

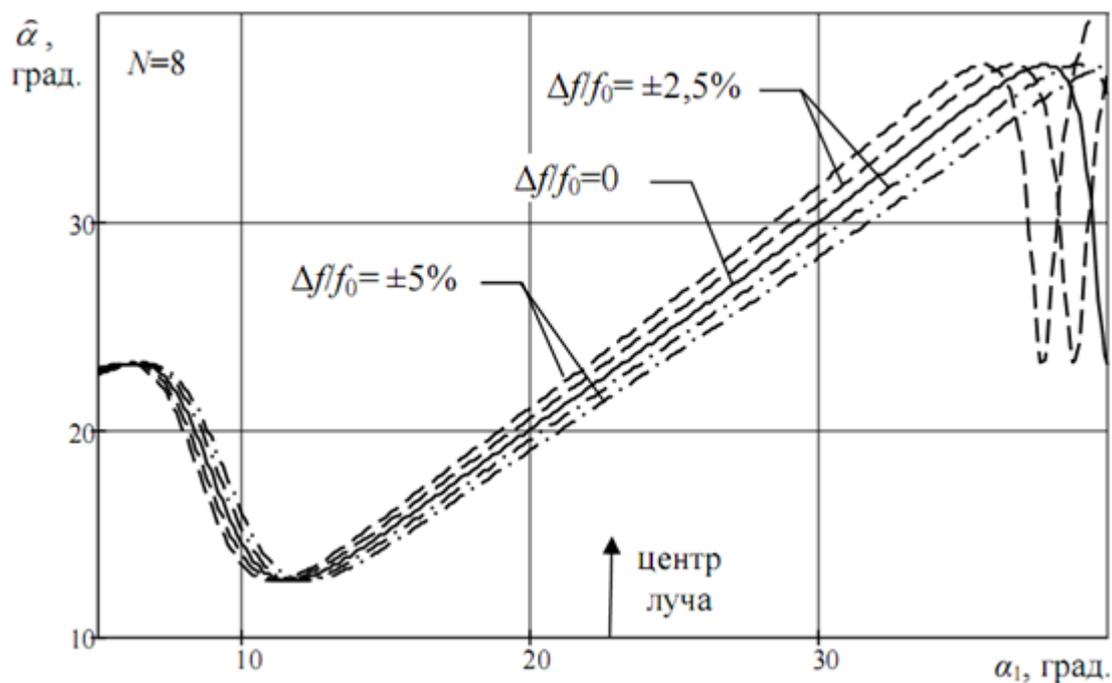


Рисунок 3 - Семейство пеленгационных характеристик для различных значений нормированного отклонения частоты ИРИ от опорной

Полученные результаты позволили сформировать следующие основные закономерности обработки сигналов в адаптивных МЛАР:

при отклонении частоты ИРИ от опорной максимум зависимости отношения сигнал/мешающий сигнал+шум в суммарном канале смещается по углу пропорционально отклонению частоты ИРИ от опорной; при уменьшении частоты ИРИ (увеличении длины волны) формируемые лучи смещаются в направлении увеличения отклонения от нормали;

зависимость систематической ошибки оценивания угловых координат ИРИ от отклонения его частоты от опорной для АМЛАР с ограничениями имеет практически линейный характер;

широкополосность АМЛАР фактически ограничивается величиной отклонения частоты, при которой происходят существенные изменения амплитудной диаграммы направленности приемных элементов АМЛАР.

С учетом полученных закономерностей был проведен сравнительный анализ эффективности использования в средстве радиомониторинга адаптивной и неадаптивной МЛАР. Иллюстративные результаты в виде зависимостей среднеквадратических ошибок определения азимута σ_α и вероятности пропуска $p_{\text{пр}}$ источника радиоизлучения от амплитудных и фазовых ошибок МЛАР для неадаптивной (сплошные кривые) и адаптивной (пунктирные кривые) МЛАР приведены на рисунке 4.

Установлено, что адаптивная МЛАР обеспечивает существенное, примерно в четыре раза, уменьшение вероятности пропуска сигнала ИРИ. Так, для наиболее вероятной ситуации наличия на интервале наблюдения трех сигналов ИРИ вероятность пропуска уменьшается с уровня 0,2 для неадаптивной МЛАР до уровня 0,05 для АМЛАР. Кроме того, для адаптивной МЛАР будет наблюдаться существенное, в 3...3,5 раза уменьшение среднеквадратической ошибки пеленгования с уровня 1,5°...2,5° до уровня 0,5°...0,8°.

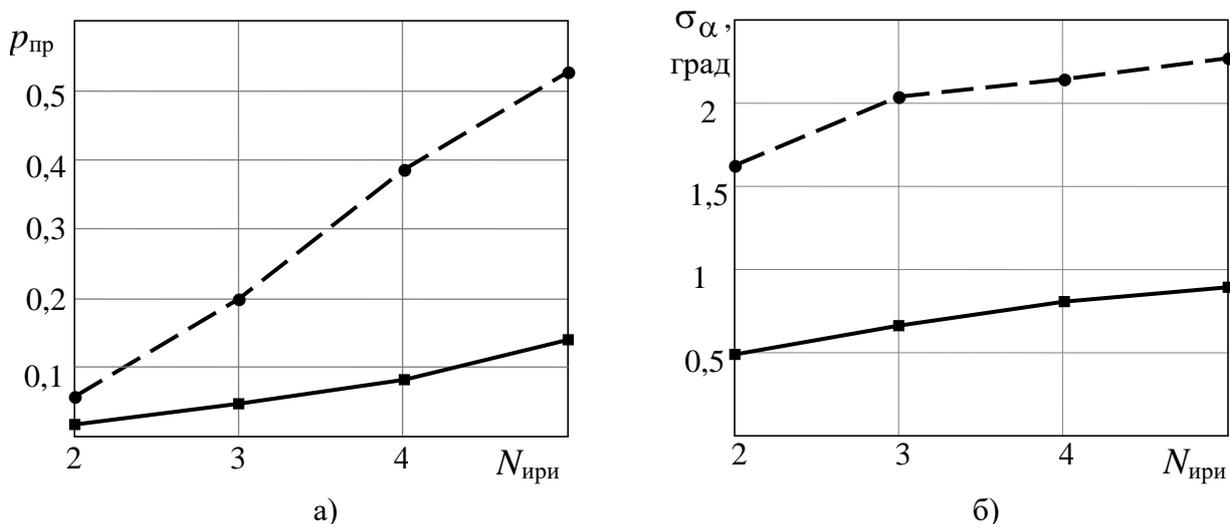


Рисунок 3.9. Зависимости вероятности пропуска сигналов ИРИ (а) и среднеквадратической ошибки определения азимута ИРИ (б) от числа ИРИ на интервале наблюдения для неадаптивной (пунктирные кривые) и адаптивной (сплошные кривые) МЛАР

В четвертой главе были разработаны рекомендации по практическому применению алгоритмов обработки сигналов в приемных МЛАР. Приведена рациональная временная циклограмма функционирования АМЛАР, результаты оценки вычислительных затрат на адаптацию, определена возможная элементная база для реализации процессора адаптивной МЛАР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате диссертационных исследований получены следующие основные результаты.

1. В современных условиях перед средствами радиомониторинга ставится задача обнаружения и определения параметров импульсных, квазинепрерывных и непрерывных сигналов ИРИ с шириной спектра от единиц кГц до сотен МГц при динамическом диапазоне 50...60 дБ и плотности потока сигналов до 10^6 импульсов в секунду. Используемый ранее вариант построения средства радиомониторинга, включающий МЛАР, многоканальное по частоте приемное устройство и набор подключаемых при обнаружении сигнала на выходе канала приемника измерителей, не обеспечивает требуемое качество функционирования. Направлением совершенствования средств РМ на базе МЛАР является повышение ее пространственной избирательности в текущей радиоэлектронной обстановке за счет реализации методов адаптивной пространственной компенсации помех.

2. Обоснован алгоритм функционирования приемных многолучевых антенных решетках с суммарно-разностной обработкой и компенсацией помех, отличающийся от известного операцией коррекции оценок пеленгов в лучах на величину, определяемую разностью оценки частоты доминирующего по мощности сигнала в луче и опорной частоты при обработке и разработана имитационная математическая модели для исследования эффективности обработки сигналов в адаптивных МЛАР при реализации предлагаемого алгоритма функционирования.

3. Проведено исследование углочастотных характеристик лучей МЛАР с суммарно-разностной обработкой и компенсацией помех и эффективности применения адаптивных МЛАР в условиях сложной радиоэлектронной обстановки методом математического моделирования установлены следующие закономерности:

эффективная ширина луча АМЛАР примерно в два-три раза меньше, чем ширина луча МЛАР с той же геометрией; в АМЛАР для перекрытия заданного

углового сектора требуется, как минимум, удвоение числа формируемых лучей в сравнении с МЛАР без адаптивной обработки;

главные лепестки диаграмм направленности лучей в АМЛАР имеют близкую к прямоугольной форму и характеризуются большой крутизной скатов; пространственная избирательность АМЛАР существенно выше, чем у неадаптивной МЛАР;

при отклонении частоты ИРИ от опорной максимум зависимости отношения сигнал/мешающий сигнал+шум в суммарном канале смещается по углу пропорционально отклонению частоты ИРИ от опорной; при уменьшении частоты ИРИ (увеличении длины волны) формируемые лучи смещаются в направлении увеличения отклонения от нормали;

зависимость систематической ошибки оценивания угловых координат ИРИ от отклонения его частоты от опорной для АМЛАР с ограничениями имеет практически линейный характер;

широкополосность АМЛАР фактически ограничивается величиной отклонения частоты, при которой происходят существенные изменения амплитудной диаграммы направленности приемных элементов АМЛАР;

в условиях сложной радиоэлектронной обстановки, характеризующейся одновременном наличии сигналов от трех-пяти ИРИ, адаптивная МЛАР в сравнении с адаптивной, обеспечивает существенное, в три-четыре раза, уменьшение вероятности пропуска сигнала ИРИ и среднеквадратической ошибки их пеленгования.

4. Разработаны рекомендации по практическому применению алгоритмов обработки сигналов в приемных МЛАР средств радиомониторинга. Показано, что адаптивная МЛАР может быть реализована с использованием современной элементной базы – быстродействующих синхронных квадратурных аналогоцифровых преобразователей и программируемых логических интегральных схем с производительность порядка 1000 млн. операций комплексного умножения со сложением в секунду при реализации циклического функционирования с задержкой в выдаче информации в два цикла функционирования.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИИ

1. Каирхан Ш.А., Козлов С.В. Широкополосность адаптивных многолучевых антенных решеток с пространственной компенсацией помех // Материалы 13-й международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций» (РТ-2017). Севастополь: СевГУ. 2017. С. 150.
2. Каирхан Ш.А., Козлов С.В. Углочастотные характеристики каналов многолучевой антенной решетки с суммарно-разностной обработкой и пространственной компенсацией помех // Материалы 25-ой международной научно-технической конференция «радиолокация, навигация и связь» (РЛНС – 2018). Воронеж: ВГУ. 2018. С. 267.
3. Материалы 54-й научно-технической конференции студентов, магистрантов и аспирантов БГУИР (2018 г., г. Минск) <https://www.bsuir.by/>