

ВАСИН Антон Александрович

**Пеленгаторные антенные решетки коротковолнового диапазона  
с высокоточным способом пеленгования**

Специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

Специальность 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

**А в т о р е ф е р а т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Диссертационная работа выполнена на кафедре 406 «Радиофизика, антенны и микроволновая техника» Московского Авиационного Института (национального исследовательского университета).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Пономарев Леонид Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Трошин Георгий Иванович

доктор технических наук, профессор  
Черемисин Олег Павлович

Ведущая организация: 18 ЦНИИ МО РФ

Защита диссертации состоится «29» мая 2012 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.03 в Московском Авиационном Институте (национальном исследовательском университете) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского Авиационного Института (национального исследовательского университета).

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Д 212.125.03, к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_

М.И. Сычев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы диссертации**

Задача определения параметров (направлений прихода и амплитуд) сигналов наземных источников радиоизлучения и осуществление радиомониторинга в коротковолновом (КВ) диапазоне до настоящего времени остается весьма актуальной. Это связано со спецификой сигнально-помеховой обстановки в этом диапазоне и естественными особенностями распространения пеленгуемых сигналов одной частоты, поступающих на вход антенны, как правило, с нескольких направлений в условиях многолучевого распространения волн. Кроме того, к принципиальным особенностям сигнально-помеховой обстановки, в которой приходится функционировать антенным устройствам радиопеленгаторов КВ диапазона, следует отнести существенный уровень помех во всей полосе частот в связи с резким ростом числа радиосредств не только военного, но и гражданского назначения, а также зачастую малый уровень полезного сигнала. Перечисленные выше обстоятельства не позволяют считать задачу радиопеленгования в КВ диапазоне успешно решенной.

Наряду с широко известными пеленгаторными антеннами в последние годы интенсивно развивалось направление пеленгования КВ сигналов с помощью малоразмерных антенных решеток (АР) с цифровой обработкой информации. Для подобных АР в литературе широко употребляется термин «цифровые антенные решетки» (ЦАР). В задачах радиомониторинга в КВ диапазоне определенную сложность представляют вопросы двумерного пеленгования сигналов, поступающих на вход АР с направлений, характеризующихся малым угловым разносом в азимутальной ( $1 - 2^\circ$ ) и достаточно большим разносом в угломестной ( $25 - 40^\circ$ ) плоскостях. В этом случае наблюдается ситуация, когда в пределах главного лепестка диаграммы направленности (ДН) приемной антенны оказывается несколько сигналов, приходящих с различных направлений. Это приводит к тому, что пространственное разделение источников по углу оказывается невозможным из-за малости электрических размеров антенны, что не позволяет эффективно осуществить пространственную фильтрацию принимаемых сигналов даже в адаптивных АР этого диапазона и является еще одним характерным ограничением, присущим процессу пеленгования в диапазоне коротких волн. Также ситуацию пеленгования сигналов с помощью АР в этом диапазоне

осложняет явление многолучевости, которое приводит к сильной корреляции лучей, поступающих на вход АР от одного и того же источника.

Следует отметить, что задача высокоточного определения угловых координат сигналов в условиях многолучевого распространения волн возникает не только в диапазоне коротких волн, но и в гораздо более высокочастотных диапазонах, которые используются, например, в системах спутниковой навигации, системах радиовидения и др. Например, для систем спутниковой навигации характерна ситуация, когда на вход приемного устройства поступает два сигнала – прямой и отраженный от земли. При этом на входе антенны наблюдаются сигналы с сильной корреляцией, которые трудно разделить из-за слабой направленности антенны. Это, в свою очередь, приводит к значительным ошибкам позиционирования.

Значительный вклад в развитие теории пеленгования с использованием антенных решеток в сложной сигнально-помеховой обстановке внесли следующие ученые: Черемисин О.П., Гершман А.Б., Караваев В.В., Дрогалин В.В., Marple S.L. JR, Capon J., Stoica P., Ottersten B., Viberg M., Kaveh M., Friedlander B., Weiss A., Manikas A., Pillai U., Wax M. Также вопросами теории и разработки устройств в этой области занимаются такие специалисты, как Грешилов А.А., Виноградов А.Д., Нечаев Ю.Б., Бобрешов В.Г., Рембовский А.М., Ашихмин А.В, Вертоградов Г.Г., Шевченко Н.М., Хомсков Е.В., Хомсков А.Е., Сычев М.И. и другие.

### **Цель работы**

Целью данной работы является исследование возможности использования малоразмерных антенных решеток (с базой от десятых долей до единиц длины волны пеленгуемых сигналов) для высокоточного (до  $1^\circ$ ) пеленгования сигналов в условиях многолучевого распространения волн в КВ диапазоне, и разработка способа, направленного на повышение точности пеленгования многолучевых сигналов в таких антенных решетках.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие основные задачи:

- проведены обзор и анализ литературы по теории и технике пеленгаторных антенных решеток и методам пеленгования для выяснения требований, предъявляемых к АР радиопеленгаторов КВ диапазона;

- разработан и обоснован способ определения количества, направлений прихода и амплитуд сигналов в условиях многолучевого распространения волн при помощи малоэлементной ЦАР, позволяющий улучшить характеристики существующих пеленгаторов путем анализа введенных сигнальных и шумовых собственных ДН АР<sup>1</sup>;
- проведены численное моделирование и анализ эффективности разработанного способа в ЦАР при условии действия на входе АР пространственного белого шума;
- определено влияние основных характеристик направленности линейных и кольцевых АР КВ диапазона, а также взаимодействия излучателей в этих решетках на эффективность пеленгования с помощью развитого способа;
- установлено влияние ограниченности динамического диапазона приемного устройства на точность определения основных параметров сигналов с помощью разработанного способа, и проанализированы возможные пути устранения этого влияния;
- проведено имитационное моделирование эффективности разработанного способа на 16-элементной пеленгаторной кольцевой антенной решетке (диаметр которой в нижней части диапазона рабочих частот составляет приблизительно 1/3 длины волны пеленгуемых сигналов).

**Методы исследований**, используемые для решения поставленных в диссертации задач, основываются на применении электродинамических методов теории антенн, численных методов математического анализа и моделирования, матричного аппарата линейной алгебры. Численные результаты, приведенные в работе, получены на основе компьютерного моделирования с использованием вычислительных алгоритмов, реализованных в математическом программном пакете MathCad.

---

<sup>1</sup> Сигнальными и шумовыми собственными ДН АР здесь и в дальнейшем для краткости будем называть ДН АР при возбуждении излучателей АР компонентами комплексно-сопряженных сигнальных и шумовых собственных векторов корреляционной матрицы входных сигналов. Отметим, что впервые понятие собственных диаграмм направленности было введено в книге: Монзинго Р.А. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию / Т.У. Миллер, Р.А. Монзинго // М.: Радио и связь, 1986. – 447 с.

**Научная новизна работы** заключается в разработке и теоретическом обосновании высокоточного способа пеленгования узкополосных сигналов КВ диапазона по введенным  $N$  собственным ДН  $N$ -элементной АР с получением системы функциональных уравнений относительно этих ДН с целью определения количества многолучевых сигналов, направлений прихода и амплитуд этих сигналов. Алгоритм эквивалентен введению  $N - 1$  суммарно-разностных ДН АР и определению направлений прихода многолучевых сигналов из условий максимизации и минимизации мощности, принимаемой по этим ДН. С использованием этого алгоритма проведено численное имитационное моделирование эффективности пеленгования для разных отношений сигнал/шум. Установлена степень влияния взаимодействия излучателей в АР КВ диапазона на точность определения параметров многолучевых сигналов. Проанализировано влияние ограниченности динамического диапазона входных цепей приемных устройств на точность пеленгования.

### **Практическая значимость результатов работы**

Проведенные в процессе работы над диссертацией аналитические исследования разработанного способа определения параметров пеленгуемых сигналов и анализ результатов численного и имитационного (на примере 16-элементной кольцевой АР) моделирования показали возможность применения этого способа на практике в радиопеленгаторах КВ диапазона с малоэлементными линейными, кольцевыми и крестообразными АР, функционирующими в условиях многолучевого распространения волн.

### **Реализация и внедрение результатов работы**

Результаты диссертационной работы нашли практическое применение. В частности, полученные теоретические и практические результаты были переданы на предприятие «Специальный технологический центр» (г. Санкт-Петербург) для использования в ОКР по разработке радиопеленгатора КВ диапазона с 16-элементной кольцевой антенной решеткой.

**Достоверность полученных результатов** обуславливается корректностью исходных положений и преобразований при составлении математических моделей сигнально-шумовой обстановки и пеленгаторных антенных решеток и подтверждается в частных случаях совпадением

результатов численного имитационного моделирования с результатами, известными из теории пеленгования, а также с результатами, полученными другими авторами в этой же области.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Разработанный способ пеленгования узкополосных сигналов в КВ диапазоне с использованием малоэлементных антенных решеток с размером апертуры от десятых долей до единиц длин волн, основанный на спектральном разложении корреляционной матрицы сигналов, поступивших на вход  $N$ -элементной АР, по собственным векторам и использовании совокупности собственных диаграмм направленности АР, введение которых эквивалентно формированию  $N - 1$  суммарно-разностных ДН, позволяет определить количество, направления прихода и амплитуды когерентных сигналов в условиях многолучевого распространения волн.

2. Алгоритм, реализующий разработанный способ определения параметров сигналов по собственным диаграммам направленности АР соответствующей конфигурации, позволяет при наличии на входе АР пространственного белого шума, некоррелированного как с полезными сигналами, так и между собой в соседних каналах приема, а также при условии точной оценки корреляционной матрицы пеленговать сигналы при достаточно низком ОСШ ( $\sim 10$  дБ и даже ниже).

3. Неточное задание характеристик направленности (ДН, КНД), а также входного сопротивления излучателей АР приводит к значительным ошибкам (до  $10^\circ$ ) в определении направлений прихода пеленгуемых многолучевых сигналов. Показаны возможные пути компенсации этих ошибок, позволяющие повысить точность определения углов прихода сигналов в малоэлементных АР до  $1^\circ$ .

4. Ограниченность динамического диапазона входных цепей приемного устройства может приводить к появлению интермодуляционных помех, оказывающих существенное влияние на точность пеленгования. Использование высокочастотных фильтров с добротностью порядка  $10^4 \dots 10^5$  на входах элементов АР позволяет ослабить это явление.

## **Апробация результатов работы**

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 19-ой международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо-2009) (Севастополь, 14 – 18 сентября 2009 г.); VIII международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов» (Санкт-Петербург, 15 – 18 сентября 2009 г.); III международной конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» (ARMIMP-2009) (Суздаль, 22 – 24 сентября 2009 г.); III Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь» (Москва, 26 – 30 октября 2009 г.); научно-технической конференции молодых ученых факультета №4 Московского Авиационного Института «Информационные технологии и радиоэлектронные системы» (Москва, 27 апреля 2010 г.); IV Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь» (Москва, 29 ноября – 3 декабря 2010 г.); X международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов» (Самара, 11 – 17 сентября 2011 г.).

## **Публикации**

Основные результаты исследований, проведенных в процессе выполнения диссертационной работы, опубликованы в 14 печатных работах, из них 5 статей в журналах, включенных в перечень ВАК, 6 работ в материалах конференций, 2 тезисов докладов, 1 патент РФ.

## **Структура и объем работы**

Диссертационная работы изложена на 146 машинописных страницах и состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений, списка литературы, четырех приложений. Иллюстративный материал представлен в виде 42 рисунков и 22 таблиц. Список использованных источников включает 100 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** приводится обоснование актуальности разработки пеленгаторных антенных решеток для определения параметров сигналов в КВ диапазоне в области радиомониторинга, сформулированы цели и задачи



исследований, отмечены научная новизна и практическая значимость работы, описана структура диссертации.

**Первая глава** содержит обзор и анализ материалов отечественных и зарубежных источников по тематике, связанной с особенностями построения пеленгаторных антенных решеток КВ диапазона. Отмечается, что несмотря на множество работ, посвященных разработке антенных решеток для целей пеленгования, ряд вопросов по-прежнему остается недостаточно изученным. К их числу следует отнести исследование ошибок определения параметров сигналов (направлений прихода и амплитуд) в зависимости от неточности задания характеристик направленности АР различной конфигурации, в частности кольцевых и крестообразных АР, определение зависимости ошибок пеленгования от отношения сигнал/шум, исследование точности конкретного метода от количества излучателей в ЦАР и определение их минимального числа и ряд других вопросов.

Также в этой главе приводится подробное описание проблем, с которыми приходится сталкиваться специалистам, работающим в области пеленгования в коротковолновом диапазоне, а именно:

- частичная или полная неизвестность структуры и параметров сигнала;
- большой динамический диапазон внеполосных помех и внешних шумов, достигающий 100–120 дБ и более;
- наличие одновременно нескольких однотипных и сильно коррелированных сигналов, приходящих с разных направлений из-за многолучевости распространения пеленгуемых сигналов (рассматривается несколько возможных моделей возникновения этого явления);
- ограниченность размеров антенных устройств радиопеленгатора;
- необходимость высокоточного знания характеристик АР в широком диапазоне длин волн.

Во **второй главе** производится постановка задачи пеленгования при помощи антенных решеток произвольной конфигурации. В случае многолучевого распространения волн задача радиопеленгования  $M$  сигналов с помощью АР может быть поставлена следующим образом. В зависимости от условий распространения радиоволн сигнал от каждого источника радиоизлучения может приходить на вход АР по одному или нескольким путям с различных направлений. Также на входе АР присутствует компонента

пространственного шума, не коррелированного как с сигналом, так и с самим собой по пространству расположения излучателей АР. Таким образом, на входе антенной решетки, представляющей собой  $N$  пространственно разнесенных точек приема, действует  $N$ -элементный вектор пространственной выборки совокупности принятых сигналов и шумов, который в общем случае может быть записан следующим образом:

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{B}(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi}) \mathbf{A}(t) + \mathbf{u}_{\text{ш}}(t), \quad (1)$$

где  $\mathbf{u}(t) = [u_1(t) \ u_2(t) \ \dots \ u_n(t) \ \dots \ u_N(t)]^T$  – вектор-столбец нормированных напряжений, возникающих на входах отдельных излучателей;  $\mathbf{u}_{\text{ш}}(t) = [u_{\text{ш}1}(t) \ u_{\text{ш}2}(t) \ \dots \ u_{\text{ш}N}(t)]^T$  – вектор шумовых напряжений на входах отдельных излучателей;  $\mathbf{A}(t) = [A_1(t) \ A_2(t) \ \dots \ A_M(t)]^T$  – вектор комплексных амплитуд напряженностей электрического поля совокупности  $M$  плоских волн, поступающих на вход АР;  $\mathbf{B}(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi})$  – матрица размерности  $N \times M$ , коэффициенты которой определяются структурой и параметрами АР и сигнально-помеховой структурой пеленгуемых сигналов как  $B_{nm}(\theta_m, \varphi_m) = e^{i\Delta\varphi_{nm}} \dot{f}'_n(\theta_m, \varphi_m) (\bar{\mathbf{e}}_m \cdot \bar{\mathbf{p}}_n)$ , где  $\dot{f}'_n(\theta_m, \varphi_m)$  – значение комплексной диаграммы направленности  $n$ -го излучателя, определяемой с учетом взаимодействия излучателей, в направлении  $(\theta_m, \varphi_m)$ ;  $\bar{\mathbf{e}}_m$  – единичный вектор поляризации  $m$ -ой падающей волны;  $\bar{\mathbf{p}}_n$  – поляризационная диаграмма направленности  $n$ -го излучателя; через  $(\bar{\mathbf{e}}_m \cdot \bar{\mathbf{p}}_n)$  обозначено скалярное произведение векторов;  $\Delta\varphi_{nm} = \frac{2\pi}{\lambda} (\bar{\mathbf{p}}_n \cdot \bar{\mathbf{r}}_{0m})$  – фазовый набег  $m$ -ой волны, приходящей с направления  $(\theta_m, \varphi_m)$ , на  $n$ -й антенный элемент относительно начала системы координат. Направления прихода  $(\theta_m, \varphi_m)$   $M$  радиосигналов должны быть определены на основе обработки пространственно-временной выборки (1) на выходе антенной решетки.

Также в этой главе проводится аналитический обзор некоторых существующих методов пеленгования и сравнение точностных характеристик, обеспечиваемых при использовании того или иного метода. Отмечается, что наиболее перспективными методами пеленгования являются методы, основанные на предварительной оценке и последующем спектральном разложении корреляционной матрицы (КМ) входных сигналов:

$$\mathbf{R} = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}(t) \langle \mathbf{u}(t)^* dt \quad (2)$$

При этом отмечено, что эти методы, как правило, дают оценку угловых координат для  $M$  различных некогерентных сигналов. Поэтому они не вполне пригодны для решения поставленной задачи пеленгования сигналов, среди которых могут быть сильно коррелированные сигналы.

**Третья глава** содержит подробное описание разработанного способа пеленгования сигналов в условиях многолучевого распространения при помощи антенных решеток с линейной, крестообразной и кольцевой геометрией расположения излучателей. Схема реализации предлагаемого способа пеленгования представлена на рис. 1. Для приема сигналов используется антенная решетка 1, состоящая из  $N$  независимых идентичных излучателей. Принятые сигналы разделяют с помощью  $K$  узкополосных фильтров 2, установленных на выходе каждого  $n$ -го ( $n = 1, \dots, N$ ) излучателя. Комплексные амплитуды сигналов  $u_{(c+\omega)n}^k$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$  затем преобразуются с помощью АЦП 4 в цифровые сигналы. Далее стоит блок управления весовыми коэффициентами 5, который реализуется с помощью фазовращателей и усилителей или цифровых устройств. В блоке 6, состоящем из  $K$  сумматоров, происходит суммирование сигналов в каждом  $k$ -ом частотном поддиапазоне.

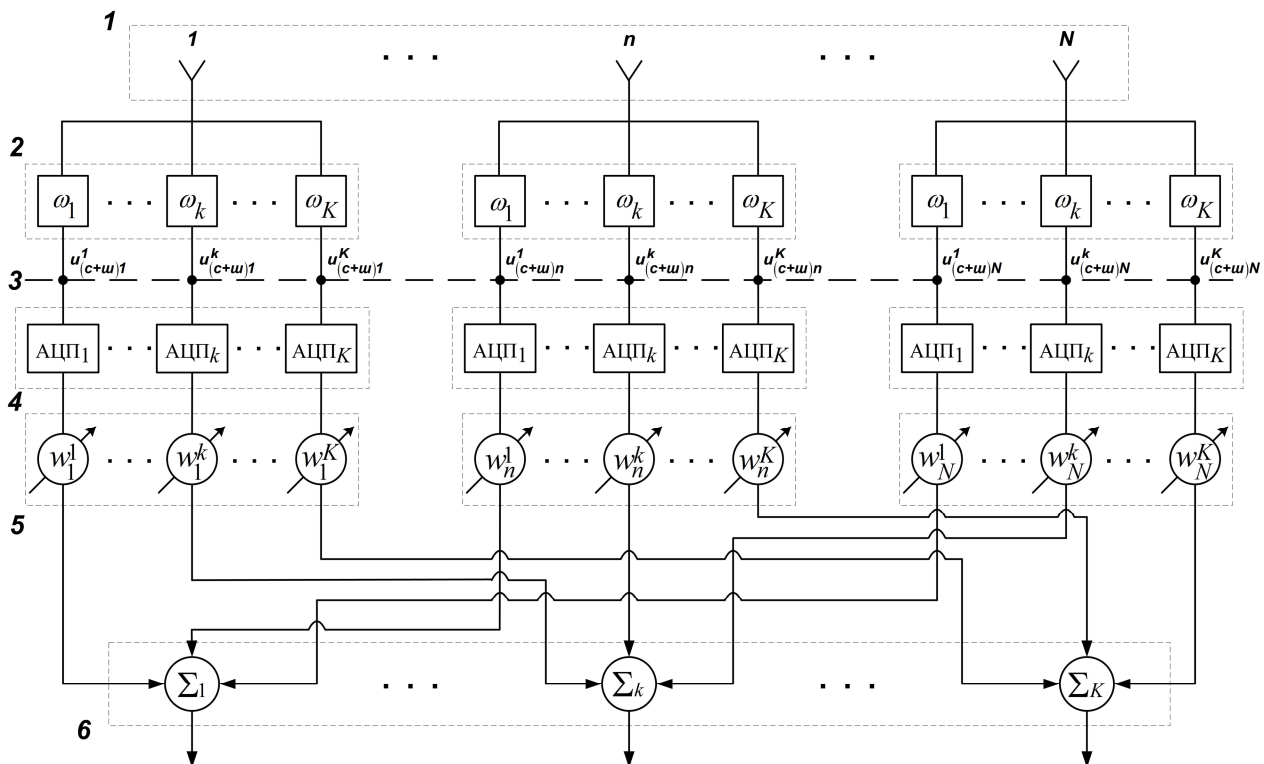


Рис. 1. Схема антенной части пеленгатора

В этой главе исследуются основные закономерности изменения величины и структуры собственных сигнальных и шумовых значений и векторов корреляционной матрицы при наличии произвольного количества когерентных падающих волн с различных направлений и пространственного белого шума. Корреляционная матрица (2) в этом случае для  $k$ -го частотного поддиапазона может быть записана следующим образом:

$$\mathbf{R}_{\text{с+ш}}^k = \mathbf{R}_{\text{с}}^k + P_{\text{ш}}^k \cdot \mathbf{E}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{E}$  – единичная матрица,  $\mathbf{R}_{\text{с}}^k$  – корреляционная матрица сигналов при отсутствии шумов,  $P_{\text{ш}}^k = \frac{1}{T} \int_0^T u_{\text{ш}}^k(t) u_{\text{ш}}^{k*}(t) dt$  – мощность шумовых компонент в полосе приема. В частности, показано следующее:

- сигнальный собственный вектор  $\mathbf{q}_{\text{с}}^k$ , соответствующий наибольшему собственному значению, является единственным вне зависимости от количества  $M$  приходящих лучей и с точностью до нормирующего множителя совпадает с вектором комплексных амплитуд входных напряжений;
- структура шумовых собственных векторов  $\mathbf{q}_{\text{ш}j}^k, j = 1, 2, \dots, N-1$ , соответствующих всем остальным собственным значениям, формально не зависит от уровня отношения сигнал/шум, а определяется соотношением мощностей принятых сигналов на входах излучателей.

Раскладывая корреляционную матрицу комплексных амплитуд сигналов на входах излучателей в каждом частотном поддиапазоне по собственным векторам  $\mathbf{q}_n^k$ , можно ввести понятие сигнальных и шумовых собственных диаграмм направленности приемной антенны, которые определяются как ДН в режиме возбуждения излучателей АР соответствующим комплексно-сопряженным собственным вектором:

$$Fq_{\text{с}}^k(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N \dot{f}_n^k(\theta, \varphi) q_{\text{с}n}^{k*} e^{i\Delta\varphi_n}, \quad (4)$$

$$Fq_{\text{ш}j}^k(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N \dot{f}_n^k(\theta, \varphi) q_{\text{ш}jn}^{k*} e^{i\Delta\varphi_n}, j = 1, \dots, N-1, \quad (5)$$

где  $\Delta\varphi_n = \frac{2\pi}{\lambda}(\bar{\rho}_n \cdot \bar{r}_0)$ ;  $f_n^k(\theta, \varphi)$  – комплексная диаграмма направленности  $n$ -го излучателя, определяемой с учетом взаимодействия излучателей в АР.

С целью определения направления прихода сигналов предлагается определять весовые коэффициенты в схеме на рис. 1 из условия минимизации мощности, принимаемой АР по всем направлениям, которое эквивалентно некоторой взвешенной минимизации принимаемого поля в направлении прихода каждого сигнала. В свою очередь, эта задача сводится к поиску минимума следующего отношения:

$$\text{ОЭФ}^k = \frac{P_{\text{ВЫХ}}^k}{\sum_{n=1}^N w_n^k w_n^{k*}} = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N w_n^k w_m^{k*} \frac{1}{T} \int_0^T u_n^k(t) u_m^{k*}(t) dt}{\sum_{n=1}^N w_n^k w_n^{k*}}, \quad (6)$$

где  $\text{ОЭФ}^k$  – отношение эрмитовых форм,  $P_{\text{ВЫХ}}^k$  – мощность сигналов на выходе  $k$ -го сумматора, принимаемая антенной решеткой из  $N$  излучателей. Установлено, что минимум такого отношения равен минимальному собственному значению корреляционной матрицы (3), величина которого равна мощности принимаемого шума  $P_{\text{ш}}^k$ , и достигается при произвольно выбранном  $j$ -ом собственном шумовом векторе  $\mathbf{q}_{\text{ш}j}^k$ ,  $j=1, \dots, N-1$  матрицы  $\mathbf{R}_{\text{с+ш}}^k$ , т.е. при выборе весовых коэффициентов в соответствии с законом:

$$\mathbf{w}^k \rangle = \mathbf{q}_{\text{ш}j}^{k*} \rangle, j=1, 2, \dots, N-1. \quad (7)$$

При этом суммарная принимаемая по любой шумовой собственной ДН мощность сигнальных компонент становится равной нулю, и направления прихода сигналов могут быть найдены из решения системы функциональных уравнений:

$$u_{\text{с}q_{\text{ш}j}}^k(\theta_m^k, \varphi_m^k) = \sum_{m=1}^M A_m^k F q_{\text{ш}j}^k(\theta_m^k, \varphi_m^k) = 0, j=1, 2, \dots, N-1. \quad (8)$$

Из анализа этой системы уравнений следует, что направления прихода определяются из условия взаимной компенсации сигнальных компонент, приходящих с разных направлений, по каждой из шумовых ДН на выходе сумматоров в схеме на рис. 1.

Для определения значений  $A_m^k$  ( $m = 1, \dots, M$ ) при найденных из (8) угловых координатах используется система из  $M$  уравнений:

$$Fq_c^k(\theta_m^k, \varphi_m^k) = \sum_{n=1}^N \dot{f}_n^k(\theta_m^k, \varphi_m^k) q_{cn}^{k*} e^{i\Delta\varphi_{nm}^k}, \quad m=1, \dots, M. \quad (9)$$

Таким образом, определение параметров (направлений прихода и амплитуд)  $M$  многолучевых сигналов сводится к решению двух систем нелинейных уравнений (8), (9). При этом пеленгование  $M$  сигналов возможно в одной плоскости с помощью решетки, состоящей как минимум из  $M + 1$  излучателей, а пеленгование в пространстве – с помощью АР, число элементов которой не менее  $2M + 1$ .

Отметим, что приведенный алгоритм пеленгования (8), (9) эквивалентен введению  $N - 1$  суммарно-разностных ДН АР в  $(M+1)$ -мерном (в случае пеленгования в одной плоскости) и  $(2M+1)$ -мерном (в случае пеленгования в двух плоскостях) пространстве изменения углов  $\theta$  и  $\varphi$  и определению угловых координат ИРИ из условий максимизации и минимизации мощности сигналов, приходящих с разных направлений и принимаемых по этим ДН (когда количество излучателей превышает минимально необходимое для пеленгования  $M$  когерентных сигналов, возможно нахождение нескольких решений с последующим усреднением).

В этой же главе приводится описание статистического метода, предложенного Черемисиным О.П. и основанного на адаптивном алгоритме максимизации функции правдоподобия оценки параметров пеленгуемых сигналов.

В **четвертой главе** приводится описание алгоритмов пеленгования, позволяющих реализовать предложенный в главе 3 способ. Алгоритмы представлены в виде блок-схем с подробным описанием всех переменных, входящих в них. Результаты численного моделирования получены в предположении наличия на входе АР нормального белого шума при условии точной оценки корреляционной матрицы  $\mathbf{R}_{c+\text{ш}}^k$ . При этом исследуется форма собственных ДН АР для разных ситуаций, в которых меняется количество излучателей и параметры сигналов (направления и амплитуды), поступающих на вход АР. На рис. 2 представлены собственные ДН для случая падения одного сигнала с направления  $\varphi_1 = 35^\circ$  на частоте  $f_1 = 30$  МГц на линейную антенную решетку, состоящую из двух и четырех излучателей, расположенных эквидистантно на расстоянии  $d=\lambda_1/2$  друг от друга. Здесь и далее направления прихода сигналов на рисунках обозначены вертикальными пунктирными линиями.

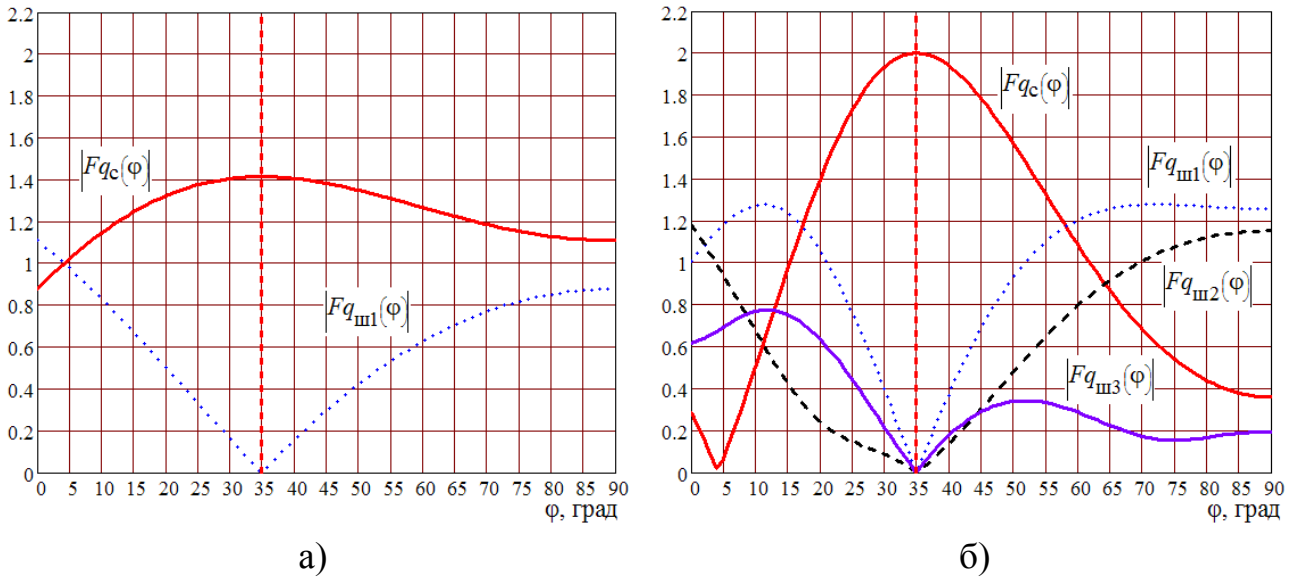


Рис. 2. Амплитудные сигнальная и шумовые собственные ДН линейной АР –  $M = 1, \varphi_1 = 35^\circ$ : а)  $N = 2$ ; б)  $N = 4$

Как видно, в случае одного сигнала собственные шумовые ДН четко выставляют нули в направлении прихода сигнала независимо от количества излучателей. При этом в направлении минимума шумовых ДН наблюдается максимум сигнальной ДН. На следующем рисунке представлена ситуация, когда на вход АР поступает два коррелированных сигнала ( $M = 2$ ) с направлений  $\varphi_1 = 35^\circ$  и  $\varphi_2 = 60^\circ$  как с одинаковыми ( $A_1 = A_2$ ), так и с разными ( $A_1 = 2A_2$ ) амплитудами.

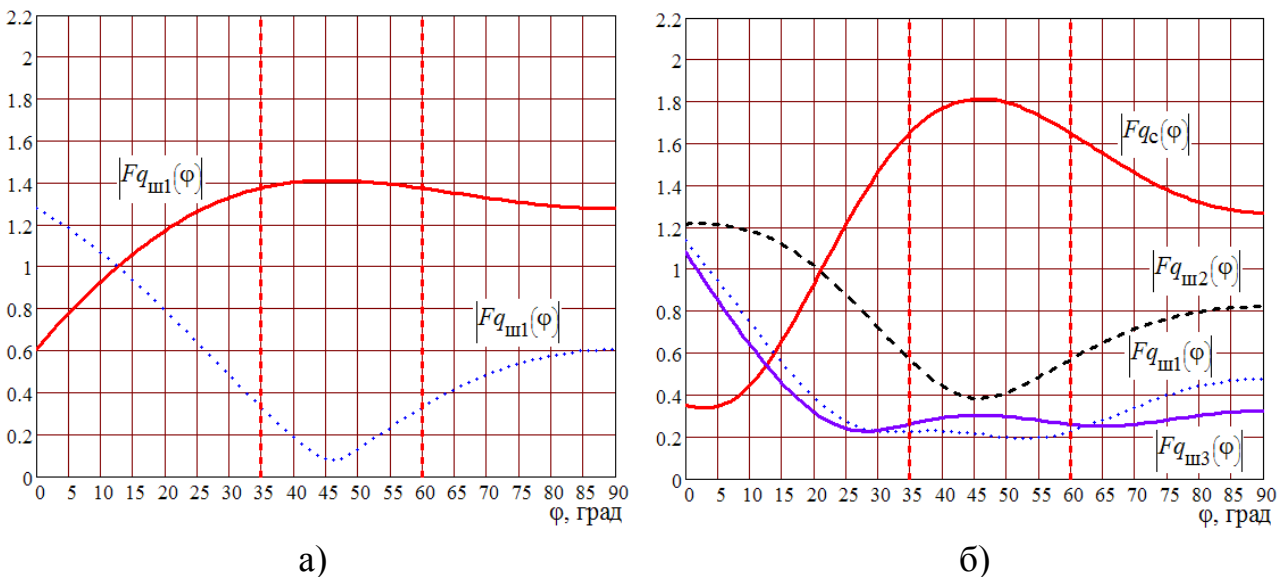


Рис. 3. Амплитудные собственные ДН линейной АР:  $M = 2, \varphi_1 = 35^\circ$  и  $\varphi_2 = 60^\circ$  – а)  $N = 2, A_1 = A_2$ ; б)  $N = 4, A_1 = A_2$

Можно заметить, что собственные ДН не имеют четко выраженных экстремумов в направлениях прихода сигналов. В этом случае шумовые ДН имеют лишь минимум, направление которого располагается в интервале между углами прихода двух сигналов. Причем этот эффект наблюдается как для двух

излучателей (одна собственная шумовая ДН), так и для четырех излучателей (три различные собственные шумовые ДН). Направления прихода сигналов по каждой из шумовых ДН могут быть найдены из условия взаимной компенсации принятых сигналов в сумматоре, что и отражает система функциональных уравнений (8).

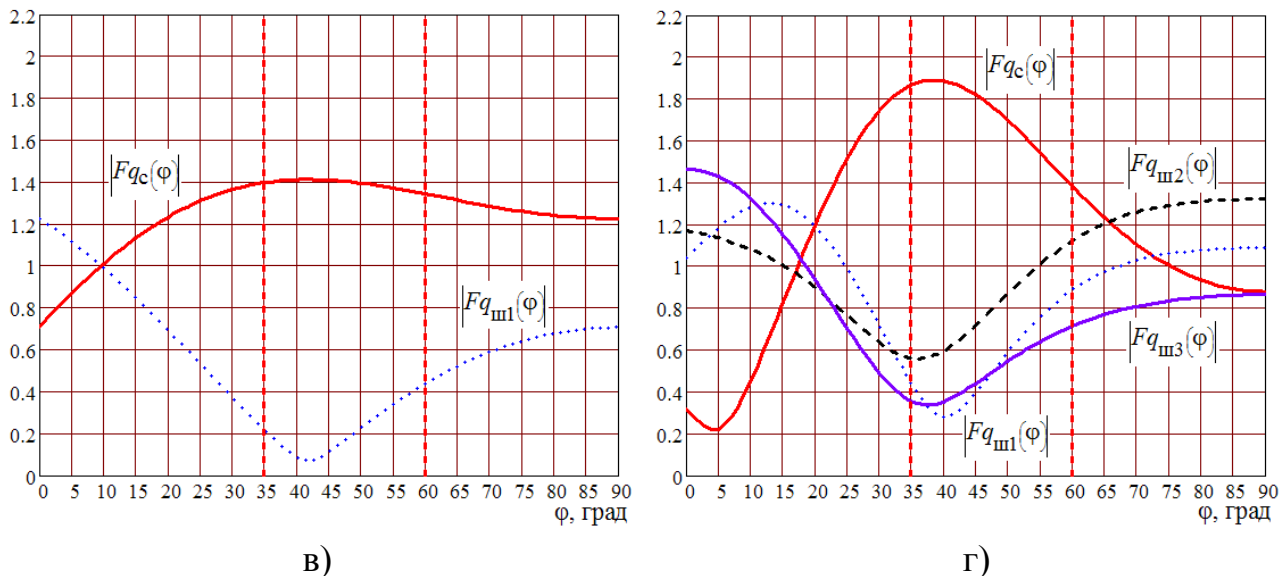


Рис. 3. Амплитудные собственные ДН линейной АР:

в)  $N = 2, A_1 = 2A_2$ ; г)  $N = 4, A_1 = 2A_2$

При появлении на входе АР сигналов разной амплитуды (рис. 3в и рис. 3г) происходит отклонение максимума сигнальной и минимумов шумовых собственных ДН по направлению к пеленгу более мощного сигнала. Причем отклонение тем больше, чем больше отношение амплитуд пеленгуемых сигналов. Однако следует отметить, что на точность определения угловых координат из системы уравнений (8) это не влияет.

Система уравнений (8) решается методом перебора дискретных значений направлений  $\varphi_{0i}$  в исследуемом диапазоне углов с заданным шагом, который фактически определяет точность пеленгования сигналов.

Ниже приводятся результаты моделирования, оформленные в виде таблиц, по точности определения направлений прихода и комплексных амплитуд двух когерентных сигналов на частоте  $f_1 = 30$  МГц, поступающих на вход линейной эквидистантной АР, состоящей из  $N = 3$  излучателей, расположенных на расстоянии  $d = \lambda_1/2$  друг от друга, при отношении сигнал/шум, равном 10 дБ. В таблицах используются следующие обозначения:  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ ,  $A_1$  и  $A_2$  – истинные значения пеленгов и амплитуд сигналов;  $\varphi_{01}$  и  $\varphi_{02}$ ,  $A_{01}$  и  $A_{02}$  – значения пеленгов и амплитуд сигналов, полученные из решения систем (8) и (9);  $\Delta\varphi_1 = |\varphi_{01} - \varphi_1|$ ,  $\Delta\varphi_2 = |\varphi_{02} - \varphi_2|$ ,  $\delta A_1 = |A_{01} - A_1|/A_1$ ,  $\delta A_2 = |A_{02} - A_2|/A_2$ .



Таблица 1

Ошибка определения направлений прихода  $\Delta\varphi_m$  сигналов с одинаковой амплитудой при постоянном шаге перебора опорных углов, равном  $1^\circ$

№	1	2	3	4	5	6
$\varphi_1$ , град	10	30	30	30.7	35.46	20.359
$\varphi_2$ , град	70	60	32	32.8	43.62	33.787
$\Delta\varphi_1$ , град	0	0	0	0.3	0.46	0.359
$\Delta\varphi_2$ , град	0	0	0	0.2	0.62	0.787

Таблица 2

Ошибка определения направлений прихода  $\Delta\varphi_m$  сигналов с одинаковой амплитудой при переменном шаге перебора опорных углов

№	1	2	3	4	5	6
$\varphi_1$ , град	10	30	30	30.7	35.46	20.359
$\varphi_2$ , град	70	60	32	32.8	43.62	33.787
$\Delta\varphi_1$ , град	0	0	0	0.2	0.207	0.07
$\Delta\varphi_2$ , град	0	0	0	0.2	0.38	0.013

Анализ данных табл. 1 и табл. 2 показывает, что если направление прихода сигналов кратно целому числу шага перебора, то ошибка пеленга равна нулю. Если направление прихода не кратно целому числу шага перебора, то при переменном шаге перебора возникает ошибка, не превышающая половины шага перебора. Данные представленных таблиц получены для случая равенства амплитуд обоих приходящих сигналов. Однако в случае сильного преобладания одного из сигналов над другим формирование сетки опорных углов с шагом в  $1^\circ$  не дает приемлемых результатов при определении направлений прихода сигналов и их амплитуд. Поэтому в табл. 3 сразу приводятся данные относительно величин ошибок  $\Delta\varphi_1$  и  $\Delta\varphi_2$ , полученные при условии переменного шага перебора углов  $\varphi_{0i}$ .

Таблица 3

Ошибка определения направлений  $\Delta\varphi_m$  и амплитуд  $\delta A_m$  пеленгуемых сигналов:  $M = 2$ ,  $\varphi_1 = 20.359^\circ$ ,  $\varphi_2 = 33.787^\circ$ , переменный шаг перебора опорных углов  $\varphi_{0i}$

№	1	2	3	4
$A_1$ , В	1	5	10	20
$A_2$ , В	1	1	1	1
$\Delta\varphi_1$ , град	0.07	0.109	0.0007	0.00003
$\Delta\varphi_2$ , град	0.013	0.787	0.013	0.213
$\delta A_1$	0.0064	0.018	0.0001	0.0008
$\delta A_2$	0.006	0.089	0.001	0.016

Результаты моделирования точности пеленгования двух сигналов в пространстве с помощью крестообразной АР представлены в следующей таблице.

Таблица 4

Ошибка определения направлений прихода сигналов с одинаковой амплитудой при переменном шаге перебора опорных углов

№	1	2	3
$(\theta_1, \varphi_1)$ , град	(30, 60)	(20.359, 40.142)	(50, 160)
$(\theta_2, \varphi_2)$ , град	(40, 80)	(33.787, 70.863)	(10, 280)
$(\Delta\theta_1, \Delta\varphi_1)$ , град	(0.096, 0.077)	(0.304, 0.853)	(0.037, 0.026)
$(\Delta\theta_2, \Delta\varphi_2)$ , град	(0.097, 0.15)	(0.185, 0.85)	(0.051, 0.113)

В диссертационной работе приводятся более подробные результаты моделирования по точности пеленгования для различных ОСШ, а также для трех сигналов. Анализ этих результатов показывает, что в рамках идеализированной модели с нормальным белым шумом при условии точной оценки КМ погрешность пеленгования по разработанному способу слабо зависит от отношения сигнал/шум, определяется только величиной выбранного шага перебора угловых координат и при желании всегда может быть снижена за счет уменьшения дискрета и соответственно увеличения объема вычислений.

Для сравнительной оценки эффективности и устойчивости к шумам разработанного алгоритма и алгоритма, предложенного Черемисиным О.П., было проведено численное моделирование, результаты которого показали, что точность пеленгования, а также точность определения амплитуд обоими методами оказывается одинаковой.

**Пятая глава** посвящена исследованию влияния характеристик направленности цифровых антенных решеток, а также ограниченности динамического диапазона (ДД) приемных устройств на точность пеленгования разработанным способом. В частности, исследуется влияние эффекта взаимодействия излучателей в АР различных конфигураций, приводящего к изменению комплексных диаграмм направленности и входных сопротивлений отдельных излучателей.

Напряжение  $u_n$ , возникающее на входном сопротивлении  $n$ -го излучателя, связано с напряженностью  $\bar{E}_m(\bar{\rho}_n)$   $m$ -ой падающей волны в фазовом центре  $n$ -го излучателя выражением

$$u_n = -i \sum_{m=1}^M \left( \bar{E}_m(\bar{\rho}_n) \bar{p}_n(\theta_m, \varphi_m) \right) \dot{f}'_n(\theta_m, \varphi_m), \quad (10)$$

где через  $(\cdot)$  обозначено скалярное произведение векторов;  $\dot{f}'_n(\theta_m, \varphi_m)$  – значение комплексной ДН  $n$ -го излучателя в решетке в направлении  $(\theta_m, \varphi_m)$ , имеющей вид:

$$\dot{f}'_n(\theta, \varphi) = \dot{f}_n(\theta, \varphi) \frac{Z_n}{Z_n + Z_{an}}, \quad (11)$$

где  $\dot{f}_n(\theta, \varphi)$  – ДН этого же излучателя в решетке при  $\frac{Z_n}{Z_n + Z_{an}} = \text{const}$ ,  $Z_{an}$  – входное сопротивление  $n$ -го излучателя в решетке,  $Z_n$  – волновое сопротивление  $n$ -го питающего фидера.

Взаимодействие излучателей в АР приводит к изменению как формы диаграмм направленности, так и коэффициентов усиления отдельных излучателей. Также изменяются их входные сопротивления. Эти явления, если их не учитывать, становятся причиной возникновения ошибок пеленгования сигналов по предложенному алгоритму (8). На рис. 4 приведены собственные сигнальные и шумовые ДН, которые имеют место при пеленговании одного сигнала, падающего с направления  $\varphi_1$  на АР с  $N = 3$  (рис. 4а), а также двух сигналов, приходящих с направлений  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  на АР с  $N = 3$  (рис. 4б). При этом взаимодействие излучателей не учитывается.

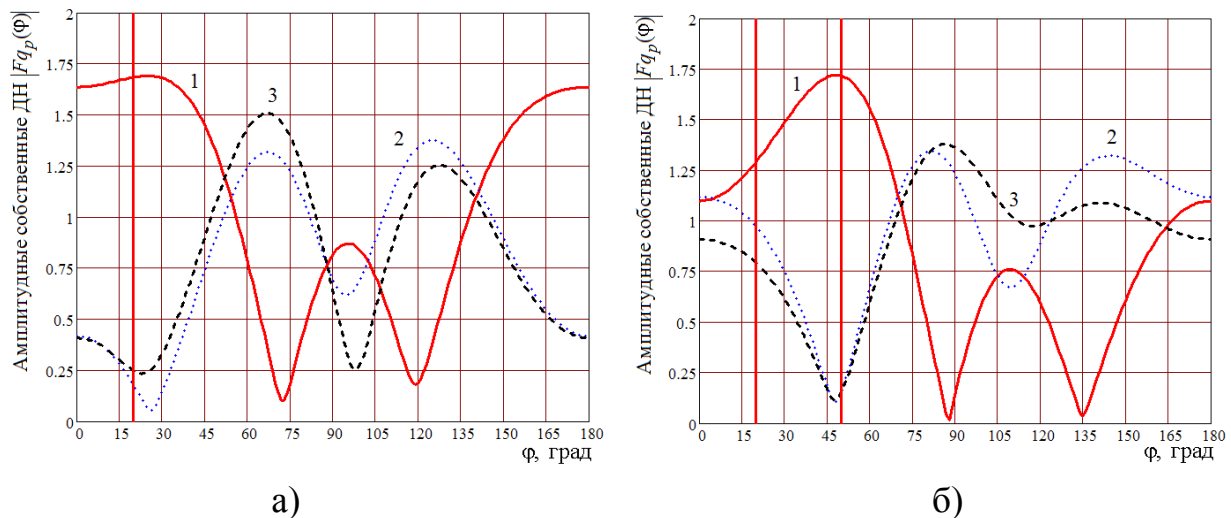


Рис. 4. Амплитудные собственные ДН линейной АР ( $d = \lambda_1/2$ ):

а)  $N = 3$ ,  $M = 1$ ,  $\varphi_1 = 20^\circ$ ; б)  $N = 3$ ,  $M = 2$ ,  $\varphi_1 = 20^\circ$ ,  $\varphi_2 = 50^\circ$

Из анализа приведенных кривых следует, что без учета взаимного влияния излучателей АР нулевые провалы в собственных шумовых ДН для одного сигнала исчезают, и положения минимумов этих ДН оказываются существенно смещенными от истинного направления прихода сигнала. Еще более сложная ситуация наблюдается при пеленговании двух и большего количества сигналов.

При моделировании для учета взаимного влияния элементов в АР, в качестве которых были выбраны вертикальные мачты, был использован метод интегральных уравнений (ИУ) Галлена. При этом для решения системы ИУ был использован метод Крылова-Боголюбова, который подразумевает аппроксимацию распределения тока по излучателям кусочно-постоянными базисными функциями. При учете взаимодействия таким способом при выборе шага сетки углов в  $1^\circ$  при решении системы функциональных уравнений (8) ошибка  $\Delta\varphi$  пеленгования одного сигнала не превышает  $0.5^\circ$  и слабо зависит от количества излучателей  $N$  в АР.

Наряду с указанными выше вопросами особое внимание уделено исследованию влияния ограниченности динамического диапазона приемного устройства на точность пеленгования. Установлено, что возможная нелинейность в приемном устройстве (из-за конечности динамического диапазона) приводит к возникновению значительных ошибок пеленгования (до  $10^\circ$  и более) (рис. 5).

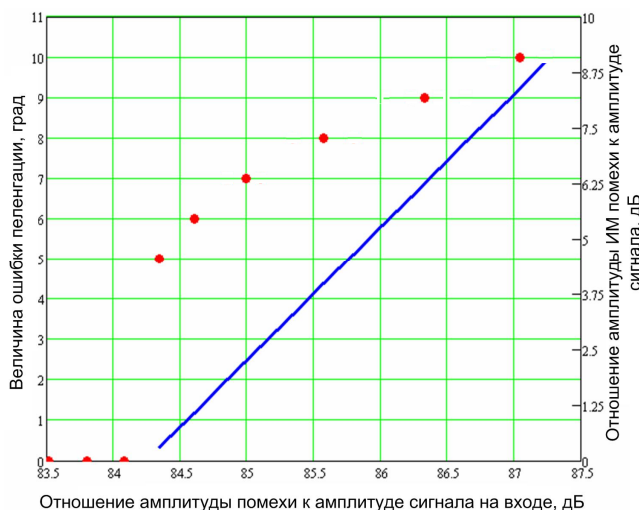


Рис. 5. Зависимость ошибки определения направления сигнала  $\Delta\varphi$  и отношения амплитуды ИМ составляющей к амплитуде сигнала от отношения амплитуды помехи к амплитуде сигнала

Для устранения этих ошибок в диссертации рассмотрена возможность использования узкополосных фильтров, позволяющих повысить динамический диапазон системы фильтр + приемник. В качестве таких фильтров могут быть использованы высокотемпературные сверхпроводниковые (ВТСП) фильтры, обладающие высокой добротностью и малыми потерями и позволяющие получить полосу фильтрации, сопоставимую с полосой сигнала. Приведенный анализ влияния порядка фильтра на точность пеленгования позволил установить, что в современной сигнально-помеховой обстановке КВ диапазона порядок ВТСП фильтра в зависимости от параметров интермодуляционной помехи и ДД приемного устройства может лежать в диапазоне  $n = 1 - 4$ .

В **шестой главе** приводятся результаты имитационного моделирования точностных характеристик разработанного способа пеленгования на основе пространственно-временных выборок, наблюдаемых на входе 16-элементной кольцевой АР с радиусом  $R = 50$  м. Эти выборки получены при различных отношениях сигнал/шум на входе АР. При этом в наблюдаемых выборках в общем случае закон распределения шумов может отличаться от закона распределения белого шума. Полученные результаты свидетельствуют о том, что отличие принимаемых шумов от закона белого шума приводит к ухудшению точности определения параметров пеленгуемых сигналов. Показано, что повысить точность пеленгования можно за счет разбиения АР на несколько непересекающихся подрешеток с последующим усреднением результатов пеленгования по каждой из подрешеток. Так, при разбиении 16-элементной АР на 3 непересекающиеся АР, каждая из которых состоит из 5 излучателей, точность пеленгования двух когерентных сигналов заметно повышается.

В **приложении 1** установлена взаимосвязь системы (8), (9) функциональных уравнений и совокупностью суммарно-разностных ДН АР. В **приложении 2** приведено спектральное разложение корреляционной матрицы по собственным значениям и собственным векторам для пространственно-временных выборок, используемых при имитационном моделировании. Пример одной из этих выборок представлен в **приложении 3**. В **приложении 4** показано, что алгоритм (8), разработанный в диссертации, при условии белого шума и точной оценки корреляционной матрицы сигналов на входе АР, совпадает с алгоритмом, представленным Черемисиным О.П. и полученным им на основе статистического подхода к оценке параметров когерентных сигналов.

Таким образом, в целом приведенные в диссертации результаты можно рассматривать, как дальнейшее развитие методов определения параметров многолучевых сигналов в КВ диапазоне по совокупности суммарно-разностных ДН АР, формируемых в процессе цифровой обработки сигналов.

В **заключении** сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы, которые заключаются в следующем:

1. Разработан и обоснован способ и алгоритм определения параметров (направлений прихода и амплитуд) сигналов для малоэлементных антенных решеток произвольной конфигурации с цифровой обработкой сигналов. Алгоритм обработки основан на спектральном разложении корреляционной матрицы входных данных и использовании собственных диаграмм направленности антенной решетки с последующим разделением совокупности имеющихся диаграмм на сигнальные и шумовые и получением

функциональных уравнений относительно этих диаграмм направленности для определения количества многолучевых сигналов, направлений прихода и амплитуд этих сигналов. Указанный алгоритм эквивалентен введению  $N - 1$  суммарно-разностных ДН  $N$ -элементной АР и определению угловых координат ИРИ из условий максимизации и минимизации мощности сигналов, приходящих с разных направлений и принимаемых по этим ДН. Алгоритм детализирован для линейных, крестообразных и кольцевых антенных решеток.

2. Показано, что при точной оценке корреляционной матрицы и наличии на входе антенной решетки пространственного белого шума возможно определение количества многолучевых сигналов, а также направлений и амплитуд двух и трех сигналов в малоэлементных АР (с базой от десятых долей до единиц длины волны пеленгуемых сигналов) при достаточно низком ОСШ ( $\sim 10$  дБ и ниже).

3. Установлено, что взаимное влияние излучателей в антенных решетках в КВ диапазоне существенно влияет на характеристики пеленгования разработанным способом. Задание диаграмм направленности и входных сопротивлений излучателей пеленгаторных антенных решеток без учета эффектов взаимодействия может приводить к значительным (до 10 градусов и более) ошибкам при пеленговании одного, а тем более двух и большего числа сигналов.

4. Исследовано влияние ограниченности динамического диапазона приемного устройства, приводящего к появлению интермодуляционных помех, на характеристики пеленгования, и предложены пути снижения этого влияния за счет использования высокочастотных фильтров с добротностью порядка  $10^4 \dots 10^5$ .

5. Проведено имитационное моделирование точностных характеристик радиопеленгатора КВ диапазона с 16-элементной кольцевой антенной решеткой по пространственно-временным выборкам, представленным предприятием «СТЦ», и показана возможность определения угловых координат и амплитуд  $M$  лучей с высокой точностью (до  $1^\circ$ ) даже при малом диаметре АР приблизительно  $1/3$  длины волны и при достаточно низком отношении сигнал-шум ( $\sim 10$  дБ). Результаты работы переданы в указанную выше организацию для использования в ОКР «Радиолампа-ТП».

### **Публикации по теме диссертации**

1. Пономарев Л.И., Васин А.А. Высокоточная пеленгация многолучевых сигналов с использованием малоэлементных антенных решеток коротковолнового диапазона // Радиотехника и электроника. 2011. Т. 56.

- № 3. С. 330 – 345. (Перевод: Ponomarev L. I., Vasin A. A. High-accuracy direction finding in multipath environment with short-wave antenna arrays comprising a small number of elements // Journal of Communications Technology and Electronics. 2011. Vol. 56. № 3. P. 304 – 319.)
2. Пономарев Л.И., Васин А.А. Влияние взаимодействия излучателей в антенных решетках пеленгаторов на точность пеленгования многолучевых сигналов в коротковолновом диапазоне // Антенны. 2011. № 3. С. 69 – 78.
  3. Пономарев Л.И., Васин А.А., Терехин О.В., Капускин С.А. Эффективность использования высокотемпературных сверхпроводниковых фильтров в радиопеленгаторах коротковолнового диапазона // Вестник МАИ. 2011. Т. 18. № 1. С. 150 – 158.
  4. Патент № 2407026. Пономарев Л.И., Паршиков В.В., Васин А.А., Терехин О.В. Способ пеленгации узкополосных радиосигналов КВ диапазона. Опубликовано 20.12.2010. Бюл. № 35.
  5. Пономарев Л.И., Васин А.А. Высокоточная пеленгация многолучевых сигналов в коротковолновом диапазоне // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2009. Т. 12. № 3. С. 91 – 99.
  6. Пономарев Л.И., Васин А.А. Пеленгация многолучевых сигналов в КВ диапазоне // Материалы 19-ой международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо-2009), т. 2, с. 403 – 404, Севастополь, Крым, Украина, 14 – 18 сентября 2009 г.
  7. Пономарев Л.И., Паршиков В.В., Терехин О.В., Васин А.А. Цифровой способ высокоточной пеленгации сигналов // Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова, серия «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации», вып. 3, с. 84 – 88, опубликованные по результатам проведения третьей международной конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» (ARMIMP-2009), Суздаль, 22 – 24 сентября 2009 г.
  8. Пономарев Л.И., Васин А.А. Высокоточная пеленгация многолучевых сигналов с использованием малоэлементных антенных решеток КВ диапазона // Труды III Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь», т. 2, с. 54 – 58, Москва, 26 – 30 октября 2009 г.
  9. Васин А.А. Способ определения направлений прихода и амплитуд многолучевых сигналов // Тезисы докладов научно-технической конференции молодых ученых факультета № 4, проводимой в рамках

- научно-практической конференции молодых ученых и студентов МАИ «Инновации в авиации и космонавтике – 2010», Москва, 27 апреля 2010 г.
10. Васин А.А., Милосердов А.С. Исследование влияния взаимодействия излучателей в антенной решетке пеленгатора на точность определения направлений прихода волн // Тезисы докладов научно-технической конференции молодых ученых факультета № 4, проводимой в рамках научно-практической конференции молодых ученых и студентов МАИ «Инновации в авиации и космонавтике – 2010», Москва, 27 апреля 2010 г.
  11. Пономарев Л.И., Васин А.А., Милосердов А.С. Исследование влияния взаимодействия излучателей в антенной решётке пеленгатора на точность определения направлений прихода сигналов // Доклады IV Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь» (электронный сборник), с. 868 – 872, Москва, 29 ноября – 3 декабря 2010 г.
  12. Пономарев Л.И., Паршиков В.В., Васин А.А. Использование технологии ММО для повышения спектральной эффективности радиорелейной линии связи // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. № 8. С. 17 – 21.
  13. Пономарев Л.И., Васин А.А. Исследование устойчивости высокоточного способа пеленгования к различного рода ошибкам // Материалы X международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов», с. 69 – 71, Самара, 11 – 17 сентября 2011 г.
  14. Васин А.А., Милосердов А.С. Особенности пеленгования источников широкополосных сигналов с использованием антенных решеток // Материалы X международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов», с. 75 – 77, Самара, 11 – 17 сентября 2011 г.