

На правах рукописи



Коробков Михаил Александрович

**УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ АЛГОРИТМ РЕДУКЦИИ РАНГА
ДЛЯ ПЕЛЕНГОВАНИЯ МНОЖЕСТВЕННЫХ РАДИОМАЯКОВ**

05.12.04 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»
05.12.14 «Радиолокация и радионавигация»

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Рязань 2015

Работа выполнена на кафедре радиотехнических систем в
ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Научный руководитель: Кошелев Виталий Иванович —
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Юдин Василий Николаевич —
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры 405 «Теоретическая
радиотехника» Московского авиационного
института (национальный исследовательский
университет), г. Москва

Фролов Игорь Иванович —
кандидат технических наук, заместитель
директора научно-технического центра, АО
«Государственный рязанский приборный
завод», г. Рязань

Ведущая организация: АО "ИРКОС", г. Москва

Защита диссертации состоится 11 марта 2016 г. в 12 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.211.04 в Рязанском государственном
радиотехническом университете по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина,
59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО
«РГРТУ» и на сайте www.rsreu.ru

Автореферат разослан " ____ " _____ 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук



Г.В. Овечкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Задача поиска терпящих бедствие в результате несчастных случаев и аварийных ситуаций, которые могут происходить как с отдельными людьми, так и с группами людей, как известно, является чрезвычайно актуальной. В системе КОСПАС-САРСАТ для поиска терпящих бедствие используются специальные радиомаяки, которые могут выполнять функцию радиобуев или иметь персональное исполнение.

С точки зрения радиопеленгации поиск радиобуев и радиомаяков – это задача поиска множественных источников радиоизлучения (ИРИ), работающих при этом одновременно. Традиционные фазовые методы пеленга ИРИ обеспечивают одномоментное обнаружение лишь единственного ИРИ. В такой ситуации для пеленга множественных ИРИ следует обратиться к ковариационным алгоритмам, что объясняет актуальность темы диссертационной работы.

Значительный вклад в развитие методов пеленгования ИРИ внесли отечественные учёные: Ю.И. Абрамович, П.А. Бакулев, А.Д. Виноградов, А.Б. Гершман, В.П. Денисов, Д.В. Дубинин, Л.И. Коновалов, И.С. Кукес, Д.И. Леховицкий, Ю.Б. Нечаев, В.Ф. Писаренко, М.В. Ратынский, А.М. Рембовский, О.П. Черемисин и др., а также зарубежные исследователи: A. Barabell, F. Belloni, J. Böhme, G.V. Borgiotti, J.P. Burg, J. Capon, B. Friedlander, W. Gabriel, T. Kailath, L.J. Kaplan, R.L. Kellogg, V. Koivunen, C.P. Mathews, A. Nehorai, B. Ottersten, R. Roy, R.O. Schmidt, P. Stoica, L. Swindlehurst, H.L. Van Trees, M. Viberg, J.L. Volakis, M. Wax, A. Weiss, M.D. Zoltowski и др.

Задача пеленгации множественных ИРИ состоит в определении азимутов и углов места в выбранной системе координат радиотехническими методами, с учётом амплитудно-фазовых соотношений между радиосигналами, зарегистрированными некоторой антенной системой. В случае отсутствия у пеленгатора многосигнального режима работы наличие нескольких работающих ИРИ приведёт к неверному результату, так как односигнальный пеленгатор в данной ситуации покажет некий усреднённый пеленг.

Ковариационные алгоритмы позволяют пеленговать несколько одновременно излучающих ИРИ. Однако основные известные на сегодняшний день ковариационные алгоритмы для определения координат ИРИ требуют выполнения процедуры полного двумерного поиска по азимуту и углу места, что приводит к высоким временным

затратам даже при шаге поиска 1° , что не позволяет использовать их в системах мониторинга реального времени.

Существующие быстрые модификации ковариационных алгоритмов применимы только к определённым классам антенных решёток (АР). Так, хорошо известная модификация алгоритма MUSIC (Multiple Signal Classification), использующая вместо двухмерного поиска процедуру нахождения корней полинома (Root-MUSIC), применяется в основном к однородным линейным АР. Однако для структур более общего вида метод Root (нахождение корней полинома) не может быть применён напрямую и требует предварительного перехода к виртуальной АР. При этом вычисление азимута сопровождается неоднозначностью определения координат ИРИ.

Цель работы – разработка вычислительно эффективного алгоритма для пеленга множественных одновременно излучающих аварийных радиомаяков спутниковой навигационной системы КОСПАС-САРСАТ на основе ковариационного алгоритма редукции ранга (АРР).

Задачи, решаемые для достижения поставленной цели:

- 1) проанализировать структуру АРР-полинома¹ на возможность сокращения его степени для уменьшения вычислительных затрат в алгоритме редукции ранга;
- 2) разработать новый метод устранения ложных корней в ковариационном алгоритме редукции ранга, используя результаты анализа структуры АРР-полинома;
- 3) проанализировать возможность использования комбинирования АРР с другими известными алгоритмами для повышения производительности и устойчивости к ошибкам определения числа пеленгуемых источников;
- 3) исследовать структуру полиномиальной АРР-матрицы² для выявления скрытых возможностей уменьшения времени выполнения АРР;
- 4) выполнить статистический анализ работы известных и разработанных алгоритмов с целью их верификации;
- 5) определить потенциальную разрешающую способность однородной кольцевой АР (ОКАР), предназначенной для

¹ АРР-полином – полином, получаемый в результате нахождения определителя АРР-матрицы

² АРР-матрица – матрица, получаемая на одном из этапов выполнения алгоритма редукции ранга

пеленга аварийных радиомаяков системы КОСПАС-САРСАТ, с помощью алгоритма MUSIC;

- б) реализовать на базе ПЛИС изделие, позволяющее выполнить пеленг множественных источников с помощью усовершенствованного ковариационного алгоритма редукции ранга.

Научная новизна³

- Обоснован алгоритм, позволяющий понизить степень APP-полинома в APP от двух до десяти раз, благодаря чему до 2,2 раза сокращаются вычислительные затраты, связанные с нахождением корней этого полинома.

- Разработан алгоритм устранения ложных корней в APP, в котором на первом этапе отбрасываются корни усечённого полинома, лежащие на комплексной плоскости вне кольца с радиусом $1 \pm 0,2$, а на втором – выполняется одномерный поиск значений азимута при помощи алгоритма MUSIC.

- Предложен комбинированный алгоритм, не требующий предварительного определения точного числа пеленгуемых ИРИ, что устраняет необходимость выполнения этой трудоёмкой процедуры и позволяет сохранить работу комбинированного алгоритма при неверном их определении.

- Обоснован алгоритм пересчёта коэффициентов APP-полинома, позволяющий избежать операций с полиномиальными матрицами, которые необходимы при традиционном расчёте пеленга с помощью алгоритма редукции ранга.

Внедрение результатов

Результаты диссертационной работы внедрены в опытный образец изделия «УТОК МБ» ЦДКТ.465423.014, разработанного филиалом ОАО «ОПК» - «НИИ КП», г. Москва, что подтверждено соответствующим актом.

Методы анализа

Результаты работы получены в рамках методов статистической радиотехники, спектрального анализа сигналов, матричного исчисления, теории антенн, цифровой обработки сигналов, схемотехники, проектирования цифровых систем на ПЛИС. Наряду с теоретическими методами при работе были проведены исследования на основе имитационного моделирования, аппаратной реализации и

³ Пункты 1, 2, 4 соответствуют специальности 05.12.04, п.3 - специальности 05.12.14

экспериментальных исследований с применением современной измерительной аппаратуры.

Основные положения, выносимые на защиту⁴:

1) алгоритм сокращения степени АРР-полинома, отличающегося от традиционного уменьшенным от двух до десяти раз количеством коэффициентов, что позволяет до 3,9 раза сократить вычислительные затраты в алгоритме редукции ранга при допустимом смещении корней АРР-полинома не более чем на 10^{-4} ;

2) способ устранения ложных корней в алгоритме редукции ранга, не соответствующих пеленгу источников сигнала, состоящий в отбрасывании корней АРР-полинома, лежащих на комплексной плоскости вне кольца с радиусом $1 \pm 0,2$, при последующем одномерном поиске с помощью алгоритма MUSIC, позволяющий исключить вычисление дополнительного компенсирующего полинома;

3) комбинированный алгоритм, построенный на основе алгоритма Кейпона и алгоритма редукции ранга, который в отличие от традиционного алгоритма редукции ранга сохраняет структуру корней АРР-полинома, что позволяет сохранить работу комбинированного алгоритма при ошибочно определённом числе пеленгуемых источников;

4) алгоритм расчёта элементов полиномиальной АРР-матрицы, отличающийся от традиционного отсутствием операций с полиномиальными матрицами, что позволяет упростить вычисление пеленга с помощью алгоритма редукции ранга и снизить вычислительные затраты до 14 раз по сравнению с традиционным алгоритмом.

Достоверность полученных результатов подтверждена корректным применением математических аппаратов, проведением компьютерного имитационного моделирования полученных алгоритмов; соответствием результатов диссертационной работы, в частных случаях, известным результатам.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на следующих конференциях:

- Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2014». Севастополь, 2014 г.
- Региональная конференция молодых учёных «Инновационные методы решения научных и технологических задач Рязанской области». Рязань, 2013 г.

⁴ Пункты 1, 2, 4 соответствуют специальности 05.12.04, п.3 - специальности 05.12.14

- XVII научная конференция «Математическое моделирование и информатика». Москва, 2015 г.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 16 работ. Из них 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК для опубликования основных результатов диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, 7 статей в журнале из списка РИНЦ, 2 статьи в межвузовских сборниках научных трудов, 3 тезиса докладов на научно-технических конференциях, 1 статья в прочих изданиях.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх разделов, заключения и приложений. Общий объем диссертации 128 страниц, в том числе 111 страниц основного текста, включая библиографический список из 115 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, представлены основные положения, выносимые на защиту, определены цель и задачи исследования, изложены новые результаты, полученные при исследовании, их научное и практическое значение, а также реализация и практическое внедрение.

В первом, обзорном разделе проведён обзор ковариационных алгоритмов пеленга ИРИ, а также выявлен ряд проблемных и нерешённых вопросов.

Пеленгация ИРИ выполняется при помощи четырёх базовых методов: амплитудного, амплитудно-разностного (моноимпульсного), фазового и группы ковариационных методов.

Основной недостаток первых трёх методов состоит в том, что пеленг множественных ИРИ приходится осуществлять по каждому из них в отдельности. Поэтому следует обратиться к алгоритмам, основанным на анализе характеристик ковариационной матрицы, сформированной из принимаемых сигналов.

Однако основным недостатком ковариационных алгоритмов является необходимость выполнения неэффективного в вычислительном отношении полного двумерного поиска, ограничивающего применение алгоритмов при работе в оперативном режиме или системах реального времени. Существующие «быстрые» модификации таких алгоритмов применимы только с AP определённых конфигураций. Для возможности применения

«быстрых» методов к ОКАР в научных работах предлагается АРР. К сожалению, АРР имеет недостатки:

- 1) алгоритм требует выполнения операций с громоздкими полиномиальными матрицами (перемножение и нахождение определителя);
- 2) полученный в результате нахождения определителя полиномиальной матрицы полином имеет симметричные относительно центра комплексной плоскости и единичной окружности корни, которые приводят к неоднозначности вычисления пеленга по азимуту;
- 3) степень АРР-полинома может быть достаточно большой, достигая значений более 400;
- 4) АРР не позволяет вычислить пеленг по углу места;
- 5) традиционный АРР чувствителен к ошибочному определению числа пеленгуемых ИРИ.

Устранению вышеперечисленных недостатков посвящён 2-й раздел диссертационной работы.

Во втором разделе изложены основные результаты по исследованию особенностей функционирования, повышения быстродействия и комбинирования АРР с другими ковариационными алгоритмами – MUSIC и Кейпона, проведён анализ особенностей структуры АРР-матрицы и свойств АРР-полинома. Проведено численное статистическое моделирование при различных параметрах обстановки и параметрах приёмно-передающего тракта. Выполнены анализ и оценка вычислительных затрат как известных, так и новых решений с целью демонстрации превосходства последних над традиционными в вычислительном соотношении.

Вычисление азимута с использованием АРР выполняется с помощью следующего уравнения:

$$f_{АРР}(z)_{|z|=1} = \det \left\{ \mathbf{T}(1/z)^T \mathbf{E}_{n_b} \mathbf{E}_{n_b}^H \mathbf{T}(z) \right\} = 0, \quad (1)$$

где $\det \{ \cdot \}$ – определитель матрицы, \mathbf{E}_{n_b} – матрица подпространства шума ковариационной матрицы в пространстве лучей,

$$\mathbf{T}(z) = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}(z) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 1 \\ \mathbf{PQ}(1/z) & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (2)$$

размером $(2M + 1) \times (M + 1)$,

$$\mathbf{Q}(z) = \text{diag} \left\{ z^{-M}, z^{-(M-1)}, \dots, z^{-2}, z^{-1} \right\} \quad (3)$$

размером $M \times M$, $\mathbf{\Pi}$ – обменная матрица размером $M \times M$,

$$z = e^{j\varphi}, \quad (4)$$

φ – азимут в градусах,

$$M = \lfloor k_0 r \rfloor, \quad (5)$$

где $\lfloor \cdot \rfloor$ – определяет целую часть, k_0 – волновое число, r – радиус ОКАР.

Положение 1. Вычисление определителя в (1) приводит к АРР-полиному, модули коэффициентов которого приведены на рисунке 1 и обозначены символом «*».

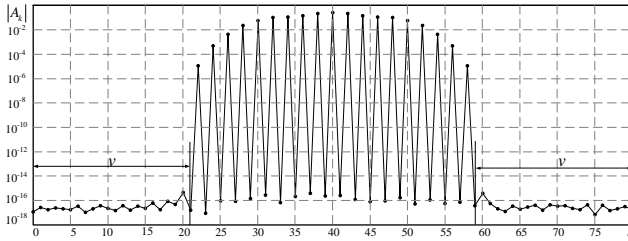
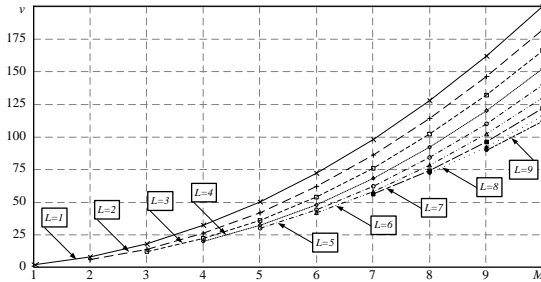


Рисунок 1 - Модули коэффициентов полинома, полученного при $N = 12$, $L = 3$, $\Delta = 0.4\lambda$, $M = 4$. A_k – коэффициент полинома, k – порядковый номер коэффициента, соответствующий степени члена АРР-полинома

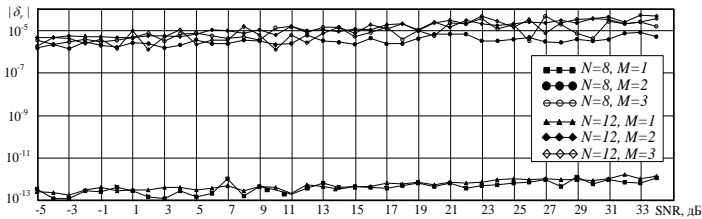
Как следует из анализа рисунка 1, имеется 2ν коэффициентов, модуль которых имеет значение много меньшее, чем у остальных коэффициентов. Следовательно, можно сделать предположение, что сокращение степени полинома путём удаления слагаемых полинома, стоящих при ν младших и старших степенях АРР-полинома, не приведёт к потере корней, соответствующих азимутальному положению ИРИ, или к их значительному смещению. Значение ν может быть рассчитано по формуле, которая получена эмпирическим путём, в результате численного анализа:

$$v = M^2 + M + \sum_{b=0}^{M-L} (2 \cdot b). \quad (6)$$

Из приведённого выражения видно, что число отсекаемых коэффициентов зависит от числа пеленгуемых ИРИ L .



а



б

Рисунок 2 – Пояснения к сокращению степени АРР-полинома:
а – число отсекаемых коэффициентов при различных значениях M и L ;

б – модуль смещения корней усечённого полинома относительно не усечённого для различных конфигураций ОКАР

Приведённые зависимости на рисунке 2,а показывают, что число отсекаемых коэффициентов уменьшается при увеличении числа ИРИ L при фиксированном значении M . Графики на рисунке 2,б показывают, что смещение корней составляет величину, не превосходящую значения 10^{-4} , что достаточно для задач пеленга аварийных радиомаяков. Выявлено, что данный подход позволяет сократить степень АРР-полинома минимум вдвое и более чем в 10 раз (для больших ОКАР).

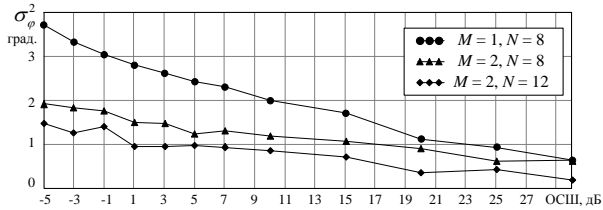
Положение 2. Одним из серьёзных недостатков АРР является наличие ложных корней АРР-полинома, которые не соответствуют

азимуту пеленгуемых ИРИ. Алгоритм устранения ложных корней предполагает выполнение процедуры, описанной в таблице.

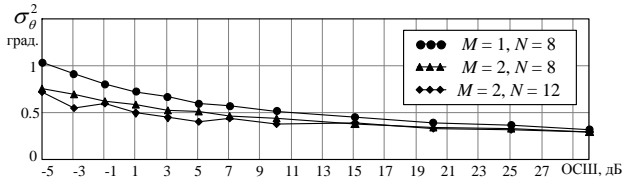
Этапы выполнения предлагаемого способа устранения ложных корней

Этап	Процедура
1	Перейти от вектора отсчёта сигналов \mathbf{x}_e к вектору \mathbf{x}_b в пространстве лучей
2	Сформировать ковариационную матрицу \mathbf{R}_b
3	Определить матрицу \mathbf{E}_{N_b} , составленную из собственных векторов матрицы \mathbf{R}_b , соответствующих её собственным значениям в пространстве шума
4	Найти корни полинома, решая уравнение (1), при использовании метода сокращения степени полинома (6) пропустить п.5
5	Провести предварительную фильтрацию оценок при помощи соотношения $ 1 - z_i \leq \delta_{\max}$
6	Объединить корни z_i , имеющие одинаковые значения φ_i путём их усреднения.
7	Для каждой из оставшихся оценок азимутального угла φ_i рассчитать зависимости функции $f_{MUSIC}(\varphi_i, \theta)$ от угла θ в интервале от 0° до 90° и путём одномерного поиска определить θ_i , при которых достигаются максимумы функции $f_{MUSIC}(\varphi_i, \theta)$
8	Отсортировать пары (φ_i, θ_i) в порядке убывания функции $f_{MUSIC}(\varphi_i, \theta_i)$ и выделить среди них первые L пар углов, при которых максимумы принимают наибольшие значения. Они и будут трактоваться как положения ИРИ

Для предлагаемого решения, позволяющего полностью избавиться от ложных корней, было рассчитано среднеквадратическое отклонение (СКО) пеленга по азимуту и углу места, приведённое на рисунке 3.



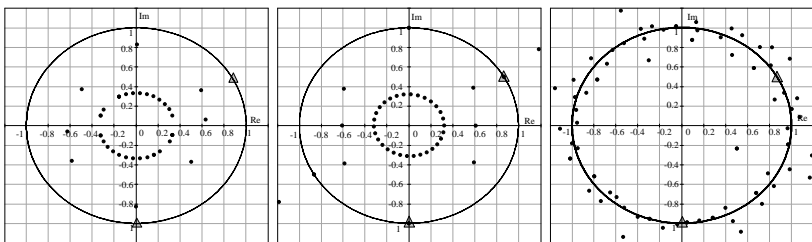
а



б

Рисунок 3 – СКО пеленга одного ИРИ при различных параметрах ОКАР M , N в зависимости от отношения сигнал-шум (ОСШ): а – по азимуту; б – по углу места

Положение 3. Применение метода редукции ранга (МРР) в известной технической литературе было выполнено только для алгоритма MUSIC. Результатом применения МРР к алгоритму MUSIC при использовании ОКАР является АРР. Но алгоритм MUSIC чувствителен к ошибочному определению числа пеленгуемых ИРИ, а следовательно, к такому параметру чувствителен и АРР, что продемонстрировано на рисунке 4.



а

б

в

Рисунок 4 – Корни АРР-полинома при заданном числе пеленгуемых ИРИ, равном 2, и определённом числе: а – 1; б – 2; в – 3. «●» – корни полинома, «Δ» – заданное положение ИРИ

Из приведённых примеров следует, что для того чтобы сохранить работоспособность АРР при ошибочном определении числа пеленгуемых ИРИ, следует выбирать такие ковариационные алгоритмы пеленга множественных ИРИ, которые нечувствительны к точному определению числа пеленгуемых ИРИ.

К таким алгоритмам относятся: алгоритм сканирования лучом, алгоритм адаптивной угловой характеристики, алгоритм Кейпона, теплового шума, обобщённый алгоритм Кейпона. Последние три алгоритма очень схожи между собой, а их двухмерная функция имеет следующее представление:

$$f(\varphi, \theta) = \left[\mathbf{a}(\varphi, \theta)^H \mathbf{R}^{-m} \mathbf{a}(\varphi, \theta) \right]^{-1}, \quad (7)$$

где $\mathbf{a}(\varphi, \theta)$ – вектор отклика ОКАР, \mathbf{R} – ковариационная матрица, m – степень, в которую возводится матрица \mathbf{R} . При $m=1$ формула (7) соответствует алгоритму Кейпона, при $m=2$ – алгоритму теплового шума, при $m \geq 3$ – обобщённому алгоритму Кейпона. Применяя к (7) МРР, получаем комбинированный алгоритм АРР/Кейпона:

$$f(z) = \det \left\{ \mathbf{T}(1/z)^T \mathbf{R}_b^{-m} \mathbf{T}(z) \right\} = 0 \quad (8)$$

Предложенный комбинированный алгоритм не требует априорной или точной информации о числе пеленгуемых ИРИ, поскольку не содержит процедур по разделению подпространства сигнала и шума. Это позволяет сохранить структуру корней АРР-полинома и остаться комбинированному алгоритму работоспособным при ошибочном определении числа пеленгуемых источников.

Положение 4. В пеленгационных системах (ПС) размер апертуры антенной системы в большинстве случаев является фиксированным, что приводит к фиксированным геометрическим размерам ОКАР. Это означает, что АРР-полином будет иметь фиксированную степень, поэтому целесообразно вычислить его коэффициенты заранее.

Более детальный анализ структуры АРР-матрицы показал, что существует зависимость, позволяющая вычислить все её элементы:

$$b_{i,j} = e_{i,j} z^{2M-i} + \begin{cases} e_{2M-i,j} z^i, & \text{если } i \neq M \\ 0, & \text{если } i = M \end{cases}, \quad i = 0, \dots, M, \quad j = 0, \dots, 2M, \quad (9)$$

$$d_{i,j} = b_{i,j} z^j + \begin{cases} b_{i,2M-j} z^{2M-j}, & \text{если } j \neq M \\ 0, & \text{если } j = M \end{cases}, \quad i = 0, \dots, M, \quad j = 0, \dots, M. \quad (10)$$

где $e_{i,j}$ – это элементы матрицы, стоящей между $\mathbf{T}(1/z)^T$ и $\mathbf{T}(z)$.
Заменяя в аналитической записи элементы определителя выражениями (9) и (10), получаем коэффициенты АРР-полинома. Например, для определителя 2×2 :

$$\det \begin{pmatrix} d_{0,0} & d_{0,1} \\ d_{1,0} & d_{1,1} \end{pmatrix} = d_{0,0} d_{1,1} - d_{0,1} d_{1,0}. \quad (11)$$

Используя (9) и (10) получаем:

$$\begin{aligned} d_{0,0} &= e_{0,2} z^4 + (e_{0,0} + e_{2,2}) z^2 + e_{2,0}, \\ d_{0,1} &= e_{1,2} z^3 + e_{1,0} z, \\ d_{1,0} &= e_{1,0} z^3 + e_{2,1} z, \\ d_{1,1} &= e_{1,1} z^2. \end{aligned} \quad (12)$$

Тогда

$$\det \left(\mathbf{T}(1/z)^T \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{T}(z) \right) = (e_{1,1} e_{2,0} - e_{1,0} e_{2,1}) z^2 + (e_{0,0} e_{1,1} - e_{0,1} e_{1,0} + e_{1,1} e_{2,2} - e_{1,2} e_{2,1}) z^4 + (e_{0,2} e_{1,1} - e_{0,1} e_{1,2}) z^6, \quad (13)$$

где \mathbf{E} – это либо результат произведения матриц $\mathbf{E}_{n_b} \mathbf{E}_{n_b}^H$ при использовании традиционно АРР в (1), либо \mathbf{R}_b^{-m} в (8) при использовании комбинированного алгоритма АРР/Кейпона.

Предлагаемое решение является универсальным для получения коэффициентов АРР-полинома и может быть применено при комбинировании АРР с другими известными алгоритмами.

В третьем разделе проводится исследование потенциальной разрешающей способности ОКАР, на основе которой реализуется пеленгационная аппаратура для системы КОСПАС-САРСАТ.

Выбраны варианты конфигурации АР в составе ПС и проведено исследование по определению предельного числа одновременно пеленгуемых ИРИ, их минимального углового разрешения, а также

углового отклонения пеленга от истинного положения ИРИ в зависимости от отношения сигнал–шум. Выявлено:

1) одновременное разрешение десяти некоррелированных ИРИ с угловым разнесением 5° достигается лишь при использовании ОКАР с большим числом элементов и диаметром. Расчёты показывают, что для частоты 406 МГц следует использовать ОКАР с числом антенных элементов $N = 16$ и диаметром $D = 7,6$ м, а на частоте 121,5 МГц пришлось бы увеличить диаметр ОКАР до 25,3 м. И даже в этом случае отношение сигнал–шум (SNR) должно быть не менее 20 дБ;

2) численный эксперимент показал, что на частоте 121,5 МГц, $SNR > 30$ дБ и $\Delta\varphi = 45^\circ$ при помощи ОКАР с диаметрами 40 см и 65,5 см можно разрешить до шести ИРИ, а на частоте 406 МГц максимально возможное число ИРИ – семь;

3) при малых угловых разнесениях ИРИ (5°) на частоте 406 МГц при помощи ОКАР с диаметром 65,5 см удаётся разрешить 2 ИРИ при $\Delta\varphi = 5^\circ$ и $SNR > 30$ дБ, 3 ИРИ при $\Delta\varphi = 15^\circ$ и $SNR > 20$ дБ, 4 ИРИ при $\Delta\varphi = 15^\circ$ и $SNR > 30$ дБ;

На основании проведённых исследований сделан вывод о том, что при заданном отношении мощности сигнала к мощности шума угловое разрешение ИРИ по азимуту сильно зависит от их числа, увеличение которого влечет за собой ухудшение разрешающей способности системы.

В четвёртом разделе рассмотрены вопросы, связанные с реализацией ковариационных алгоритмов в пеленгационной аппаратуре КОСПАС–САРСАТ. Приведены основные требования, которым должны удовлетворять пеленгаторы, предназначенные для пеленга множественных ИРИ:

- 1) пеленгация нескольких одновременно излучающих ИРИ;
- 2) определение количества ИРИ, присутствующих в эфире, их азимутального и угломестного пеленгов;
- 3) устойчивая работа при чувствительности приёмника ниже минус 80 дБм;
- 4) периодическое оценивание параметров ИРИ (значение несущей, пеленг, мощность на входе приёмной системы);
- 5) пеленгация в оперативном режиме (временной разрыв между регистрацией сигнала и получением результата не должен превышать длительности преамбулы посылки аварийного радиомаяка КОСПАС-САРСАТ, равной 160 мс);
- 6) поддержка нескольких алгоритмов расчёта пеленга.

Показаны варианты построения модулей первичной обработки сигналов. В частности, рассмотрены варианты построения

одноканальной и восьмиканальных систем первичной обработки. Приведены иллюстрации готовых модулей, обобщённая структурная схема функционального модуля вторичной обработки сигналов.

Рассмотрены основные задачи, возлагаемые на модуль первичной и вторичной обработки сигналов, а также на антенную систему. Приведено описание лабораторного макета, собранного для проверки работоспособности и подтверждения теоретических результатов. Приведены результаты лабораторных испытаний.

В заключении подведены итоги диссертационной работы и сформулированы её основные научные и практические результаты, которые сводятся к следующему:

1) разработаны, исследованы и реализованы алгоритмы, повышающие быстродействие и устойчивость работы ковариационного АРР. Достигнуто минимум 50%-е сокращение степени АРР-полинома при сохранении адекватности вычисления (ошибка не более 5°) азимутального и угломестного положений ИРИ. Степень полинома может быть сокращена в более чем 10 раз для ОКАР с большим конфигурационным параметром M ;

2) предложен способ, позволяющий в АРР отсеять корни, не соответствующие пеленгу ИРИ, состоящий в отбрасывании корней усечённого полинома, лежащих на комплексной плоскости вне кольца с радиусом 1 ± 0.2 , при последующем одномерном поиске корней, соответствующих азимуту, при помощи алгоритма MUSIC;

3) улучшена устойчивость работы АРР при неизвестном или некорректно определённом числе пеленгуемых ИРИ. Показано, что при неверно определённом числе ИРИ комбинированный алгоритм сохраняет структуру корней АРР-полинома, что позволяет вычислить пеленг ИРИ;

4) разработан алгоритм, позволяющий полностью исключить работу с полиномиальными матрицами при работе с АРР, что даёт 14-кратное увеличение быстродействия по сравнению с традиционными этапами выполнения АРР. Данный подход может быть использован не только при работе с традиционным АРР и предлагаемым комбинированным алгоритмом, но и при комбинировании АРР с другими известными ковариационными алгоритмами, что придаёт универсальность предлагаемому решению;

5) проведено моделирование работы комбинированного алгоритма в условиях короткой выборки сигнала при низком отношении сигнал-шум (минус 5 дБ), которое показало, что для вычисления пеленга одного ИРИ (при ошибке не более 5°) достаточно иметь не менее 32-х выборок для 8-элементной ОКАР. При

уменьшении выборок до 16 погрешность по углу места возрастает до 10° при той же конфигурации ОКАР;

б) исследовано фундаментальное для АРР преобразование в пространство лучей. Показано, что преобразование в пространство лучей порождает ошибку, величина которой зависит от координат пеленгуемого ИРИ;

7) разработано изделие, позволяющее производить пеленг множественных аварийных радиомаяков системы КОСПАС-САРСАТ.

В приложении приведены список условных обозначений и аббревиатур, встречающихся в тексте диссертации, а также копия акта внедрения результатов, полученных в диссертационной работе.

Основные результаты диссертации опубликованы:

В изданиях из перечня ВАК

1. Коробков, М.А. Метод устранения ложного пеленга множественных источников радиоизлучения при использовании пеленгационного алгоритма редукции ранга [Текст] / М.А. Коробков // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. — 2014. — №4 (часть 2). — С.16-20.

2. Коробков, М.А. Методы и алгоритмы пеленга источников радиоизлучения [Текст] / А.С. Петров, М.А. Коробков // Электромагнитные волны и электронные системы. — 2015. — №4. — С. 3-32.

3. Коробков, М.А. Комбинированный алгоритм АРР/Кейпона для пеленга множественных целей с помощью однородной кольцевой антенной решётки [Текст] / М.А. Коробков // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. — 2015. — №2. — С.28-33.

В изданиях из перечня РИНЦ

4. Коробков, М.А. Ошибка преобразования в пространство лучей [Текст] / М.А. Коробков // Молодой учёный. — 2014. — №16. — С. 84-87.

5. Коробков, М.А. Улучшение спектрального разрешения при использовании априорной информации о сигнале [Текст] / М.А. Коробков // Молодой учёный. — 2014. — №14. — С. 57-58.

6. Коробков, М.А. Методы нахождения корней полинома в алгоритме пеленгования UCA-Root-Rare в пакете Mathcad [Текст] / М.А. Коробков // Молодой учёный. — 2014. — №14. — С. 54-56.

7. Коробков, М.А. Корреляционные методы пеленгования источников излучения [Текст] / М.А. Коробков // Молодой учёный. — 2014. — №13. — С. 55-58.

8. Коробков, М.А. Алгоритм UCA-Root-Rare для задач пеленгования источников радиоизлучения однородной кольцевой

антенной решёткой [Текст] / М.А. Коробков // Молодой учёный. — 2014. — №13. — С. 47-54.

9. Коробков, М.А. Метод сокращения вычислительных затрат в алгоритме UCA-Root-Rare [Текст] / М.А. Коробков // Молодой учёный. — 2014. — №16. — С. 88-90.

10. Коробков, М.А. Обзор методов и алгоритмов удаления ложных корней в алгоритме редукции ранга [Текст] / М.А. Коробков // Молодой учёный. — 2015. — №1. — С.74-77.

Прочие публикации

11. Коробков, М. Синтезируемое VHDL описание автомата управления динамическим сдвигом фазы примитивы ММСМ для ПЛИС 7-ой серии фирмы Xilinx [Текст] / М. Коробков // Компоненты и технологии. — 2014 — №10. — С. 65-70.

12. Коробков, М.А. Особенности применения квадратурных смесителей [Текст] / М.А. Коробков // Электроника 2013: межвуз. сб. науч. тр. / Рязанский государственный радиотехнический университет. — Рязань, 2013. — С. 3-7.

13. Коробков, М.А. Метод спектрального сверхразрешения, основанный на модификации собственных значений корреляционной матрицы [Текст] / В.Г. Андреев, М.А. Коробков // Информационные технологии в научных исследованиях: сб. науч. тр. / Рязанский государственный радиотехнический университет. — Рязань, 2012. — С. 12 - 15.

14. Коробков, М.А. Алгоритм редукции ранга для однородной кольцевой антенной решётки [Текст] / М.А. Коробков, С.М. Гудков // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2014»: материалы 10-й междунар. молодежной науч.-техн. конф. (Севастополь, 12-17 мая 2014 г.). – Севастополь: СевНТУ, 2014. — С. 250.

15. Коробков, М.А. Программно-аппаратный комплекс имитации радиолокационной обстановки [Текст] / М.А. Коробков // Региональная конференция молодых ученых «Пути инновационного развития экономики Рязанской области»: тез. докл. – Рязань: РГРТУ, 2013. – С. 20-23.

16. Коробков, М.А. Повышение быстродействия ковариационного алгоритма редукции ранга [Текст] / М.А. Коробков // Математическое моделирование и информатика: труды XVII науч. конф. (Москва, 15-18 мая 2014 г.). – Москва: ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 2014. — С. 81-84.

КОРОБКОВ МИХАИЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ АЛГОРИТМ РЕДУКЦИИ РАНГА
ДЛЯ ПЕЛЕНГОВАНИЯ МНОЖЕСТВЕННЫХ РАДИОМАЯКОВ**

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 28.12.15. Формат бумаги 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л.1,0.
Тираж 115 экз. Заказ № 8980.
ООО «НПЦ «Информационные технологии».
390035, Рязань, ул. Островского, 21/1.