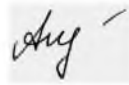


На правах рукописи



Сафонова Анастасия Владимировна

**ЭФФЕКТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ УГЛОВЫХ
КООРДИНАТ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Рязань 2016

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

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

Официальные оппоненты: Куприянов Александр Ильич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры 402 «Радиосистемы передачи информации и управления» Московского авиационного института (национальный исследовательский университет), г. Москва

Савостьянов Владимир Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, начальник лаборатории АО «Корпорация «Фазотрон – НИИР», г. Москва

Ведущая организация: АО «ИРКОС», г. Москва

Защита диссертации состоится 10 февраля 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 ВО «РГРТУ» и на сайте www.rsreu.ru.

Автореферат разослан 28 ноября 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук



Г.В.Овечкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Во многих практических задачах радиолокации, радионавигации и радиосвязи необходимо с высокой точностью измерять координаты источников излучения (ИИ), одновременно формирующих сигналы, имеющие одинаковые несущие частоты. К подобным сигналам относятся преднамеренные активные помехи, а также естественные помехи, возникающие из-за особенностей распространения сигнала в околоземном пространстве, приводящие к многолучевости в точке приема. Кроме того, увеличение количества работающих радиосредств гражданского назначения, наблюдающееся в настоящее время, приводит к сильной загроуженности радиодиапазона.

Использование современных алгоритмов углового сверхразрешения позволяет решать задачу определения угловых координат (УК) ИИ при условии, что отношение сигнал-шум велико, а отклонение амплитудно-фазового распределения в раскрыве реальной антенной системы от модельного пренебрежимо мало. Однако при использовании таких алгоритмов в реальных системах возникает ряд проблем, связанных с выбором геометрии применяемой антенной системы, большими вычислительными затратами, необходимостью обеспечения высокого значения отношения сигнал-шум для достижения требуемой точности оценивания координат ИИ. Кроме того, пеленгации ИИ препятствуют различные мешающие воздействия. Таким образом, актуальным является вопрос повышения эффективности методов адаптивной пространственной обработки сигналов применительно к задаче разрешения источников радиоизлучения.

Значительный вклад в развитие современных методов оценки угловых координат внесли советские и российские ученые: Ю.И. Абрамович, П.А. Бакулев, А.Д. Виноградов, Д.И. Воскресенский, А.Б. Гершман, В.П. Денисов, Д.В. Дубинин, В.В. Караваев, Д.И. Леховицкий, В.Н. Манжос, Ю.Б. Нечаев, В.Ф. Писаренко, М.В. Ратынский, А.М. Рембовский, О.П. Черемисин, Я.Д. Ширман и др., а также зарубежные исследователи: А. Varabell, F. Belloni, G.V. Borgiotti, J.P. Burg, J. Capon, V. Friendlander, G. Jenkins, W. Gabriel, S.L. Marple,

A. Modhaddamgo, B. Ottersten, B. Rao, R. Schmidt, P. Stoica, H. Van Trees, D. Watts, A. Weiss, M. Zoltowski и др.

Целью диссертационной работы являются исследование возможностей углового сверхразрешения источников излучения и разработка практически реализуемых алгоритмов, позволяющих повысить эффективность оценивания угловых координат источников радиоизлучения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) провести сравнительный анализ существующих алгоритмов углового сверхразрешения, оценить их эффективность в условиях малых отношений сигнал-шум и возможности их совершенствования;

2) определить влияние геометрии пространственного положения излучателей на эффективность оценки угловых координат ИИ;

3) разработать алгоритм оценивания угловых координат ИИ, требующий меньших вычислительных затрат, чем известные алгоритмы, но не уступающий им по точности определения координат;

4) разработать алгоритм оценивания угловых координат ИИ, не требующий парного соответствия между азимутом и углом места пеленгуемых источников излучения;

5) разработать алгоритм, позволяющий осуществлять пеленгацию как коррелированных, так и некоррелированных источников излучения в условиях воздействия различных видов шумов;

6) исследовать структуру алгоритмов углового положения источников излучения и модифицировать их для уменьшения вычислительных затрат.

Научная новизна полученных в диссертации результатов заключается в следующем¹:

1) разработан алгоритм оценивания угловых координат, не требующий парного соответствия между азимутом и углом места пеленгуемых источников излучения;

2) исследовано влияние структуры алгоритма на эффективность оценки угловых координат применительно к антенным решеткам L- и 2D-L-формы;

¹ Пункты 1,2,4,5 соответствуют специальности 05.12.04, пункты 3,5 – специальности 05.12.14

3) разработан алгоритм, позволяющий одновременно пеленговать коррелированные и некоррелированные источники излучения в условиях воздействия различных видов шумов;

4) разработан алгоритм сингулярного разложения матриц, обеспечивающий быструю сходимость разложения;

5) проведен анализ эффективности разработанных алгоритмов и получены результаты их сравнения с известными методами.

Внедрение результатов

Результаты диссертационной работы внедрены в разработки АО «Государственный рязанский приборный завод» и в учебный процесс ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет» при изучении дисциплин «Методы спектрального анализа сигналов» (магистерский курс), «Основы теории систем и комплексов радиоэлектронной борьбы» (курс специалитета), «Радиолокационные объекты и отражения» (курс специалитета), в том числе в форме программного обеспечения к лабораторным работам, что подтверждено соответствующими актами.

Методы исследования

Анализ полученных результатов проводился с помощью методов статистической теории радиотехники, методов спектрального анализа радиосигналов, методов теории математических пространств, а также методов линейной алгебры, матричных вычислений собственных значений и векторов матриц. Основная часть результатов получена с помощью имитационного моделирования с использованием вычислительных алгоритмов, реализованных на ПК.

Основные положения, выносимые на защиту²:

1) алгоритм оценивания угловых координат, не требующий парного соответствия между азимутом и углом места пеленгуемых источников излучения, который позволяет сократить вычислительные затраты в 4,5 раза по сравнению с одним из наиболее эффективных алгоритмов – алгоритмом ESPRIT;

2) алгоритм оценивания угловых координат источников радиоизлучения, который позволяет проводить пеленгование коррелиро-

² Пункты 1,3 соответствуют специальности 05.12.04, пункты 1,2 – специальности 05.12.14

ванных и некоррелированных источников излучения при воздействии различных видов шумов с погрешностью не хуже 0,1 градуса;

3) алгоритм сингулярного разложения матриц, позволяющий сократить число требуемых итераций в 2 раза по сравнению с одним из наиболее эффективных – Brent-Luk-Van Loan (BLV) алгоритмом разложения.

Достоверность полученных результатов подтверждается корректным применением математического аппарата, сравнительными результатами имитационного компьютерного моделирования предложенных и известных алгоритмов, согласованностью результатов расчетов, моделирования и экспериментальных исследований и совпадением в частных случаях полученных результатов с известными результатами.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы были доложены на 8 международных научно-технических конференциях:

- XIX международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва, 2013 г.;
- 9-я международная молодежная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2013», Севастополь, 2013 г.;
- XVIII международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», Харьков, 2014 г.;
- 9-я международная молодежная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2014», Севастополь, 2014 г.;
- 24-я международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, 2014 г.;
- 23-я международная научно-техническая конференция «Современная радиоэлектроника», Москва, 2015 г.;
- XXI международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва, 2015 г.;
- XXVIII международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-28», Рязань, 2015 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 работ. Из них 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, 8 тезисов докладов на международных научно-технических конференциях, в том числе 1 расширенный текст доклада, включенный в реферативную базу SCOPUS, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, 1 статья в прочих изданиях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Общий объем диссертации составляет 113 страниц, в том числе, список использованных источников из 168 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении показаны актуальность работы и степень разработанности темы, определены цель и задачи исследования, обоснована научная новизна полученных в диссертации результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту, приведены данные о внедрении результатов, апробации представленной работы и публикациях, представлена структура диссертации.

В первой главе сформулирована задача углового разрешения источников излучения в многоканальных системах. Проведен обзор существующих методов нелинейного спектрального анализа сигналов в задаче оценки угловых координат, а также сравнительный анализ алгоритмов сверхразрешения. Выявлен ряд научных проблем, решение которых представляет интерес для разработчиков систем оценки угловых координат. Такими проблемами являются: высокие вычислительные затраты, требуемые для реализации алгоритмов, уменьшение СКО пеленга, снижение влияния геометрии АС на характеристики систем оценки угловых координат, а также уменьшение зависимости оценки азимута ИИ от полученной оценки угла места ИИ и наоборот.

Поиску решения вышеперечисленных проблем посвящена вторая глава диссертационной работы.

Во второй главе описана статистическая модель исследуемой системы, предложен и обоснован алгоритм оценивания угловых

координат, не требующий парного соответствия между азимутом и углом места пеленгуемых ИИ, который позволяет сократить вычислительные затраты при его реализации без увеличения погрешности получаемых оценок.

Вычисления оценок азимута $\hat{\phi}_k$ и угла места $\hat{\theta}_k$ для k -го ИИ при помощи предложенного алгоритма происходят независимо друг от друга по следующим формулам:

$$\hat{\phi}_k = \arccos \left[\frac{\lambda}{2\pi d_y} \arccos \left[\frac{\text{amplitude}(\mathbf{\Phi})_{k,k}}{\sqrt{2}} \right] \right] \quad (1)$$

$$\hat{\theta}_k = \arccos \left[\frac{\lambda}{2\pi d_x} \text{phase}(\mathbf{\Phi})_{k,k} \right] \quad (2)$$

где λ – длина волны, d_x и d_y – координаты антенного элемента (АЭ) по оси x и по оси y соответственно, $\text{amplitude}(\mathbf{\Phi})_{k,k}$ и $\text{phase}(\mathbf{\Phi})_{k,k}$ подразумевают амплитудные и фазовые компоненты диагональной матрицы $\mathbf{\Phi}$ размерностью $K \times K$, которую можно описать следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{\Phi} = & \sqrt{2} \text{diag} \left[\cos \left(\frac{2\pi d_y \cos \phi_1}{\lambda} \right) \exp \left\{ j \left(\frac{2\pi d_x \cos \theta_1}{\lambda} \right) \right\}, \dots \right. \\ & \left. \dots, \cos \left(\frac{2\pi d_y \cos \phi_K}{\lambda} \right) \exp \left\{ j \left(\frac{2\pi d_x \cos \theta_K}{\lambda} \right) \right\} \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Проведено сравнение предложенного алгоритма с известными алгоритмами PM (Propagator method) и ESPRIT (Estimation of Signal Parameters Via Rotational Invariance Techniques).

Предложенный алгоритм требует для реализации $3NLK$ вычислительных операций. Как известно, алгоритм ESPRIT имеет вычислительную сложность, равную $N^3 + 2N^2L$, а PM требует $3N'LK$ вычислительных операций, где L – количество векторов сигнала (снимков), принятых антенной решеткой, N – число элементов антенной решетки (АР), N' – число элементов в каждой подрешетке, K – число пеленгуемых ИИ. Для рассмотренного случая вычислительная сложность предложенного алгоритма в 1,5 раза меньше, чем у PM, и в 4,5 раза меньше, чем у ESPRIT, что во многих случаях является принципиальным с точки зрения реализации

алгоритма в реальном времени. Например, при пеленгации движущихся целей.

На рисунке 1 представлены зависимости стандартного отклонения (Δ) оценки угла места источника излучения $\varphi = 50^\circ$ (рис. 1, а) и оценки азимута источника излучения $\theta = 20^\circ$ (рис. 1, б) от истинного значения в зависимости от величины отношения сигнал-шум (ОСШ) для предложенного алгоритма, а также для известных алгоритмов РМ и ESPRIT.

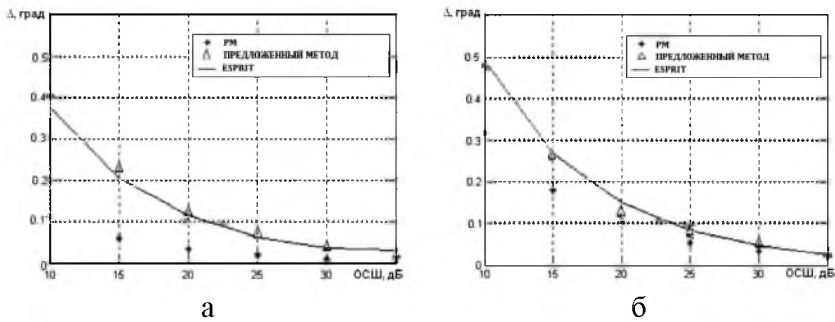


Рисунок 1 – Зависимости стандартного отклонения угловых координат от истинного значения от величины ОСШ

Приведенные на рисунке 1,а зависимости показывают, что при значениях величины ОСШ менее 25 дБ точность предложенного метода при определении угла места ИИ ниже точности РМ на (0,05...0,35) градусов. При этом стандартное отклонение от истинного значения координат ИИ для предложенного метода и метода ESPRIT лежит в пределах доверительного интервала. Величина доверительного интервала – 0,02 градуса, вероятность – 0,95. Для случая, когда величина ОСШ больше 30 дБ, разница в точности методов незначительна и также не выходит за пределы доверительного интервала. Графики на рисунке 1,б показывают, что разница в точности при определении азимута при помощи РМ и предложенного алгоритма колеблется в диапазоне от 0,2 до 0,05 градуса при величине ОСШ от 10 дБ до 25 дБ. Погрешность определения азимута при помощи алгоритма ESPRIT и предложенного метода в данном случае также не выходит за пределы доверительного интервала. Таким образом, данные, полученные в результате моделирования

подтверждают эффективность определения угловых координат при помощи предложенного алгоритма.

Исследовано влияние структуры алгоритма на эффективность оценки угловых координат ИИ. Рассмотрены случаи применения AP с параллельным расположением элементов, а также AP L-формы и 2D-L-формы.

Если угол места пеленгуемого ИИ лежит в секторе от 70 до 90 градусов, то его оценка может быть недостоверной. Этот диапазон является типичным для мобильных телекоммуникационных систем, что существенно ограничивает применение алгоритма. Существующую проблему можно решить путем использования AP L-формы. В данном случае проблема оценивания координат, лежащих в секторе от 70 до 90 градусов, устраняется, но появляется аналогичная проблема для оценивания значений азимута в секторе от 0 до 20 градусов. Однако при использовании двух AP L-формы в плоскостях x-z и y-z данная проблема может быть полностью устранена. Кроме того, при применении AP с параллельным расположением элементов СКО достигает значения до 3 градусов, при применении AP L-формы величина СКО составляет до 2,5 градуса, в то время как при использовании AP 2D-L-формы СКО не превышает 1 градуса.

Данные, полученные в результате моделирования рассмотренных структур AP, сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Основные характеристики рассмотренных алгоритмов

Тип AP	Параллельное расположение АЭ	L-форма	2D-L-форма
Диапазон определения азимута и угла места	$(0, 2\pi), (0, \pi/2)$	$(0, 2\pi), (0, \pi)$	$(0, 2\pi), (0, \pi)$
Диапазон наибольшей ошибки оценивания координат	$70^{\circ} - 90^{\circ}$	$0^{\circ} - 20^{\circ}$	–
Максимальное значение СКО, град	3	2,5	0,9
Парное соответствие между азимутом и углом места	Требуется	Не требуется	Не требуется

Из данных, приведенных в таблице 1, можно сделать вывод, что применение AP 2D-L-формы для определения УК ИИ позволяет существенно повысить эффективность оценки азимута и угла места. Во-первых, использование AP L-формы увеличивает диапазон определения угла места ИИ в 2 раза, по сравнению с использованием AP с параллельным расположением элементов. Во-вторых, при использовании AP L-формы и AP 2D-L-формы не требуется парного соответствия между угловыми координатами, т.е. оценка азимута и угла места производится независимо друг от друга. В-третьих, использование AP 2D-L-формы позволяет получить оценку УК с высокой точностью, независимо от угла прихода сигнала.

В третьей главе рассмотрены вопросы пеленгования коррелированных и некоррелированных ИИ в условиях воздействия нестационарного шума.

Большинство алгоритмов сверхразрешения рассчитаны на работу в условиях воздействия белого гауссовского шума, однако радиотехническим системам (РТС) часто приходится работать в условиях воздействия различных видов шумов, например, таких как розовый шум или хаотичные импульсные помехи. Кроме того, на систему может воздействовать сразу несколько различных постановщиков помех, тогда возникает необходимость одновременной пеленгации как коррелированных, так и некоррелированных ИИ. В этом случае для применения классических алгоритмов спектрального оценивания угловых координат ИИ необходимо провести предварительную обработку принятого сигнала.

В работе предложен алгоритм оценивания угловых координат источников радиоизлучения, который позволяет проводить пеленгование коррелированных и некоррелированных источников излучения при воздействии нестационарного шума. Проведено статистическое моделирование предложенного алгоритма при различных параметрах обстановки и его сравнение с одним из наиболее эффективных алгоритмов – алгоритмом, предложенным А. Модхаддам-жо.

В результате работы сделаны следующие выводы:

1. Предложенный алгоритм может быть использован для пеленгования нескольких некоррелированных ИИ в условиях воздействия

нестационарного шума, так как пеленгуемые источники в этом случае хорошо различимы и СКО не превышает 0,05 градуса.

2. Предложенный алгоритм может быть использован для пеленгования нескольких коррелированных ИИ в условиях воздействия нестационарного шума, так как пеленгуемые источники в этом случае хорошо различимы и СКО не превышает 0,07 градуса.

3. Предложенный алгоритм может быть использован для пеленгования сразу нескольких ИИ при воздействии нестационарного шума, независимо от того, коррелированы источники между собой или не коррелированы. СКО в этом случае не превышает 0,1 градуса.

В четвертой главе рассмотрен вопрос уменьшения вычислительных затрат при расчете оценок угловых координат ИИ. Сингулярное разложение матриц является важным компонентом многих алгоритмов обработки сигнала и используется в алгоритмах оценки координат ИИ. Таким образом, для практического применения требуется проведение сингулярного разложения в реальном времени. Для АР, имеющих малое количество элементов, удовлетворить данное требование несложно. Однако если используются АР с большим числом элементов, то достижение быстрой сходимости является трудной задачей.

Предложен алгоритм сингулярного разложения матриц, обеспечивающий быструю сходимость разложения, который можно описать следующим образом:

1) проводим преобразование диагональных элементов матрицы;

1.1) находим $N/2$ больших элементов диагонали матрицы $(x_i; y_i)$, $i = 1, \dots, N/2$, таких, что: $x_{i+1} \neq x_1, \dots, x_i$, $x_{i+1} \neq y_1, \dots, y_i$, $y_{i+1} \neq x_1, \dots, x_i$, $y_{i+1} \neq y_1, \dots, y_i$, $x_i \neq y_i$;

1.2) формируем подматрицы \mathbf{A}_{diag} размерностью 2×2 :

$$\mathbf{A}_{diag} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{x_i x_i} & \mathbf{A}_{x_i y_i} \\ \mathbf{A}_{y_i x_i} & \mathbf{A}_{y_i y_i} \end{bmatrix}; \quad (4)$$

1.3) к полученным матрицам \mathbf{A}_{diag} применяем сингулярное разложение и находим левые и правые параметры вращения θ_l и θ_r , соответственно;

1.4) применяем двустороннее плоское вращение Якоби:

$$\mathbf{A}'_{diag} = \mathbf{J}_1 \mathbf{A}_{diag} \mathbf{J}_1 ; \quad (5)$$

2) проводим преобразование столбцов матрицы;

2.1) формируем подматрицу \mathbf{A}_{cm} размерностью 2×2 . Если $x_i < y_i$, то

$$\mathbf{A}_{cm} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{c_{2j-1}x_i} & \mathbf{A}_{c_{2j}y_i} \\ \mathbf{A}_{c_{2j}x_i} & \mathbf{A}_{c_{2j-1}y_i} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где $i = 1, \dots, (N/2 - 1)$, $c_k \neq x_i, y_i$, $k = 1, \dots, (N - 2)$ или

$$\mathbf{A}_{cm} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{c_{2j-1}y_i} & \mathbf{A}_{c_{2j}x_i} \\ \mathbf{A}_{c_{2j}y_i} & \mathbf{A}_{c_{2j-1}x_i} \end{bmatrix}; \quad (7)$$

2.2) применяем правостороннее вращение к подматрице столбцов:

$$\mathbf{A}'_{cm} = \mathbf{A}_{cm} \mathbf{J}_r ; \quad (8)$$

2.3) заменяем подматрицу в исходной матрице;

3) проводим преобразование строк матрицы;

3.1) формируем подматрицу \mathbf{A}_{cmp} размерностью 2×2 . Если $x_j < y_j$, то

$$\mathbf{A}_{cmp} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{x_j r_{2j-1}} & \mathbf{A}_{x_j r_{2j}} \\ \mathbf{A}_{y_j r_{2j-1}} & \mathbf{A}_{y_j r_{2j}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

или

$$\mathbf{A}_{cmp} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{y_j r_{2j-1}} & \mathbf{A}_{y_j r_{2j}} \\ \mathbf{A}_{x_j r_{2j-1}} & \mathbf{A}_{x_j r_{2j}} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где $r_k \neq x_j, y_j$, $k = 1, \dots, (N - 2)$;

3.2) применяем левостороннее вращение к подматрице строк:

$$\mathbf{A}'_{cmp} = \mathbf{J}_l \mathbf{A}_{cmp}; \quad (11)$$

3.3) заменяем подматрицу в исходной матрице.

Предложенный алгоритм удобно реализовать на устройствах с параллельной обработкой информации. Схема реализации предлагаемого алгоритма представлена на рисунке 2.

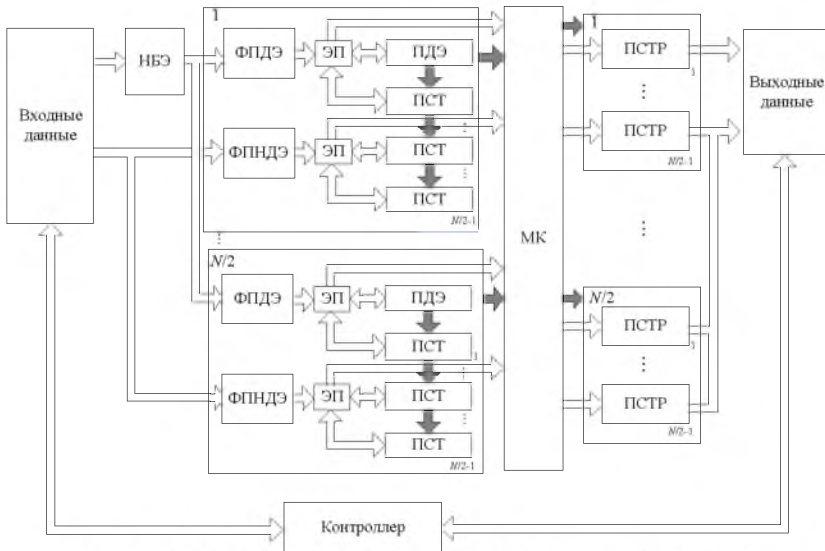


Рисунок 2 – Схема реализации предложенного алгоритма

На рисунке 2 приняты следующие обозначения: НБЭ – блок нахождения большего элемента, ФПДЭ – блок формирования подматрицы диагональных элементов, ФПНДЭ – блок формирования подматрицы недиагональных элементов, ЭП – элемент памяти, ПДЭ – блок преобразования матрицы диагональных элементов, ПСТ – блок преобразования столбцов матрицы, ПСТР – блок преобразования строк матрицы, МК – матричный коммутатор. Закрашенные стрелки показывают связь параметров вращения, белые – связь матричных элементов.

На рисунке 3 представлен график зависимости недиагональной нормы от числа итераций для предложенного алгоритма (ПА) и алгоритма BLV, а на рисунке 4 – график зависимости числа повторений от размерности используемой матрицы для тех же алгоритмов.

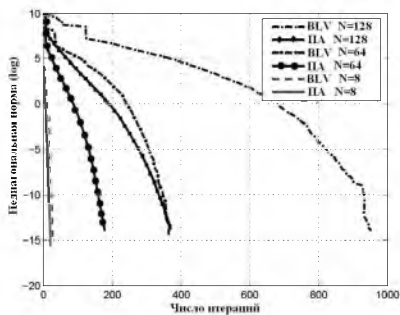


Рисунок 3 – Зависимость недиагональной нормы от числа итераций

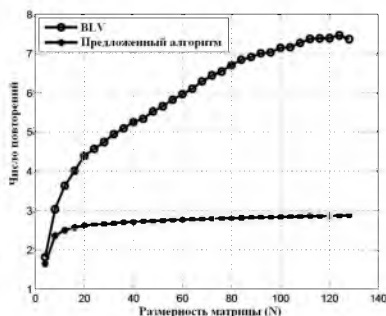


Рисунок 4 – Зависимость числа повторений от размерности используемой матрицы

По полученным зависимостям можно сделать вывод, что при использовании матриц малой размерности ($N=8$) оба алгоритма обладают примерно одинаковой сходимостью. Однако при работе с большими матрицами ($N=64$, $N=128$) число требуемых итераций при использовании предложенного алгоритма сокращается примерно в 2 раза по сравнению с применением BLV, что является существенным при реализации алгоритмов.

В заключении описаны основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, которые состоят в следующем:

1) проведен сравнительный анализ известных методов оценивания координат ИИ, рассмотрена устойчивость этих методов, а также найдены граничные значения ОСШ, при которых методы высокого разрешения остаются работоспособными. Оценена точность определения угловых координат методами ROOT-MUSIC, ESPRIT и MUSIC. Разрешающая способность методов ROOT-MUSIC и ESPRIT превосходит в 1,5-2 раза разрешающую способность классического MUSIC;

2) предложен алгоритм оценивания угловых координат ИИ, не требующий парного соответствия между азимутом и углом места пеленгуемых источников излучения, который позволяет сократить вычислительные затраты в 4,5 раза по сравнению с алгоритмом ESPRIT. Кроме того, предложенный алгоритм позволяет различить

несколько близкорасположенных ИИ с погрешностью не хуже 0,5 градуса;

3) рассмотрено влияние геометрии АР на эффективность определения угловых координат ИИ. Использование АР L- и 2D-L-формы позволяет устранить проблему оценивания координат, лежащих в секторе от 0 до 20 градусов и от 70 до 90 градусов. При этом оценка азимута не зависит от оценки угла места источника излучения и наоборот. 2D-L-алгоритм превосходит L-алгоритм и алгоритм, использующий АР с параллельным расположением элементов, по точности. При применении АР с параллельным расположением элементов СКО не превышает 3 градуса, при применении АР L-формы величина СКО составляет до 2,5 градуса, в то время как при использовании АР 2D-L-формы СКО не превышает 1 градуса;

4) предложен алгоритм оценивания угловых координат источников радиоизлучения, который позволяет проводить пеленгование как коррелированных, так и некоррелированных источников излучения в условиях воздействия нестационарного шума. СКО в этом случае не превышает 0,1 градуса;

5) предложен алгоритм сингулярного разложения матриц, который обеспечивает быструю сходимость и позволяет сократить число требуемых итераций в 2 раза по сравнению с известным BLV алгоритмом. Число повторений, необходимых для реализации предложенного алгоритма, при использовании матриц размерностью $N > 32$ примерно одинаково, что является преимуществом при работе с большими матрицами.

В приложении приведены список условных обозначений, сокращений и терминов, а также копии актов внедрения результатов, полученных в диссертационной работе.

Работа выполнена при поддержке гранта (задание № 2014/178) на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России (НИР 7-14Г, номер государственной регистрации 01201461760).

Основные результаты диссертационной работы опубликованы:

В изданиях из перечня ВАК

1. Кошелев В.И., Сафонова А.В. Модифицированный Propagator метод оценки направления прихода радиосигнала // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2014. – № 47. – С. 53-58.
2. Сафонова А.В. Эффективность алгоритма оценивания угловых координат источника радиосигнала при различных методах обработки входных реализаций // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2015. – № 2. – С. 54-60.
3. Сафонова А.В. Алгоритм сингулярного разложения матриц // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2016. – № 1. – С. 61-66.

В изданиях, входящих в БД SCOPUS

4. Сафонова А.В. Влияние структуры алгоритма углового разрешения источников излучения на эффективность оценки угловых координат . // 24-я междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»: материалы конференции, Севастополь, 7—13 сентября 2014 г – 2014. – Т. 1. – С. 475-476.

Прочие публикации:

5. Сафонова А.В. Исследование возможностей углового разрешения источников излучения // Методы и устройства формирования и обработки сигналов в информационных системах: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань: РГРТУ, 2013. – С.125-129.
6. Сафонова А.В., Штрунова Е.С. Исследование эффективности подавления радиолокационной системы активной шумовой помехой по боковым лепесткам диаграммы направленности // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: XIX междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 4 т. Т. 1. – Москва: МЭИ, 2013. – С. 121.

7. Сафонова А.В. Исследование точности методов углового сверхразрешения источников излучения // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2013»: материалы 9-й междунар. молодежной науч.-техн. конф., Севастополь, 22 - 26 апреля 2013 г. – Севастополь: СевНТУ, 2013. – С. 95.

8. Сафонова А.В. Оценка координат источника излучения при помощи модифицированного РМ-алгоритма // 18-й междунар. молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке»: материалы форума. – Харьков, 2014. – Т. 3. – С. 168-169.

9. Сафонова А.В. Исследование модифицированного рт-алгоритма оценки координат // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2014»: материалы 10-й междунар. молодежной науч.-техн. конф. – Севастополь, 2014. – С. 97.

10. Сафонова А.В. Метод оценки направления прихода сигнала // Труды 23-й МНТК "Современная радиоэлектроника". – Москва, 2015. – С. 3-5.

11. Сафонова А.В. Исследование влияния структуры алгоритма сверхразрешения на точность оценки угловых координат источника излучения // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: XXI междунар. науч.-техн. конф.: тез. докл. В 4 т. – Москва: МЭИ, 2015. – С. 88.

12. Сафонова А.В. Алгоритм быстрой сходимости SVD. XXVIII междунар. науч. конф. «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-28». – Рязань, 2015. – С. 22-23.

Объекты интеллектуальной собственности:

13. Программа реализации алгоритма оценивания координат для задач навигации: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015616868, заявл.05.05.2015 г., зарег. 25.06.2015 г. / Сафонова А.В., Кошелев В.И.

Сафонова Анастасия Владимировна

**ЭФФЕКТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ
УГЛОВЫХ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКОВ
РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ**

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 06.10.16. Формат бумаги 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать ризографическая. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ № 6465.

ООО «НПЦ» Информационные технологии».

390035, Рязань, ул. Островского, 21/1.