

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

УДК 621.396

Башкова  
Мария Александровна

**Алгоритмы первичной обработки сигналов в поляризационно-чувствительных пеленгаторах средств радиомониторинга**

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук  
по специальности 1-39 80 01  
«Радиосистемы и радиотехнологии»

\_\_\_\_\_ М. Башкова

Научный руководитель  
Козлов Сергей Вячеславович  
доктор технических наук, профессор

Минск 2023

## ВВЕДЕНИЕ

В системах радиомониторинга часто возникает задача обнаружения и пеленгования источников радиоизлучения (ИРИ) с неизвестной поляризацией. Если приемные антенны средства радиомониторинга имеют одинаковую поляризацию, то поляризация ИРИ не оказывает существенного влияния на процесс пеленгования. Такая ситуация имеет место, например, в широко распространенных пеленгаторных антенных решетках с приемными элементами в виде вертикально ориентированных вибраторов. Другая ситуация возникает, когда приемные элементы размещены на криволинейной поверхности и обеспечить одинаковые поляризационные параметры принципиально невозможно. В связи с этим возникает вопрос о возможности практической реализации алгоритмов совместного оценивания угловых и поляризационных параметров источников радиоизлучений в корреляционно-интерферометрических пеленгаторах с антенными элементами, размещаемыми на криволинейной поверхности и имеющими различные поляризационные параметры, и эффективности указанных алгоритмов.

В работе были поставлены задачи по:

- анализу принципов построения и характеристик антенных систем и подсистем обработки сигналов поляризационно-чувствительных пеленгаторов;

- разработке математической модели входной реализации корреляционно-интерферометрических пеленгаторов с антенными элементами, размещаемыми на криволинейных поверхностях;

- разработке и реализации оптимального и квазиоптимального алгоритмов оценивания угловых координат и поляризационных параметров источников излучения в поляризационно-чувствительных пеленгаторах;

- разработке методик, компьютерных моделей и исследовании точности оценивания угловых и поляризационных параметров источников радиоизлучений при оптимальных и квазиоптимальных алгоритмах обработки;

- верификации компьютерной модели;

- разработке рекомендаций по построению и характеристикам поляризационно-чувствительных пеленгаторов с антенными системами, размещаемыми на криволинейных поверхностях.

В работе рассматривается назначение и структура компьютерной модели. Приведена математическая модель входной реализации корреляционно-интерферометрического пеленгатора с антенными элементами в виде пар антенн с ортогональными поляризациями, размещенными на поверхности с произвольной кривизной, позволяющая получить аналитическую запись сигналов на выходах приемных каналов и вектора диаграмм направленности приемных каналов для заданных информационных параметров сигналов, и применения результатов при разработке оптимального и квазиоптимального алгоритмов оценивания

угловых координат и поляризационных параметров источников излучения и исследование их точности. Разработаны структурные схемы и подробно описаны алгоритмы совместного измерения угловых координат и поляризационных параметров источников излучения для поляризационно-чувствительных пеленгаторов.

Целевым назначением компьютерной модели является изыскание способов повышения эффективности и расширения функциональных возможностей средств радиомониторинга за счет реализации алгоритмов совместного измерения угловых координат и поляризационных параметров источников радиоизлучений в поляризационно-чувствительных пеленгаторах.

Компьютерная модель и методика исследования точности оценивания угловых и поляризационных параметров источников радиоизлучений при оптимальных и квазиоптимальных алгоритмах обработки, разработанные и реализованные в работе, могут быть полезны для специалистов в области радиомониторинга и сотрудников служб безопасности государственных и коммерческих структур.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Связь работы с научными программами, темами**

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» на кафедре информационных радиотехнологий в рамках развития на предприятиях радиотехнического профиля Республики Беларусь промышленного производства систем радиомониторинга с техническими, конструктивными и эксплуатационными характеристиками, соответствующие мировым функциональным требованиям, стандартам и технологическим нормам построения радиоаппаратуры XXI века.

Тема соответствует Перечню приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности в Республике Беларусь на 2023-2025 гг. в области приборостроения и инновационных материалов (п. 4), обеспечения безопасности человека, общества и государства (п. 6).

Результаты диссертационных исследований могут быть использованы при оптимизации технических решений по построению поляризационно-чувствительных пеленгаторов средств радиомониторинга и исследованию их эффективности.

### **Цель, задачи, объект и предмет исследования**

*Цель работы* – расширение функциональных возможностей средств радиомониторинга за счет реализации совместного измерения угловых координат и поляризационных параметров источников радиоизлучений (ИРИ) в поляризационно-чувствительных пеленгаторах.

*Задачи* исследования:

анализ принципов построения и характеристик антенных систем и подсистем обработки сигналов поляризационно-чувствительных пеленгаторов;

разработка математической модели входной реализации корреляционно-интерферометрических пеленгаторов с антенными элементами, размещаемыми на криволинейных поверхностях;

разработка и реализация оптимального и квазиоптимального алгоритмов оценивания угловых координат и поляризационных параметров источников излучения в поляризационно-чувствительных пеленгаторах;

разработка методик, компьютерных моделей и исследование точности оценивания угловых и поляризационных параметров источников радиоизлучений при оптимальных и квазиоптимальных алгоритмах обработки;

разработка рекомендаций по построению и характеристикам поляризационно-чувствительных пеленгаторов с антенными системами, размещаемыми на криволинейных поверхностях.

*Гипотеза:* существует возможность практической реализации алгоритмов совместного оценивания угловых и поляризационных параметров

источников радиоизлучений в корреляционно-интерферометрических пеленгаторах с антенными элементами, размещаемыми на криволинейной поверхности и имеющими различные поляризационные параметры.

*Объект* – пеленгаторы средств радиомониторинга.

*Предмет* – алгоритмы первичной обработки сигналов при оценивании угловых и поляризационных параметров источников радиоизлучения в поляризационно-чувствительных пеленгаторах.

**Научная новизна** полученных результатов заключается в следующем:

1. Разработана математическая модели входной реализации корреляционно-интерферометрического пеленгатора с антенными элементами в виде пар антенн с ортогональными поляризациями, размещенными на поверхности с произвольной кривизной вкруговую и в несколько ярусов, *отличающаяся* учетом изменения поляризационных параметров приемных элементов от места его установки на криволинейной поверхности и коэффициента усиления от длины волны принимаемого радиоизлучения и направления его прихода, что *позволило* получить опорный сигнал для максимально-правдоподобного алгоритма оценивания и вычислить элементы матрицы Фишера при получении статистических характеристик оценивания.

2. Установлены закономерности максимально-правдоподобных оценок информационных параметров источников радиоизлучения для поляризационно-чувствительного пеленгатора с антенными элементами в виде набора ортогонально ориентированных пар диполей, размещенных по криволинейной поверхности в виде полусферы и показано, что: среднеквадратическая ошибка (СКО) максимально-правдоподобных оценок угловых координат ИРИ в 2-3 раза меньше, чем СКО оценок угла наклона плоскости поляризации и сдвига фаз ортогонально поляризованных компонентов; среднеквадратическая ошибка оценивания амплитуды не зависит от отношения сигнал/шум и определяется весовым усреднением шумов «видимых» для заданного направления наблюдения приемных каналов; точность измерения азимута источника полезного сигнала выше, чем угла места, что определяется большими размерами «апертуры» антенной системы в азимутальной плоскости; наибольшая СКО наблюдается при измерении сдвига фаз поляризационных компонент, причем она превышает СКО оценивания угла наклона плоскости поляризации; коэффициенты корреляции ошибок измерения всех информационных параметров близки к нулю.

Высокая точность оценивания достигается при относительно малых, порядка 10 дБ и менее, отношениях сигнал/шум на выходе изотропного приемного элемента, что обусловлено тем, что при вычислении решающей статистики происходит фокусировка приемной антенной решетки в направлении на полезный сигнал с соответствующим увеличением энергии полезного сигнала.

3. Показано, что для предлагаемого квазиоптимального алгоритма пеленгования оценки измерения угловых координат и информационных параметров полезного сигнала являются смещенными: по азимуту в пределах  $0,2...2,5$  градусов, по углу места  $0,5...3$  градусов, по углу наклона плоскости поляризации и сдвигу фаз ортогонально-поляризованных компонент  $0,5...8$  градусов. СКО ошибок для квазиоптимального алгоритма оценивания в  $1,2...2,8$  раз больше, чем для оптимального максимально-правдоподобного алгоритма оценивания.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Статистически оптимальный алгоритм совместного оценивания угловых координат и поляризационных параметров источников излучений и методика исследования его точностных характеристик на основе матрицы Фишера, *отличающиеся* формированием векторов диаграмм направленности приемных элементов для всех ожидаемых значений угловых координат и поляризационных параметров источников излучений, что *позволяет* получить максимально-правдоподобные оценки совместного измерения информационных параметров сигнала и их статистические характеристики.

2. Квазиоптимальный алгоритм совместного оценивания угловых координат и поляризационных параметров источников излучений, *отличающийся* получением в рамках адаптивного байесовского подхода модифицированной функции правдоподобия за счет исключения комплексной амплитуды принимаемого сигнала, проведением предварительной грубой оценки угловых координат, угла наклона плоскости поляризации и сдвига фаз ортогонально-поляризованных компонентов сигнала по выходным сигналам пары ортогонально-поляризованных приемных каналов с максимальной амплитудой принимаемого сигнала, и максимизацией модифицированной функции правдоподобия по угловым координатам и поляризационным параметрам источника радиоизлучения градиентным методом, что позволило уменьшить число анализируемых параметров при проведении максимизации с 6-ти до 4-х при количестве вычислений функции правдоподобия в пределах  $40...80$  и обеспечить получение оценок в реальном масштабе времени.

3. Компьютерная модель корреляционно-интерферометрического пеленгатора с антенными элементами, размещаемыми на криволинейной поверхности, *отличающаяся* учетом поляризационных характеристик источников радиоизлучения и приемных элементов и реализацией предложенных алгоритмов совместного оценивания информационных параметров полезных сигналов, что *позволяет* проводить исследования эффективности и выбирать рациональные параметры поляризационно-чувствительных пеленгаторов.

**Личный вклад соискателя ученой степени в результаты диссертации с ограничением их от соавторов совместных исследований и публикаций.**

Представленные в диссертационной работе научные результаты, а также

положения, выносимые на защиту, получены соискателем самостоятельно.

Основным соавтором публикаций является научный руководитель – доктор технических наук, профессор Козлов С. В., который осуществлял определение целей и постановку задач исследований.

### **Апробация диссертации и сведения об использовании ее результатов**

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на республиканской научно-технической конференции «Информационные радиосистемы и радиотехнологии» (г. Минск 2022 г.); 58-й и 59-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (г. Минск, 2022 г., 2023 г.).

### **Опубликованность результатов диссертации**

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 2 статьи в сборниках материалов республиканских научных конференций с международным участием и 2 статьи в сборниках материалов республиканских научных конференций аспирантов, магистрантов и студентов. Общий объем публикаций составляет 1,8 авторских листа.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, трех глав, заключения, библиографического списка и приложений.

Общий объем диссертации составляет 92 страницы, из них 58 страниц основного текста, библиографический список из 39 наименований на 3 страницах, список собственных публикаций из 4 наименований на 1 странице, и одного приложения на 16 страницах, включающего код компьютерной модели в среде *Matlab*.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность работы, отмечается новизна и кратко излагается содержание диссертации, а также назначение, задачи, структура разрабатываемой системы и основные научные результаты исследований.

В **первой главе** рассматриваются результаты обзора литературы по теме диссертации, проводится анализ принципов построения и характеристик антенных систем поляризационно-чувствительных пеленгаторов средств радиомониторинга для совместного определения направления прихода и поляризации. Ставится цель и определяется структура диссертации.

**Вторая глава** посвящена описанию разрабатываемых алгоритмов оценивания угловых координат и поляризационных параметров источников радиоизлучений в корреляционно-интерферометрических пеленгаторах. В данной главе представлена общая структурная схема корреляционно-интерферометрического пеленгатора. Рассмотрен вариант геометрии антенной системой в виде набора ортогонально ориентированных пар диполей, размещенных по криволинейной поверхности.

Общая структурная схема корреляционно-интерферометрического пеленгатора представлена на рисунке 1.

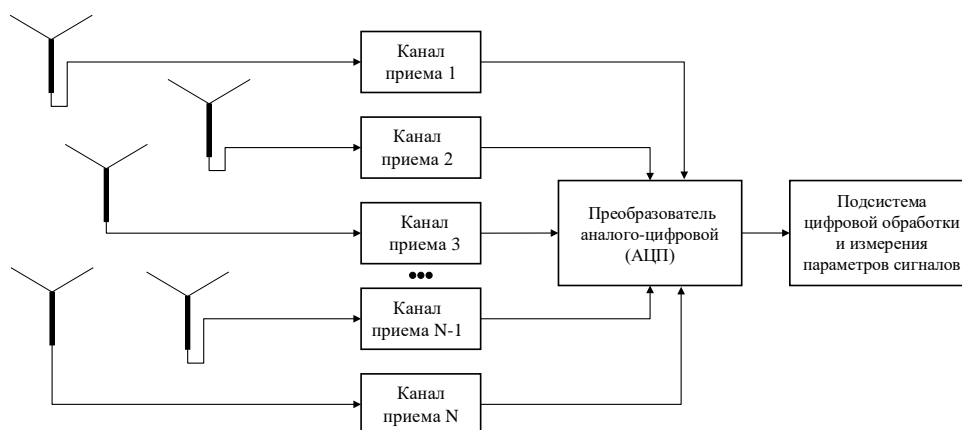


Рисунок 1 – Общая структурная схема корреляционно-интерферометрического пеленгатора

Сущность рассматриваемой подсистемы состоит в реализации в среде компьютерного моделирования специальных алгоритмов обработки сигналов, которые имитируют поведение и взаимодействие элементов радиопеленгатора с учетом шумов.

Поэтому есть необходимость создания алгоритмов обработки сигналов для такого пеленгатора с целью расширения функциональных возможностей средств радиомониторинга за счет реализации совместного измерения угловых координат и поляризационных параметров источников радиоизлучений (ИРИ) в поляризационно-чувствительных пеленгаторах.



Основными задачами для достижения поставленной цели являются:

- разработка математической модели входной реализации;
- реализация алгоритмов оценивания информационных параметров;
- оценка потенциальной точности пеленгования для разработанных алгоритмов;
- оптимизация параметров корреляционно-интерферометрического пеленгатора.

Ведется разработка геометрии антенной системы и разрабатывается математическая модель формирования сигналов на выходах приемных элементов, расположенных на криволинейной поверхности.

Математическая модель представляет собой составную часть модели корреляционно-интерферометрического пеленгатора с произвольной поляризацией в азимутальной и угломестной плоскостях и может быть использована для исследования точностных характеристик совместного оценивания угловых координат и поляризационных параметров источников радиоизлучения.

Геометрия рассматриваемой антенной системы приведена на рисунке 2.

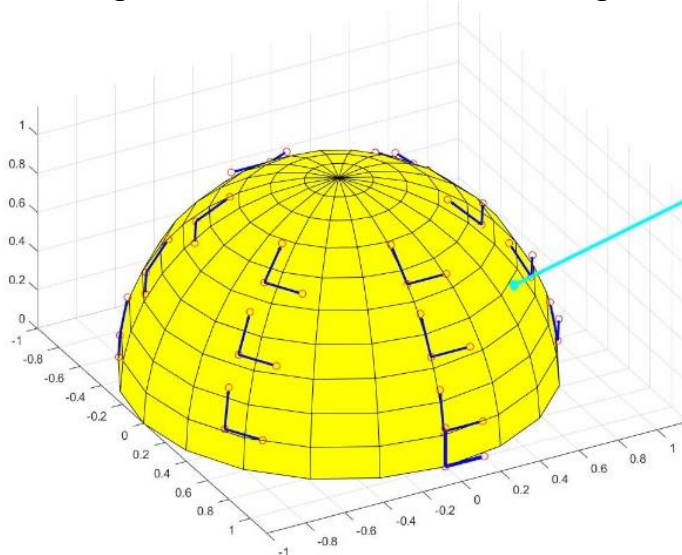


Рисунок 2 – Геометрия антенной системы

Назначение разрабатываемой математической модели:

- получение аналитической записи сигналов с учетом шумов на выходах приемных каналов для сигнала с произвольной поляризацией с заданными азимутом  $\alpha_c$ , углом места  $\beta_c$ , углом наклона плоскости поляризации  $\gamma_c$  и сдвигом фаз ортогонально поляризованных компонентов  $\chi_c$  для множества ортогональных по поляризации приемных элементов с заданными для дальнейшего использования в оптимальном и квазиоптимальном алгоритме совместного оценивания угловых координат и поляризационных параметров источника излучения;

- формирование вектора диаграмм направленности приемных каналов  $\mathbf{f}(\boldsymbol{\eta}_{ac}) = \mathbf{f}(\alpha_c, \beta_c, \gamma_c, \chi_c)$  для заданных азимута, угла места, угла наклона плоскости

поляризации и сдвига фаз ортогонально поляризованных компонентов.

Рассматривается оптимальный алгоритм оценивания информационных параметров, который сводится к нахождению оценок угловых координат и поляризационных параметров. Оценивание информационных параметров ИРИ в рамках статистического оптимального максимально правдоподобного алгоритма проводится путем перебора по всем шести информационным параметрам с вычислением логарифма функции правдоподобия и выбором значений, соответствующих максимуму.

Параметры источника радиоизлучения объединены в вектор  $\boldsymbol{\eta}_c = (A_c, \varphi_c, \alpha_c, \beta_c, \gamma_c, \chi_c)^T$ , где:

$A_c$  - амплитуда источника на выходе изотропной приемной антенны при согласованной поляризации;

$\varphi_c$  - начальная фаза для выбранного фазового центра антенной системы;

$\alpha_c, \beta_c$  - азимут и угол места ИРИ;

$\gamma_c, \chi_c$  - поляризационные параметры источника излучения – угол поворота плоскости поляризации и сдвиг фаз ортогонально поляризованных компонентов электромагнитной волны.

Функции правдоподобия имеет вид:

$$\ell(\mathbf{y} / \boldsymbol{\eta}) = C |\boldsymbol{\Phi}|^{-1} \exp\left(-(\mathbf{y} - A e^{j\varphi} \mathbf{f}(\alpha, \beta, \gamma, \chi))^+ \boldsymbol{\Phi}^{-1} (\mathbf{y} - A e^{j\varphi} \mathbf{f}(\alpha, \beta, \gamma, \chi))\right), \quad (1)$$

где  $\mathbf{f}(\alpha, \beta, \gamma, \chi)$  – вектор диаграмм направленности приемных элементов;  $\boldsymbol{\Phi}$  – диагональная корреляционная матрица собственных шумов приемных каналов с элементами на главной диагонали  $\sigma_{ш}^2$ ;  $C$  – несущественная нормировочная константа.

Оптимальные оценки информационных параметров ИРИ:

$$(\hat{A}, \hat{\varphi}, \hat{\boldsymbol{\eta}}_a) = \arg \max_{A, \varphi, \boldsymbol{\eta}_a} \ln \ell(A, \varphi, \boldsymbol{\eta}_a), \quad (2)$$

где  $\hat{\boldsymbol{\eta}}_a = (\hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\gamma}, \hat{\chi})^T$  - оценка вектора «антенных» параметров ИРИ.

В результате возможно получить точные, численно рассчитанные, оценки поляризационных параметров и угловых координат, в виде максимумов (минимумов) функций правдоподобия по всем интересующим нас параметрам.

Однако, отмечается, что получение оценки  $\hat{\boldsymbol{\eta}}$  вектора информационных параметров представляет собой сложную задачу ввиду необходимости перебора по шести параметрам, что не реализуемо в реальном масштабе времени. Общее число вычисляемых значений функции правдоподобия при указанных исходных данных оценивается как  $40 \cdot 360 \cdot 360 \cdot 90^3 \sim 3,8 \cdot 10^{12}$ . Поэтому реализуется квазиоптимальный алгоритм оценивания с уменьшенным числом вычислительных операций с исключением комплексной амплитуды.

Для логарифма функции правдоподобия с учетом отбрасывания

независящих от  $\boldsymbol{\eta}$  слагаемых и расчета оценки амплитуды и фазы в логарифм функции правдоподобия, получаем:

$$\begin{aligned} \ln \ell(\boldsymbol{\eta}_a) &= 2A \underbrace{\cos(\varphi(\mathbf{y}, \boldsymbol{\eta}_a) + \varphi)}_{=0} |F(\mathbf{y}, \boldsymbol{\eta}_a)| - A^2 |F(\boldsymbol{\eta}_a)|^2 = \\ &= 2 \frac{|F(\mathbf{y}, \boldsymbol{\eta}_a)|}{|F(\boldsymbol{\eta}_a)|^2} |F(\mathbf{y}, \boldsymbol{\eta}_a)| - \frac{|F(\mathbf{y}, \boldsymbol{\eta}_a)|^2}{|F(\boldsymbol{\eta}_a)|^4} |F(\boldsymbol{\eta}_a)|^2 = \\ &= 2 \frac{|F(\mathbf{y}, \boldsymbol{\eta}_a)|}{|F(\boldsymbol{\eta}_a)|} - \frac{|F(\mathbf{y}, \boldsymbol{\eta}_a)|^2}{|F(\boldsymbol{\eta}_a)|^2} = 2x - x^2, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $x = \frac{|F(\mathbf{y}, \boldsymbol{\eta}_a)|}{|F(\boldsymbol{\eta}_a)|}$ .

Оценка антенных параметров ИРИ для квазиоптимального алгоритма:

$$\hat{\boldsymbol{\eta}}_a = (\hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\gamma}, \hat{\chi}) = \arg \max_{\boldsymbol{\eta}_a} \ln \ell(\boldsymbol{\eta}_a) \quad (4)$$

За счет вычисления условных оценок амплитуды и фазы принимаемого сигнала на выходе изотропной приемной антенны с согласованной поляризацией удастся исключить эти параметры из процедуры максимизации ФП и уменьшить сложности алгоритма оценивания по количеству вычислений ФП в  $40 \cdot 360 = 1,4 \cdot 10^4$  раз.

Рассматривается возможность дальнейшего уменьшения сложности алгоритма оценивания в рамках адаптивного байесовского подхода с применением метода градиентного спуска, после применения которого общее количество вычислений условной функции правдоподобия составит  $40 \dots 80$ , что определяет возможность реализации алгоритма в реальном масштабе времени. Приводится блок-схема алгоритма оценивания информационных параметров.

Рассматривается алгоритм оценки потенциальной точности оптимального пеленгатора и анализ статистической взаимосвязи оценок измерения параметров, который сводится к построению информационной матрицы Фишера и корреляционной матрицы ошибок при совместной оценке комплексной амплитуды, угловых координат и поляризационных параметров источника излучения для пеленгатора с ортогонально поляризованными приемными каналами, размещенными на криволинейной поверхности.

В **третьей главе** приведены результаты исследования эффективности корреляционно-интерферометрического пеленгатора. Основной целью является проверка работоспособности алгоритмов и сравнение результатов оценки потенциальной и реальной точности для оптимального и квазиоптимального алгоритмов.

Рассматривалась структура компьютерной модели, которая представлена на рисунке 3.

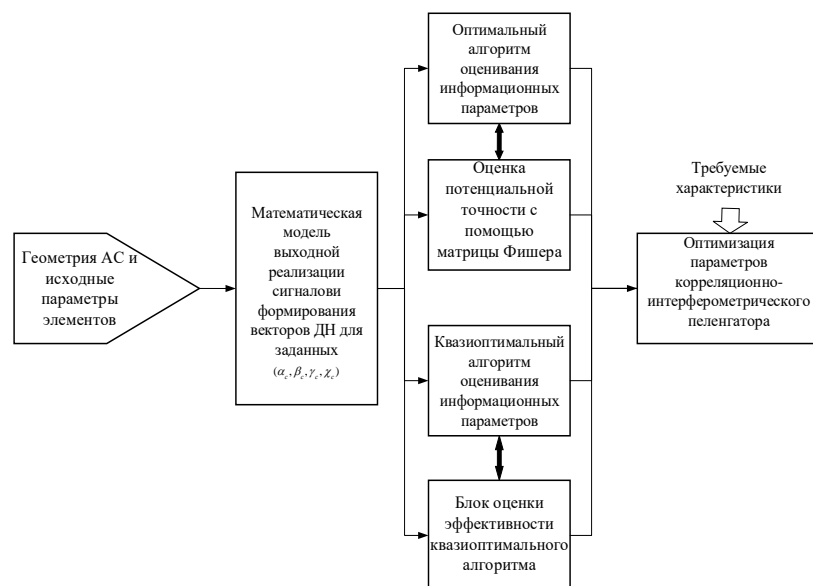


Рисунок 3 – Структура компьютерной модели

Компьютерная модель включает в себя несколько моделирующих алгоритмов, которые взаимосвязаны между собой через входные и выходные данные. Вся разработка представленных алгоритмов велась в среде компьютерного моделирования *Matlab*.

Приведены основные соотношения математической модели, которые используются многократно: для получения вектора диаграмм направленности приемных каналов и для формирования опорных сигналов для статически оптимального алгоритма и оценке потенциальной точности, а также для квазиоптимального алгоритма.

На рисунке 4 представлены результаты тестирования компьютерной модели. В качестве исходных данных был взят следующий набор:  $\alpha_c = 45^\circ, \beta_c = 35^\circ, \gamma_c = 45^\circ, \chi_c = 90^\circ, \lambda = 1\text{ м}, A_c = 100\text{ м}$

Сигналы для первых четырех ПЭ (две пары диполей в первом ряду) показаны на рисунке 4 (сплошные линии – вертикально ориентированные диполи, пунктирные – горизонтально):

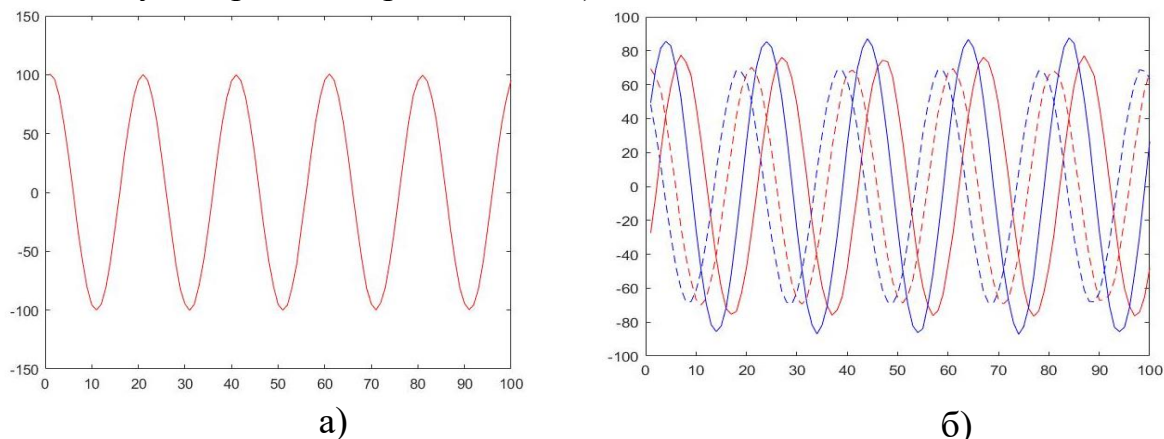


Рисунок 4 – Полезный сигнал на выходе изотропного ПЭ (а) и на выходе первых четырех ПЭ (б)

При тестировании компьютерной модели чувствительность амплитуд и фаз выходных сигналов ПЭ к изменению всех значимых параметров источника ЭМВ и геометрии антенной системы, определяет возможность использование разработанной модели для обоснования алгоритмов совместного измерения угловых координат и поляризационных параметров источников излучения.

В результате проведения основных соотношений компьютерной модели реализуется статически оптимальный алгоритм оценивания информационных параметров и квазиоптимальный алгоритм. После чего проводится оценка потенциальной точности оптимального алгоритма с помощью формирования матрицы Фишера и корреляционной матрицы ошибок; и получения реальных оценок угловых координат и поляризационных параметров для квазиоптимального алгоритма с последующим применением градиентного метода (для уточнения найденных грубых оценок) и проведения оценки эффективности квазиоптимального алгоритма.

На рисунке 5 приведен вид логарифма функции правдоподобия при заданных исходных параметрах, полученный при  $A/\sigma_{ш}=100$  (сильный сигнал) при изменении каждого их четырех «антенных» параметров при истинных значениях остальных параметров при оптимальном алгоритме оценивания информационных параметров. График 5 соответствует круговой поляризации  $\left(\alpha_c=45^\circ, \beta_c=35^\circ, \gamma_c=\frac{\pi}{4}, \chi_c=\frac{\pi}{2}\right)$ :

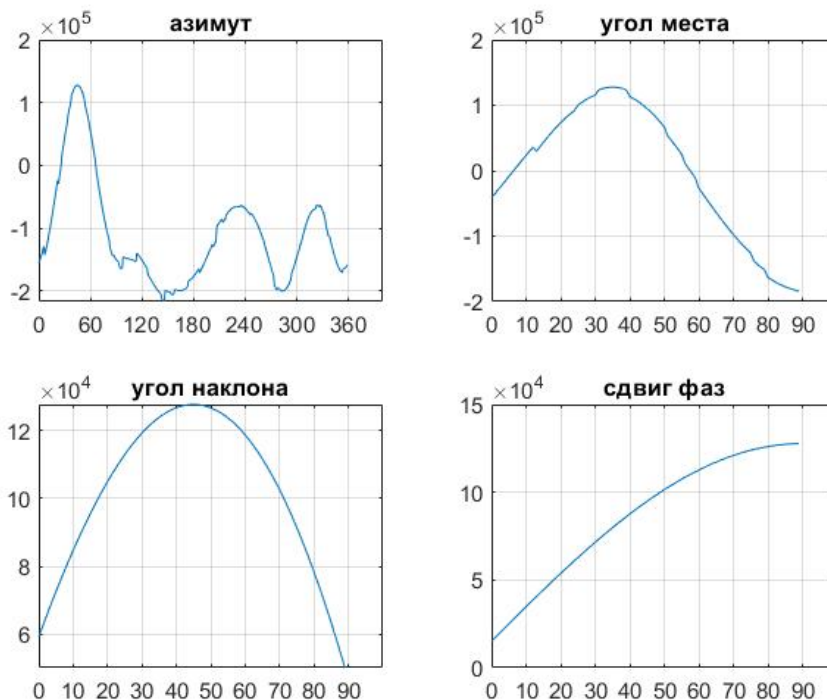


Рисунок 5 – Вид логарифма функции правдоподобия при круговой поляризации принимаемого сигнала оптимального алгоритма

По графикам видим, что максимумы решающей статистики

соответствуют истинным значениям параметров, угловые координаты и поляризационные параметры определяются верно. Они определены точно и не имеют смещения. Характерным является наличие мелких «зазубрин» на зависимостях решающей статистики от азимута и угла места, что определяется изменением числа и состава видимых приемных элементов при изменении угловых координат. Зависимость решающей статистики от азимута многоэкстремальная, но с четко выраженным глобальным максимумом.

На рисунке 6 приведены результаты оценки потенциальной точности для вышеописанного набора исходных данных: зависимости среднеквадратических ошибок измерения информационных параметров полезного сигнала от отношения сигнал/шум на выходе изотропного приемного элемента на согласованной поляризации для рисунка 5 логарифма ФП.

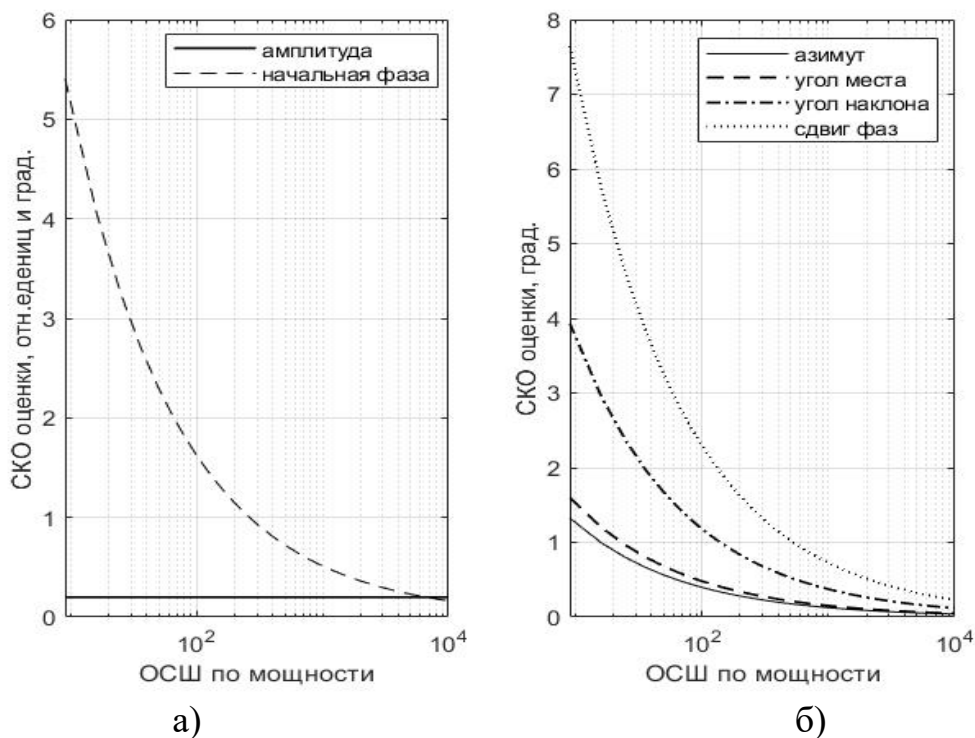


Рисунок 6 – Зависимости среднеквадратических ошибок оценки параметров полезного сигнала от отношения сигнал/шум по мощности для  $\alpha_c=45^\circ, \beta_c=35^\circ, \gamma_c=45^\circ, \chi_c=90^\circ, \lambda=1\text{ м}, N_\Sigma = N_1 N_2 = 6 \cdot 3 = 18$ .

По полученным графикам сделаны выводы, что абсолютная среднеквадратическая ошибка оценивания амплитуды (горизонтальная линия на рисунке 6 а) практически не зависит от отношения сигнал/шум (в отличие от относительной ошибки, которая изменяется обратно пропорционально отношению сигнал/шум). Величина абсолютной ошибки при  $\sigma_{\text{ш}}^2=1$  определяется весовым усреднением шумов «видимых» для заданного направления наблюдения приемных каналов.

Коэффициенты корреляции ошибок измерения всех информационных параметров оказываются близкими к нулю. Высокая точность измерения

достигается при относительно малых, порядка 10 дБ и менее, отношениях сигнал/шум на выходе изотропного приемного элемента. Такой результат обусловлен тем, что при вычислении решающей статистики происходит фокусировка приемной антенной решетки в направлении на полезный сигнал с соответствующим увеличением энергии полезного сигнала.

На рисунке 7 приведен вид логарифма функции правдоподобия при заданных исходных параметрах для квазиоптимального алгоритма.

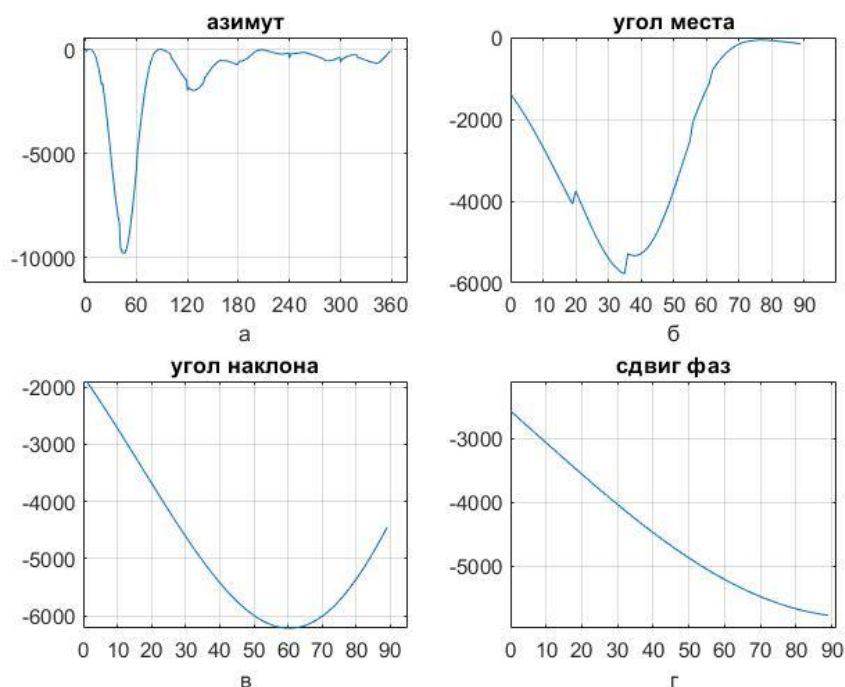


Рисунок 6 – Вид логарифма функции правдоподобия при эллиптической поляризации принимаемого сигнала по найденным грубым оценкам параметров сигнала

По полученным графикам видим, что минимумы решающей статистики соответствуют приближенным истинным значениям угловых координат и поляризационных параметров. На полученных зависимостях решающей статистики от азимута (в большей степени) и угла места (в меньшей степени) наблюдаются также локальные экстремумы, как и при построении функции правдоподобия оптимального алгоритма по шести информационным параметрам. Зависимость решающей статистики от азимута многоэкстремальная, но с выраженным глобальным минимумом. Зависимости от поляризационных параметров имеют один экстремум. Все эти особенности позволяют использовать градиентный метод для нахождения совместной оценки всех информационных параметров при условии, что начальное приближение для градиентного метода («грубая» оценка) по азимуту достаточно точное и находится в пределах локальных максимумов, между которыми расположен глобальный минимум.

Для нахождения СКО реальной точности пеленгования и измерения поляризационных параметров для квазиоптимального алгоритма и всех

антенных параметров, расчёт осуществляется по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (5)$$

где  $X_i$  – одно из значений выборки;

$\bar{X}$  – среднее арифметическое значений выборки;

$\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})$  – сумма всех значений выборки от 1 до  $n$ ;

$n$  – количество элементов в выборке.

Средние квадратические ошибки оценивания информационных параметров для тех же исходных данных, приведены в таблице 1 и на рисунке 8 СКО оценивалась по  $n = 200$  реализациям.

Таблица 1 – Средние квадратические ошибки оценивания информационных параметров от ОСШ по мощности

Отношение сигнал/шум, раз	Средняя квадратическая ошибка измерения информационных параметров, град.			
	$\sigma_\alpha$	$\sigma_\beta$	$\sigma_\gamma$	$\sigma_\chi$
Набор исходных данных: $\alpha_c=45^\circ, \beta_c=35^\circ, \gamma_c=45^\circ, \chi_c=90^\circ, \lambda=1\text{ м}, N_\Sigma = N_1 N_2 = 6 \cdot 3 = 18$ $L_d = 0.2\text{ м}$				
10	23,3	7,5	7,3	17,4
$10^2$	0,6	2,1	1,3	3,6
$10^3$	0,49	0,15	0,31	0,88
$10^4$	0,45	0,06	0,12	0,27

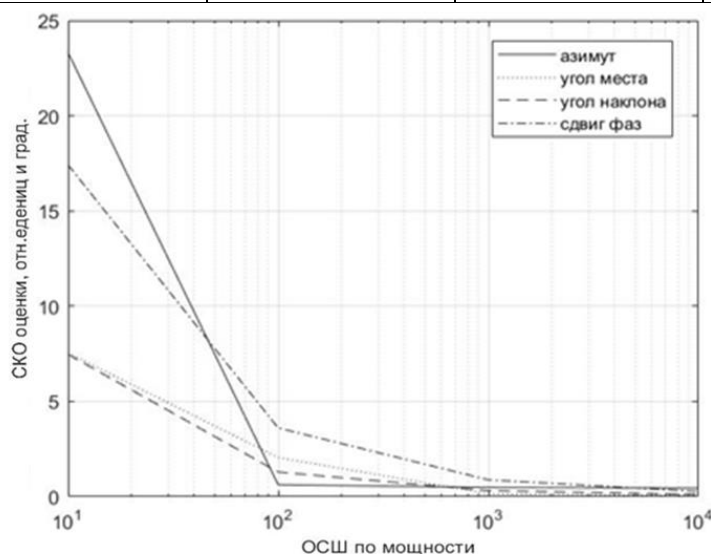


Рисунок 8 – Зависимости среднеквадратических ошибок оценки параметров полезного сигнала от отношения сигнал/шум по мощности для  $\alpha_c=45^\circ, \beta_c=35^\circ, \gamma_c=45^\circ, \chi_c=90^\circ, \lambda=1\text{ м}, N_\Sigma = N_1 N_2 = 6 \cdot 3 = 18$ .

По полученным графикам сделаны выводы, что изменение амплитуды полезного сигнала приведет к соответствующим обратно пропорциональным изменениям СКО оценивания угловых координат и поляризационных параметров. Так, например, при увеличении амплитуды в 10 раз, ошибка оценивания всех «антенных» параметров уменьшается примерно в 10 раз, что



полностью соответствует закономерностям для потенциальной точности измерений. При ОСШ 40 дБ СКО становится пренебрежимо мало и стремится к нулю. Высокая точность оценивания достигается при отношении сигнал/шум на выходе изотропного приемного элемента порядка 20 дБ и более. При меньших, 10...15 дБ, значениях отношения сигнал/шум СКО возрастает более сильно, и перестает подчиняться известной закономерности, когда СКО обратно пропорционально отношению сигнал/шум по напряжению. Это обусловлено (что подтверждается при моделировании) появлением аномальных ошибок оценивания информационных параметров.

При сравнении графиков СКО по оптимальному и квазиоптимальному алгоритмам от отношения сигнал/шум по мощности видно, что точность оценивания для оптимального алгоритма выше по всем отдельно взятым исследуемым параметрам. Точность измерения в среднем для ОСШ 20-40 дБ СКО ошибок для квазиоптимального алгоритма оценивания в 1.2...2.8 раз больше, чем для оптимального максимально-правдоподобного алгоритма оценивания.

При увеличении отношения сигнал/шум коэффициенты корреляции ошибок измерения всех информационных параметров оказываются близкими к нулю для обоих случаев.

Отметим момент, что при применении квазиоптимального алгоритма пеленгования оценки измерения угловых координат и информационных параметров полезного сигнала являются смещенными: по азимуту в пределах 0.2...2.5 градусов, по углу места 0.5...3 градусов, по углу наклона плоскости поляризации и сдвигу фаз ортогонально-поляризованных компонент 0.5...8 градусов.

Также в третьей главе были приведены рекомендации по практическому применению алгоритмов первичной обработки сигналов в поляризационно-чувствительных пеленгаторах средств радиомониторинга, что предполагает выделение этапов разработки алгоритма и определение области применения разработанных алгоритмов.

В результате разработанная компьютерная модель является необходимым инструментом для расширения функциональных возможностей средств радиомониторинга для ситуации, когда приемные элементы размещены на криволинейной поверхности и обеспечить одинаковые поляризационные параметры принципиально невозможно. В результате видим эффективность разработанной компьютерной модели при практической реализации алгоритмов совместного оценивания угловых и поляризационных параметров источников радиоизлучений в корреляционно-интерферометрических пеленгаторах с антенными элементами, размещаемыми на криволинейной поверхности и имеющими различные поляризационные параметры.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данной работой, были решены все поставленные задачи. Был выполнен обзор научно-технической литературы по теме исследования и проведен анализ принципов построения и характеристик антенных систем поляризационно-чувствительных корреляционно-интерферометрических пеленгаторов. Была разработана математическая модель входной реализации с антенными элементами, размещаемыми на криволинейных поверхностях. Также была произведена разработка и реализация оптимального и квазиоптимального алгоритмов оценивания угловых координат и поляризационных параметров источников излучения в поляризационно-чувствительных пеленгаторах. Была разработана структура компьютерной модели и проведено исследование точности оценивания угловых и поляризационных параметров источников радиоизлучений при оптимальных и квазиоптимальных алгоритмах обработки. Заданы исходные данные и параметры системы для исследования точности на выходе приемных каналов антенной системы.

Были разработаны алгоритмы в среде компьютерного моделирования для получение аналитической записи сигналов с учетом шумов на выходах приемных каналов для сигнала с произвольной поляризацией и вектора диаграмм направленности приемных каналов для заданных информационных параметров сигналов. Также разработаны алгоритмы для исследования точности оценивания угловых и поляризационных параметров источников радиоизлучений при оптимальных и квазиоптимальных алгоритмах обработки. Разработка компьютерной модели проводилась в среде *Matlab*.

Также была проведена верификация компьютерной модели. Проверена работоспособность всех алгоритмов путем сравнения полученных параметров с заданными параметрами сигналов.

Разработанную в данной работе компьютерная модель предполагается использовать для обоснования практически реализуемых алгоритмов обнаружения и пеленгования сигналов в поляризационно-чувствительных корреляционно-интерферометрических пеленгаторах и оптимизации параметров указанных пеленгаторов с антенными элементами, размещаемыми на криволинейной поверхности.

Компьютерная модель и методики оценки потенциальной точности позволяет повысить эффективность алгоритмов обработки сигналов, расширить функциональные возможности средств радиомониторинга за счет реализованных алгоритмов совместного измерения угловых координат и поляризационных параметров источников радиоизлучений в поляризационно-чувствительных пеленгаторах, а также проводить визуализацию геометрии и полученной реализации для контроля процесса моделирования.

## СПИСОК СОБСТВЕННЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

1. Башкова, М. А. Математическая модель входной реализации для корреляционно-интерферометрического пеленгатора с ортогонально поляризованными приемными каналами, размещенными на криволинейной поверхности / М.А. Башкова, С.В. Козлов // Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2022 : материалы научно-технической конференции, Минск, 29–30 ноября 2022 г., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск : БГУИР, 2022. – с. 94–100
2. Башкова, М. А. Методика оценки потенциальной точности корреляционно-интерферометрического пеленгатора с ортогонально поляризованными приемными каналами / М.А. Башкова, С.В. Козлов // Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2022 : материалы научно-технической конференции, Минск, 29–30 ноября 2022 г., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск : БГУИР, 2022. – с. 101–105.
3. Башкова, М. А. // Алгоритм поляризационно-чувствительного пеленгования средств радиомониторинга / Радиотехника и электроника: сборник тезисов докладов 58-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, апрель 2022, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2022. – С. 66–67.
4. Башкова, М. А. // Совместное оценивание угловых координат и поляризационных параметров источника излучения в корреляционно-интерферометрическом пеленгаторе с ортогонально поляризованными приемными каналами / Радиотехника и электроника: сборник тезисов докладов 59-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, апрель 2023, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2023.