

На правах рукописи

Гвоздарёв Алексей Сергеевич

**СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИНТЕГРАЛЬНОЙ РАЗНОСТИ ФАЗ ПРИ
ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАДИОГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ЭТАЛОННЫХ
МЕТОДОВ**

Специальность 01.04.03 - Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Воронеж – 2015

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, доцент
Артёмова Татьяна Константиновна

Официальные оппоненты: Разиньков Сергей Николаевич,
доктор физико-математических наук, старший научный
сотрудник, научно-исследовательский центр
радиоэлектронной борьбы Военного учебно-научного
центра военно-воздушных сил «Военно-
воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского
и Ю.А. Гагарина», ведущий научный сотрудник

Захаров Александр Викторович,
кандидат физико-математических наук, доцент ФГБОУ
ВПО «Воронежский государственный университет»,
кафедра радиофизики, доцент

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный
университет имени Александра Григорьевича и Николая
Григорьевича Столетовых», г.Владимир

Защита состоится 14 мая 2015 года в 17⁰⁰ на заседании диссертационного совета
Д 212.038.10 при Воронежском государственном университете по адресу: 394006,
Воронеж, Университетская пл., 1, ауд. 428.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке Воронежского
государственного университета по адресу 394006, г. Воронеж, Университетская площадь, 1, и на
сайте ВУЗа <http://www.vsu.ru>, с авторефератом – также на сайте Высшей аттестационной
комиссии при Министерстве образования и науки РФ <http://vak.ed.gov.ru>.

Автореферат разослан “ ___ ” _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Маршаков Владимир Кириллович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Наличие ситуаций в системах дистанционного контроля, досмотра и слежения, когда оптические или термические методы не применимы, привело к резкому росту интереса к системам голографического радиовидения. На данный момент многие современные системы радиовидения и дистанционного зондирования различного назначения используют голографический способ регистрации для получения изображения исследуемых объектов. Предпринимаются также попытки извлечь из зарегистрированных данных информацию о размерах объекта, его электродинамических параметрах, местоположении в пространстве, о форме с целью идентификации объекта по набору значений этих параметров, которые на практике реализуются несколькими путями:

- с использованием методов решения обратных задач рассеяния (основы были заложены в работах Lewis R., Wojarski N.N.);
- с использованием методов конформных отображений (Cmielewski O., Tortel H., Litman A., Saillard M., Colton D., Geffrin J.-M., Belkebir K.) и методов анализа коэффициентов разложений (Datta A., Subodh Som);
- с использованием методов цифровой обработки изображения, восстановленного по радиоголограмме, в том числе разработанных для систем компьютерного зрения (Azad P., Gockel T., Dillmann R., Davies E. R., Fisher R., Dawson-Howe K, Fitzgibbon A., Robertson C., Trucco E. и др.).

Существующие ограничения систем голографического радиовидения (СГРВ), в том числе дальность действия, трудно реализуемые требования к замкнутости апертуры (в большинстве методов, основанных на решении обратной задачи рассеяния, удовлетворительное качество достигается лишь при условии кругового сканирования), разрешающая способность, работа в режиме реального времени (ограничивающая объём обрабатываемых данных и время анализа) накладывают ограничения на качество оценки параметров по радиоголограмме, получаемой вышеперечисленными методами.

Однако (Bennett C., Toomey J., Anderson S.J., Гвоздарёв А.С.) задача может быть решена с помощью эталонных методов.

На данный момент в реализованных СГРВ (Богданович В.И., Добровольский И.Ф., Воронин Е.Н., Гринев А.Ю., Чебаков И.А., Douglas L. McMakin, Thomas E. Hall, David M. Sheen, Копейкин В.В., Морозов П.А., Куляков А.Н.) не используются эталонные методы оценки параметров радиоголографических объектов. Это объясняется несколькими факторами:

- слишком широким набором исследуемых радиоголографических объектов, что приводит к чрезвычайно большой базе данных эталонов, что в свою очередь снижает быстродействие анализа и предъявляет высокие требования к объёму хранимых данных;
- неиспользованием априорной информации о форме радиоголографического объекта.

В тоже время для случаев, когда производится поиск объектов с конкретными параметрами (формой, размерами, электродинамическими параметрами и т.д.), например, в случае персонального досмотра на наличие оружия (Ahmad F., Amin M.) или взрывчатых веществ, поиска мин и фугасов, оценки неоднородностей структуры можно заранее построить базу данных эталонных объектов с заданными параметрами, тем самым уменьшив её размеры и повысив быстродействие конечной реализации СГРВ (Понькин В.А., Гончаров О. П., Soulez F., Denis L., Yin Z., Su H.).

В ряде работ (Гвоздарёв А.С., Артёмова Т.К., Артёмов К.С.) продемонстрирована возможность реализации этих идей на практике в СГРВ при использовании эталонного метода на основе интегральной разности фаз (ИРФ). При этом для рассматриваемой

авторами совокупности конфигурации системы и объектов исследования был продемонстрирован существенный выигрыш в разрешающей способности.

Однако теоретически данный метод является не до конца проработанным: отсутствуют статистические характеристики и показатели качества метода, их зависимость от параметров объектов, объёма выборки и др., отсутствуют строгое обоснование принципа построения эталонной сетки и рекомендации по проведению процедуры оценивания параметров.

Таким образом, тематика диссертационного исследования является актуальной.

Цель диссертационной работы – исследование вероятностно-статистических характеристик эталонного метода определения параметров радиоголографических объектов, использующего в качестве критерия сходства интегральную разность фаз.

Исследования, проведённые в рамках диссертационной работы, предусматривают решение следующих **задач**:

- получение точных, асимптотических и аппроксимирующих выражений для статистических характеристик интегральной разности фаз для эталонного метода определения параметров радиоголографических объектов;
- исследование поведения оценок интегральной разности фаз, получаемых методами моментов и максимального правдоподобия в зависимости от отношения сигнал/шум и истинного значения интегральной разности фаз;
- определение границ применимости найденных выражений и формирование рекомендаций по применению рассматриваемых методов оценивания для данной задачи;
- определение минимального шага эталонной сетки;
- исследование зависимости шага эталонной сетки от объёма выборки, отношения сигнал/шум и истинного значения интегральной разности фаз.

Методы проведения исследований. В работе использованы: метод краевых волн из теории дифракции, методы математической физики, методы математической статистики, асимптотические методы анализа, методы статистической оценки параметров, методы математического и компьютерного моделирования. Численное моделирование проводилось на ЭВМ с привлечением современных численных методов.

Научная новизна. В процессе диссертационного исследования теоретически строго решена задача определения статистических характеристик интегральной разности фаз: функции плотности вероятности (ФПВ), функции распределения, моментных функций произвольного порядка, математического ожидания и дисперсии (в явном виде). Получено альтернативное представление функции плотности вероятности и предложены три вида аппроксимации: на основе "обёрнутого" нормального распределения, распределения Тихонова-фон Мизеса и асимптотическое (при больших соотношениях сигнал/шум (ОСШ)). Для случая больших ОСШ получены асимптотические выражения различной степени точности для моментов 1 – 4 порядков, сделаны заключения об их применимости для моментов и приведены рекомендации по использованию предлагаемых аппроксимаций.

Исследована оценка методом моментов интегральной разности фаз с учётом полученных ранее её статистических характеристик, её смещение и рассеяние. Приведены рекомендации относительно величины ОСШ, необходимого для достижения заданной эффективности получаемой методом моментов оценки ИРФ.

Рассмотрена задача выбора минимального шага сетки эталонов на основе двух критериев: ограничения по допустимой полной вероятности ошибки или вероятности правильного принятия решения при решении задачи классификации двух соседних эталонов и ограничения, накладываемого на статистический предел разрешения. Показано, что при наличии априорной неопределённости относительно коэффициента амплитудного расхождения требования к обеспечиваемому ОСШ возрастают. Проведено сравнение требований, предъявляемых к СГРВ рассмотренными критериями, указаны области преимущества как одних, так и других критериев, указан подход, позволяющий уменьшить

требуемую величину ОСШ. Проведено математическое моделирование сравнения поведения эталонных методов, использующих интегральную разность фаз, с методами, использующими расстояние Евклида, при выборе минимального шага сетки эталонов на основе ограничений, накладываемых на вероятность правильной классификации двух соседних эталонов. Отмечены области возможных изменений таких параметров как размеры апертуры и число антенных элементов, при которых метод на основе интегральной разности фаз даёт выигрыш по значению требуемого соотношения сигнал/шум. Указана величина такого выигрыша.

Положения, выносимые на защиту:

- точные, асимптотические и аппроксимирующие выражения для статистических характеристик интегральной разности фаз для эталонного метода определения параметров радиолокационных объектов; асимптотические выражения различной степени точности для моментов 1 – 4 порядков; аппроксимации функции плотности вероятности ИРФ и рекомендации по их применению;
- поведение оценок интегральной разности фаз, получаемых методами моментов и максимального правдоподобия в зависимости от отношения сигнал/шум и истинного значения интегральной разности фаз;
- рекомендации по применению метода моментов и метода максимального правдоподобия для задачи оценки интегральной разности фаз;
- способ определения минимального шага эталонной сетки;
- установленная зависимость шага эталонной сетки от объёма выборки, отношения сигнал/шум и истинного значения интегральной разности фаз.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты диссертационного исследования имеют теоретическую и практическую значимость. На основе полученных теоретических выражений и их аппроксимаций возможно проведение дальнейших исследований по синтезу алгоритмов и устройств оценивания интегральной разности фаз. Сформулированные рекомендации позволяют определить требования к СГРВ, выполнение которых обеспечит желаемое качество её функционирования. Исследованный эталонный метод, использующий в качестве критерия ИРФ, и способы построения её оценки позволяют существенно повысить разрешающую способность систем голографического радиовидения по сравнению с классической аппаратной. Предполагаемые области применения включают в себя: системы персонального и таможенного досмотра (бодисканеры), системы компьютерной томографии, системы автоматической робототехники, охранные системы, системы военного назначения (идентификация и наведение на цель), системы авиационного автоматического беспилотного обнаружения (Friend-Of-Foe), биомедицинские системы, системы неразрушающего контроля, системы подповерхностного зондирования.

Достоверность результатов работы.

Достоверность и обоснованность результатов, полученных в данной работе, основывается на применении многократно апробированного метода статистических испытаний и совпадении полученных результатов в предельном случае с опубликованными ранее и теоретическими пределами. При проведении исследований использовались известные и проверенные методы – математические и статистической радиофизики.

Личный вклад автора. Основные результаты диссертационного исследования получены А.С. Гвоздарёвым лично и опубликованы в соавторстве с научным руководителем Т.К. Артёмовой. В совместных работах научному руководителю принадлежит формулировка задачи и определение направления исследований. Подробное проведение рассуждений, расчетов, анализ и интерпретация полученных результатов выполнены автором лично.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 17, 19 – 23 Международных конференциях «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, Украина, 2007 г., 2009 – 2013 гг.); XIII, XIV, XVI – XVIII международных научно-технических конференциях «Радиолокация, навигация, связь»

(Воронеж, 2007, 2008, 2010 – 2012, 2014); 15, 17 Международных конференциях «Математика. Компьютер. Образование» (Пушино, 2007, Дубна, 2010), 6 и 7 всероссийских конференциях «Радиолокация и радиосвязь» (Москва, 2012, 2013).

Внедрение. Результаты диссертации использованы в НИР, выполнявшихся на кафедре радиофизики ЯрГУ им. П.Г. Демидова.

Публикации. Основные результаты работы отражены в 22-х работах по теме диссертации. Из них 4 статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК для публикаций основных результатов диссертаций, 18 публикаций в межвузовских сборниках научных трудов и материалах конференций.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, семи приложений и списка литературы, включающего 136 наименований. Объём основного текста диссертации составляет 164 стр., включая 41 иллюстрацию.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, приведён краткий обзор известных результатов по теме диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна и практическая значимость результатов работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, и личный вклад автора в полученные результаты. Приведены сведения об апробации работы и публикациях, о структуре и содержании работы.

В первой главе рассмотрены вопросы построения эталонных методов оценки параметров. Проводится обзор наиболее часто используемых на практике критериев сходства, на основе которых можно реализовать эталонные методы.

В работе применительно к задаче определения параметров объектов в системах голографического радиовидения использовался эталонный метод, использующий в качестве критерия сходства интегральную разность фаз. Предполагалось, что в СГРВ с заданной конфигурацией исследуемый объект с параметром (или совокупностью параметров) R облучается зондирующим сигналом с известными параметрами. Регистрируемая радиоголограмма или поле, рассеянное объектом, в j -ой отсчётной точке на апертуре имеет комплексную амплитуду $\dot{u}(\alpha, R)$.

Пусть для наблюдения в диапазоне углов $\alpha \in [\alpha_1, \alpha_2]$ доступно N_{stat} реализаций $\dot{u}(\alpha, R_{ob})$ при фиксированном значении параметра $R = R_{ob}$ в присутствии комплексного АБГШ (с равными дисперсиями σ^2 и нулевыми математическими ожиданиями вещественной и мнимой частей). Для набора эталонных значений $\{R_{et}\}_{i=1}^{N_{et}}$, которые может принимать оцениваемый параметр, по правилу $\dot{u}_{et_i}(\alpha) = \dot{u}(\alpha, R_{et_i})$ сформируем набор эталонных функций $\{\dot{u}_{et_i}(\alpha)\}_{i=1}^{N_{et}}$.

Пусть доступная для наблюдения реализация определена для конечного набора $\{\alpha_j\}_{j=1}^{N_\alpha}$ из диапазона $[\alpha_1, \alpha_2]$, тогда сформируем величину $\dot{\xi}_i(R_{ob})$, описывающую связь между наблюдаемой реализацией и i -м эталоном по следующему правилу:

$$\dot{\xi}_i(R_{ob}) = \sum_{j=1}^{N_\alpha} \dot{u}_{et_i}(\alpha_j) \cdot \dot{u}^*(R_{ob}, \alpha_j). \quad (1)$$

Введём обозначение для интегральной разности фаз (ИРФ) $\varphi_i(R_{ob}) = \left| \arg \left\{ \dot{\xi}_i(R_{ob}) \right\} \right|$.

В качестве оценки исследуемого параметра \hat{R}_{ob} выберем значение эталонного параметра R_{et} , минимизирующее значение $\varphi_i(R_{ob})$, т.е.:

$$\hat{R}_{ob} = \min_i \{ \varphi_i(R_{ob}) \}.$$

Основные показатели качества работы эталонного фазового метода (ЭФМ), основанного на интегральной разности фаз, будут напрямую определяться статистическими характеристиками величины φ_i , её оценкой, а так же используемым набором эталонов $\{ \dot{u}_{et_i}(\alpha) \}_{i=1}^{N_{et}}$. При этом в процессе формирования эталонов одной из наиболее важных задач является определение минимально возможного шага сетки эталонов (расстояния между ближайшими эталонами по оцениваемому параметру). Тут следует учесть такие факторы как потенциальная разрешающая способность СРГВ по параметру (в отсутствие шумов), её снижение за счёт наличия шумов, требуемая вероятность правильного определения искомого параметра, существующие ограничения на объём выборки, диктуемые требуемым быстродействием и ресурсоёмкостью системы.

Характер $\xi_i(R_{ob})$ будет напрямую определяться полем, рассеянным объектом, а значит, задаётся решением задачи дифракции на этом объекте. Так как аналитически строгое решение задачи дифракции существует лишь для очень ограниченного набора объектов, то и строго аналитического решения в общем случае исходная задача определения параметров объектов по радиоголограмме в такой постановке не имеет. Однако, при заданном (аналитически, численно или экспериментально) отображении оцениваемого параметра R_{ob} объекта в величину φ_i можно рассматривать данную задачу относительно этой величины φ (опуская индекс, указывающий на номер эталона и подразумевая, что существует некоторый способ обратного перехода к искомому параметру). Будем в дальнейшем придерживаться этого подхода. Соответственно поставленная задача сводится к задаче исследования статистических характеристик интегральной разности фаз φ .

Исследование будем проводить на примере классических тестовых объектов радиоголографии, для которых существуют аналитические выражения для дифракционного поля, например, идеально проводящих круговых цилиндров (конечных и бесконечных) и бесконечных лент.

Рассмотрим задачу оценки параметров радиоголографических объектов с помощью СРГВ, работающей в миллиметровом диапазоне, который на данный момент считается наиболее перспективным. В этом случае характерные размеры объектов (оценка которых и будет проводиться) составляют от нескольких единиц до нескольких сотен длин волн. В дальнейшем, проводя численный анализ, учитывающий конкретное значение интегральной разности фаз, будем подразумевать, что при известных зависимостях перехода ей будут соответствовать определённые размеры конкретных объектов.

Во второй главе сформулирована и теоретически строго решена задача определения вероятностных характеристик интегральной разности фаз. Путём функционального преобразования функций плотности вероятности отсчётов регистрируемой радиоголограммы для случая, когда определяемый параметр R_{ob} является детерминированным, получены выражения для:

- функции плотности вероятности интегральной разности фаз в форме двухкомпонентной смеси распределений Беннетта:

$$w_\varphi(u, \rho, \psi) = \frac{2e^{-\frac{\rho^2}{2}}}{\pi} + e^{-\frac{\rho^2}{2}} \sum_{n=1}^2 v_n e^{-v_n^2} \operatorname{erf}(v_n), \quad (2)$$

где $\operatorname{erf}(\cdot)$ – функция ошибок, $\vec{v} = 1/\sqrt{2\pi} \{ \rho \cos(u - \psi), \rho \cos(u + \psi) \}$, ψ – истинное значение ИРФ в отсутствие шумов, а ρ – коэффициент, равный произведению ОСШ q и коэффициента амплитудного расхождения η , указывающего на степень несовпадения амплитудной радиоголограммы выбранного для сравнения из заранее сформированной базы эталона и наблюдаемого объекта, который в дальнейшем за исключением ряда отдельно указанных случаев будем полагать известным и равным 1;

- функции распределения интегральной разности фаз в виде сходящегося ряда по обобщённым гипергеометрическим функциям;
- моментных функций произвольного порядка (в общем виде);
- математического ожидания и дисперсии (в явном виде).

Получено альтернативное представление функции плотности вероятности в виде разложения в ряд Фурье с коэффициентами, схожими с коэффициентами Цветнова:

$$w_\varphi(u, \rho, \psi) = \frac{2}{\pi} + \frac{\rho}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\rho^2}{4}} \sum_{k=1}^{\infty} \cos(2ku) \cos(2k\psi) \left(I_{k+\frac{1}{2}} \left(\frac{\rho^2}{4} \right) + I_{k-\frac{1}{2}} \left(\frac{\rho^2}{4} \right) \right), \quad (3)$$

где $I_{k \pm \frac{1}{2}}(\cdot)$ – модифицированная функция Бесселя полуцелого порядка.

Предложены три вида аппроксимации:

1. на основе "обёрнутого" нормального распределения

$$w_1(u, \rho, \psi) = \frac{1}{\pi} \left(\mathcal{G}_3 \left(u - \psi, e^{-\frac{2}{\rho^2}} \right) + \mathcal{G}_3 \left(u + \psi, e^{-\frac{2}{\rho^2}} \right) \right), \quad (4)$$

где $\mathcal{G}_3(\cdot)$ – эллиптическая тета-функция Якоби третьего рода;

2. распределения Тихонова-фон Мизеса

$$w_2(u, \rho, \psi) = \left(\pi I_0 \left(\frac{\rho^2}{4} \right) \right)^{-1} \left(e^{\frac{1}{4}\rho^2 \cos(2(u-\psi))} + e^{\frac{1}{4}\rho^2 \cos(2(u+\psi))} \right), \quad (5)$$

где $I_0(\cdot)$ – модифицированная функция Бесселя нулевого порядка;

3. асимптотическое (при больших соотношениях сигнал/шум)

$$w_3(u, \rho, \psi) = \left(\sqrt{\pi} \operatorname{erf} \left(\frac{\rho \cos(\psi)}{\sqrt{2}} \right) \right)^{-1} e^{-\frac{\rho^2}{2}} \sum_{n=1}^2 v_n e^{-v_n^2}. \quad (6)$$

Для случая больших ОСШ получены асимптотические выражения различной степени точности для моментов 1 – 4, в том числе:

$$\begin{aligned} E[\varphi] &= |\psi| + O(\rho^{-10}); & D[\varphi] &= \frac{1}{\rho^2} \left(1 + \frac{1}{\rho^2} + \frac{8}{3\rho^4} + \frac{12}{\rho^6} \right) + O(\rho^{-10}); \\ E[\varphi^3] &= \frac{3\pi^2 \psi^2}{16} + \frac{3}{\rho^2} \left(1 + \frac{1}{\rho^2} + \frac{8}{3\rho^4} + \frac{12}{\rho^6} \right) \left(|\psi| + \frac{\pi}{4} \left(\frac{\pi}{4} - 1 \right) \right) + \\ &+ \frac{\pi^3}{3} \left(B_4 \left(\frac{2\psi + \pi}{2\pi} \right) - B_4 \left(\frac{|\psi|}{\pi} \right) - \frac{1}{16} \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) \right) + O(\rho^{-10}); \end{aligned} \quad (7)$$

где $B_4(\cdot)$ – полином Бернулли 4 порядка.

Проведён сравнительный анализ первых двух моментов в зависимости от ОСШ (рис. 1) при использовании исходной плотности распределения вероятности (3) и предложенных

аппроксимаций (4) – (6), который, в частности, показал, что асимптотическое выражение (7) для математического ожидания успешно аппроксимирует его истинное значение, рассчитанное численно с использованием (3) – (6), для значений ОСШ более 9 дБ при $\psi \geq 10^\circ$. При $1^\circ \leq \psi \leq 10^\circ$ для достижения расхождения не более чем в 1 % величину ОСШ необходимо поднять до 15 дБ.

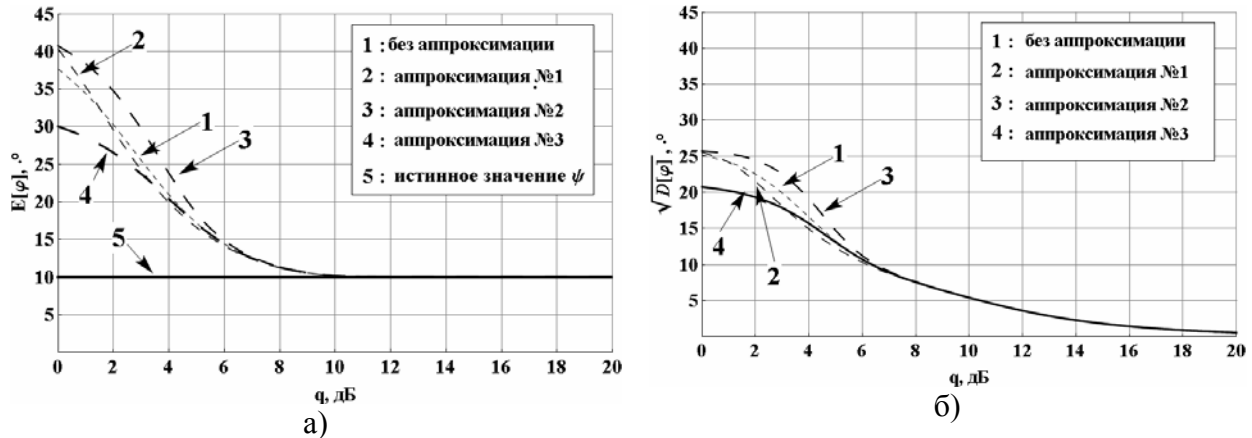


Рис. 1 Зависимость а) математического ожидания и б) СКО интегральной разности фаз, рассчитанной для предлагаемых аппроксимаций функции плотности вероятности, от отношения сигнал/шум для случая $\psi = 10^\circ$

Сделаны заключения о применимости полученных асимптотических выражений для моментов и приведены рекомендации по использованию предлагаемых аппроксимаций, в частности:

- в области больших ОСШ (более 6 дБ) любая из аппроксимаций является вполне удовлетворительной и, как следствие, стоит обратить внимание на вычислительные особенности описывающих их выражений:
 - для реализации первой аппроксимации на данный момент необходимо использование специализированных вычислительных пакетов с установленными библиотеками специальных функций и преобразованиями над ними, а значит вычислительная сложность практической реализации первой аппроксимации значительно выше, чем у двух других;
 - вычислительная сложность второй и третьей аппроксимаций примерно равны;
- в области малых ОСШ (менее 6 дБ) предпочтительной является первая аппроксимация, так как она демонстрирует наименьшее отклонение математического ожидания и дисперсии от их значений, вычисленных с использованием строго выражения;
- в случае, если необходимо использовать аппроксимирующее выражение плотности вероятности с наименьшим абсолютным отклонением от истинной во всём диапазоне значений анализируемого параметра, то в области отношений ОСШ более 4 – 5 дБ следует отдать предпочтение третьей аппроксимации.

В третьей главе рассмотрена процедура оценки интегральной разности фаз с учётом полученных ранее её статистических характеристик.

Отмечено, что в силу невозможности факторизации выражения для полученной функции плотности вероятности достаточную статистику найти не удаётся, а значит в соответствии с теоремой Неймана-Фишера и построить оптимальную оценку. Исходя из этого, выбор был сделан в пользу наиболее простой процедуры оценивания, обеспечивающей удовлетворительный результат – метода моментов:

$$\hat{\psi}_{MM} = \bar{\varphi}, \quad (8)$$

где черта сверху указывает на операцию статистического усреднения по выборке.

В выражение (8) не входят значения ОСШ и коэффициент амплитудного расхождения, а значит, рассеяние получаемой оценки не зависит от априорного знания этих параметров, что является несомненным плюсом этой процедуры оценивания.

Проанализированы смещение (рис. 2 а) и рассеяние (рис. 2 б), обеспечиваемые методом моментов (ММ).

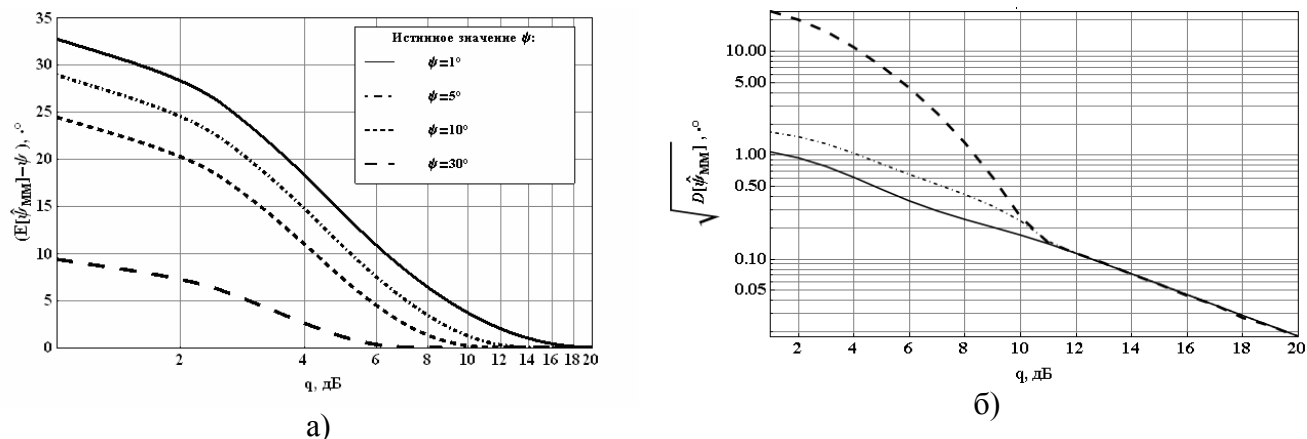


Рис. 2 Зависимость от ОСШ (при выборке в 1000 отсчётов) а) смещения ММ оценки для $\psi = \{1^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 30^\circ\}$ и б) корня из рассеяния ММ оценки при истинном значении $\psi = 10^\circ$ (пунктирная линия – ММ оценка, сплошная – Рао-Крамера, штрихпунктирная – Чепмена-Роббинса)

На основе выражения (2) проведено исследование максимально правдоподобной (МП) оценки, полученной в предположении того, что известны и ОСШ, и коэффициент амплитудного расхождения.

Проведено сравнение смещений и рассеяний, обеспечиваемых данными оценками, для различных значений параметров: истинной интегральной разности фаз и ОСШ. Также для определения степени эффективности оценок получено выражение для минимального рассеяния несмещённой оценки интегральной разности фаз в виде границ Рао-Крамера (ГРК) и Чепмена-Роббинса (ГЧР).

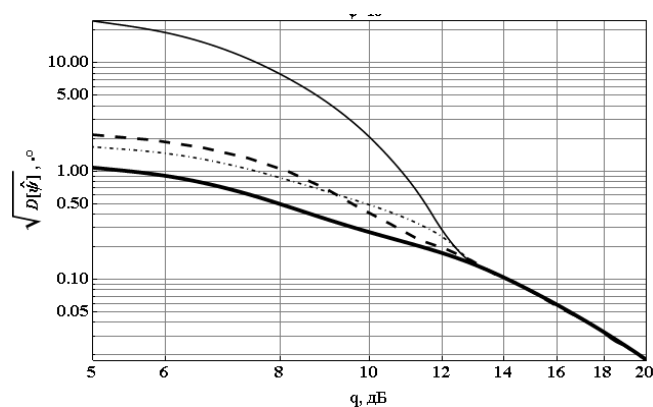


Рис. 3 Зависимость корня из рассеяния ММ оценки (сплошная тонкая линия), МП оценки (пунктирная линия), ГРК (сплошная жирная), ГЧР (штрихпунктирная линия), для $\psi = 10^\circ$ и объёме выборки в 2000 отсчётов

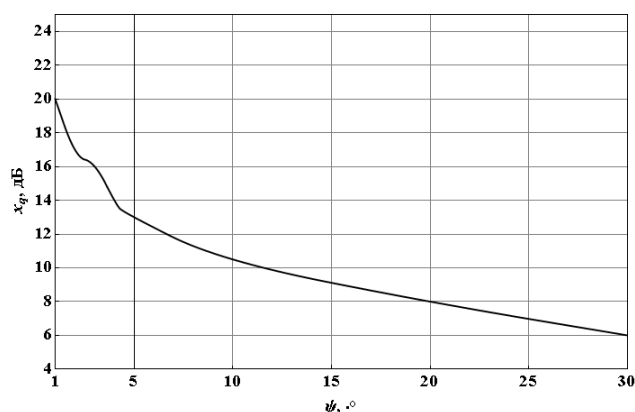


Рис. 4 Зависимость x_q от истинного значения интегральной разности фаз

Проведённое исследование показало, что получаемые ММ и МП оценки при ОСШ менее 10-12 дБ и ИРФ менее 5° - 7° являются существенно смещёнными и обладают

рассеянием существенно большим, чем предсказывается ГРК. В этой области точность МП оценки оказывается значительно выше ММ оценки. При этом для выборки менее 1500 элементов смещение и рассеяние МП оценки носят немонотонный характер (чего не наблюдается у ММ оценки), что затрудняет возможность её использования, однако увеличение выборки до 2000 отсчётов существенно уменьшает и рассеяние МП оценки (см. рис. 3), и её смещение.

В области ОСШ более 12 дБ и ИРФ более 5° дисперсии обеих оценок сходятся достаточно быстро к ГРК (проявляется их асимптотическая эффективность). В этой области точность, обеспечиваемая ММ оценкой, практически совпадает с точностью МП оценки.

Определена величина порогового ОСШ $x_q(\psi)$, при котором расхождение между рассеянием оценок и границей Рао-Крамера не превосходит некоторого наперёд заданного порога (например, 1% – см. рис. 4). Отмечено также, что в области порога от 1,5 до 3 дБ поведение рассеяния ММ оценки значительно лучше описывается границей Чепмена-Роббинса.

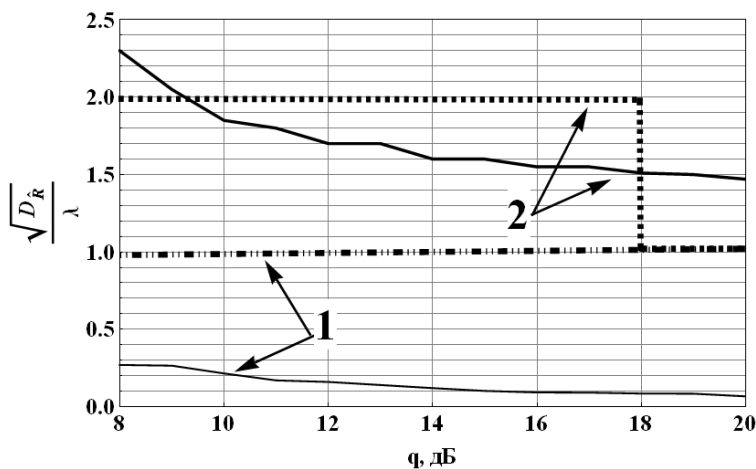


Рис. 5 Зависимость рассеяния оценки размера объекта на основе анализа: 1 – интегральной разности фаз, 2 – модуля корреляционного интеграла от соотношения сигнал/шум для $R_{ob} = 1,1\lambda$

идеально проводящей ленты (рис. 5: пунктирные кривые – с учётом аппаратной разрешающей способности, сплошные – интерполяция по сетке эталонов). Указаны области соотношений сигнал/шум, при которых они дают схожие результаты (от 16 дБ), указаны выигрыш и проигрыш одного метода относительно другого при точном совпадении объекта с одним из эталонов и не совпадении. Отмечены возможные модификации, позволяющие повысить качество оценки.

Сделаны заключения и рекомендации относительно использования рассмотренных методов в задаче оценивания параметров объектов радиоголографическими эталонными фазовыми методами.

В четвёртой главе рассмотрена задача выбора минимального шага сетки эталонов. Для её решения использовались 2 критерия:

- ограничения по допустимой полной вероятности ошибки P_ε или вероятности правильного принятия решения (классификации) P_D (при этом задача сводится к задаче статистической проверки гипотез: различения 2-х соседних эталонов в сетке эталонов):

$$P_D(\psi, \rho) = 1 - \exp(\mu(0.5, \psi, \rho) + 0.5\mu'(0.5, \psi, \rho)), \quad (9)$$

$$P_\varepsilon(\psi, \rho) = \exp(\mu(0.5, \psi, \rho) + 0.5\mu'(0.5, \psi, \rho)) \operatorname{ch}(0.5\mu'(0.5, \psi, \rho)), \quad (10)$$

где $\mu(\cdot)$ – логарифм производящей функции моментов в предположении, что истинное значение интегральной разности фаз отлично от нуля (т.е. эталон,

Проведено исследование времени, требуемого для получения ММ и МП оценок. Показано, что для объёмов выборки более 100 отсчётов выигрыш ММ во времени составляет несколько порядков. При этом в ситуации, когда ИРФ или ОСШ неизвестны, время, требуемое на проведение МП оценивания, дополнительно существенно возрастает.

Проведено сравнение процедур оценки параметра объекта эталонными методами с использованием ИРФ и модуль корреляционного интеграла на примере оценки ширины

выбранный для сравнения, отличается по величине оцениваемого параметра от исследуемого объекта);

- ограничения, накладываемого на статистический предел разрешения (SRL) (при этом задача сводится к задаче оценки интегральной разности фаз, порождаемой двумя соседними эталонами):

$$SRL = 2\sqrt{D[\varphi]}. \quad (11)$$

Проведенное исследование зависимости вероятности правильного (ложного) принятия решения от ОСШ при различных величинах истинной интегральной разности фаз (рис. 6 а) и объёма выборки (рис. 6 б) дают возможность сделать вывод о том, что P_D (P_e) возрастает (уменьшается) с увеличением как N_{stat} , так и ψ . Стоит отметить, что исследуемые зависимости носят сугубо нелинейный характер: так, в частности, для достижения требуемого уровня P_D рост доступного объёма выборки приводит к уменьшению энергетического выигрыша по величине отношения сигнал/шум на входе системы, при котором достигается данная P_D . К подобному же заключению можно прийти относительно уменьшения полной ошибки P_e .

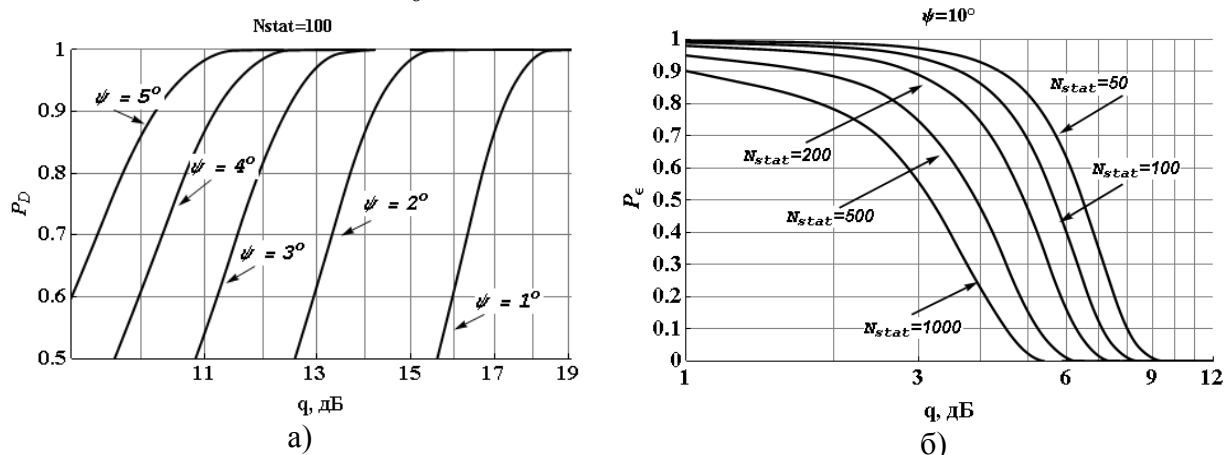


Рис. 6 Зависимость от отношения сигнал/шум а) вероятности правильного принятия решения и б) вероятности полной ошибки

Важно отметить, что система классификации существенно более чувствительна к росту ψ , чем N_{stat} . В частности, увеличение ψ в 2 раза (например, с 1° до 2°) приводит к выигрышу по величине входного ОСШ в 3 дБ. Для достижения подобного же эффекта необходимо (при заданном ψ) увеличить в 10 раз доступный объем выборки (например, с 50 до 500 отсчётов).

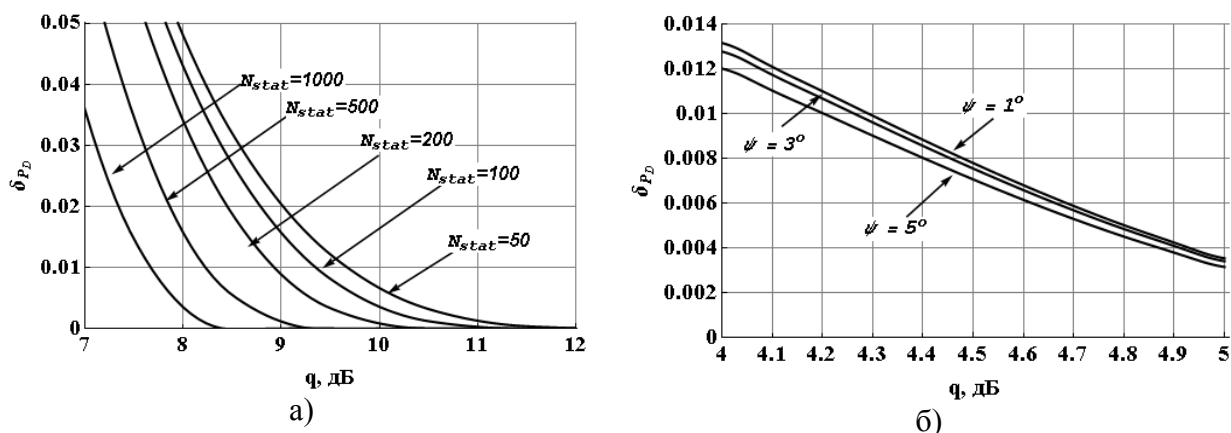


Рис. 7 Зависимость относительной ошибки по вероятности правильного принятия решения, вносимой аппроксимацией (4), от отношения сигнал/шум при а) $\psi = 5^\circ$ и б) при объёме выборки 1000 отсчётов

Проведённое исследование продемонстрировало необходимость использования крайне аккуратного подхода к построению системы классификации, который бы учитывал особенности конкретных рассматриваемых на практике объектов.

Исследование для случая использования вместо исходной ПРВ (3) одной из предлагаемых аппроксимаций, например, (4) показало (рис. 7), что при отношении сигнал/шум от 9,5 дБ, объёме выборки от 100 отсчётов и $\psi \geq 1^\circ$ относительная ошибка по вероятности правильного принятия решения δ_{pD} составляет не более 1 %.

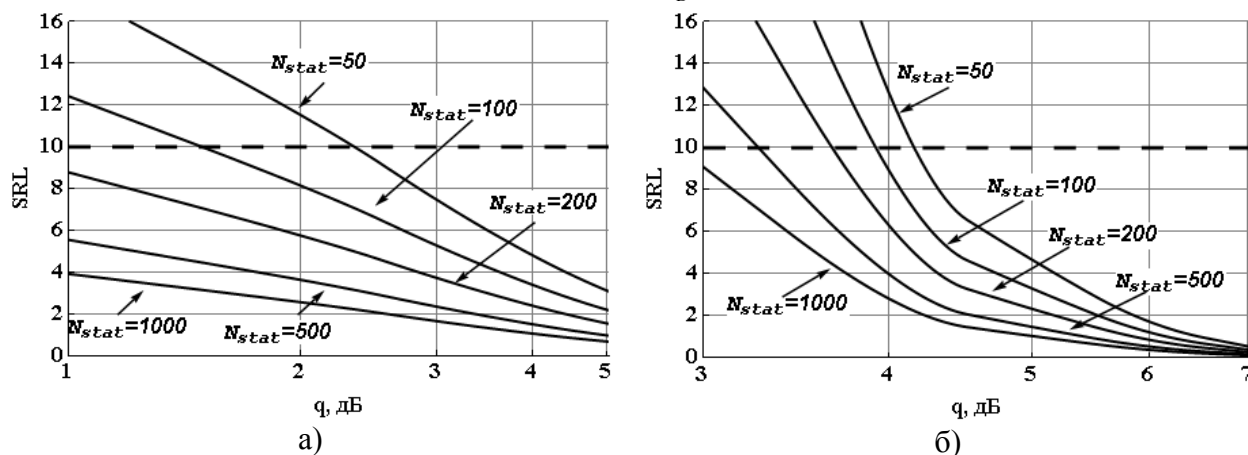


Рис. 8 Зависимость статистического предела разрешения от отношения сигнал/шум при $\psi = 10^\circ$, а) известном $\eta = 1$ и б) неизвестном $\eta = 1$

Из анализа полученных зависимостей можно сделать заключение о том, что величина SRL (рис. 8 а) уменьшается с ростом как N_{stat} , так и ψ . Стоит отметить, что исследуемые зависимости носят нелинейный характер: так, в частности, для достижения требуемого уровня SRL рост доступного объёма доступной выборки приводит к уменьшению энергетического выигрыша по величине отношения сигнал/шум на входе системы, при котором данный SRL достигается (рис. 9). Стоит отметить, что выигрыш в ОСШ для различных N_{stat} практически не меняется при увеличении ψ в 5 раз (с 1° до 5°).

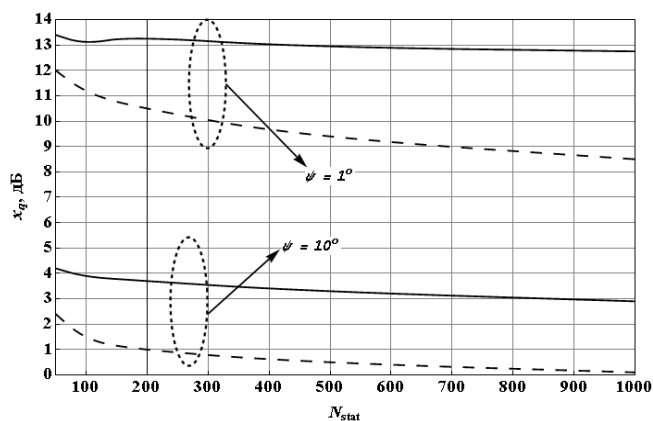


Рис. 9 Зависимость x_q от объёма выборки

«путать» мало различающиеся по оцениваемому параметру эталоны. Рассматриваемый ЭФМ чрезвычайно чувствителен к наличию априорной неопределённости относительно величины амплитудного расхождения (рис. 8 б). В дополнение к требованию превышения шагом сетки величины статистического предела разрешения, очевидно, необходимо добавить и требование минимизации смещения оценки ИРФ, которое будет являться доминирующим в области малых ОСШ при использовании метода моментов. Демонстрация преимуществ метода проведена на примере сравнения процедуры выбора минимального шага сетки

Исходя из проанализированных зависимостей, можно заключить, что в случае существенного увеличения количества используемых эталонов (т.е. уменьшения шага по ψ для повышения разрешающей способности метода) появится необходимость серьёзного повышения доступного объёма выборки N_{stat} , что в свою очередь неминуемо приведёт к снижению быстродействия всей системы (одного из главных её преимуществ) или, при сохранении фиксированного N_{stat} , к уменьшению P_D за счёт того, что система будет чаще

эталонов на основе P_D при использовании интегральной разности фаз и евклидового расстояния.

Проведённый анализ (рис. 10) показывает преимущество интегральной разности фаз как критерия принятия решения над расстоянием Евклида, которое наиболее заметно при широкоапертурных многоэлементных СГРВ (при $\alpha > 20^\circ$ и $N_\alpha > 100$) и может потенциально достигать 5,2 дБ. Это, в частности, можно объяснить тем фактом, что при увеличении числа антенных элементов (при фиксированной апертуре) лучше воспроизводится закон изменения фазы комплексной радиоголограммы.

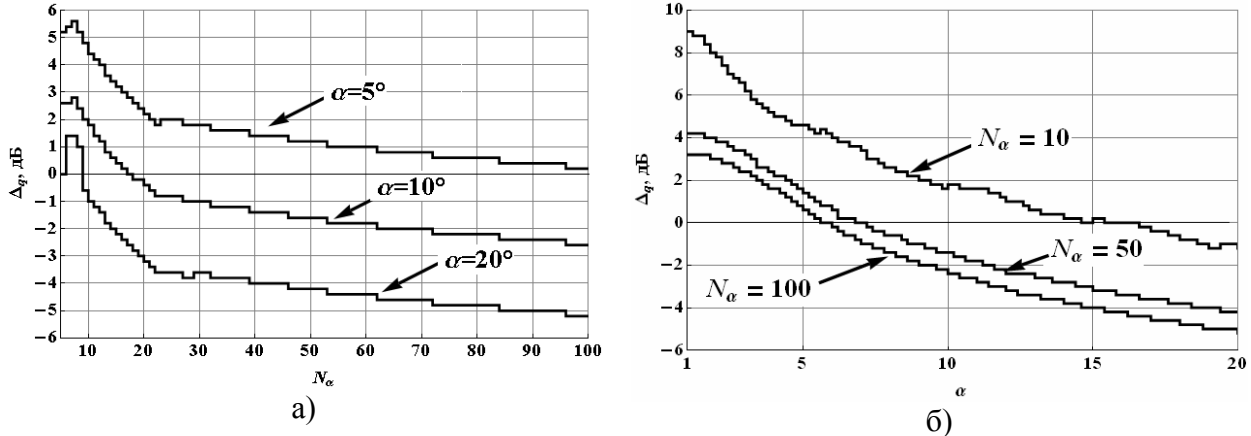


Рис. 10 Зависимость разности по ОСШ при использовании расстояния Евклида и ИРФ от а) числа дискретов радиоголограммы N_α , б) углового раскрытия апертуры α СГРВ

В заключении сформулированы основные выводы по работе, а также перечислены основные результаты, полученные в диссертации:

- получены точные, асимптотические и аппроксимирующие выражения для вероятностно-статистических характеристик интегральной разности фаз для эталонного метода определения параметров радиоголографических объектов;
- исследовано поведение максимально правдоподобных и моментных оценок интегральной разности фаз в зависимости от отношения сигнал/шум и истинного значения интегральной разности фаз;
- определены границы применимости найденных выражений и сформулированы рекомендации по применению рассматриваемых методов оценивания для данной задачи:
 - по необходимому объёму выборки, требуемому для достижения желаемого рассеяния ММ и МП оценок;
 - по необходимому значению интегральной разности;
 - по необходимому значению соотношения сигнал/шум;
- исследованы зависимости времени, требуемого для проведения процедуры оценивания интегральной разности фаз от основных параметров, для обеспечения возможности работы системы в режиме реального времени;
- определён минимальный шаг эталонной сетки;
- исследована зависимость шага эталонной сетки от объёма выборки, отношения сигнал/шум и истинного значения интегральной разности фаз.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

Статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК

1. Артёмова, Т.К. Минимально-фазовый метод эталонной оценки размеров объектов в задачах радиоголографии /А.С. Гвоздарёв, Т.К. Артёмова // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2011. – №4 – С. 22–30.

2. Гвоздарёв, А.С. Способ повышения качества эталонной оценки размеров объектов радиоголографии в условиях малоэлементной антенной решётки / А.С. Гвоздарёв, К.С. Артёмов, Т.К. Артёмова // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2012. – №1. – С. 65–74.
3. Гвоздарёв А.С. Использование границы Чернова и статистического предела разрешения для определения точности оценки параметров радиоголографических объектов минимально-фазовым методом и построения классификационной сетки эталонов метода решётки [Электронный ресурс] / А.С. Гвоздарёв, Т.К. Артёмова, К.С. Артёмов // Журнал радиоэлектроники. – Декабрь 2012. – №12.— Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/alt/dec13/8/text.pdf>
4. Гвоздарёв, А.С. Сравнение максимально правдоподобной и моментной оценок интегральной разности фаз [Электронный ресурс] / А.С. Гвоздарёв, Т.К. Артёмова, К.С. Артёмов // Журнал радиоэлектроники. – Декабрь 2013. – №12.— Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/alt/dec13/8/text.pdf>.

Публикации в межвузовских сборниках научных трудов и материалах конференций

5. Гвоздарёв, А.С. Моделирование объекта в ближней радиоголографии по бистатической диаграмме рассеяния / А.С. Гвоздарёв, Т.К. Артёмова // Сборник научных трудов «Актуальные проблемы физики». — Ярославль, 2007. — №6. — С. 14–21.
6. Гвоздарёв, А.С. Метод повышения качества радиоголографических изображений объектов, находящихся за оптически непрозрачными препятствиями / А.С. Гвоздарёв, К.С. Артёмов, Т.К. Артёмова, Е.А. Кузнецов, А.С. Леонтьев // Труды XVI международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». — Воронеж, 2008. — Т. 3. — С. 1447–1457.
7. Гвоздарёв, А.С. Метод классификации объектов по их диаграммам рассеяния, полученным при помощи системы голографического радиовидения / А.С. Гвоздарёв, Т.К. Артёмова // Тезисы IX Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы разработки и внедрения информационных технологий двойного применения». — Ярославль, 2008. — С. 57-58.
8. Гвоздарёв, А.С. Метод классификации объектов на основе корреляционного анализа их рассеянных полей / А.С. Гвоздарёв, Т.К. Артёмова // Материалы 19 Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». — Севастополь, 2009. — Т. 2. — С. 957 - 958.
9. Гвоздарёв, А.С. Анализ расширения возможности радиовидения при помощи радиоголографической системы миллиметрового диапазона / А.С. Гвоздарёв, Т.К. Артёмова // Вестник ЯрГУ. Серия «Физика. Радиотехника. Связь». — Ярославль, 2009. — №1. — С. 46–49.
10. Гвоздарёв, А.С. Композиционная обработка радиоголограммы для задач идентификации объектов / А.С. Гвоздарёв, Т.К. Артёмова // Вестник ЯрГУ. Серия «Естественные и технические науки». — Ярославль, 2010. — №1. — С. 50–55.
11. Гвоздарёв, А.С. Метод определения размеров объектов на основе анализа их полей рассеяния, восстановленных по данным радиоголограммы / А.С. Гвоздарёв, Т.К. Артёмова // Труды XVI международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». — Воронеж, 2010. — Т. 3. — С. 1689–1697.
12. Гвоздарёв, А.С. Статистические характеристики эталонной оценки параметров тестовых объектов радиоголографии минимально-фазовым методом / А.С. Гвоздарёв, Т.К. Артёмова // Материалы 20 Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». — Севастополь, 2010. — Т. 2. — С. 1257 - 1258.
13. Гвоздарёв, А.С. Исследование минимально-фазового метода оценки размеров на примере тестовых объектов радиоголографии / А.С. Гвоздарёв, Т.К. Артёмова

- // Труды XVI международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». — Воронеж, 2011 — Т. 1. — С. 73-81.
14. Гвоздарёв, А.С. Метод анализа параметрического портрета многочастотного поля рассеяния для оценки параметров радиоголографических объектов / А.С. Гвоздарёв, Т.К. Артёмов // Материалы 21 Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». — Севастополь, 2011. — Т. 2. — С. 1108 - 1109.
 15. Гвоздарёв, А.С. Использование границы Чернова для определения точности оценки параметров радиоголографических объектов минимально-фазовым методом / А.С. Гвоздарёв, Т.К. Артёмов // Материалы 22 Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». — Севастополь, 2012. — Т. 2. — С. 1094 - 1095.
 16. Гвоздарёв, А.С. Построение классификационной сетки эталонов минимально-фазового метода на основе статистического предела разрешения // Материалы 21 Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». — Севастополь, 2012. — Т. 2. — С. 1096 - 1097.
 17. Гвоздарёв, А.С. Анализ границ качества минимально-фазового метода эталонной оценки параметров объектов по радиоголограмме / А.С. Гвоздарёв, К.С. Артёмов, Т.К. Артёмов // Труды XVI международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». — Воронеж, 2012. — Т. 1. — С. 168-177.
 18. Гвоздарёв, А.С. Использование границы Чернова и статистического предела разрешения для определения точности оценки параметров радиоголографических объектов минимально-фазовым методом и построения классификационной сетки эталонов метода / А.С. Гвоздарёв, Т.К. Артёмов // Тезисы VI Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь». — Москва, 2012. — С. 184–188.
 19. Артёмов, Т.К. Исследование вероятностных характеристик интегральной разности фаз, используемой в эталонных фазовых методах / Т.К. Артёмов, А.С. Гвоздарёв, А.С. Захаров // Вестник ЯрГУ. Серия «Естественные и технические науки». — Ярославль, 2012. — №4. — С. 30–36.
 20. Гвоздарёв, А.С. Определение начала пороговой области отношения сигнал/шум применительно к задаче оценки интегральной разности фаз / А.С. Гвоздарёв, Т.К. Артёмов // Материалы международного научно-технического семинара «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях». — Ярославль, 2013. — С. 212-214.
 21. Гвоздарёв, А.С. Построение максимально правдоподобной оценки интегральной разности фаз в эталонном фазовом методе // Материалы 23 Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». — Севастополь, 2013. — Т. 2. — С. 1096 - 1097.
 22. Гвоздарёв, А.С. Сравнение поведения амплитудной и фазовой метрик при формировании набора опорных радиоголограмм в задачах эталонной оценки параметров радиоголографических объектов / А.С. Гвоздарёв, К.С. Артёмов, Т.К. Артёмов // Труды XX международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». — Воронеж, 2014. — Т. 2. — С. 982-993.

Гвоздарёв А.С. Статистический анализ интегральной разности фаз при использовании радиоголографических эталонных методов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова» 150000, г. Ярославль, ул. Советская, 14. Отпечатано в ООП ФГБОУ ВПО «ЯрГУ им. П.Г. Демидова».

Подписано в печать 25.02.2015г.

Заказ № 5/15. Формат 60x84 1/16. 1 п.л. Тир. 110 экз.