

На правах рукописи



НГУЕН Ван Дык

**АЛГОРИТМЫ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛА
РАЗНОСТНОЙ ЧАСТОТЫ ЧМ ДАЛЬНОМЕРА ПРИ НАЛИЧИИ ПОМЕХ**

Специальность: 2.2.13. Радиотехника,
в том числе системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2025

Работа выполнена на кафедре радиоуправления и связи Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина».

Научный руководитель:

Паршин Валерий Степанович,

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиоуправления и связи ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина», г. Рязань.

Официальные оппоненты:

Гаврилов Константин Юрьевич,

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Радиолокация, радионавигация и бортовое радиоэлектронное оборудование» Московского авиационного института (национального исследовательского университета), г. Москва;

Глушанков Евгений Иванович,

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехники ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Защита состоится «19» сентября 2025 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.375.03 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» или на сайте <http://www.rsreu.ru>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2025 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук, доцент

Г.В. Овечкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Важной частью систем контроля функционирования производственных процессов являются радиотехнические устройства прецизионного измерения малых расстояний, от долей метра до нескольких десятков метров. В качестве примера можно привести измерение уровня заполнения технологических емкостей, систем точного позиционирования технологического оборудования, измерение малых перемещений и вибраций деталей машин и механизмов. На практике для решения перечисленных задач очень часто используются радиодальномеры с частотной модуляцией излучаемого сигнала (ЧМ дальномеры). Частота узкополосного сигнала разностной частоты (СРЧ) на выходе смесителя таких дальномеров однозначно связана с расстоянием до отражающей поверхности. Поэтому погрешности оценки расстояния в значительной мере определяются погрешностями оценки частоты СРЧ.

Известны различные методы и алгоритмы, позволяющие измерять частоту СРЧ, принимаемого на фоне стационарного шума, в пересчете на расстояние с точностью до долей мм. Однако на практике измерение частоты радиосигнала часто производится при наличии мешающих факторов, к которым можно отнести мешающие отражения (МО), паразитную амплитудную модуляцию (ПАМ), значительное изменение параметров окружающей среды (температуры, влажности, давления) и др. Наличие каждого из перечисленных факторов приводит к дополнительной погрешности измерения частоты. Основной вклад в погрешность оценки частоты СРЧ вносят помехи в виде МО. Причина их появления – различного рода отражатели на пути распространения электромагнитных волн. Например, при измерении расстояния до уровня содержимого в резервуаре МО возникают из-за отражений от конструктивных элементов резервуара, от его боковых стенок, от дна и различного рода многократных переотражений. Погрешность оценки частоты радиосигнала в зависимости от отношения сигнал-помеха может достигать величины, неприемлемой для практических приложений.

При решении задачи оценки частоты СРЧ для уменьшения влияния МО предложены и исследованы различные методы и алгоритмы, однако полностью устранить влияние МО, как правило, не удается. К наиболее удачным следует отнести использование методов параметрического спектрального анализа и следящих алгоритмов. Необходимо отметить, что каждый из этих подходов имеет свои достоинства и недостатки. Например, к существенным недостаткам методов параметрического спектрального анализа следует отнести неустойчивость спектральных оценок, появление ложных спектральных пиков, большую чувствительность к ПАМ и нелинейным искажениям СРЧ, значительные вычислительные затраты. Использование следящих алгоритмов, основанных на особенностях логарифма функции отношения правдоподобия (ЛФОП) СРЧ, сталкивается с ограничениями – величина перемещения полезного отражателя должна быть не больше четверти длины волны несущего колебания при двух последовательных измерениях, а отношение сигнал-помеха должно быть не менее 2 дБ, что далеко не всегда выполняется на практике. Поэтому разработка алгоритмов

оценки частоты, позволяющих уменьшить погрешность оценки частоты СРЧ при наличии МО, имеет практическое значение.

Степень проработанности темы. Синтез алгоритмов оценки частоты СРЧ основывается на общетеоретических положениях оценки параметров радиосигнала, полученных в работах В.И. Тихонова, Ю.Г. Сосулина, Е.И. Куликова, А.П. Трифонова, А.И. Перова и других авторов.

Необходимо отметить, что большой вклад в развитие теории применения ЧМ дальногомера в радиотехнических системах различного назначения внесли работы О.И. Шелухина, А.С. Винницкого, Б.А. Атаянца, Б.В. Кагаленко, В.П. Мещерякова, И.В. Комарова, С.М. Смольского, В.М. Давыдочкина, В.В. Езерского, В.С. Паршина. Среди зарубежных авторов следует отметить работы Brumbi D., Edvardson K. O., Stuchly S. S., Stolle R. и др. Среди последних работ, посвященных разработке и анализу алгоритмов оценки параметров СРЧ, следует отметить монографию Б.А. Атаянца, В.М. Давыдочкина, В.В. Езерского, В.С. Паршина и С.М. Смольского, учебное пособие Б.А. Атаянца, В.В. Езерского, В.С. Паршина.

Несмотря на глубокую проработанность изложенных в упомянутых работах различных методов и алгоритмов оценки частоты СРЧ, принимаемого на фоне МО, недостаточно исследованы методы оценки фазовой характеристики ЧМ дальногомера при наличии МО, оценки частоты СРЧ при отношении сигнал-помеха меньше единицы, оценки параметров радиосигнала, представленного короткой выборкой.

Целью исследования является разработка алгоритмов, позволяющих уменьшить влияние МО на результат оценки частоты СРЧ, что обеспечивает расширение области применения ЧМ дальномеров.

Для достижения этих целей необходимо решить следующие основные задачи.

1. Анализ алгоритмов оценки частоты СРЧ и фазовой характеристики ЧМ дальногомера при воздействии помех в виде белого нормального шума и МО.
2. Разработка алгоритма оценки фазовой характеристики ЧМ дальногомера, позволяющего уменьшить погрешность оценки из-за влияния МО.
3. Разработка алгоритмов оценки частоты при наличии МО, в том числе алгоритма на основе ЛФОР СРЧ, позволяющего производить оценку при отношении сигнал-помеха меньше единицы.
4. Проверка разработанных алгоритмов на серийных образцах ЧМ дальномеров, функционирующих при наличии МО различной интенсивности.

Методы исследования. В диссертационной работе при проведении исследований используются положения статистической радиотехники, теории статистических решений, теории оптимальных методов приема радиосигналов. Анализ полученных теоретических результатов проводился с помощью статистических моделирований и обработки экспериментальных данных, полученных при использовании серийно выпускаемых образцов ЧМ дальномеров.

Научная новизна

1. Получены математические соотношения, позволяющие определить смещения, дисперсии, коэффициенты корреляции раздельных и совместных оценок

частоты, фазы и амплитуды радиосигналов, представленных короткой выборкой, на фоне белого нормального шума. Установлена связь между оценками параметров сигнала разностной частоты и значениями несущей частоты, диапазоне перестройки и временем модуляции при измерении малых расстояний.

2. Разработана процедура оценки фазовой характеристики ЧМ дальномера, позволяющая существенно уменьшить влияние мешающего отражения на результаты измерения.

3. Разработаны алгоритмы оценки разностной частоты сигнала, в том числе алгоритм на основе логарифма функции отношения правдоподобия и компенсации помехи, позволяющий производить измерение при отношении сигнал-помеха меньше единицы.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Алгоритм оценки фазовой характеристики дальномера с частотной модуляцией зондирующего сигнала, позволяющий уменьшить погрешность оценки из-за влияния мешающего отражения в 2-3 раза и обеспечивающий дисперсию оценки, определяемую нижней границей Рао-Крамера.

2. Алгоритм оценки разностной частоты сигнала, основанный на варьировании его начальной фазы, позволяющий повысить точность измерения в 2-3 раза и основанный на минимизации взаимной энергии полезного сигнала и помехи.

3. Алгоритм оценки разностной частоты, основанный на комбинации логарифма функции отношения правдоподобия и компенсации помехи, предусматривающий оценки ее местоположения, амплитуды и фазы при каждом измерении, позволяющий уменьшить зону повышенной погрешности в 2-3 раза при измерениях с отношением сигнал-помеха меньше единицы.

Достоверность полученных результатов обуславливается использованием в процессе исследований адекватных математических моделей, корректным использованием математического аппарата, подтверждением полученных теоретических результатов имитационным моделированием и совпадением ряда частных результатов с результатами других авторов, а также с результатами экспериментальных исследований.

Практическая значимость и внедрение результатов работы

Реализация полученных результатов позволяет повысить точность измерения расстояния ЧМ дальномера в сложной помеховой обстановке, обусловленной наличием МО.

Результаты диссертационной работы внедрены на ООО предприятие «КОНТАКТ-1» в городе Рязани.

Личное участие автора. Автору принадлежат на правах соавтора постановка задач, способы и алгоритмы их решения, отраженные в главах диссертации, а также компьютерное моделирование работы алгоритмов. Степень авторства подтверждается соответствующим заключением кафедры РУС РГРТУ.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 9 Международных и 5 всероссийских научно-технических конференциях:

5-й, 6-й, 7-й Международные научно-технические форумы «Современные технологии в науке и образовании» (Рязань, 2022, 2023 и 2024 гг.);

24-я, 25-я, 26-я 27-я Международные конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение» (Москва, 2022, 2023, 2024 и 2025 гг.);

127-я, 128-я, 129-я Всероссийские научно-технические конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании» (Рязань, 2022, 2023 и 2024 гг.);

8-я, 9-я Всероссийские научно-технические конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства» (Рязань, 2023 и 2024 гг.);

8-я Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических инфокоммуникационных систем» (Москва, 2024 г.).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 16 работ, из них 3 статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, 3 тезиса докладов и 10 текстов докладов на Международных и всероссийских конференциях.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений и списка литературы. Материалы диссертации изложены на 146 страницах, содержат 72 рисунка, 2 приложения и список использованной литературы из 102 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определена степень проработанности, сформулированы цель и задачи исследования, научные положения, выносимые на защиту, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, а также отмечен личный вклад автора, приведены данные об апробации работы, сведения о публикациях, структуре и объёме работы.

В первой главе рассмотрен принцип работы ЧМ дальномера, представлена модель СРЧ, приведены основные расчетные соотношения, позволяющие связать частоту СРЧ, расстояние до отражающей поверхности и время задержки излучаемого сигнала. Проведен анализ алгоритмов оценки частоты СРЧ, основанных на поиске максимальной спектральной составляющей, средневзвешенной оценки и использовании поправочных коэффициентов при воздействии белого нормального шума и МО. Проведен анализ алгоритма оценки фазовой характеристики ЧМ дальномера при воздействии МО.

СРЧ на полупериоде модуляции без учета высокочастотной составляющей, удаляемой фильтром низкой частоты, представлен в виде

$$y(t) = f(t) \left[S_c \cos \left(\omega_0 \tau_z + \frac{2\Delta\omega_d \tau_z}{T_{\text{мод}}} t + \varphi_c \right) + \sum_{l=1}^L S_{nl} \cos \left(\omega_0 \tau_{nl} + \frac{2\Delta\omega_d \tau_{nl}}{T_{\text{мод}}} t + \varphi_{nl} \right) \right] + \zeta(t), \quad (1)$$

где S_c , S_n – амплитуды полезного сигнала и сигнала, отраженного от МО; ω_0 – минимальное значение несущей частоты; $\Delta\omega_d$ – диапазон перестройки несущей частоты; $T_{\text{мод}}$ – период модуляции несущего колебания; τ_z , τ_n – задержки, соответствующие расстоянию до отражающей поверхности и МО; φ_c , φ_n – фазы сигнала, обусловленные фазовой характеристикой ЧМ дальномера и свойствами отражающей среды и МО; L – число МО; $\zeta(t)$ – белый нормальный

шум со спектральной плотностью N_0 ; $f(t)$ – функция, описывающая ПАМ.

Два параметра СРЧ в (1) – частота СРЧ $\omega_c = 2\Delta\omega_d\tau_z/T_{mod}$ и задержка τ_z взаимосвязаны. Конечной измеряемой величиной является расстояние R . Однако для его расчета необходимо непосредственно вычислить частоту. Расстояние рассчитывается в соответствии с формулой $R = \omega_c c T_{mod} / 4\Delta\omega_d$, где c – скорость распространения электромагнитной волны.

На практике частота ω_c СРЧ часто измеряется по положению максимальной спектральной плотности амплитуды (СПА) $S(\omega)$, то есть

$$S(\hat{\omega}_c) = \max_{\omega} \{S(\omega)\}. \quad (2)$$

Для реализации алгоритма (2) в известной литературе используется двух-этапная процедура. На первом этапе с помощью быстрого преобразования Фурье осуществляется грубая оценка частоты СРЧ. На втором этапе в окрестности максимальной спектральной составляющей происходит уточнение частоты путем поиска положения экстремума с помощью следующих методов. Первый метод основан на поиске максимума модуля дискретно-временного преобразования Фурье (ДВПФ) $S(x)$ СРЧ с помощью одномерной оптимизации

$$S(x_{\max}) = \max_{x \in X} S(x), \quad (3)$$

где $S(x) = \left| \sum_{k=0}^{K-1} y(k)w(k) \exp\{-j2\pi xk\} \right|$; $y(k)$ – дискретный СРЧ; $w(k)$ – весовая функция; $x = n/(K + K_0)$; $n = 0, 1, \dots, K + K_0 - 1$; $0 \leq x < 1$; K – число отсчетов СРЧ; K_0 – число добавляемых нулевых отсчетов.

Второй метод основан на вычислении поправки p . При этом уточнение частоты СРЧ определяется так:

$$\hat{\omega}_c = (n_{\max} - 1 + p) \frac{\Delta\omega}{K + K_0}, \quad (4)$$

где $p = \frac{S(n_{\max} - 1) - S(n_{\max} + 1)}{S(n_{\max} - 1) + S(n_{\max} + 1)} \Psi_p$; $n_{\max}$ – номер максимальной спектральной составляющей СПА СРЧ, определяемый на первом этапе; $\Delta\omega$ – интервал частот между спектральными составляющими; Ψ_p – множитель, зависящий от числа K_0 .

Третий метод основан на использовании средневзвешенной оценки, т. е.

$$n_R = \frac{\sum_{i=n_n}^{n_g} i \left(\left| \sum_{l=1}^K y(l) \exp\{-j2\pi li/K\} \right| \right)^2}{\sum_{i=n_n}^{n_g} \left(\left| \sum_{l=1}^K y(l) \exp\{-j2\pi li/K\} \right| \right)^2}, \quad (5)$$

где n_n , n_e – нижняя и верхняя границы номеров обрабатываемых спектральных составляющих, причем $n_n \leq n_{\max} \leq n_e$.

Проведено сравнение среднеквадратических ошибок оценки частоты при использовании упомянутых вариантов реализации на фоне белого шума. В дальнейшем для реализации алгоритма (2) используется алгоритм (3), поскольку он позволяет обеспечить наименьшую дисперсию оценки, определяемую нижней границей Рао-Крамера. Однако при наличии МО погрешность измерения расстояния ΔR значительно увеличивается, как показано на рисунке 1. Несущая частота при получении графика равна 10 ГГц, диапазон перестройки несущей частоты 1 ГГц, отношение сигнал-шум равно 60 дБ. В работе везде под отношением сигнал-шум

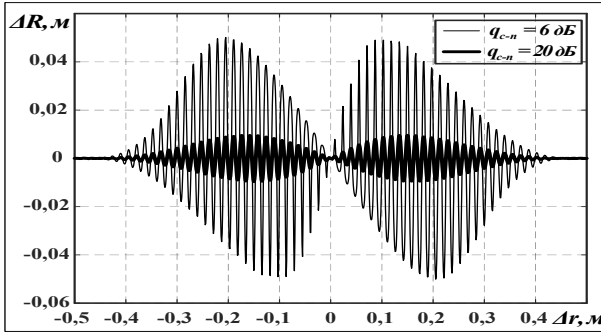


Рисунок 1 – Мгновенные погрешности измерения расстояния

под понимается отношением энергии СРЧ на полупериоде модуляции к спектральной плотности белого шума. Под отношением сигнал-помеха $q_{с-п}$ понимается отношение энергии сигнала к энергии помехи. Под Δr обозначено расстояние между

полезным отражателем и МО.

Из (1) следует, что информация о расстоянии до отражающей поверхности содержится как в частоте, так и в фазе СРЧ. В известной литературе оценка фазовой характеристики (ФХ) $\hat{\phi}_c$ осуществляется алгоритмом, основанным на вычислении начальной фазы $\hat{\phi}_n$ и фазовой добавки $\omega_0 \hat{t}_z$, то есть

$$\hat{\phi}_c = \hat{\phi}_n - \omega_0 \hat{t}_z, \quad (6)$$

где $\hat{\phi}_n = -\arctg \{ \text{Im} \dot{S}(\hat{\omega}_c) / \text{Re} \dot{S}(\hat{\omega}_c) \}$; $\hat{t}_z = T_{\text{моо}} \hat{\omega}_c / 2\Delta\omega_d$.

Из выражения (6) видно, что при наличии МО погрешность оценки фазовой характеристики дальномера увеличивается существенно.

Анализ алгоритмов оценки частоты и фазы СРЧ при воздействии помехи в виде нормального белого шума и МО показал необходимость разработки алгоритмов, позволяющих уменьшить погрешность измерения из-за влияния МО.

Во второй главе проведены разработка и исследование алгоритма оценки фазовой характеристики ЧМ дальномера, основанного на ЛФОП. Получены математические соотношения, позволяющие определить смещения, дисперсии и коэффициенты корреляции отдельных и совместных оценок параметров радиосигнала, представленного короткой выборкой, принимаемого на фоне белого

шума. Установлена связь между оценками параметров СРЧ и значениями несущей частоты, диапазоном перестройки и временем модуляции при измерении малых расстояний.

Для минимизации погрешности оценки частоты СРЧ часто используются алгоритмы, основанные на ЛФОП. Однако для их реализации необходимо знать фазу φ_c для каждого измеряемого расстояния. Поэтому в работе предложена процедура оценки фазовой характеристики ЧМ дальномера. Последовательность действий для ее оценки следующая.

На первом этапе осуществляется предварительная оценка расстояния $\hat{R}_p$ с помощью алгоритма (2). При этом необходимо гарантировать попадание этой оценки в окрестность глобального максимума ЛФОП, то есть погрешность оценки расстояния не должна превышать величину четверти длины волны несущего колебания: $-\lambda/4 \leq \hat{R}_p - R_{ист} \leq \lambda/4$, где $R_{ист}$ – истинное расстояние.

На втором этапе для каждого измерения расстояния, рассчитанного на первом этапе, поиск фазы φ_c СРЧ производится на интервале $(\hat{R}_p - \lambda/4, \hat{R}_p + \lambda/4)$ путем варьирования фазы и расстояния опорного сигнала СРЧ. За оценку фазы $\hat{\varphi}_c$ принимается то значение, при котором выполняется следующее условие:

$$\int_{\hat{R}_p - \lambda/4}^{\hat{R}_p} \ln \{A(R, \varphi_c)\} dR = \int_{\hat{R}_p}^{\hat{R}_p + \lambda/4} \ln \{A(R, \varphi_c)\} dR, \quad (7)$$

где $\ln \{A(R, \varphi_c)\}$ – ЛФОП СРЧ.

Оценка $\hat{\varphi}_c$ при поиске положения экстремума ЛФОП в соответствии с формулой (7) является несмещенной для больших частот ($\omega_c T_{мод} \gg 1$). Если обозначить энергию СРЧ на полупериоде модуляции как E , то дисперсия оценки фазы $\hat{\varphi}_c$ определяется как $D_{\hat{\varphi}_c} = (N_0/2E)(12\omega_0^2/\Delta\omega_d)$. Её величина совпадает с нижней границей Рао-Крамера для оценки фазы СРЧ при неизвестной частоте. Несмотря на одинаковую дисперсию оценки фазы при использовании алгоритма (6) и алгоритма на основе уравнения (7), уменьшается влияние на оценку фазы МО, что показано в третьей главе.

В ряде случаев необходимо измерять частоту радиосигнала, представленного короткой выборкой, на фоне белого шума. Подобная задача возникает при измерении малых расстояний ЧМ дальномером, анализе сигналов в акустике, гидроакустике, сейсмоакустике. В данной работе под термином «короткая выборка» понимается реализация сигнала, относительная частота которого $n = \omega T_u/2\pi$ такова, что на интервале времени наблюдения T_u содержатся доли и единицы периода колебания. В этом случае использование алгоритма (2) не представляется возможным, поскольку максимальная СПА находится на нулевой частоте или в ее окрестностях.

Принимаемая реализация $\xi(t)$ представляет собой сумму полезного сигнала $s(t)$ и белого нормального шума $\zeta(t)$ со спектральной плотностью N_0 , то есть

$$\xi(t) = s(t) + \zeta(t) = a \cos(2\pi n t / T_u + \varphi) + \zeta(t), \quad (8)$$

где a , n и φ – амплитуда, относительная частота и начальная фаза полезного сигнала.

Для оценки параметров радиосигнала в виде (8) используется алгоритм, основанный на ЛФОП. Для этого необходимо, варьируя параметры опорного сигнала во всем возможном диапазоне, добиться максимизация ЛФОП. За оценку параметров радиосигнала принимаются те значения опорного сигнала, в которых ЛФОП достигает максимума. Получены соотношения, позволяющие определить дисперсии и коэффициенты корреляции отдельных и совместных оценок амплитуды, частоты и начальной фазы радиосигнала, представленного короткой выборкой. Проведено статистическое моделирование. Показано, что результаты по полученным выражениям полностью совпали с результатами статистического моделирования. В качестве примера на рисунке 2 показан коэффициент корреляции $r_{n\varphi}$ между оценками частоты и фазы при неизвестной ампли-

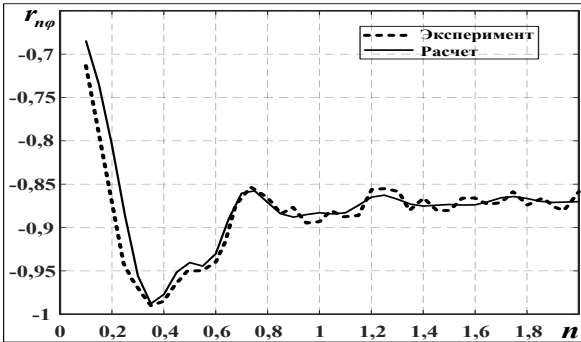


Рисунок 2 – Коэффициент корреляции оценки относительной частоты и начальной фазы

туде. Показано, что в зависимости от числа n графики дисперсии и коэффициента корреляции имеют колебательный характер. При увеличении числа n значения этих функций стремятся к прямой, величина которой совпадает с нижней границей Рао-Крамера. Например, при больших относительных

частотах $n \gg 1$ дисперсии совместных оценок амплитуды, частоты и начальной фазы соответственно равны $D_{\hat{a}} = N_0 / T_u$, $D_{\hat{\omega}} = (N_0 / 2E_0)(12 / T_u^2)$ и $D_{\hat{\varphi}} = 4N_0 / 2E_0$. А коэффициенты корреляции между оценками этих параметров составляют $r_{\hat{a}\hat{n}} = r_{\hat{a}\hat{\varphi}} = 0$ и $r_{\hat{n}\hat{\varphi}} = -\sqrt{3}/2$.

В третьей главе проведено исследование алгоритма оценки фазовой характеристики ЧМ дальногомера при наличии МО, основанного на ЛФОП СРЧ. Разработан следующий алгоритм оценки частоты СРЧ, позволяющий использовать его при отношении сигнал-помеха меньше единицы, предусматривающий

оценку параметров МО при каждом измерении с последующим формированием компенсирующего сигнала. Предложен алгоритм оценки частоты СРЧ, основанный на варьировании начальной фазы сигнала.

Алгоритм оценки ФХ при наличии МО. Ограничиваясь случаем наличия одного МО, для больших относительных частот ($\omega_c T_{\text{мод}} \gg 1$) сигнальная функция СРЧ представляется суммой двух колебаний с одинаковой частотой и, в общем случае с различными начальными фазами и амплитудами. Под воздействием МО экстремумы этой сигнальной функции смещаются. Однако величина такого смещения существенно меньше смещения экстремума огибающей ЛФОП, то есть при измерении частоты СРЧ по положению максимальной СПА СРЧ. Эти особенности ЛФОП СРЧ позволяют уменьшить погрешность оценки фазовой характеристики из-за влияния МО.

Результаты моделирования приведены на рисунке 3. Несущая частота ра

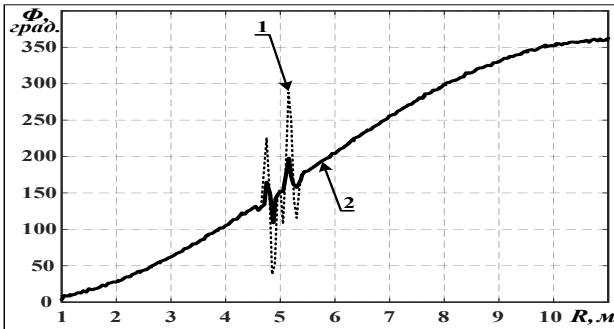


Рисунок 3 – Зависимость оценки фазовой характеристики от расстояния

10 ГГц, диапазон перестройки несущей частоты равен 1 ГГц, отношение сигнал-шум 60 дБ, отношение сигнал-помеха 24 дБ. Графики 1, 2 соответствуют оценке ФХ с помощью алгоритма (6) и алгоритма на основе уравнения (7). Из рисунка 3 видно, что предлагаемый

алгоритм, реализованный на основе ЛФОП, позволяет уменьшить погрешность оценки ФХ, обусловленную воздействием МО, в 2-3 раза.

Алгоритм оценки частоты СРЧ, основанный на комбинации следящего алгоритма и компенсации помехи. В ряде случаев оценку частоты СРЧ приходится производить при отношении сигнал-помеха меньше единицы. В качестве примера можно указать на измерение уровня радиопрозрачной жидкости, расположенного вблизи дна резервуара. В этом случае использование алгоритма (2) приводит к большим погрешностям измерения расстояния до полезной поверхности. Для решения такой задачи предложена комбинация алгоритма, следящего за полезным экстремумом ЛФОП, и компенсации помехи. Процедура выполнения этого алгоритма следующая. На первом этапе, используя ЛФОП, необходимо провести оценку параметров ($\hat{S}_n$, $\hat{\tau}_n$ и $\hat{\phi}_n$) СРЧ, соответствующего отражению от МО. Затем полученные оценки параметров помехи используются для формирования компенсирующего сигнала $s_k(t) = \hat{S}_n \cos(\omega_0 \hat{\tau}_n + 2\Delta\omega_d \hat{\tau}_n t / T_{\text{мод}} + \hat{\phi}_n)$. После компенсации помехи результирующий сигнал $s_p(t)$ можно записать в

виде

$$s_p(t) = y(t) - s_k(t) = S_c \cos(\omega_0 \tau_s + 2\Delta\omega_d \tau_s t / T_{\text{мод}} + \varphi_c) + \\ + S_n \cos(\omega_0 \tau_n + 2\Delta\omega_d \tau_n t / T_{\text{мод}} + \varphi_n) - \hat{S}_n \cos(\omega_0 \hat{\tau}_n + 2\Delta\omega_d \hat{\tau}_n t / T_{\text{мод}} + \hat{\varphi}_n) + \zeta(t). \quad (9)$$

Поскольку компенсация помехи будет происходить неполностью, для оценки частоты СРЧ используется следящий алгоритм, основанный на поиске полезного экстремума ЛФОП.

Необходимо отметить, что оценка параметров СРЧ, соответствующего МО, должна начинаться на таком расстоянии между отражающей поверхностью и МО, которое превышает величину дискретной ошибки. В этом случае наибольшие экстремумы ЛФОП полезного сигнала и помехи будут соответствовать расстояниям до полезного отражателя и МО. При уменьшении расстояния между ними оценка параметров МО и полезного сигнала осуществляется с помощью следящего алгоритма.

На рисунке 4 показана зависимость мгновенных погрешностей измерения расстояния $\Delta R = \hat{R} - R_{\text{ист}}$ от разности Δr расстояния между полезной поверхностью и МО. Отношение сигнал-помеха ОСП = -6 дБ. Остальные условия проведения моделирования соответствуют рисунку 3. Из рисунка 4 следует, что при наличии МО с отношением сигнал-помеха меньше единицы возможно достаточно точное измерение расстояния до отражающей поверхности с помощью комбинации следящего алгоритма и компенсации помехи. Проведено сравнение полученных результатов с результатами, известными из технической литературы.

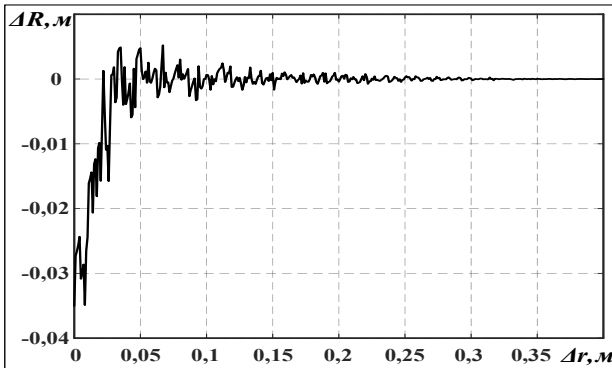


Рисунок 4 – Мгновенная погрешность измерения расстояния

ния моделирования соответствуют рисунку 3. Из рисунка 4 следует, что при наличии МО с отношением сигнал-помеха меньше единицы возможно достаточно точное измерение расстояния до отражающей поверхности с помощью комбинации следящего алгоритма и компенсации помехи. Проведено

Формирование опорного сигнала СРЧ методом максимального правдоподобия. В работе проведено исследование возможности уменьшения влияния МО на точность оценки частоты СРЧ путем включения в состав опорного сигнала помеховой составляющей. Дисперсия оценки частоты в этом случае определяется нижней границей Рао-Крамера. Результаты моделирования показали, что погрешность измерения частоты СРЧ можно уменьшить в 2-3 раза за счет включения в состав опорного сигнала составляющей, учитывающей помеху. При этом различие в амплитудах той части опорного сигнала, которая учитывает помеху, и в амплитуде самой помехи не столь существенно. Ошибки в

определении местоположения МО оказывают большее влияние на точность измерения. Поэтому для включения в состав опорного сигнала помеховой составляющей необходимы априорные сведения о местоположении МО.

Алгоритм оценки частоты СРЧ, основанный на варьировании начальной фазы. Из графика погрешности измерения расстояния (рисунок 1) при использовании алгоритма (2) видно, что график погрешности имеет колебательный характер и периодически переходит через точки с нулевой ошибкой. Эти точки соответствуют минимальной взаимной энергии полезного сигнала и сигнала, отраженного от МО. Уменьшить влияние МО на точность оценки частоты СРЧ можно за счет варьирования несущей частоты при сохранении диапазона перестройки несущей частоты. При этом будут изменяться начальные фазы СРЧ, соответствующих отражениям от полезной поверхности и МО. Вследствие этого будет изменяться энергия СРЧ. Недостатком такого способа являются повышенные требования к передатчику ЧМ дальномера.

В работе для уменьшения влияния МО предложен алгоритм, основанный на варьировании начальной фазы СРЧ без изменения несущей частоты. Процедура реализации этого алгоритма заключается в следующем. СРЧ длиной N отсчетов разбивается на два блока длиной M и $(N - M)$ отсчетов. Вычисляется энергия $E_{срч}$ СРЧ с использованием первого блока длиной M отсчетов. Затем СРЧ сдвигается «вправо» на один отсчет. Первым отсчетом блока длиной M отсчетов будет его второй отсчет, а последним – первый отсчет второго блока длиной $(N - M)$. После вычисления энергии при сдвиге на один отсчет первый блок снова сдвигается еще на один отсчет «вправо». Недостающий отсчет берется из второго блока, и снова вычисляется энергия СРЧ. В результате вычислений получаем

$$E_{срч}(i) = \sum_{k=1+i}^{M+i} [y^2(k)] = \sum_{k=1+i}^{M+i} [s_c^2(k) + s_n^2(k) + 2s_c(k)s_n(k)] = E_c + E_n + 2E_{сн}, i = 0, 1, 2, \dots, N - M, \quad (10)$$

где $s_c(k)$, $s_n(k)$ – соответственно полезный сигнал и сигнал, отраженный от МО; E_c – энергия полезного сигнала; E_n – энергия сигнала, отраженного от МО; $E_{сн}$ – взаимная энергия полезного сигнала и сигнала, отраженного от МО.

Вычисления со сдвигом «вправо» на один отсчет производятся до тех пор, пока не будут определены значения i_1 и i_2 , при которых полная энергия $E_{срч}$ СРЧ принимает максимальное и минимальное значения. Поскольку при сдвиге первого блока меняются начальные фазы полезного сигнала и помехи, то функция $E_{срч}(i)$ имеет колебательный характер. При этом оптимальное значение i_{opt} , при котором взаимная энергия полезного сигнала и сигнала, отраженного от МО, будет минимальна, определяется соотношением $i_{opt} = (i_1 + i_2)/2$. Указанные выше операции должны производиться при каждом измерении, поскольку взаимная энергия СРЧ зависит от расстояния. Необходимо отметить,

что если исходный СРЧ разбивается на два блока, то это эквивалентно уменьшению диапазона перестройки несущей частоты пропорционально уменьшению длительности сигнала.

Отметим, что варьирование начальной фазы без использования весовой функции (ВФ) дает существенный выигрыш по сравнению с результатами, полученными с помощью алгоритма (2). Однако в этом случае могут возникать аномальные ошибки измерения, обусловленные воздействием боковых лепестков спектра СРЧ, отраженного от МО. Устранить эти ошибки можно за счет применения ВФ, коэффициент подавления боковых лепестков у которой достаточно большой. Однако это приводит к увеличению погрешности измерения за счет расширения ширины главного лепестка спектра СРЧ. В работе использована известная ВФ, обеспечивающая подавление боковых лепестков при незначительном расширении ширины главного лепестка. Ее общая формула задана выражением $w(k) = \alpha - (1 - \alpha) \cos(2\pi k/M)$, $k = 0, 1, \dots, M-1$, $0 \leq \alpha \leq 1$. Величина коэффициента α должна выбираться в общем случае каким-то оптимальным способом, например с использованием критерия минимизации среднеквадратичной погрешности, возникающей под воздействием влияния и шума, и МО. Однако строгий выбор оптимального значения α наталкивается на существенные сложности математического характера. Поэтому значение α выбрано эмпирически, на основе результатов моделирования. При многократных проверках величина коэффициента α выбрана равной $\alpha = 0,75$. С помощью моделирования показано, что варьирование начальной фазы с использованием предлагаемой ВФ позволяет уменьшить погрешность измерения больших расстояний примерно в 1,5 раза, а также зона повышенной погрешности, в которой наблюдается влияние МО, уменьшается приблизительно в 2 раза.

Наибольший выигрыш при варьировании начальной фазы достигается при измерении малых расстояний. В этом случае ошибка измерения возникает из-за перекрытия спектральных плотностей СРЧ, вычисленных на положительных и отрицательных частотах. Минимизация взаимной спектральной плотности

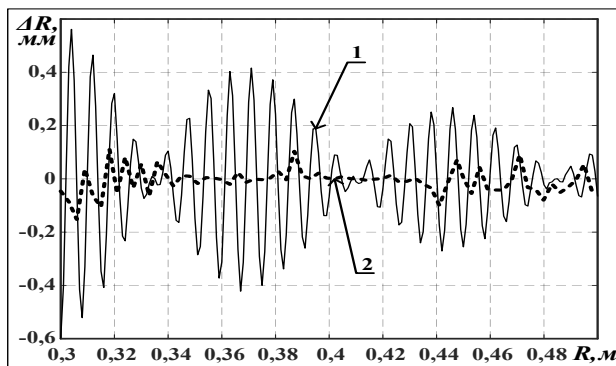


Рисунок 5 – Мгновенные погрешности измерения малых расстояний

также может быть достигнута путем варьирования начальной фазы СРЧ. При выполнении этого условия происходит уменьшение погрешности измерения ΔR малых расстояний. Результат моделирования показан на рисунке 5. На этом рисунке под R обозначено

расстояние от ЧМ дальномера. График 1 получен при использовании алгоритма (2). График 2 – при варьировании начальной фазы. Из анализа рисунка 5 следует, что варьирование начальной фазы позволяет уменьшить погрешность измерения малых расстояний в 2-5 раза.

В четвертой главе представлены результаты обработки экспериментальных данных, полученных с помощью дальномеров БАРС 351, 352, выпускаемых в городе Рязани на ООО предприятие «КОНТАКТ-1». Измерения проведены на сертифицированном измерительном стенде. Диапазон перестройки несущей частоты равен 500 МГц. Несущая частота равна 10 ГГц.

Экспериментальное тестирование алгоритма оценки ФХ. Радиолокационный отражатель перемещался на специальной тележке вдоль измерительной ленты на расстояние от дальномера от 0,85 м до 8,3 м с шагом 0,05 м. Из-за конструктивных особенностей элементов измерительного стенда, отражений от стен и потолка стендового зала возникают различные переотражения – множественные МО малой интенсивности (отношение сигнал-помеха больше 40 дБ). Избавиться от таких МО на практике чрезвычайно сложно. Результат эксперимента приведен на рисунке 6. График 1 получен с помощью алгоритма (6), а график 2 в соответствии с (7). Из рисунка 6 видно, что погрешность оценки ФХ при

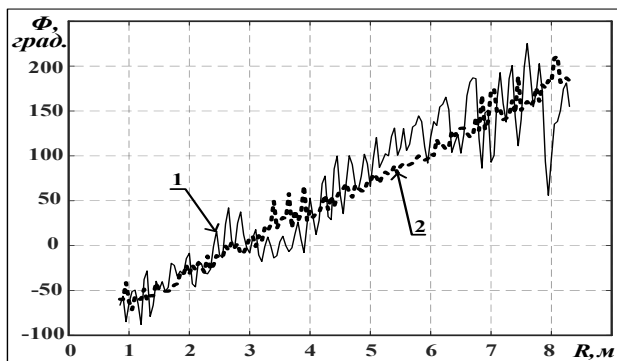


Рисунок 6 – Графики оценки фазовой характеристики дальномера

использовании предлагаемого алгоритма уменьшается в 2-3 раза. Погрешность оценки ФХ обусловлена двумя причинами. Это влияние МО малой интенсивности и неточность установки РЛО вдоль измерительной ленты (ее цена деления 1 мм). В работе показано, что погрешность

измерения расстояния с помощью алгоритма на основе ЛФОР при подстановке полученной ФХ в опорный сигнал существенно уменьшается по сравнению с результатами, полученными при использовании алгоритма (2).

Экспериментальное тестирование алгоритма, основанного на комбинации следающего алгоритма и компенсации помехи. Полезный отражатель перемещался с шагом 2 мм. Замедление скорости распространения электромагнитных волн в среде распространения имитировалось одновременным передвижением МО в противоположном от полезного отражателя направлении с шагом 1 мм. Отношение сигнал-помеха равно –8 дБ. Результаты эксперимента показаны на рисунке 7. График 1 получен при оценке расстояния с использованием следающего алгоритма без компенсации. График 2 получен при тех же условиях,

но с компенсацией помехи. Из рисунка 7 видно, что при компенсации помехи с использованием следящего алгоритма погрешность измерения существенно уменьшается. Срыв слежения наступает на существенно меньших расстояниях

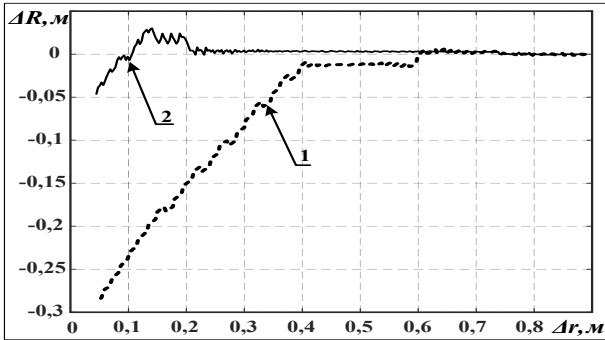


Рисунок 7 – Погрешности измерения расстояния при отношении сигнал-помеха меньше единицы

ритм, основанный на использовании ЛФОП в комбинации с компенсацией помехи позволяет уменьшить зону повышенной погрешности в 2-3 раза, а погрешность измерения расстояния снижается в 3-4 раза. Однако необходимо указать на ограничение при использовании предлагаемого алгоритма – величина перемещения отражающей поверхности при двух последовательных измерениях не должна превышать величину четверти длины волны несущего колебания.

Экспериментальное тестирование алгоритма, основанного на варьировании начальной фазы. Полезный отражатель перемещался с расстояния 0,45 м от дальномера до 0,75 м с шагом 3 мм. МО здесь является спектральная плотность СРЧ, вычисленная на отрицательных частотах, – своеобразная помеха, от которой невозможно избавиться. Результат эксперимента приведен на

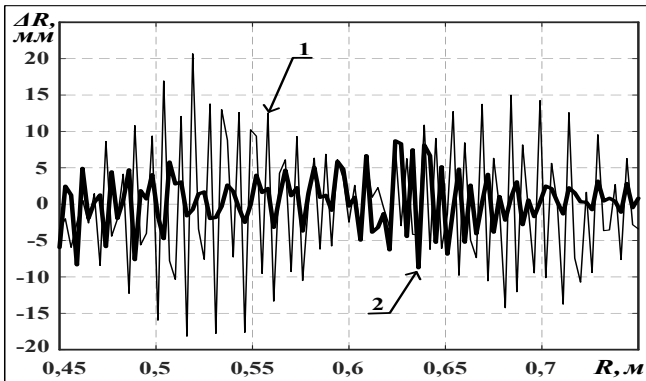


Рисунок 8 – Погрешности измерения малых расстояний

между МО и полезным отражателем. Проведено сравнение полученных результатов с результатами измерения расстояния при наличии МО с использованием методов параметрического спектрального анализа. Проведенное сравнение позволяет утверждать, что алго-

рисунок 8. График 1 получен с помощью алгоритма (2). График 2 получен при той начальной фазе, при которой взаимная энергия спектральных плотностей на положительных и отрицательных частотах минимальна. Из

рисунка 8 следует, что погрешность измерения малых расстояний уменьшается примерно в 2-3 раза. Затраты на реализацию алгоритма с поиском минимума взаимной энергии сигнала и МО минимальны, поскольку все необходимые операции выполняются программно.

В заключении изложены основные результаты диссертационной работы.

1. Предложена процедура оценки фазовой характеристики ЧМ дальномера, использующая ЛФОП СРЧ. Поскольку для определения фазовой характеристики необходимо оценивать разностную частоту (или расстояние), то используя ЛФОП СРЧ, благодаря его узким экстремумам эти параметры измеряются существенно более точно, чем по положению максимальной спектральной составляющей. В результате погрешность оценки фазовой характеристики под воздействием МО уменьшается в 2-3 раза.

2. Определены границы Рао-Крамера для совместных и отдельных оценок частоты, фазы и амплитуды гармонического сигнала, принимаемого на фоне белого нормального шума, по его короткой выборке. Под короткой выборкой понимается радиосигнал, содержащий доли и единицы периода. Получены выражения для коэффициентов корреляции между разнородными параметрами радиосигнала. Показано, что при увеличении числа периодов радиосигнала на интервале наблюдения полученные выражения сходятся к известным из технической литературы соотношениям. Установлена связь между оценками параметров СРЧ и значениями несущей частоты, диапазоном перестройки и временем модуляции при измерении малых расстояний.

3. Предложена процедура, позволяющая оценивать частоту СРЧ при наличии МО при отношении сигнал-помеха меньше единицы. Предлагаемая процедура использует комбинацию следящих алгоритмов и компенсатора помехи. Использование алгоритма, осуществляющего слежение за МО, позволяет получить максимально правдоподобные оценки его параметров – амплитуды, частоты, фазы и затем сформировать компенсирующий сигнал. Основное требование к компенсирующему сигналу – обеспечить отношение сигнал-помеха не менее 2 дБ. При таком отношении сигнал-помеха исключается срыв слежения за полезным сигналом. Моделирование показало, что по сравнению с использованием следящего алгоритма без компенсации помехи срыв слежения наступает на существенно меньших расстояниях между МО и полезным отражателем.

4. Предложен алгоритм оценки частоты, основанный на варьировании начальной фазы СРЧ и заключающийся в подборе такой начальной фазы, при которой взаимная энергия полезного сигнала и МО минимальна. Варьирование начальной фазы обеспечивается разбиением СРЧ на два блока и сдвигом «левого» блока вправо на 1,2,3, ... отсчета с добавлением выпадающих отсчетов из второго блока. С помощью численного моделирования показано, что погрешность, обусловленная МО, уменьшается примерно в 1,5 раза. Наибольший выигрыш обеспечивается при измерении малых частот, соответствующих расстояниям в доли метра. Помехой здесь является спектральная плотность сигнала, вычисленная на отрицательных частотах. Показано, что погрешность измерения в этом случае уменьшается примерно в 2-5 раза при такой начальной фазе, при которой взаимная энергия обеих частей спектральной плотности минимальна.

5. Проведена проверка разработанных алгоритмов на сигналах, полученных с помощью серийно выпускаемых в Рязани на ООО предприятие «КОНТАКТ-1» образцов ЧМ дальномеров серии БАРС 351, 352. Представленные ООО предприятие «КОНТАКТ-1» сигналы получены на сертифицированном измерительном стенде. Их обработка показала следующее:

- алгоритм оценки фазовой характеристики дальномера, основанный на ЛФОП СРЧ, позволяет уменьшить в 2-3 раза погрешность измерения из-за влияния МО;
- алгоритм оценки частоты СРЧ, основанный на комбинации следящего алгоритма и компенсации помехи, позволяет уменьшить и зону повышенной погрешности в 2-3 раза и погрешность в 3-4 раза по сравнению с результатами, определяемыми с помощью методов параметрического спектрального анализа, в том числе метода Прони, метода EV;
- алгоритм оценки частоты СРЧ, основанный на варьировании начальной фазы, позволяет повысить точность измерения малых расстояний в 2-3 раза.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК

1. Паршин, В. С. Алгоритмы оценки фазовой характеристики дальномера с частотной модуляцией зондирующего сигнала / В. С. Паршин, **В. Д. Нгуен** // Цифровая обработка сигналов. 2023. № 2. С. 22-26.
2. Паршин, В. С. Формирование опорного сигнала при измерении расстояния ЧМ дальномером методом максимального правдоподобия / В. С. Паршин, **В. Д. Нгуен** // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 90. С. 14-21.
3. Паршин, В. С. Оценка частоты и фазы гармонического сигнала, принимаемого на фоне белого шума, по его короткой выборке / В. С. Паршин, **В. Д. Нгуен** // Цифровая обработка сигналов. 2024. № 4. С. 16-20.

Публикации в других изданиях

4. Паршин, В. С. Влияние паразитной амплитудной модуляции на измерение малых расстояний ЧМ дальномером / В. С. Паршин, **В. Д. Нгуен** // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2022: сборник трудов V Международного научно-технического форума: в 10 т. Рязань: РГРТУ, 2022. Т. 1. С. 27-31.
5. Паршин, В. С. Влияние паразитной амплитудной модуляции на погрешность измерения расстояния ЧМ дальномером при варьировании его несущей частоты / В. С. Паршин, **В. Д. Нгуен** // Сборник трудов XXIV Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение DSPA-2022». Москва, 2022. С. 188-191.
6. **Нгуен, В. Д.** Влияние амплитуды мешающих отражений на точность оценки расстояния ЧМ дальномером // Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании: материалы XXVII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязань: РГРТУ, 2022. Т. 1. С. 164-166.
7. Паршин, В. С. Влияние скорости распространения радиоволн на точность оценки расстояния методом максимального правдоподобия / В. С. Паршин, **В. Д. Нгуен** // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2023: сборник

трудов VI Международного научно-технического форума: в 10 т. Рязань: РГРТУ, 2023. Т. 1. С. 88-92.

8. Паршин, В. С. Влияние помех на оценку расстояния ЧМ дальномером при варьировании его несущей частоты / В. С. Паршин, **В. Д. Нгуен** // Сборник трудов XXV Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение DSPA-2023». Москва, 2023. С. 132-137.

9. **Нгуен, В. Д.** Выбор весовой функции при измерении расстояния с варьированием несущей частоты передатчика ЧМ дальномером // Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании: материалы XXVIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязань: РГРТУ, 2023. С. 151-152.

10. Паршин, В. С. Измерение расстояния ЧМ дальномером при наличии мешающих отражений малой интенсивности / В. С. Паршин, **В. Д. Нгуен** // Материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства». Рязань: РГРТУ, 2023. С. 3-9.

11. Паршин, В. С. Оценка амплитуды сигнала разностной частоты ЧМ дальномером методом максимального правдоподобия / В. С. Паршин, **В. Д. Нгуен** // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2024: сборник трудов VII Международного научно-технического форума: в 10 т. Рязань: РГРТУ, 2024. Т. 1. С. 90-97.

12. Паршин, В. С. Оценка расстояния до отражающей поверхности при отношении сигнал/помеха, меньшем единицы / В. С. Паршин, **В. Д. Нгуен** // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2024: сборник трудов VII Международного научно-технического форума: в 10 т. Рязань: РГРТУ, 2024. Т. 1. С. 97-103.

13. Паршин, В. С. Измерение расстояния до отражающей поверхности ЧМ дальномером при отношении сигнал/помеха меньше единицы / В. С. Паршин, **В. Д. Нгуен** // Сборник трудов XXVI Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение DSPA-2024». Москва, 2024. С. 113-118.

14. Паршин, В. С. Коэффициенты корреляции между оценками параметров гармонического сигнала, принимаемого на фоне белого шума, по его короткой выборке / В. С. Паршин, **В. Д. Нгуен** // Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем: Сборник научных статей по материалам VIII Международной научно-практической конференции. Москва, 2024. С. 459-462.

15. Паршин, В. С. Коэффициент корреляции оценок относительной частоты и фазы гармонических сигналов, представленных короткой выборкой / В. С. Паршин, **В. Д. Нгуен** // Материалы IX Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства». Рязань: РГРТУ, 2024. С. 19-25.

16. **Нгуен, В. Д.** Снижение погрешности измерения расстояния ЧМ дальномером при варьировании начальной фазы сигнала разностной частоты // Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании: материалы XXIX Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязань: РГРТУ, 2024. С. 149-150.

НГУЕН Ван Дык

**АЛГОРИТМЫ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛА
РАЗНОСТНОЙ ЧАСТОТЫ ЧМ ДАЛЬНОМЕРА ПРИ НАЛИЧИИ ПОМЕХ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать ____ . ____ . 2025. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ _____

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.