

Баранов Илья Владимирович



**АЛГОРИТМЫ АДАПТИВНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА
НА ОСНОВЕ ВЕСОВОГО УСРЕДНЕНИЯ РАЗНОСТНОЙ ЧАСТОТЫ
В ЧАСТОТНОМ ДАЛЬНОМЕРЕ БЛИЖНЕГО ДЕЙСТВИЯ**

Специальности:

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

05.12.14 «Радиолокация и радионавигация»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2011

Работа выполнена на кафедре радиоуправления и связи ГОУ ВПО
«Рязанский государственный радиотехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук,
доцент
Езерский Виктор Витольдович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор
Кошелев Виталий Иванович

кандидат технических наук,
ведущий инженер-программист
Африканов Святослав Александрович

Ведущая организация: ОАО «Корпорация Фазотрон — НИИР — НИИ
Рассвет»

Защита состоится « 20 » мая 2011 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета
Д212.211.04 в Рязанском государственном радиотехническом университете по адресу:
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РГРТУ

Отзыв в двух экземплярах, заверенный печатью, просим направлять на имя ученого се-
кретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «08» апреля 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент



А. Г. Борисов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В самых различных отраслях промышленности в технологических и коммерческих целях требуется производить оперативное дистанционное бесконтактное измерение уровня заполнения различных резервуаров сыпучими, пастообразными или жидкими веществами. При этом речь идёт об измерении малых и сверхмалых расстояний (от 0,5 до 50 м). В ряде случаев внутри резервуара имеются различные технологические конструкции, затрудняющие проведение измерений. Последние три десятилетия для этих целей широко используются радиоволновые уровнемеры, построенные на основе СВЧ дальномера с частотно-модулированным (ЧМ) сигналом.

Теоретические основы построения частотного дальномера (ЧД) разрабатывались с момента его появления в 20-х годах прошлого столетия и до конца 60-х годов. В этот период рассматривалось в основном применение ЧМ радиолокаторов в военных целях. В конце 60-х — начале 70-х годов четко обозначилась новая область применения ЧД для измерения малых и сверхмалых расстояний в промышленности (измерение уровня заполнения технологических резервуаров). При этом важным являлось получение высокой точности измерения, намного меньше величины ошибки дискретности (ОД), присущей ЧМ дальномерам, и ослабление влияния различных дестабилизирующих факторов. Появилось множество работ, решающих эти частные задачи различными методами. Это работы, связанные с обработкой сигнала в спектральной области, с весовым усреднением разностной частоты (ВУРЧ), с использованием дополнительной фазовой модуляции ЧМ сигнала, эталонного канала на основе линии задержки, с применением измерения нелинейности модуляционной характеристики (МХ) передатчика и её компенсацию на основе режима ступенчатой частотной модуляции, посвящённые цифровому синтезу частоты передатчика, учитывающие особенности влияния мешающих отражений.

В последние годы появились обобщающие работы, в которых производится систематизация накопленных научных и практических результатов.

Среди отечественных ученых и практических специалистов, внесших существенный вклад в развитие теории и практическое применение ЧМ дальномеров, можно выделить Веницкого А. С., Кагаленко Б. В., Атаянца Б. А., Мещерякова В. П., Гизатулина Р. А., Дзилиева А. П., Хасянова А. Ф., Либермана С. А., Комарова И. В., Смольского С. М., Давыдочкина В. М., Езерского В. В.

Среди зарубежных авторов широко известны работы Brumbi D., Edvardson K. O., Bialkovski M. E., Stolle R.

Множество практических задач с широкими требованиями по точности измерения расстояния и экономичности используемых приборов привело к ситуации, когда приходится совмещать различные варианты применяемых методов обработки сигнала со сложностью их конструктивно технологической реализации. Существуют две крайние позиции: необходимы прецизионные приборы с очень высокой стоимостью и приборы низкой точности и малой стоимости. Во многих случаях желательно совместить достаточно высокую точность измерения с умеренной стоимостью. В этом смысле целесообразно использовать метод ВУРЧ, предложенный в шведском патенте, технически развитый в ряде зарубежных работ и проанализированный в работах Езерского В. В.

Несмотря на большое количество работ по тематике метода ВУРЧ, ряд теоретических вопросов, определяющих эффективность практического применения, остался недостаточно исследованным. В частности, это расширение класса используемых весовых функций (ВФ), влияние помех на характеристики этого метода, развитие методов минимизации погрешности измерения в идеальных условиях и при нелинейности модуляционной характеристики (МХ) СВЧ генератора.

Цель и задачи диссертации

Целью работы является исследование, разработка и проверка новых алгоритмов обработки сигнала разностной частоты (СРЧ) на основе метода ВУРЧ с использованием принципов адаптации в интересах дальнейшего уменьшения погрешности измерения малых расстояний.

Достижение поставленной цели требует решить следующие основные задачи для метода весового усреднения разностной частоты:

- провести анализ погрешности измерения расстояния при различных видах ВФ;
- разработать методику оценки влияния помех на алгоритмы обработки сигнала;
- разработать алгоритмы минимизации погрешности измерения расстояния;
- разработать алгоритмы учёта и компенсации нелинейности модуляционной характеристики передатчика;
- оценить возможности практической реализации разработанных методик и алгоритмов.

Методы исследования

При проведении исследований использовались методы функционального анализа и оптимизации, математический аппарат аналитических функций, математический аппарат теории случайных процессов, методы математического и численного моделирования.

Основные технические решения, которые положены в основу разрабатываемых устройств, исследовались методом имитационного и натурального моделирования с использованием макетных, опытных и серийных образцов частотных радиодальномеров.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Методика оценки дополнительной составляющей погрешности измерения расстояния, вызванной влиянием помех, порождённых мешающими отражателями, и коррелированных шумов, позволяющая доказать, что с помощью метода ВУРЧ возможно достижение погрешности измерения малых расстояний 1 мм и менее при отношении сигнал-шум или сигнал-помеха более 45 дБ.

2. Алгоритмы оптимизации параметров формы весовых функций (ВФ) по критерию минимума усреднённой погрешности измерения и оптимизации параметров ЧМ по критерию минимума мгновенной погрешности измерения при методе ВУРЧ, основанные на полученных выражениях для методической погрешности измерения расстояния, обеспечивающие выигрыш по погрешности измерения расстояния от 2-3 до нескольких десятков раз в зависимости от величины этого расстояния, вида ВФ и используемого параметра оптимизации.

3. Алгоритмы корректировки расчетной формулы для расстояния при нелинейности МХ, компенсации нелинейности путем введения корректирующей добавки в модулирующий сигнал и учета нелинейности при расчете расстояния, позволяющие уменьшить погрешность измерения от единиц до десятков раз при практически встречающихся видах нелинейности.

Научная новизна полученных результатов

В рамках данной диссертационной работы получены следующие новые научные результаты.

1. Получены выражения для методической погрешности измерения расстояния при использовании ВФ Кайзера-Байселя (КБ), обеспечивающие возможность уменьшения размерности пространства оптимизируемых параметров при минимизации погрешности.

2. Впервые исследовано влияние коррелированных шумов на погрешность измерения метода ВУРЧ при различных видах частотных характеристик устройства предварительной обработки и получены выражения, связывающие характеристики шума, параметры частотной характеристики и параметры ВФ с дисперсией результата измерения.

3. Исследовано влияние сигнала, порождённого мешающим отражателем, на погрешность измерения метода ВУРЧ и получены аналитические выражения, связывающие параметры ВФ, отношение сигнал-помеха, взаимное расположение мешающего и полезного отражателей.

4. Предложены реализуемые алгоритмы оптимизации формы ВФ и параметров ЧМ, позволяющие минимизировать погрешность измерения расстояния при методе ВУРЧ.

5. Предложена математическая модель МХ и методика определения её параметров по результатам экспериментального измерения статической МХ.

6. Предложены метод коррекции результатов расчета расстояния при нелинейности МХ на основе динамического расчёта параметров модели МХ по рабочему СРЧ, методика оперативной компенсации нелинейности МХ путем введения в модулирующее напряжение корректирующей добавки, вычисляемой по степени неравномерности периодов рабочего СРЧ, и алгоритмы учета нелинейности МХ при измерении расстояния.

Достоверность и обоснованность результатов обуславливаются 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 собственных экспериментальных исследований.

Практическая значимость и внедрение результатов работы

Получены аналитические зависимости погрешности измерения расстояния для различных ВФ, позволяющие производить обоснованный выбор ВФ для конкретного практического применения.

Даны рекомендации по уровню помех и шумов, требуемому для достижения значимых для практики уровней погрешности измерения.

Предложены практически реализуемые итерационные процедуры оптимизации параметров ВФ и параметров ЧМ, позволяющие минимизировать погрешность измерения расстояния.

Предложены и исследованы алгоритмы компенсации и учета нелинейности МХ, позволяющие добиться приемлемых уровней погрешностей измерения с использованием реальных, промышленно выпускаемых СВЧ модулей.

Полученные результаты позволяют проводить инженерное проектирование конкретных образцов частотных дальномеров с ВУРЧ для систем ближней радиолокации.

Реализация научных результатов и практических рекомендаций позволяет увеличить точность измерения расстояния, уменьшить влияние различных возмущающих факторов и повысить стабильность работы частотных радиодальномеров.

Результаты, полученные автором, внедрены:

- на ООО предприятии «КОНТАКТ-1» в серийно выпускаемых уровнемерах БАРС322МИ и БАРС332МИ;

- на кафедре радиоуправления и связи РГРТУ в виде лабораторной работы «Исследование алгоритмов цифровой обработки сигналов частотного дальномера».

На приборы разработаны ТУ и комплекты конструкторской документации, получены сертификаты соответствия в НАНИО "Центр по сертификации взрывозащищённого и рудничного оборудования" и разрешения на применение на поднадзорных Госгортехнадзору России производствах и объектах. Приборы востребованы промышленностью и награждены рядом дипломов международных промышленных выставок.

Апробация работы

Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались:

• на III, V, VI и X Международной НТК «Цифровая обработка сигналов и её примене-

ние» (Москва, 2000, 2003, 2005 и 2008);

- Международной конференции «Датчики и системы» (Санкт-Петербург, 2002);
- 12-й Международной конференции «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2002);
- Международной НТК «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления» (Москва, 2003);
- V и VII международной НТК «Физика и технические приложения волновых процессов» (Самара, 2006, 2008);
- Всероссийской научной конференции «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике» (Муром, 2003);
- XXVI Всероссийском симпозиуме «Радиолокационное исследование природных сред» (Санкт-Петербург, 2009).

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 26 работах, среди которых 8 статей в научных журналах, входящих в перечень ВАК, две статьи в зарубежном журнале, 13 докладов на научных конференциях и 2 патента на изобретения.

Структура и объём работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, библиографии из 97 наименований и 5 приложений. Содержание работы изложено на 120 страницах основного текста, дополненных 90 иллюстрациями на 54 страницах, 10 страницами библиографии и 14 страницами приложений.

КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, поставлены цель и задачи исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе приведен анализ методической погрешности метода ВУРЧ. На основе обзора публикаций коротко рассмотрены основы работы ЧМ дальномера во временной области и изложен метод ВУРЧ, в соответствии с которым измеряемое расстояние R вычисляется по формуле:

$$R = \delta_R \hat{S} / K_{MB}, \quad (1)$$

где $\delta_R = c / (4 \Delta F)$ - ошибка дискретности (ОД); ΔF - диапазон перестройки частоты при ЧМ; c - скорость распространения электромагнитных волн; $K_{MB} = \frac{1}{2 \Delta F} \int_0^{T_a} \alpha(t) \cdot f'(t) dt$ - постоянный коэффициент, зависящий от формы весовой функции $\alpha(t)$ и функции $f(t)$ частотной модуляции; T_a - время анализа СРЧ; \hat{S} - оценка частоты СРЧ.

При практической реализации метода ВУРЧ оценка частоты СРЧ выполняется по выражению:

$$\hat{S} = \sum_{i=1}^N \alpha(t_i), \quad (2)$$

где t_i - i -й момент перехода СРЧ через ноль (ноль СРЧ), N - число нулей СРЧ на половине периода модуляции.

С учетом этих соотношений в литературе для ВФ общего вида:

$$\alpha(t) = K_B \sum_{m=0}^K A_m \cos\left(\frac{4\pi m t}{T_M}\right), \quad (3)$$

где $A_m = \frac{2}{T_M} \int_0^{T_M/2} \alpha(t) \cos\left(\frac{4\pi m t}{T_M}\right) dt$, $m=0, 1, 2, \dots, K$; K - число гармонических слагаемых;

$K_B=1/A_0$ - нормирующий коэффициент; T_M - период модуляции, получено выражение для нормированной методической погрешности измерения расстояния и конкретизировано для частного случая ВФ:

$$\alpha_0(t) = K_B \left[1 - \cos\left(\frac{4\pi t}{T_M}\right) \right]^n, \quad (4)$$

где K_B - нормирующий коэффициент; $n=1, 2, \dots$.

В работе аналогичные расчёты проведены для ВФ КБ:

$$\alpha_1(t) = \frac{I_0 \left[\pi a \sqrt{1 - \left(\frac{2t}{T_M}\right)^2} \right]}{I_0[\pi a]}, \quad t \in [-T_M/4, T_M/4], \quad (5)$$

где $I_0[*]$ - модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка; a - параметр, задающий форму ВФ КБ.

Получено выражение для нормированной методической погрешности измерения расстояния:

$$\Delta_S = -M - \chi + 2\pi a e^{-\pi a} \begin{cases} \sum_{i=1}^M I_0[\pi a \sqrt{1 - (i-1+\varepsilon)^2 \eta^2}] & \text{при } \varepsilon \geq \chi, \\ \sum_{i=1}^{M+1} I_0[\pi a \sqrt{1 - (i-1+\varepsilon)^2 \eta^2}] & \text{при } \varepsilon < \chi, \end{cases} \quad (6)$$

где $\Delta_S = \Delta_R / \delta_R$, Δ_R - абсолютная погрешность измерения расстояния; $\varepsilon = \rho - \text{Int}(\rho)$; $\rho = [4 f_0 R / c - 0,5]$; $1/\eta = R / \delta_R = M + \chi$; $M = \text{Int}(R / \delta_R)$ и $\chi = R / \delta_R - M$.

Общий вид графиков зависимости нормированной погрешности измерения от относительного расстояния для разных ВФ имеет примерно одинаковый характер и представлен на рисунке 1.

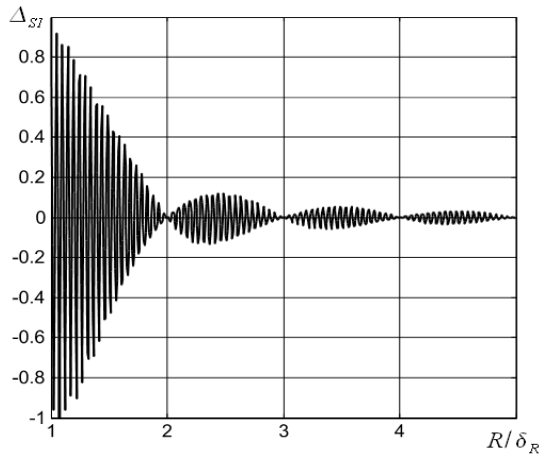


Рисунок 1 - Зависимость мгновенной погрешности от расстояния для ВФ (4) при $n=1$

Погрешность является быстро колеблющейся периодической затухающей функцией расстояния с медленной огибающей, имеющей четко выраженные узловые точки, в которых погрешность равна нулю.

Для сравнения ВФ при разных условиях работы использовано усреднение погрешности по расстоянию на интервале, равном величине одной ОД, т. е. в пределах

$$M \delta_r < r < (M+1) \delta_r. \quad (7)$$

Рассматривается среднеквадратичное отклонение ошибки (СКО) в пределах каждого интервала:

$$\sigma_\Delta = \sqrt{\Delta_S^2(M)} = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{k=1}^L \Delta_S^2(r_{M,k})}, \quad (8)$$

где $L = \frac{\delta_r}{\Delta}$; Δ - шаг по расстоянию в пределах одного

интервала; $r_{M,k}$ - k -й отсчет расстояния в пределах данного M -го интервала.

Расчеты, проведенные с использованием формулы (8), для нескольких значений параметров формы ВФ приведены на рисунке 2 для ВФ КБ (5).

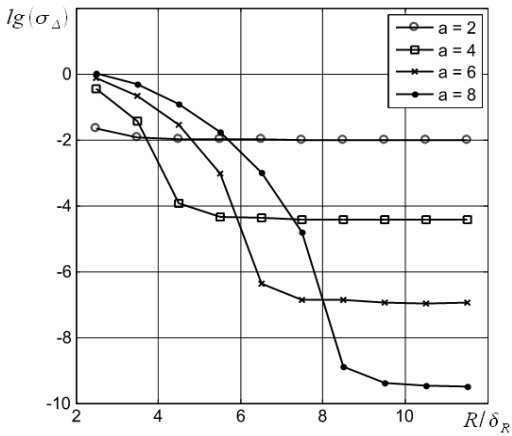


Рисунок 2 - Зависимость логарифма СКО от расстояния для ВФ (5)

сти для данного расстояния, т. е. делать оптимизацию формы ВФ.

Во второй главе рассмотрено влияние помех на метод ВУРЧ. В данной работе помехами считаются шумы и сигналы, вызванные мешающими отражателями, расположенными в рабочей зоне дальномера.

Разработана методика учёта влияния помехи и на её основе для аддитивного белого шума, возникающего в первых каскадах дальномера, получено выражение для дисперсии нормированной шумовой составляющей погрешности измерения расстояния:

$$D_{Su} = E[\Delta_{Su}^2] = \frac{T_{mod}^2 \eta^2}{(2\pi U_m)^2} \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha'(t_i) \alpha'(t_j) B(t_i - t_j) \right\}, \quad (9)$$

где $E[\dots]$ - операция математического усреднения; U_m - амплитуда СРЧ; σ_{su}^2 - дисперсия шума на выходе узкополосного устройства предварительной обработки СРЧ; t_i и t_j - неискаженное положение нулей СРЧ (момент времени, в который СРЧ пересекает нулевой уровень); $B(t_i - t_j)$ - отсчёты ковариационной функции шума в нулях СРЧ.

Эта формула конкретизирована для трех видов частотной характеристики устройства предварительной обработки СРЧ и рассмотренных ВФ.

Расчеты по этим формулам показывают, что зависимости мгновенного значения дисперсии шумовой составляющей от нормированного расстояния для разных ВФ и разных видов частотной характеристики имеют одинаковый характер. Пример зависимости СКО σ_{Su} от относительного расстояния приведен на рисунке 3 для ВФ (4) при $n=1$ и частотной характеристике, соответствующей многокаскадному усилителю.

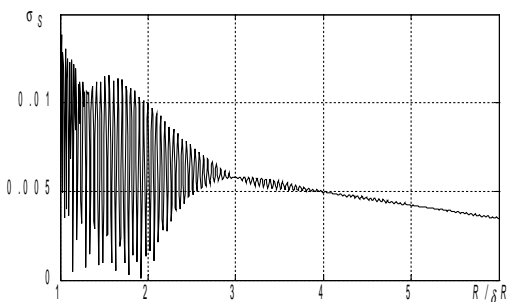


Рисунок 3 - Зависимость СКО шумовой погрешности от расстояния для многокаскадного усилителя при $q=40$ дБ и $n=1$

Для всех исследованных ВФ погрешность уменьшается с увеличением расстояния и на всех графиках выделяются два участка соответственно со сравнительно высоким уровнем погрешности и резким её изменением и малым уровнем погрешности и слабым изменением при изменении расстояния.

С усложнением формы ВФ (увеличение параметра формы a или количества параметров n) погрешность на первом участке возрастает, а на втором участке снижается. Очевидно, что при изменении расстояния можно находить такое значение параметра формы n или a , при котором достигается минимум усредненной погрешности

для данного расстояния, т. е. делать оптимизацию формы ВФ. **Во второй главе** рассмотрено влияние помех на метод ВУРЧ. В данной работе помехами считаются шумы и сигналы, вызванные мешающими отражателями, расположенными в рабочей зоне дальномера. Разработана методика учёта влияния помехи и на её основе для аддитивного белого шума, возникающего в первых каскадах дальномера, получено выражение для дисперсии нормированной шумовой составляющей погрешности измерения расстояния:

$$D_{Su} = E[\Delta_{Su}^2] = \frac{T_{mod}^2 \eta^2}{(2\pi U_m)^2} \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha'(t_i) \alpha'(t_j) B(t_i - t_j) \right\}, \quad (9)$$

где $E[\dots]$ - операция математического усреднения; U_m - амплитуда СРЧ; σ_{su}^2 - дисперсия шума на выходе узкополосного устройства предварительной обработки СРЧ; t_i и t_j - неискаженное положение нулей СРЧ (момент времени, в который СРЧ пересекает нулевой уровень); $B(t_i - t_j)$ - отсчёты ковариационной функции шума в нулях СРЧ. Эта формула конкретизирована для трех видов частотной характеристики устройства предварительной обработки СРЧ и рассмотренных ВФ. Расчеты по этим формулам показывают, что зависимости мгновенного значения дисперсии шумовой составляющей от нормированного расстояния для разных ВФ и разных видов частотной характеристики имеют одинаковый характер. Пример зависимости СКО σ_{Su} от относительного расстояния приведен на рисунке 3 для ВФ (4) при $n=1$ и частотной характеристике, соответствующей многокаскадному усилителю.

В работе проведён сравнительный анализ погрешности для разных сочетаний форм ВФ и форм частотных характеристик на основе зависимости СКО, полученного по формуле (8), от нормированного расстояния.

Например, на рисунке 4 представлена зависимость логарифма СКО шумовой составляющей погрешности измерения, усредненной в соответствии с (8), от нормированного расстояния для многокаскадного усилителя.

Увеличение n , то есть усложнение формы весовой функции, приводит к увеличению шумовой составляющей погрешности, вызванной некоррелированным шумом. Использование фильтрации дает ожидаемый результат в виде уменьшения шумовой составляющей погрешности. Это уменьшение тем больше,

чем больше измеряемое расстояние, за счёт увеличения числа накапливаемых значений. Наиболее сильное влияние шум оказывает на более сложные ВФ, для которых фильтрация обеспечивает меньший выигрыш.

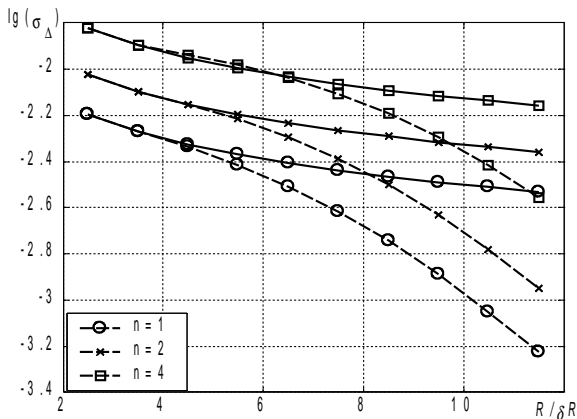


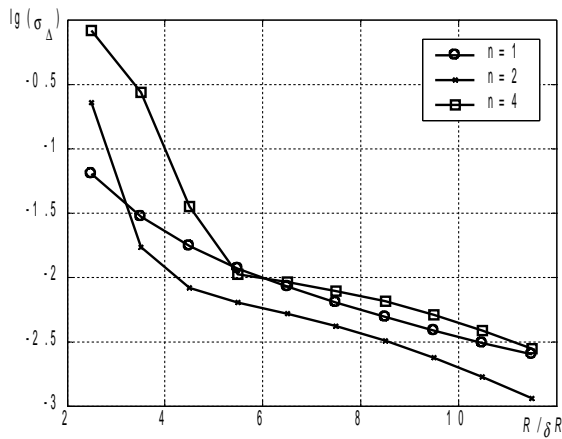
Рисунок 4 - Зависимость логарифма усреднённого СКО шумовой погрешности измерения от расстояния: пунктир — многокаскадный усилитель; сплошная — некоррелированный шум

Более эффективная фильтрация на малых расстояниях наблюдается у одиночного колебательного контура. Худший результат при этих же условиях у идеального фильтра. С увеличением измеряемого расстояния картина меняется на противоположную. Сильнее этот эффект заметен при более сложных ВФ (больших n). На больших расстояниях наилучшую фильтрацию выполняет идеальный фильтр.

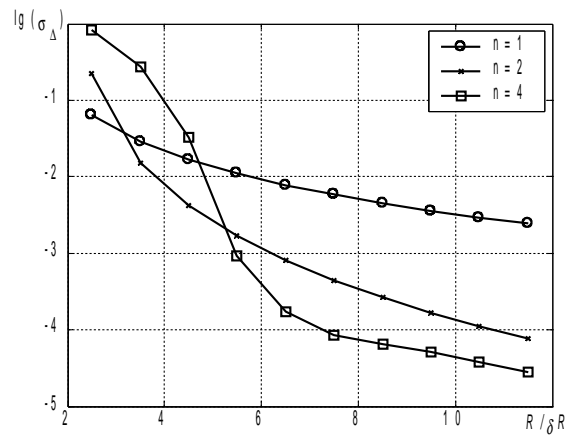
Представляет интерес суммарная ошибка $\Delta(M)$, определяемая как

$$\Delta^2(M) = \Delta_S^2(M) + D_{Su}(M). \quad (10)$$

На рисунке 5 представлены зависимости нормированного СКО усреднённой суммарной погрешности от относительного расстояния для многокаскадного усилителя при отношениях сигнал-шум 40 дБ и 80 дБ.



а



б

Рисунок 5 - Зависимость нормированного СКО суммарной усреднённой погрешности от расстояния для многокаскадного усилителя: а – шум-40 дБ, б – шум-80 дБ

Основной вклад в суммарную погрешность измерения на малых расстояниях ($R/\delta R < 4$) вносит методическая погрешность, а на больших расстояниях — шумовая составляющая. Чем сложнее форма ВФ, тем сильнее влияние шума. Снижение уровня шума приводит к резкому уменьшению суммарной погрешности для более сложных форм ВФ.

Для помехи, вызванной мешающим отражателем, получено выражение для смещения нуля Δt_i СРЧ, нормированного относительно интервала анализа:

$$\Delta t_{in} = \frac{\cos[t_{zn}(\omega_0 + 4\pi \Delta F t_{ni}) + \varphi_n]}{2\pi \Delta F [q_{cn} t_{zc} \sin[t_{zc}(\omega_0 + 2\Delta \omega_{mod} t_{ni}) + \varphi_c] + t_{zn} \sin[t_{zn}(\omega_0 + 4\pi \Delta F t_{ni}) + \varphi_n]]}, \quad (11)$$

где $q_{cn} = U_{mc}/U_{mn}$ - отношение сигнал-помеха; U_{mc} , U_{mn} , t_{zc} , t_{zn} , φ_c , φ_n - соответственно амплитуда, задержка и фаза полезного сигнала и помехи.

Получены формулы для помеховой составляющей погрешности при весовой функции (3):

$$\Delta_{II} = -2\pi K_B \sum_{m=1}^K m A_m \sum_{i=1}^N \sin(4\pi m t_{ni}) \Delta t_{in} \quad (12)$$

и при ВФ КБ (5):

$$\Delta_{II} = -2\pi^2 a^2 e^{-\pi a} \sum_{i=1}^N \frac{(2t_{ni}-1)}{\sqrt{t_{ni}-t_{ni}^2}} I_1 \left[2\pi a \sqrt{t_{ni}-t_{ni}^2} \right] \Delta t_{in}. \quad (13)$$

Пример зависимости помеховой составляющей погрешности от относительного расстояния до полезного отражателя при относительном расстоянии до помехи, равном $10\delta_R$, для ВФ (4) приведен на рисунке 6.

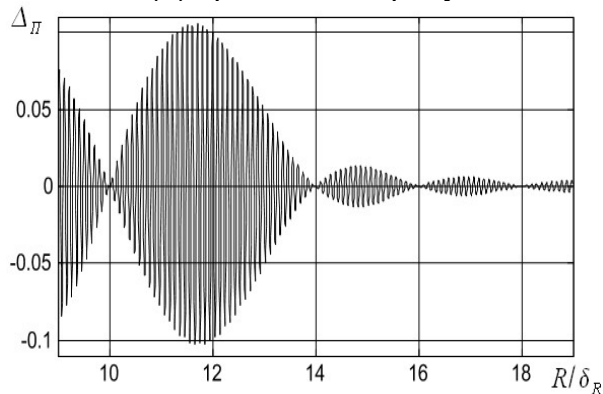


Рисунок 6 - Зависимости помеховой погрешности от расстояния до полезного отражателя

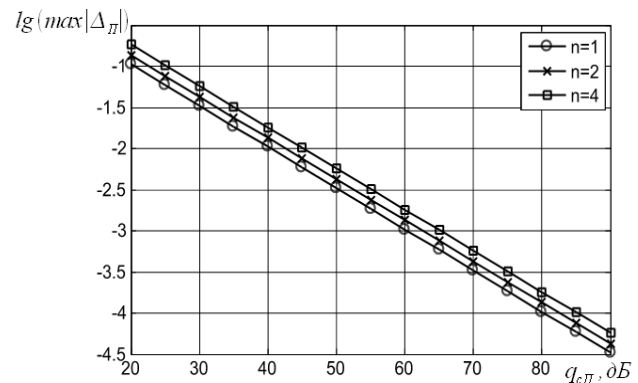


Рисунок 7 - Зависимость логарифма максимального значения помеховой погрешности от отношения сигнал-помеха для трех видов ВФ

На графике имеются главный лепесток, ширина и амплитуда которого увеличиваются с усложнением ВФ, и боковые лепестки, амплитуда которых уменьшается при усложнении формы ВФ. График симметричен относительно точки, соответствующей положению помехи.

Наибольший интерес представляет максимальная помеховая погрешность, возникающая в главном лепестке. На рисунке 7 представлена зависимость логарифма максимальной нормированной помеховой погрешности от отношения сигнал-помеха для ВФ (4). Приемлемые для практики уровни помехи, которые можно не учитывать, достигаются при отношении сигнал-помеха 40-45 дБ.

В третьей главе предложены алгоритмы минимизации погрешности измерения расстояния для метода ВУРЧ.

В первом варианте производится минимизация погрешности измерения, усреднённой в соответствии с (8), путём варьирования формы ВФ. Получены наборы оптимальных параметров ВФ, значения которых зависят от среднего расстояния каждого интервала усреднения.

Предложен **алгоритм 1** минимизации методической погрешности, который заключается в том, что в памяти хранятся наборы оптимальных параметров и при каждом измерении расстояния используется набор коэффициентов, соответствующих номеру интервала, определённому на предыдущем цикле измерения. При первом измерении после включения дальномера используется набор коэффициентов, соответствующих наименьшему расстоянию.

На рисунке 8 сплошной линией показаны зависимости нормированного СКО результата измерения от относительного расстояния, полученные с использованием в алгоритме 1 оптимальных параметров ВФ (5), и пунктиром показаны результаты, полученные

для не оптимальных параметров.

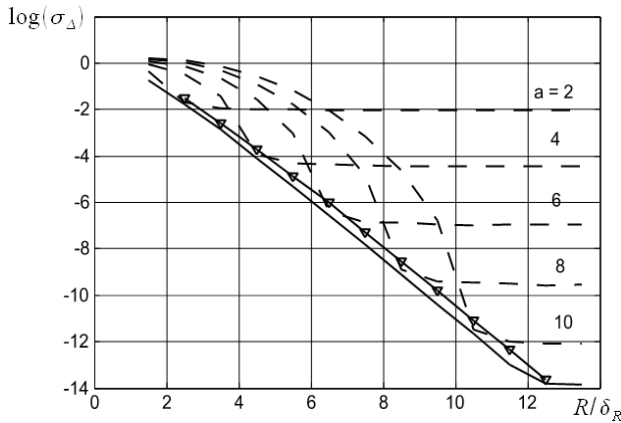


Рисунок 8 - Зависимость усредненной методической погрешности от расстояния для ВФ КБ (5) при использовании алгоритма 1

шумовой. При этом величина усредненной погрешности слабо зависит от измеряемого расстояния и определяется уровнем действующего шума.

Во втором варианте минимизации погрешности измерения расстояния с помощью **алгоритма 2** производится N -кратное варьирование несущей частоты сигнала за счет дополнительной медленной ЧМ в пределах

$$\Delta F_{медл} = \Delta F \eta \quad (14)$$

и усреднение полученных при этом результатов измерения.

При первом измерении расстояния без дополнительной ЧМ определяется нулевое приближение $\hat{\eta}^{(0)}$ и вычисляется $\Delta F_{медл}^{(0)}$ по (14). Затем процедура измерений повторяется с уточнением на каждом шаге очередного приближения $\hat{\eta}_i^{(n)}$ и расчета нового значения

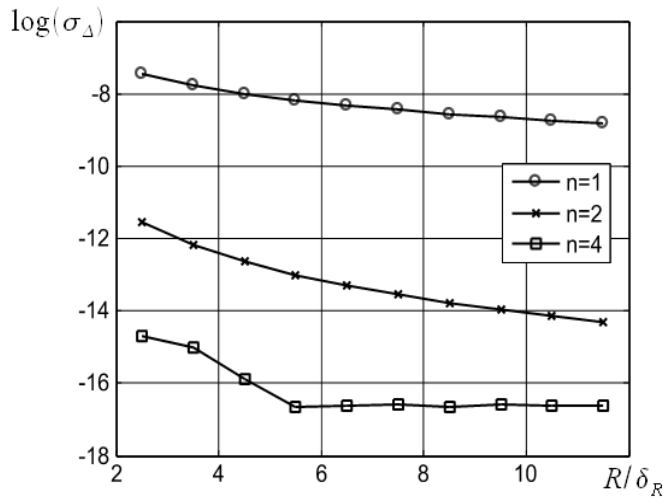


Рисунок 9 - Зависимость логарифма усредненной погрешности от расстояния при использовании алгоритма 2

диапазона перестройки частоты медленной ЧМ $\Delta F_{медл}^{(n+1)}$ до снижения абсолютного значения разности между вновь полученным значением $\hat{\eta}^{(n)}$ и его предыдущим значением $\hat{\eta}^{(n-1)}$ ниже заранее заданной величины $\Delta \eta$:

$$|\hat{\eta}^{(n)} - \hat{\eta}^{(n-1)}| \leq \Delta \eta. \quad (15)$$

Уменьшая величину $\Delta \eta$ и увеличивая N , можно достигнуть предельной погрешности измерения. Результаты, полученные для $N=100$ и $\Delta \eta=10^{-13}$, приведены на рисунке 9 при ВФ (4).

Количество итераций, необходимых для достижения условия (15), сильно зависит от измеряемого расстояния, формы ВФ, заданного значения $\Delta \eta$, количества точек усреднения N и колеблется в пределах от 4 — 5 до 50 — 60. Т. е. общее число измерений будет колебаться от $4N$ до $60N$. Указанный метод снижения погрешности требует значительных дополнительных ресурсов по диапазону перестройки частоты и времени измерения.

Третий вариант минимизации основан на подборе величины диапазона перестройки

Оптимизация параметров ВФ позволяет существенно уменьшить погрешность измерения. Эффект тем значительнее, чем сильнее изменяется форма ВФ. Наилучшие результаты обеспечивает ВФ КБ. С увеличением расстояния погрешность снижается на несколько порядков.

Исследовано влияние шума на результаты измерения расстояния при использовании оптимальных параметров и показано, что ограничивающим фактором для снижения погрешности измерения расстояния за счет оптимизации параметров ВФ является уровень шума. Начиная с некоторого расстояния, зависящего от уровня шума, методическая погрешность становится меньше

быстрой ЧМ с целью смещения текущей точки на оси нормированных расстояний в одну из ближайших узловых точек, показанных на рисунке 1. Это выполняется с помощью **алгоритма 3**, в котором первое измерение расстояния $R_{изм}^{(0)}$ производится при некотором начальном значении $\Delta F^{(0)}$ для получения нулевого приближения $\hat{\eta}_R^{(0)} = \delta_R^{(0)} / R_{изм}^{(0)}$ и определения точного положения на оси нормированного расстояния ближайшей точки с нулевой погрешностью, расположенной слева от текущей нормированной точки. Затем многократно корректируется значение диапазона перестройки частоты и производится измерение расстояния и расчет очередного приближения $\eta_R^{(n)}$. Процедура повторяется до выполнения условия (15).

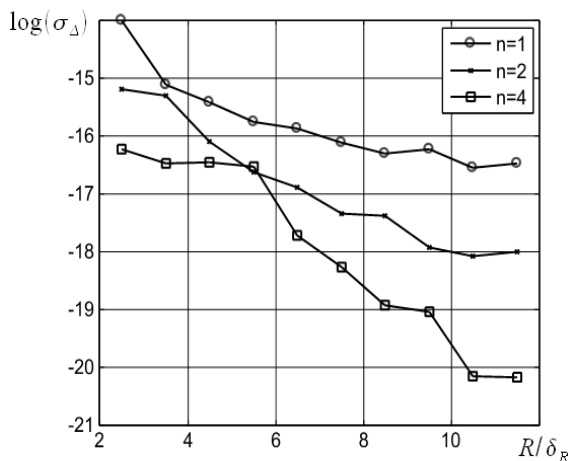


Рисунок 10 - Зависимость логарифма погрешности от расстояния при использовании алгоритма 3

числа итераций в виде **алгоритма 4**, в котором предварительно производится оптимизация

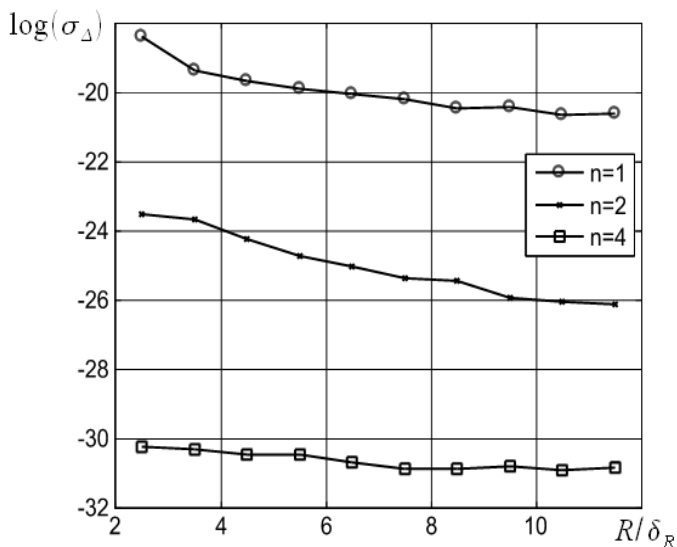


Рисунок 11 - Зависимость логарифма погрешности от расстояния при использовании алгоритма 4

Результаты расчета по этому алгоритму приведены на рисунке 10. Вид графиков зависит от вида ВФ и задаваемого предела в условии (15). Большим n соответствует меньшая погрешность, но это достигается существенным увеличением требуемого диапазона перестройки частоты. Количество итераций, требуемых для достижения заданной погрешности, зависит от величины $\Delta \eta$, измеряемого расстояния и формы ВФ. Количество итераций увеличивается при уменьшении $\Delta \eta$, уменьшении измеряемого расстояния и уменьшении параметра формы ВФ n и может изменяться от 2 — 3 до 100 — 150.

Показано, что можно совместить два последних варианта минимизации для сохранения их положительных качеств и уменьшения требуемого

числа итераций в виде **алгоритма 4**, в котором предварительно производится оптимизация диапазона перестройки частоты быстрой ЧМ на основе **алгоритма 2**. Затем с использованием найденного значения производится определение требуемого значения диапазона перестройки частоты медленной ЧМ и выполняется один цикл медленной перестройки несущей частоты с усреднением результатов измерения для уточнения расстояния, измеренного на первом этапе. Результаты расчета методической погрешности, полученной с помощью **алгоритма 4**, показаны на рисунке 11.

Теоретически такой комбинированный алгоритм позволяет значительно уменьшить методическую погрешность измерения. При этом сохраняется зависимость достигаемого уровня погрешности измерения от формы ВФ.

Все теоретические результаты проверены численным моделированием и получено хорошее совпадение результатов.

В четвертой главе проведен анализ вариантов работы метода ВУРЧ при нелинейности МХ СВЧ генератора.

Предложены эвристическая модель МХ СВЧ генератора:

$$f = f_0 + K_{MX} u_{mod} + a u_{mod}^2 + \sum_{n=1}^M b_n \sin[d_n (u_{mod} + U_{nn})], \quad (16)$$

где K_{MX} и a определяют линейный и квадратичный компонент; b_n , d_n и U_{nn} определяют соответственно амплитуду колебаний, их “частоту” на оси напряжений и начальное смещение каждого синусоидального слагаемого; M - количество гармоник, и процедура определения параметров модели (16) по экспериментально измеренным статическим МХ.

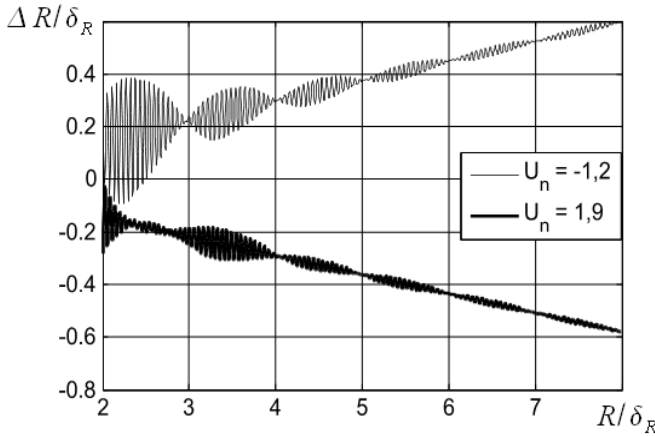


Рисунок 12 - Зависимость погрешности от расстояния при ВФ (4) с $n=1$ для колебательной нелинейности с $d=1 \text{ рад/В}$ и $b=10 \text{ МГц}$ и двух значений U_n

На рисунке 12 приведены типичные зависимости мгновенной погрешности от расстояния. Эти рисунки получены методом численного моделирования с использованием модели (16) для характерного случая нелинейности МХ в виде колебательного компонента.

Анализ показывает, что при квадратичной нелинейности происходит размывание узловых точек графика. Наличие колебательной компоненты приводит к размыванию узловых точек и появлению линейного тренда, как на рисунке 12.

Для устранения линейного тренда теоретически найдена связь коэффициента K_{MB} с параметрами нелинейности МХ и предложена процедура определения K_{MB} по рабочему СРЧ на основе формулы:

$$K_{MB} = \frac{K_B \widehat{F} \left\{ A_0 (2 \widehat{f}_H + \widehat{k}_f) + 2 \widehat{F} \widehat{\Delta F}_\sigma [\sin(\widehat{F} + \widehat{\varphi}) - \sin(\widehat{\varphi})] \sum_{m=1}^N \frac{A_m}{\widehat{F}^2 - (2\pi m)^2} \right\}}{\widehat{F} (2 \widehat{f}_H + \widehat{k}_f) + 2 \widehat{\Delta F}_\sigma [\sin(\widehat{F} + \widehat{\varphi}) - \sin(\widehat{\varphi})]}, \quad (17)$$

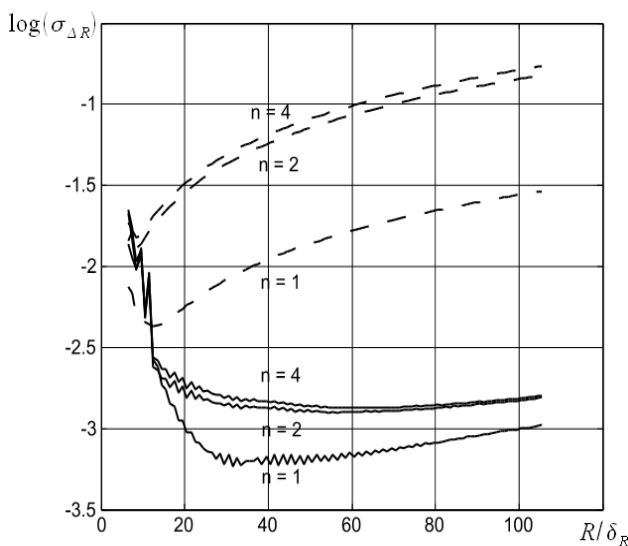


Рисунок 13 - Зависимости логарифма СКО от расстояния.

Пунктир — без корректирования, сплошная — с корректированием

где $\widehat{\Delta F}_\sigma$ и $\widehat{\varphi}$ - соответственно оценки амплитуды и фазы колебательного компонента, $\widehat{F} = \widehat{F} T_{mod}/2$, $\widehat{f}_H = \widehat{f}_H T_{mod}/2$, $\widehat{k}_f = \widehat{k}_f (T_{mod}/2)^2$ - нормированные оценки соответственно частоты колебательной компоненты и параметров линейного тренда зависимости разностной частоты от времени.

Эффективность коррекции коэффициента K_{MB} проверялась с помощью моделирования. На рисунке 13 приведены зависимости логарифма СКО, усреднённого в соответствии с (8), от нормированного расстояния и не скорректированные результаты.

Для каждой ВФ существует минимальное расстояние, начиная с которого целесообразно производить коррекцию. Достижимый выигрыш ограничивается точностью оценки параметров МХ. При использовании коррекции погрешность уменьшается от единиц до десятков раз и достигаемая погрешность соответствует практическим требованиям

ям, предъявляемым к таким приборам.

Рассмотрена возможность адаптивной компенсации нелинейности МХ путем введения в модулирующее напряжение корректирующей добавки. Показана возможность расчета корректирующей добавки с учетом степени неравномерности периодов T_{pi} СРЧ по следующему приближенному выражению:

$$\Delta u_{ki} = \frac{K_u \sum_{i=1}^N \eta_i T_{pi}}{1 - \eta_i}, \quad (18)$$

где $\eta_i = (T_{pi} - T_{pcp}) / T_{pcp}$ - степень неравномерности периода СРЧ, $T_{pcp} = \sum_{i=1}^N T_{pi} / N$.

Предложен итерационный алгоритм периодической компенсации нелинейности МХ путём многократного формирования корректирующего напряжения по формуле (18) с использованием оценки неравномерности периодов СРЧ до достижения допустимой величины неравномерности.

Проверка эффективности предложенного алгоритма компенсации нелинейности МХ производилась многократным моделированием процесса измерения расстояния для разных вариантов нелинейности и разных ВФ.

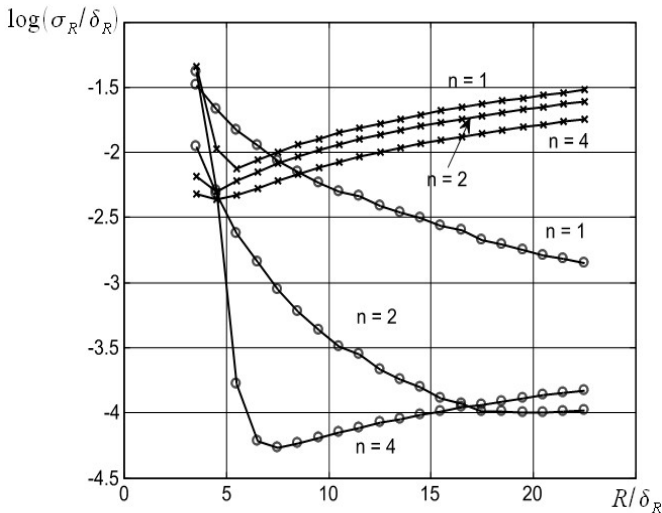


Рисунок 14 - Зависимости логарифма СКО от расстояния при компенсации нелинейности (круглые маркеры) и без компенсации (крестообразные маркеры) для $b=10 \text{ МГц}$ и $a=2 \text{ МГц}/B^2$

На рисунке 14 приведен пример зависимости логарифма СКО от нормированного расстояния при наличии и отсутствии компенсации с ВФ (4) для трех значений параметра формы и нелинейности МХ общего вида. В зависимости от вида нелинейности МХ, формы ВФ и расстояния компенсация обеспечивает выигрыш по погрешности от нескольких раз до двух порядков, начиная с некоторого минимального расстояния, индивидуального для каждой ВФ.

Предложены два варианта учета нелинейности МХ при расчете расстояния.

В первом варианте учёта нелинейности производится расчет расстояния по формуле:

$$R = \frac{c}{2 \Delta F} (k + x), \quad (19)$$

где k - число целых периодов СРЧ внутри интервала анализа; x - дополнительная

фазовая добавка.

Величина, заключённая в скобки в формуле (19), находится следующим образом:

$$k + x = \frac{2}{K_B} \sum_{j=0}^k \alpha \left(\frac{2\pi t_{pacj}}{T_a} \right), \quad (20)$$

где $t_{pacj} = (j+1-x_1)T_{cp}$ - расчётный j -й момент появления характерной точки СРЧ с усреднённым периодом T_{cp} , считая от начала интервала анализа; $T_{cp} = \frac{T_a}{k - x_1 + x_2}$ - средний период СРЧ; x_1 и x_2 - нормированные положения граничных точек интервала анализа относительно левых границ крайних полупериодов СРЧ.

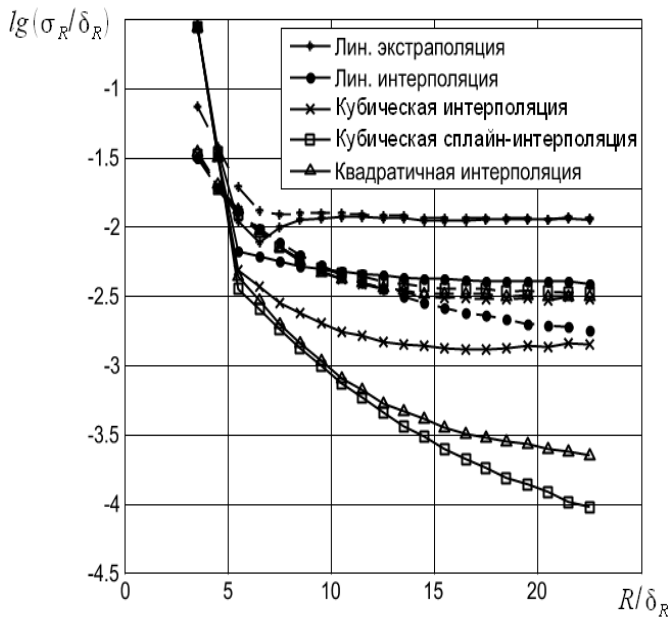


Рисунок 15 - Зависимости логарифма СКО от расстояния для разных вариантов расчета фазовых добавок при $b=10$ МГц и $a=2$ МГц/В² и разных ВФ (сплошная линия - $n=4$, пунктирная линия - $n=1$)

ВФ и нелинейности МХ общего вида. Наилучшие результаты обеспечивают кубическая сплайн-интерполяция и квадратичная интерполяция, а наихудшие - линейная экстраполяция.

Второй вариант учёта нелинейности основан на том, что при неизменном измеряемом расстоянии и любых внешних условиях за время, укладываемое между двумя любыми характерными точками сигнала биений, разделенными m полупериодами СРЧ, передатчик перестраивается на одно и то же значение частоты Δf_m . Отсюда следует формула для расчета расстояния:

$$R = \frac{cm}{4\Delta f_m}. \quad (21)$$

Для вычисления Δf_m по принятому СРЧ предложено произвести аппроксимацию зависимости частоты зондируемого сигнала от времени $F(t)$ полиномом степени n :

$$f(t) = \sum_{i=0}^n a_i t^i, \quad (22)$$

где $(n+1)$ - число характерных точек СРЧ внутри периода модуляции, используемое при расчёте; a_i - постоянные коэффициенты.

С учетом результатов измерения зависимости моментов t_i появления характерных точек СРЧ от времени и временных положений t_H и t_B двух импульсных сигналов, полученных в моменты совпадения излучаемых и двух эталонных частот F_H и F_B , составлена система из $(n+3)$ линейных уравнений относительно $(n+1)$ неизвестных коэффициентов a_i , частоты, соответствующей появлению первой характерной точки СРЧ f_1 , и диапазона перестройки частоты Δf_1 между двумя соседними характерными точками сигнала разностной частоты.

Нормированные положения граничных точек x_1 и x_2 (фазовых добавок) можно вычислять разными вариантами:

- линейная экстраполяция с использованием положения двух характерных точек, ближайших к нижней и верхней частотным меткам;

- линейная интерполяция с использованием положения двух характерных точек, между которыми расположены верхняя и нижняя метки;

- квадратичная интерполяция с использованием положения трех характерных точек, между которыми расположены верхняя и нижняя метки;

- кубическая сплайн-интерполяция;

- кубическая интерполяция.

Сравнение этих вариантов проводилось с помощью численного моделирования. На рисунке 15 приведены типичные зависимости логарифма СКО для разных вариантов расчета фазовых добавок и разных

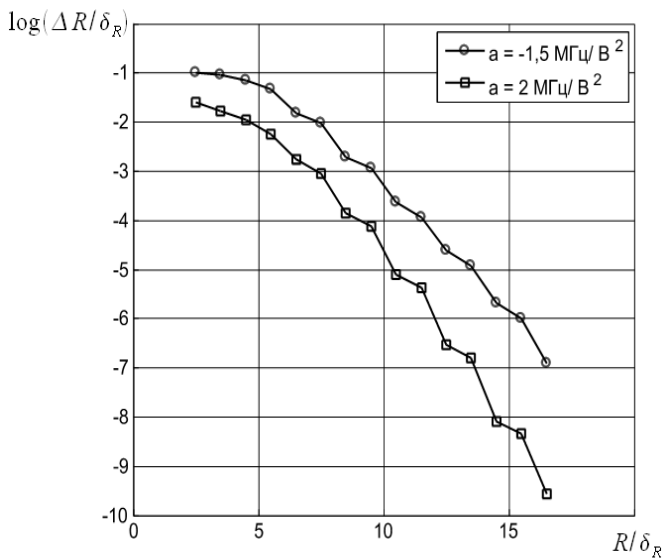


Рисунок 16 - Зависимости логарифма СКО от расстояния при размерности матрицы, не превышающей 16

Одним из решений этой системы уравнений является следующее:

$$\Delta f_1 = \frac{A_{n-1,2} F_H + A_{n,2} F_B}{\Delta}, \quad (23)$$

где Δ - определитель полученной системы уравнений; $A_{i,j}$ - соответствующее алгебраическое дополнение системы.

Моделирование данного варианта учета нелинейности МХ с расчётом расстояния по (21) и (23) показывает его высокую эффективность. Результаты этого моделирования приведены на рисунке 16. Видно, что с увеличением расстояния погрешность монотонно уменьшается при любых параметрах нелинейности. Уровень погрешности, надёжно достигаемой при этом, соответствует требованиям, предъявляемым к приборам данного типа.

В заключении сформулированы основные новые результаты, полученные в работе, которые сводятся к следующему:

1. Получены формулы для методической погрешности измерения расстояния с использованием ВФ Кайзера-Бесселя, проведен количественный анализ методической погрешности и показано, что, изменяя параметры ВФ, можно проводить адаптивную минимизацию погрешности при изменении измеряемого расстояния.

2. Предложена методика учёта влияния помех на результаты измерения расстояния с помощью ВУРЧ, получены выражения для шумовой составляющей погрешности измерения расстояния с учетом фильтрации смеси сигнала с шумом в блоке предварительной обработки для трёх видов частотной характеристики и составляющей, вызванной наличием мешающего отражателя в рабочей зоне дальномера, и показано, что их влиянием можно пренебрегать при уровне помехи, не превышающей -45 дБ.

3. Предложен алгоритм оптимизации формы ВФ, обеспечивающий выигрыш по погрешности измерения в 2-4 раза при расстоянии, равном 2-3 ОД, до нескольких порядков при расстоянии, превышающем 10 ОД, причем наибольший выигрыш обеспечивается при ВФ Кайзера-Бесселя.

4. Предложены итеративные алгоритмы минимизации методической погрешности измерения расстояния путём оптимизации параметров ЧМ, обеспечивающие выигрыш по точности измерения от единиц до несколько десятков раз.

5. Разработана модель МХ СВЧ генератора, предложен метод оценки параметров этой модели по экспериментально снятой МХ, предложен алгоритм коррекции результатов измерения и получено, что коррекция снижает погрешность измерения расстояния от единиц до десятков раз в зависимости от расстояния и вида ВФ.

6. Предложен алгоритм компенсации нелинейности МХ в процессе проведения измерений, позволяющий снизить общий уровень погрешности примерно от нескольких раз до двух порядков в зависимости от вида ВФ и расстояния.

7. Предложены алгоритмы учета нелинейности МХ при расчете расстояния по положению нулей СРЧ в интервале анализа, обеспечивающие снижение погрешности измерения расстояния до величины, удовлетворяющей практические потребности.

Полученные результаты являются новыми, не известными в научно-технической литературе и могут с успехом применяться для разработки современных точных ЧД. Достоверность этих результатов подтверждается результатами имитационного моделирования

и экспериментальной проверкой.

В целом можно сказать, что на основании исследований, выполненных автором, решены задачи, совокупность которых можно квалифицировать как научно-квалификационную работу, посвященную повышению точности измерения расстояния с помощью непрерывного ЧМ сигнала с учётом влияния мешающих факторов, имеющую существенное значение для систем ближней радиолокации промышленного назначения

В приложениях приведены некоторые математические выкладки, копии дипломов международных выставок и копии актов внедрения результатов работы.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Атаянц Б. А., Баранов И. В., Болонин В. А., Езерский В. В., Мирошин С. В. Требования к цифровой реализации адаптивного ЧМ-уровнемера // 3-я Международная НТК «Цифровая обработка сигналов и её применение». Москва, 2000 г. Доклады-2. - С 158-161.
2. Атаянц Б. А., Баранов И. В., Болонин В. А., Езерский В. В., Кагаленко Б. В. Бесконтактный радиоволновый датчик расстояния повышенной точности и стабильности // XIII НТК «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления». Гурзуф, 2001.
3. Езерский В. В., Баранов И. В., Болонин В. А. Компенсация нелинейности модуляционной характеристики ЧМ-дальномеров на основе анализа принятого сигнала // Датчики и системы: сб. докл. междунар. конф. Том 1. - Санкт-Петербург, 2002. - С. 218-222.
4. Езерский В. В., Баранов И. В. Анализ точности датчика расстояния на базе ЧМ дальномера с весовым сглаживанием дискретной ошибки // Датчики и системы: сб. докл. междунар. конф. Том 3. - Санкт-Петербург, 2002. - С. 22-26.
5. Езерский В. В., Болонин В. А., Баранов И. В. СВЧ уровнемер с весовым сглаживанием дискретной ошибки // СВЧ техника и телекоммуникационные технологии: материалы 12-й междунар. конф. - Севастополь: Вебер, 2002. - С. 453-454.
6. Езерский В. В., Болонин В. А., Баранов И. В. Алгоритм компенсации нелинейности модуляционной характеристики ЧМ дальномеров // Вестник РГРТА. - Рязань, 2002, Вып. 10. - С. 38-42.
7. Езерский В. В., Баранов И. В. Анализ методической погрешности датчика расстояния на базе ЧМ дальномера с весовым сглаживанием дискретной ошибки // Вестник РГРТА. - Рязань, 2003, Вып. 11. - С. 61-65.
8. Езерский В. В., Болонин В. А., Баранов И. В. Цифровая обработка сигнала ЧМ дальномера с весовым сглаживанием дискретной ошибки // Цифровая обработка сигналов и её применение: доклады 5-й междунар. конф. Том 1. - Москва, 2003. - С. 237-239.
9. Езерский В. В., Болонин В. А., Баранов И. В., Давыдочкин В. М., Пронин В. А. Обработка сигналов датчика расстояния на основе частотного дальномера с учётом нелинейности модуляционной характеристики передатчика // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления: материалы конф. - М.: МГИЭМ, 2003. - С. 101-103.
10. Атаянц Б. А., Езерский В. В., Болонин В. А., Баранов И. В., Давыдочкин В. М., Пронин В. А. Учёт нелинейности модуляционной характеристики передатчика при измерении расстояния широкополосным частотно модулированным радиолокатором // Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике: сб. докл. всерос. НТК.- Муром, Ми ВлГУ, 2003. - 546 с.
11. Атаянц Б. А., Езерский В. В., Болонин В. А., Баранов И. В., Давыдочкин В. М., Пронин В. А. Влияние нелинейности модуляционной характеристики передатчика на измерение дальности ближней радиолокации // Информационно-измерительные и управляющие системы. - 2003, Т.1, № 2-3. - С. 50-56.

12. Езерский В. В., Баранов И. В. Оптимизация весового метода сглаживания погрешности дискретности датчика расстояния на основе частотного дальномера // Измерительная техника, 2004, № 12. - С. 19-23.
13. Ezerskii V. V., Baranov I. V. Optimization of weighting methods of smoothing the discreteness error of distance sensors based on a frequency rangefinder // Measurement techniques. – 2004. - V. 47, № 12. - P. 1160-1167.
14. Езерский В. В., Паршин В. С., Баранов И. В., Гусев В. С., Багдадюлян А. А. Сравнительный анализ помехоустойчивости алгоритмов измерения дальности ЧМ дальномером в спектральной области // Вестник РГРТА. Рязань, 2004. Вып. 14. - С. 43-48.
15. Пат. 2234716 Российская Федерация, МПК7 G01 S 13/34. Способ формирования зондирующего частотно-модулированного сигнала для дальномера с периодической частотной модуляцией / Б. А. Атаянц, И. В. Баранов, В. А. Болонин, В. М. Давыдочкин, В. В. Езерский, Б. В. Кагаленко, В. А. Пронин; заявл.04.03.03; опубл.20.08.04, Бюл.№ 23. -8 с.: ил.
16. Пат. 2234108 Российская Федерация, МПК7 G01 S 13/34. Способ измерения расстояния (варианты) / Б. А. Атаянц, В. В. Езерский, И. В. Баранов, В. А. Болонин, В. М. Давыдочкин, В. А. Пронин; заявл.18.12.02; опубл.10.08.04, Бюл.№ 22. -8 с.: ил.
17. Езерский В. В., Баранов И. В., Мирошин С. В. Компьютерная модель обработки сигналов в ближней частотной радиолокации // Труды Российского НТО РЭС им. Попова. Серия: Цифровая обработка сигналов и её применение.6-я междунар. конф. Вып. VII–1.- М. 2005. - С. 238-242.
18. Езерский В. В., Баранов И. В. Математическая модель модуляционной характеристики частотно-модулированного СВЧ генератора // Физика и технические приложения волновых процессов: доклады V международной НТК. - Самара, 2006. - С. 66.
19. Баранов И. В., Езерский В. В. Минимизация погрешности измерения расстояния при цифровой обработке сигналов частотных дальномеров промышленного применения // Вестник РГРТА. Рязань, 2008, Вып. 2 (24). - С. 55-60.
20. Баранов И. В., Езерский В. В. Цифровой спектральный анализ полигармонического сигнала // Труды Российского НТО РЭС им. Попова. Серия: Цифровая обработка сигналов и её применение.10-я Международная конференция. Вып. X–1. Москва, 2008. - С. 173-175.
21. Баранов И. В., Езерский В. В., Каминский А. Ю. Измерение толщины льда при помощи частотно-модулированного дальномера // Измерительная техника 2008, № 7. - С. 21-25.
22. Баранов И. В., Езерский В. В. Минимизация погрешности измерения расстояния в частотных дальномерах промышленного применения при оценке частоты сигнала биений с помощью весового усреднения // Физика и технические приложения волновых процессов: тезисы докладов VII международной научно-технической конференции (11-17 сентября 2008). - С.71-72.
23. Баранов И. В., Езерский В. В. Влияние шума на погрешность измерения расстояния в частотных дальномерах промышленного применения при оценке частоты сигнала биений с помощью весового усреднения // Физика и технические приложения волновых процессов: тезисы докладов VII международной научно-технической конференции (11-17 сентября 2008). - С.47-48.
24. Baranov I. V., Ezerski V. V., Kaminskii A. Yu. Measurement of the thickness of ice by means of a frequency-modulated radiometr // Measurement Techniques, 2008, Vol. 51, № 7. - P. 726-733.
25. Баранов И. В., Езерский В. В. Оптимизация параметров модуляции в ближней частотной радиолокации при весовом усреднении разностной частоты // Вестник РГРТУ. Рязань, 2009. Вып. 2 (28). - С.30-37.

26. Баранов И. В., Езерский В. В. Учет нелинейности модуляционной характеристики передатчика при весовом усреднении разностной частоты в частотных дальномерях промышленного применения // Вестник РГРТУ. Рязань, 2011. Вып. 35. - С. 35-41.

Баранов Илья Владимирович

Алгоритмы адаптивной обработки сигнала
на основе весового усреднения разностной частоты
в частотном дальномере ближнего действия

Специальности:

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 04.04.2011 г. Формат бумаги 60x84 1/16
Бумага офсетная. Печать ризографическая. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ 001815

Отпечатано в ООО «Информационные технологии».
390035, г. Рязань, ул. Островского, д. 21/1.