

**ПРЕЦИЗИОННЫЕ СИСТЕМЫ
БЛИЖНЕЙ ЧАСТОТНОЙ
РАДИОЛОКАЦИИ
ПРОМЫШЛЕННОГО
ПРИМЕНЕНИЯ**

ПРЕЦИЗИОННЫЕ СИСТЕМЫ БЛИЖНЕЙ ЧАСТОТНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Москва
Радиотехника
2012

ИЗДАТЕЛЬСТВО
РАДИОТЕХНИКА
(ООО «РАДИОТЕХНИКА»)
125080, МОСКВА, БУЛЬВАР КИЕВСКИЙ, 199

3014421

СЭТ 21-10000000000000000000

СЭТ 21-10000000000000000000

4-425-4788-4-4788

УДК 621.396
ББК 32.95
А 92

Рецензент:

А. И. Перов

— д. т. н., проф., зав. кафедрой «Радиотехнические системы»,
Национальный исследовательский университет «МЭИ»

А 92

Прецизионные системы ближней частотной радиолокации промышленного применения. Монография / Б. А. Атаянц, В. М. Давыдочкин, В. В. Езерский, В. С. Паршин, С. М. Смольский. — М.: Радиотехника, 2012. — 512 с.: ил.

ISBN 978-5-88070-329-6

Разработана теория прецизионного измерения расстояния в ближней частотной радиолокации. Проанализированы традиционные методы обработки сигналов разностной частоты и рассмотрены варианты минимизации погрешности. Определена потенциальная точность при обработке сигнала разностной частоты методом максимального правдоподобия и рассмотрены особенности практического использования этого метода. Исследовано влияние нелинейности модуляционной характеристики и предложены алгоритмы минимизации погрешности. Показано влияние мешающих отражений и предложены алгоритмы минимизации их влияния. Разработаны вопросы организации практических измерений характеристик прецизионных измерителей и приведены результаты тестирования алгоритмов на сертифицированном измерительном стенде.

Для научных работников и инженеров, занимающихся проблемами измерения малых и сверхмалых расстояний. Может быть полезна аспирантам и студентам старших курсов радиотехнических специальностей.

БИБЛИОТЕКА
Научно-техническое
отделение ЗНБ ЮФУ
(г. Таганрог)

УДК 621.396
ББК 32.95

1544436

ISBN 978-5-88070-329-6

© Авторы, 2012
© ООО предприятие «Контакт-1», 2012
© ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОТ АВТОРОВ	11
ВВЕДЕНИЕ	13
ГЛАВА 1	
СЧЕТНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ РАЗНОСТНОЙ ЧАСТОТЫ	19
1.1. Введение	20
1.2. Основные расчетные соотношения	21
1.3. Традиционный счетный метод измерения расстояния	26
1.4. Источники погрешности измерения расстояния частотно-модулированным дальномером	28
1.5. Адаптивное управление параметрами частотной модуляции	30
1.6. Методическая погрешность измерения расстояния при адаптивной частотной модуляции	37
Фиксированный измерительный интервал времени.....	37
Измерительный интервал времени, кратный полупериоду модуляции	41
Коррекция результата расчета расстояния	44
1.7. Погрешность определения расстояния, обусловленная неточностью адаптации модуляции	48
1.8. Влияние шума на точность определения расстояния с помощью адаптивного счетного метода	50
Выводы	58
ГЛАВА 2	
ВЕСОВОЙ МЕТОД УСРЕДНЕНИЯ РАЗНОСТНОЙ ЧАСТОТЫ	59
2.1. Введение.....	60
2.2. Методическая погрешность весового метода усреднения разностной частоты	63

2.3. Минимизация методической погрешности весового метода усреднения разностной частоты оптимизацией параметров весовой функции	76
2.4. Минимизация методической погрешности весового метода усреднения разностной частоты оптимизацией параметров частотной модуляции	82
Использование дополнительной медленной частотной модуляции	83
Оптимизация диапазона перестройки частоты при частной модуляции	86
Комбинированная оптимизация	89
2.5. Влияние шума на погрешность весового метода усреднения разностной частоты	90
Погрешность измерения для весовой функции в виде тригонометрического ряда	92
Погрешность измерения для весовой функции Кайзера—Бесселя	99
Выводы	104

ГЛАВА 3

ОЦЕНКА РАЗНОСТНОЙ ЧАСТОТЫ ПО ПОЛОЖЕНИЮ

МАКСИМУМА СПЕКТРА	105
3.1. Введение	106
3.2. Алгоритмы оценки разностной частоты	108
3.3. Оценка разностной частоты по положению максимума спектральной плотности сигнала разностной частоты ...	112
Аналитическая оценка методической погрешности измерения расстояния	112
Методическая погрешность оценки разностной частоты при весовых функциях Дольфа—Чебышева и Кайзера—Бесселя	117
Минимизация погрешности измерения на основе оптимизации параметров частотной модуляции	121
Минимизация погрешности на основе оптимизации параметров весовой функции	124
3.4. Средневзвешенная оценка разностной частоты	132
Методическая погрешность средневзвешенной оценки	132
Оптимизация средневзвешенной оценки разностной частоты по минимуму погрешности измерения	136
3.5. Систематическая погрешность оценки частоты для алгоритма с поправочными коэффициентами	140

3.6. Влияние шумовой помехи на погрешность измерения расстояния	142
Статистические характеристики оценки спектральной суммы сигнала разностной частоты и шума	142
Влияние шумовой помехи на точность оценки центральной частоты	145
3.7. Минимизация методической погрешности измерения расстояния с помощью адаптируемых весовых функций	157
Выводы	164

ГЛАВА 4

ОЦЕНКА РАССТОЯНИЯ ПО СИГНАЛУ РАЗНОСТНОЙ ЧАСТОТЫ МЕТОД МАКСИМАЛЬНОГО ПРАВДОПОДОБИЯ	167
4.1. Введение	168
4.2. Оценка расстояния по сигналу разностной частоты.	169
4.3. Особенности оценки времени задержки с помощью метода максимального правдоподобия.	176
4.4. Основные факторы, влияющие на погрешность измерения времени задержки	180
4.5. Оценка фазовой характеристики частотного дальномера	186
4.6. Моделирование алгоритма оценки расстояния	198
Моделирование при известной фазовой характеристике	199
Результаты моделирования при неизвестной фазовой характеристике.	
Методика практической оценки фазовой характеристики	199
Уменьшение влияния шума на точность оценки фазовой характеристики	203
4.7. Оценка частоты короткой реализации сигнала на фоне аддитивного шума	205
Выводы	213

ГЛАВА 5

ВЛИЯНИЕ НЕЛИНЕЙНОСТИ МОДУЛЯЦИОННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЧ-ГЕНЕРАТОРА	215
5.1. Введение.	216
5.2. Математическая модель модуляционной характеристики	216

5.3. Влияние нелинейности модуляционной характеристики на методическую погрешность счетного метода измерения частоты	224
Квадратичная модуляционная характеристика	225
Колебательная модуляционная характеристика	228
Квадратичная модуляционная характеристика с колебательной компонентой	234
5.4. Влияние нелинейности модуляционной характеристики на погрешность весового метода усреднения разностной частоты	234
5.5. Связь корректирующего коэффициента с параметрами нелинейности модуляционной характеристики при весовом усреднении разностной частоты	241
Квадратичная нелинейность модуляционной характеристики	241
Колебательная нелинейность модуляционной характеристики	242
Квадратичная и колебательная нелинейность модуляционной характеристики	243
5.6. Оценка корректирующего коэффициента по рабочему сигналу разностной частоты	243
5.7. Компенсация нелинейности модуляционной характеристики	247
5.8. Учет нелинейности модуляционной характеристики при расчете расстояния	258
Оценка доли крайних периодов	258
Аппроксимации зависимости периодов сигнала от времени	261
Выводы	263

ГЛАВА 6

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЯ

ПРИ НАЛИЧИИ ПОМЕХ	265
6.1. Введение	266
6.2. Погрешность, вызванная одиночным мешающим слагаемым сигнала разностной частоты	270
6.3. Погрешность, вызванная влиянием мешающих отражателей в антенно-волноводном тракте и в рабочей зоне частотного дальномера	274
Влияние мешающих отражателей в антенно-волноводном тракте и в рабочей зоне частотного дальномера	274

Влияние мешающего отражения импульсного характера	278
6.4. Погрешность, вызванная отражением сигнала от угла, образованного вертикальной стеной резервуара и поверхностью жидкости	284
6.5. Влияние краевых волн, вызванных ограниченными размерами зондируемого объекта	288
6.6. Влияние отраженных волн на погрешность измерения расстояния частотного дальномера	291
Влияние эхо-сигналов на режим работы СВЧ-генератора	291
Влияние волн, отраженных от полезного отражателя, на режим работы генератора	295
Влияние волн, отраженных от полезного и мешающего отражателя, на режим работы генератора	299
6.7. Влияние комбинационных составляющих в смесителе частотного дальномера на погрешность измерений	303
Виртуальные отражатели	303
Влияние «виртуальных помех» на погрешность оценки расстояния	308
6.8. Влияние мешающего отражателя на погрешность измерения расстояния при обработке сигнала во временной области	310
Выводы	313

ГЛАВА 7

СНИЖЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ПОМЕХ

С ПОМОЩЬЮ АДАПТИРУЕМЫХ ВЕСОВЫХ ФУНКЦИЙ	315
7.1. Введение	316
7.2. Оценка помеховой ситуации	318
7.3. Минимизация погрешности оценки частоты и амплитуды слабого сигнала на фоне разрешаемой одиночной помехи	325
Вводные замечания	325
Минимизация погрешности измерения расстояния до слабо отражающих жидкостей	326
Измерение расстояния на фоне сильного отражения от дна резервуара	333
7.4. Снижение погрешности оценки разностной частоты сигнала, принятого на фоне неразрешаемых помех	334
Ситуации, наиболее часто встречающиеся в практике	334

Метод снижения погрешности	335
Алгоритм снижения погрешности оценок	343
7.5. Уменьшение погрешности, вызванной виртуальным отражателем	344
7.6. Снижение погрешности, вызванной ЭХО-сигналом	349
Выводы	350

ГЛАВА 8

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ПОМЕХ	351
8.1. Введение	352
8.2. Компенсация мешающих отражений	352
Использование для компенсации комплексной спектральной плотности	355
Использование МО для компенсации спектральной плотности мощности	358
8.3. Снижение погрешности измерения при наличии мешающих отражений методами распознавания образов	363
Определение расстояния при использовании комплексной спектральной плотности	364
Определение расстояния при использовании спектральной плотности мощности	367
8.4. Уменьшение влияния мешающих отражателей на точность оценки расстояния методом максимального правдоподобия	371
Следящий измеритель расстояния	371
Влияние погрешности оценки фазовой характеристики на работу следящего измерителя	380
Условия, при которых происходит срыв слежения	381
Измерение расстояния при наличии мешающих отражателей малой интенсивности	384
8.5. Измерение частоты на основе анализа собственных векторов в подпространстве шума	386
8.6. Измерение частоты методом наименьших квадратов Прони	393
8.7. Предсказание расстояния на основе учета скорости перемещения полезного отражателя	399
Равномерная скорость движения полезного отражателя	399
Неравномерная скорость движения полезного отражателя	402
Выводы	405

ГЛАВА 9	
ИСПЫТАНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ БЛИЖНЕЙ ЧАСТОТНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ	407
9.1. Введение	408
9.2. Аппаратура и методика экспериментальной оценки характеристик частотного дальномера	409
Синтез радиолокационных отражателей для прецизионных измерений	410
Стенд для измерения параметров частотного дальномера	419
Методика проведения измерений	421
9.3. Экспериментальное снижение погрешности, вызванной виртуальными помехами	422
Волноводная измерительная установка	423
Экспериментальное исследование возможности снижения влияния виртуальных помех	424
Влияние уровня излучаемой мощности на погрешность оценки расстояния, вызванную виртуальными помехами	425
9.4. Результаты экспериментального снижения погрешности измерения расстояния управлением параметрами адаптируемой весовой функции	427
9.5. Результаты тестирования параметрических алгоритмов измерения расстояния на измерительном стенде	430
Алгоритм, основанный на методах распознавания	431
Алгоритмы, основанные на методах параметрического спектрального анализа	432
Алгоритм, основанный на методе максимального правдоподобия	434
Тестирование следающего измерителя расстояния	436
Результаты тестирования алгоритма «предсказание»	437
Выводы	440
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	441
ПРИЛОЖЕНИЯ	445
<i>Приложение А. Весовые функции для гармонического анализа сигналов</i>	446
<i>Приложение Б. Аналитическое выражение для силы тока балансного преобразователя</i>	484
<i>Приложение В. Сокращения</i>	487
<i>Приложение Г. Список обозначений</i>	489
ЛИТЕРАТУРА	491

Разработана теория прецизионного измерения расстояния в ближней частотной радиолокации. Проанализированы традиционные методы обработки сигналов разностной частоты и рассмотрены варианты минимизации погрешности. Определена потенциальная точность при обработке сигнала разностной частоты методом максимального правдоподобия и рассмотрены особенности практического использования этого метода. Исследовано влияние нелинейности модуляционной характеристики и предложены алгоритмы минимизации погрешности. Показано влияние мешающих отражений и предложены алгоритмы минимизации их влияния. Разработаны вопросы организации практических измерений характеристик прецизионных измерителей и приведены результаты тестирования алгоритмов на сертифицированном измерительном стенде.

Для научных работников и инженеров, занимающихся проблемами измерения малых и сверхмалых расстояний. Может быть полезна аспирантам и студентам старших курсов радиотехнических специальностей.

ISBN 978-5-88070-326-5



9 785880 703265