

И. В. Комаров
С. М. Смольский

Основы теории радиолокационных систем с непрерывным излучением частотно-модулированных колебаний

Москва
Горячая линия - Телеком
2010

УДК 621.396.962.25
ББК 32.95
К63

Комаров И. В., Смольский С. М.

К63 Основы теории радиолокационных систем с непрерывным излучением частотно-модулированных колебаний. — М.: Горячая линия–Телеком, 2010. — 366 с.: ил.

ISBN 978-5-9912-0103-2.

Рассмотрены основы теории радиолокационных систем с непрерывным излучением и с частотной модуляцией колебаний (ЧМ РЛС), а также основы теории задающих генераторов ЧМ РЛС и излучающих ЧМ автодинов. Такие системы используются для самых разнообразных целей, но наиболее широкое применение они нашли в системах ближнего действия при расстояниях между взаимодействующими объектами от крайне небольших до нескольких километров.

Книга предназначена для научных работников и специалистов, знакомых с принципами действия радиолокационных систем и желающих изучить основы теории радиолокационных систем с непрерывным излучением и с частотной модуляцией колебаний, а также для специалистов, занимающихся теорией автоколебательных систем, в частности автодинного типа. Издание будет полезно аспирантам и студентам старших курсов при изучении указанных вопросов.

ББК 32.95

Адрес издательства в Интернет WWW.TECHBOOK.RU

Научное издание

Комаров Игорь Васильевич, Смольский Сергей Михайлович

Основы теории радиолокационных систем с непрерывным излучением частотно-модулированных колебаний

Редактор *Ю. Н. Чернышов*

Художник *В. Г. Ситников*

Компьютерная верстка *Ю. Н. Чернышова*

Подписано в печать 30.05.2009. Формат 60×90 1/16. Гарнитура Computer Modern.

Усл.-печ. л. 24,5. Тираж 1000 экз. (1-й завод 500 экз.). Изд. № 90103.

ISBN 978-5-9912-0103-2

© И. В. Комаров, С. М. Смольский, 2010

© Оформление издательства
«Горячая линия—Телеком», 2010

Предисловие

Настоящая книга издана в США издательством Artech House Publishers [1] в 2003 году. Главная причина этого хорошо знакома и понятна научным работникам, которые в период перестройки в нашей стране столкнулись с невозможностью издавать тематические научные монографии в России. Именно тогда подготовленный нами материал, основанный на многолетнем научном опыте авторов, был предложен указанному зарубежному издательству и был принят, подготовлен на английском языке и издан. Понимая, что главная цель авторов — познакомить со специфическим классом радиолокаторов ближнего действия именно отечественных специалистов, авторы специально предусмотрели легальную возможность последующего издания книги в России, что сейчас и делают, пользуясь изменившимися условиями издания научных монографий в России, в виде перевода американской книги с английского языка и с некоторыми дополнительными разъяснениями, необходимыми, на наш взгляд, российскому читателю.

В русский текст книги внесены небольшие изменения. Глава 6 американского издания, в которой подробно описывался метод символических укороченных уравнений С.И. Евтянова, практически неизвестный зарубежным специалистам, из российского издания удалена, поскольку этот материал прекрасно известен российскому читателю. Вместе с ней добавлен материал по задающим генераторам и автодинам со стабилизацией амплитуды колебаний (новая глава 10). Кроме того, учитывая, что в российской печати много внимания уделялось и уделяется автодинным устройствам, в текст главы 9 добавлен краткий обзор российских литературных источников по этому вопросу.

Перевод текста американской книги на русский язык осуществлялся под редакцией С.М. Смольского.

Нам очень приятно отметить, что в мире наша книга пользуется, как нам известно, популярностью и получает хорошие отзывы. Совершенно неожиданно для нас мы увидели в 2004 году рецензию на нее, опубликованную в одном из престижных журналов IEEE [2], подготовленную известным специалистом одного из университетов Финляндии. Рецензия подробно отражает интересные для американских

радиоспециалистов положительные и отрицательные стороны книги. Эти оценки представляются нам настолько интересными, что мы сочли целесообразным привести в русском издании точный перевод этой большой рецензии (Приложение 1) и рекомендуем читателям ее просмотреть.

Как отмечено в предисловии к американскому изданию книги, в нее вошла лишь небольшая часть обширного материала, полученного авторами при проведении многолетних научно-исследовательских работ в области ЧМ РЛС и ЧМ генераторов, в том числе и автодинов. Эти работы проводились на кафедрах радиоприемных устройств и формирования колебаний и сигналов Московского энергетического института (технического университета). Большинство работ выполнялось по соответствующим постановлениям Правительства в тесном взаимодействии с рядом НИИ, предприятиями промышленности и другими вузами. Таким образом, вся совокупность полученных результатов — это труд большого количества специалистов.

Поэтому нам бы хотелось добрым словом почтить память тех наших Учителей, наставников, коллег и помощников, которых, к сожалению, уже нет с нами — И.И. Бакулова, М.В. Благовещенского, А.И. Гасликова, И.М. Когана, Л.Я. Николаевой, Е.А. Магаюмова, Н.К. Свистова, В.И. Сифорова, Г.М. Уткина, А.И. Яровского и выразить нашу благодарность ныне здравствующим — А.А. Абдулкину, С.Л. Артеменкову, С.Н. Биккенину, В.М. Богачеву, В.Е. Дубровину, В.А. Иванову, Г.Г. Киле, В.Н. Кулешову, Л.Н. Лауту, В.Г. Лысенко, Т.И. Мамонкиной, С.А. Моросанову, М.И. Мусянкову, Ю.А. Нуждину, А.В. Попову, В.И. Плещееву, Ю.В. Пырсикову, Н.Н. Рыжову, М.А. Соловьеву, Л.С. Субботину*.

Мы рады, что российское издательство «Горячая Линия — Телеком» согласилось издать русский вариант книги, за что мы ему искренне благодарны, и теперь нам будет очень приятно, если заинтересованные российские читатели выскажут нам через издательство или напрямую вопросы, замечания и рекомендации по улучшению книги.

* Фамилии указаны в алфавитном порядке.

Оглавление

Предисловие.....	3
Предисловие к американскому изданию.....	5
Часть I. СТРУКТУРА И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЧМ РЛС И УСТРОЙСТВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ.....	15
Глава 1. Введение в технику ЧМ РЛС ближнего действия с непрерывным излучением.....	16
1.1. Краткая история.....	16
1.2. Классификация ЧМ РЛС ближнего действия.....	19
1.2.1. Радиовысотомеры малых и средних высот и датчики высоты.....	21
1.2.2. Уровнемеры.....	22
1.2.3. Дальномеры для геодезических измерений.....	24
1.2.4. Измерители малых перемещений.....	25
1.2.5. Навигационные ЧМ РЛС.....	27
1.2.6. Транспортные РЛС.....	28
1.2.7. Охранные системы.....	29
1.2.8. Датчики присутствия.....	29
Глава 2. Основы теории ЧМ РЛС ближнего действия .	31
2.1. Принцип действия и принципиальная структурная схема ЧМ РЛС.....	31
2.2. Типовые структурные схемы ЧМ РЛС ближнего действия.....	34
2.2.1. Схема с отдельными передающей и приемной антеннами и ненулевой промежуточной частотой ближнего действия.....	34
2.2.2. Схема с ненулевой промежуточной частотой и сложной частотной модуляцией.....	36
2.2.3. Схема с одной приемно-передающей антенной.....	36
2.2.4. Схема на автодине с одной приемно-передающей антенной.....	38
2.3. Общие выражения для излучаемого, отраженного и преобразованного сигналов.....	39

2.4. Преобразованный сигнал при модуляции периодической функцией. Общие соотношения	41
2.5. Преобразованный сигнал при модуляции суммой двух периодических функций (двойная частотная модуляция). Общие соотношения	45
2.6. Преобразованный сигнал при модуляции модулированной периодической функцией. Общие соотношения ...	47
2.7. Структурные схемы ультразвуковых ЧМ РЛС. Особенности преобразованного сигнала	48
Глава 3. Характеристики преобразованного сигнала при различных законах модуляции частоты передатчика	51
3.1. Гармоническая модуляция	51
3.1.1. Синусоидальная модуляция	51
3.1.2. Двойная синусоидальная модуляция	56
3.2. Линейная модуляция	57
3.2.1. Модуляция по закону несимметричной пилообразной функции	58
3.2.2. Модуляция по законам неравнобедренной и симметричной пилообразных функций	64
3.3. Дискретная модуляция	67
3.4. Влияние нелинейности модуляционной характеристики передатчика на параметры преобразованного сигнала	70
Глава 4. Способы интегральной обработки преобразованного сигнала	74
4.1. Влияние ПАМ излучаемого сигнала на работу приемника ЧМ РЛС	77
4.2. Способы уменьшения влияния сигнала ПАМ на работу приемника	80
4.3. Стабилизация девиации частоты	86
4.4. Частотная обработка преобразованного сигнала	90
4.4.1. Определение дальности путем подсчета числа нулей преобразованного сигнала за период модуляции	90
4.4.2. Измерение мгновенной частоты	93
4.4.3. Фиксация мгновенной частоты преобразованного сигнала	94
4.4.4. Использование девиации частоты преобразованного сигнала	96
4.4.5. Применение двойной синусоидальной модуляции	100
4.4.6. Одноантенный вариант при «нулевой» промежуточной частоте	103

4.4.7. Фиксация девиации частоты преобразованного сигнала	105
4.5. Фазовая обработка преобразованного сигнала	110
Глава 5. Способы спектральной обработки преобразованного сигнала	118
5.1. Разрешающая способность по дальности. Возможность ее увеличения	122
5.2. Обзор диапазона измеряемых дальностей	130
5.3. Спектральная обработка с использованием сигнала паразитной амплитудной модуляции	140
5.4. Использование для обработки отдельных составляющих спектра преобразованного сигнала	142
5.4.1. Формирование дискриминационной характеристики ..	142
5.4.2. Фазовая обработка отдельных составляющих спектра ..	145
Часть II. ПЕРЕДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА ЧМ РЛС ..	156
Глава 6. Анализ частотно-модулированных задающих генераторов методом символических укороченных уравнений	163
6.1. Метод символических укороченных уравнений для управляемых автоколебательных систем произвольного вида	164
6.2. Метод символических укороченных уравнений для автономных ЧМ систем	171
6.3. Примеры получения укороченных уравнений простейших ЧМ систем	175
6.3.1. Дифференциальное уравнение параллельного консервативного LC-контура с переменной емкостью и активным двухполюсником	175
6.3.2. Дифференциальное уравнение параллельного диссипативного LC-контура с переменной емкостью и активным двухполюсником	177
6.3.3. Укороченные уравнения задающих ЧМ генераторов при синусоидальной модуляции частоты	178
6.3.4. Укороченные уравнения задающих ЧМ генераторов при произвольном законе модуляции частоты	181
6.4. Укороченные уравнения преобразователя частоты с задающим ЧМ генератором	183
6.5. Краткие выводы	185
Глава 7. Паразитная модуляция	187
7.1. Изменение амплитуды выходного сигнала ЧМ ЗГ при дискретной перестройке частоты	188

7.2. Паразитная амплитудная модуляция в идеальных ЧМ контурах	195
7.3. ПАМ выходного сигнала в задающих ЧМ генераторах ближних РЛС	199
7.4. ПАМ при перестройке частоты варикапами	208
7.5. ПАМ в задающих генераторах при различных законах модуляции частоты	215
7.5.1. Случай синусоидальной модуляции частоты	216
7.5.2. Случай манипуляции частоты колебаний	217
7.5.3. Случай модуляции частоты колебаний по пилообразному закону по несимметричной форме	218
7.5.4. Случай модуляции частоты колебаний по симметричному пилообразному закону	218
7.6. Краткие выводы	219
Глава 8. Нелинейность модуляционной характеристики задающих ЧМ генераторов и ее линеаризация	222
8.1. Нелинейность зависимости частоты от управляющего напряжения на варикапе при больших перестройках	224
8.2. Нелинейные искажения при частотной модуляции с помощью варикапов	231
8.2.1. Нелинейные искажения при емкостной связи варикапа с контуром	232
8.2.2. Нелинейные искажения при автотрансформаторной связи варикапа с контуром	234
8.2.3. Нелинейные искажения в случае вырожденного контура при учете высокочастотного напряжения на варикапе	235
8.3. Линеаризация зависимости частоты задающего ЧМ генератора от модулирующего напряжения	237
8.4. Методика инженерного расчета диодно-резистивных корректирующих цепей	242
8.5. Уменьшение нелинейных искажений корректирующего сигнала	246
8.6. Краткие выводы	248
Глава 9. Теория одноконтурных ЧМ автодинов и оптимизация режима	250
9.1. Краткий обзор литературы по автодинным приемопередатчикам	251
9.2. Модель отраженного сигнала для одночастотного и ЧМ автодинов	259
9.3. Метод символических укороченных уравнений для ЧМ автодинных систем	265

9.4. Укороченные дифференциальные уравнения одноконтурного транзисторного автодина	266
9.5. Теория ЧМ автодинов для малых отраженных сигналов	272
9.5.1. Линеаризованные дифференциальные уравнения ЧМ автодинов для малых отраженных сигналов	272
9.5.2. Эквивалентные схемы ЧМ автодинов для малых отраженных сигналов	274
9.5.3. Форма и спектр выходного сигнала одночастотного ЧМ автодина	277
9.5.4. Форма и спектр высокочастотного сигнала ЧМ транзисторного автодина	283
9.6. Коэффициенты передачи ЧМ автодина по напряжению и току и оптимизация режима при наличии ПАМ	286
9.6.1. Случай безынерционного активного элемента	286
9.6.2. Случай высоких частот (инерционного активного элемента)	290
9.6.3. Выбор режима с высокой автодиной чувствительностью	291
9.7. Краткие выводы	292
Глава 10. Автодинные системы с цепями стабилизации амплитуды и с расширенной полосой перестройки	295
10.1. Задающий генератор со стабилизацией амплитуды и с трансформаторной связью с выходом	296
10.2. Проектирование простой стабилизирующей цепи	299
10.2.1. Методика расчета перестраиваемого ЗГ со стабилизирующей цепью	302
10.2.2. Устойчивость гармонических колебаний в автодине с цепью стабилизации режима	303
10.3. Автодинный режим ЧМ ЗГ с цепью стабилизации амплитуды	308
10.4. Краткие выводы	316
Глава 11. Автодинные режимы задающих генераторов при больших активных помехах	317
11.1. Общие свойства автодинных режимов одноконтурного синхронизированного автогенератора	319
11.1.1. Укороченные уравнения синхронизированного автогенератора	319
11.1.2. Укороченные уравнения в нормированных параметрах	320
11.1.3. Стационарные синхронные режимы	323
11.1.4. Переходные процессы при синхронизме	326
11.1.5. Бифуркационные диаграммы захваченного автодина ..	329