

УДК 621.396.96

ББК 32.95

С61

Рецензенты: доктор техн. наук, профессор *Ю. М. Перунов*, Институт динамики геосфер Российской Академии Наук; доктор техн. наук, профессор *А. М. Бородин*, ФГУП «ЦНИРТИ им. академика А. И. Берга»

Горбунов Ю. Н., Лобанов Б. С. Куликов Г. В.

С61 Введение в стохастическую радиолокацию. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2017. – 376 с.: ил.

ISBN 978-5-9912-0433-0.

Рассмотрены основы радиолокации, вопросы реализации когерентно-импульсных систем радиолокации и их компонентов – цифровых систем обнаружения и измерения параметров радиолокационных сигналов, систем селекции движущихся целей, обеспечивающих выделение полезных сигналов от целей на фоне коррелированных помех по доплеровским и угловым признакам (пространственным частотам). В отличие от традиционного изложения материала, упор сделан на стохастические методы обработки сигналов и информации.

Для студентов, обучающихся по специальности «Радиоэлектронные системы и комплексы», а также другим радиотехническим и инфокоммуникационным специальностям, при изучении дисциплин «Устройства приема и обработки сигналов», «Основы теории радиолокационных систем и комплексов», «Основы теории систем и комплексов радиоэлектронной борьбы», «Цифровая обработка сигналов», «Пространственно-временная обработка сигналов»; аспирантов и адъюнктов соответствующего профиля, специалистов.

ББК 32.95

Адрес издательства в Интернет WWW.TECHBOOK.RU

Все права защищены.

Любая часть этого издания не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения правообладателя

© ООО «Научно-техническое издательство «Горячая линия – Телеком»
www.techbook.ru

© Ю. Н. Горбунов, Б. С. Лобанов, Г. В. Куликов

Оглавление

| | |
|---|-----------|
| Введение | 3 |
| 1. Общие сведения о радиолокации | 5 |
| 1.1. Принципы радиолокации | 5 |
| 1.1.1. Определения | 5 |
| 1.1.2. Принципы и физические основы радиолокации. Поляризация сигналов | 10 |
| 1.1.3. Координаты целей, измеряемые РЛС | 14 |
| 1.2. Краткий обзор истории и применения радиолокации ... | 20 |
| 1.3. Применения и виды радиолокации | 22 |
| 1.4. Обобщенная структурная схема активной РЛС | 25 |
| 1.5. Рандомизация обработки радиолокационных сигналов . | 27 |
| 1.5.1. Понятие о рандомизированной обработке | 27 |
| 1.5.2. Примеры использования грубых отчетов сигналов и их рандомизации по методу Монте-Карло | 28 |
| 2. Вторичное излучение целей и эффективная площадь рассеяния | 35 |
| 2.1. Основные понятия и определения | 35 |
| 2.2. ЭПР целей, размеры которых значительно меньше дли- ны волны (релеевская область) | 39 |
| 2.3. ЭПР целей, размеры которых одного порядка с длиной волны (резонансная область) | 40 |
| 2.4. ЭПР сложных целей, больших по сравнению с длиной волны (высокочастотная область) | 42 |
| 2.4.1. Физические причины флуктуаций ЭПР | 42 |
| 2.4.2. Модели флуктуаций амплитуды эхо-сигналов и ЭПР | 43 |
| 2.4.3. Модель релеевских флуктуаций амплитуды | 45 |
| 2.4.4. Диаграмма вторичного излучения (рассеяния) сложной цели | 48 |
| 2.4.5. Корреляция флуктуаций амплитуд эхо-сигналов и ЭПР | 48 |
| 3. Параметры, характеристики и критерии эффектив- ности РЛС | 51 |
| 3.1. Тактические и технические характеристики РЛС | 51 |
| 3.1.1. Дальность действия и зона действия РЛС | 53 |

| | |
|--|-----------|
| 3.1.2. Характеристики обнаружения | 55 |
| 3.1.3. Чувствительность приемника РЛС | 56 |
| 3.1.4. Основное уравнение радиолокации | 57 |
| 3.1.5. Уравнение радиолокации для импульсного радара | 58 |
| 3.1.6. Точность и разрешающая способность РЛС | 59 |
| 3.2. Поиск целей | 70 |
| 3.2.1. Методы устранения координатной и доплеровской неопределенности | 70 |
| 3.2.2. Дискретизация пространства | 74 |
| 3.3. Общие рекомендации по выбору основных ТТХ РЛС .. | 77 |
| 3.3.1. Выбор диапазона | 77 |
| 3.3.2. Выбор составляющих энергopotенциала РЛС | 79 |
| 3.3.3. Выбор типа сигнала | 80 |
| 3.3.4. Выбор чувствительности и полосы пропускания радиоприемного устройства | 80 |
| 3.3.5. Выбор типа выходного устройства | 81 |
| 3.4. Классификация критериев эффективности | 81 |
| 3.4.1. Информационные критерии | 82 |
| 3.4.2. Мощностные (энергетические) критерии | 84 |
| 3.4.3. Точностные критерии | 86 |
| 3.4.4. Вероятностные критерии | 86 |
| 3.4.5. Оперативно-тактические критерии | 86 |
| 3.4.6. Экономические критерии | 86 |
| 3.4.7. Взаимосвязь критериев эффективности | 87 |
| 4. Основы теории обнаружения сигналов | 88 |
| 4.1. Постановка задачи обнаружения и условия ее решения | 88 |
| 4.1.1. Уточнение понятий | 88 |
| 4.1.2. Теория обнаружения | 89 |
| 4.1.3. Некоторые сведения из истории | 90 |
| 4.2. Возможные решения и критерии качества обнаружения | 93 |
| 4.2.1. Комбинации индикаторных переменных (ситуации) | 93 |
| 4.2.2. Понятие среднего риска | 94 |
| 4.2.3. Адаптивный обзор | 95 |
| 4.2.4. Понятие оптимального обнаружителя | 96 |
| 4.2.5. Оптимальный последовательный обнаружитель .. | 99 |
| 4.3. Модели сигнала и шума | 101 |
| 4.3.1. Модели сигнала | 101 |
| 4.3.2. Модель шума | 102 |

| | |
|---|-----|
| 4.4. Общий подход к задаче обнаружения сигнала (структура оптимальных обнаружителей) | 103 |
| 4.4.1. Вероятность ложных тревог и вероятность правильного обнаружения | 103 |
| 4.4.2. Отношение правдоподобия | 104 |
| 4.4.3. Оптимальный приемник | 105 |
| 4.5. Оптимальное обнаружение детерминированных сигналов | 106 |
| 4.5.1. Функционал отношения правдоподобия | 106 |
| 4.5.2. Достаточные статистики. Физический смысл корреляционного интеграла | 108 |
| 4.5.3. Анализ качества оптимального обнаружителя | 109 |
| 4.5.4. Комплексная форма функционала правдоподобия и оптимального алгоритма | 113 |
| 4.5.5. Алгоритмы обнаружения в частотной области | 114 |
| 4.6. Оптимальное обнаружение квазидетерминированных сигналов | 115 |
| 4.6.1. Детерминированные сигналы | 115 |
| 4.6.2. Обнаружение сигналов со случайными неинформативными параметрами | 116 |
| 4.6.3. Оптимальные алгоритмы обнаружения сигналов со случайной начальной фазой | 117 |
| 4.6.4. Оптимальные алгоритмы обнаружения сигналов со случайными начальной фазой и эффективным значением | 119 |
| 4.6.5. Показатели качества синтезированного оптимального обнаружителя сигналов со случайной начальной фазой | 121 |
| 4.6.6. Распределение вероятностей суммы сигнала и шума. Вероятность правильного обнаружения | 123 |
| 4.6.7. Показатели качества синтезированного оптимального обнаружителя сигналов со случайной фазой и эффективным значением | 125 |
| 4.7. Согласованная фильтрация — основная операция оптимального обнаружения сигнала на фоне белого шума при неизвестной дальности цели | 130 |
| 4.7.1. Многоканальный коррелятор для вычисления корреляционных интегралов при неизвестной дальности цели | 130 |
| 4.7.2. Согласованный фильтр. Частотная характеристика | 130 |

| | |
|---|------------|
| 4.7.3. Согласованный фильтр. Импульсная характеристика | 133 |
| 4.7.4. Отношение сигнал/шум на выходе согласованного фильтра | 134 |
| 4.7.5. Форма сигнала на выходе согласованного фильтра | 135 |
| 4.8. Обобщение задачи оптимального обнаружения для случайной рандомизации условий радиоприема | 136 |
| 4.8.1. Рандомизация параметров сигналов | 136 |
| 4.8.2. Рандомизация условий радиоприема | 137 |
| 4.9. Основные выводы по разделу 4 | 138 |
| 5. Основные положения теории цифровой стохастической обработки радиолокационных сигналов при использовании «грубых статистик» | 141 |
| 5.1. Теория пространственно-временного обнаружения радиолокационных сигналов, учитывающая эффекты дискретизации и квантования | 142 |
| 5.1.1. Обнаружение цели на фоне шума и помех | 142 |
| 5.1.2. Базовая теория обнаружения, учитывающая эффекты дискретизации и квантования сигналов.... | 144 |
| 5.1.3. Использование различий сигналов и помех..... | 148 |
| 5.2. Распирение границ применимости теории пространственно-временного обнаружения сигналов в условиях искусственной рандомизации грубых отсчетов..... | 150 |
| 5.2.1. Определение понятия «грубые статистики» | 150 |
| 5.2.2. Формулировка основного принципа линеаризации грубых статистик..... | 152 |
| 5.2.3. Использование метода Монте-Карло | 153 |
| 5.2.4. Формулировка нового подкласса задач теории обнаружения | 155 |
| 5.3. Стохастические решающие правила и использование грубой непараметрической статистики | 157 |
| 5.3.1. Стохастические критерии обнаружения сигналов . | 157 |
| 5.3.2. Рандомизация критерия обнаружения в импульсных РЛС | 162 |
| 5.3.3. Робастное непараметрическое обнаружение сигналов на основе обобщенно-весаового знакового критерия | 164 |
| 5.3.4. Робастные непараметрические обнаружители сигналов с рандомизацией критерия обнаружения ... | 168 |
| 5.4. Выводы по разделу 5 | 172 |

| | |
|--|-----|
| 6. Оптимальные методы измерения параметров сигнала | 173 |
| 6.1. Формулировка задачи оценки параметров сигнала | 173 |
| 6.2. Точечные оценки параметров сигнала и их свойства | 179 |
| 6.3. Эффективные оценки | 183 |
| 6.4. Основные положения теории статистических оценок | 189 |
| 6.5. Некоторые обобщения, относящиеся к оптимизации оценок | 192 |
| 6.6. Квантование распределений | 196 |
| 6.6.1. Аналого-цифровое преобразование сигналов как процесс стохастического оценивания и квантования распределений. Поправки Шепарда | 196 |
| 6.6.2. Способы квантования сигнала по уровню | 196 |
| 6.6.3. Квантование сигналов по уровню как процесс квантования распределений | 197 |
| 6.6.4. Аналого-цифровое преобразование как процесс стохастического оценивания | 198 |
| 7. Методы измерения координат, радиальной скорости цели и промаха | 204 |
| 7.1. Радиодальнометрия: методы измерения дальности | 207 |
| 7.1.1. Импульсный метод измерения дальности | 207 |
| 7.1.2. Фазовый метод измерения дальности | 216 |
| 7.1.3. Частотный метод измерения дальности | 220 |
| 7.1.4. Ошибки измерения дальности | 224 |
| 7.1.5. Следящие измерители дальности | 226 |
| 7.1.6. Потенциальная точность измерения дальности | 228 |
| 7.2. Углометрия: методы измерения угловых координат | 230 |
| 7.2.1. Использование амплитудной модуляции при определении направления | 230 |
| 7.2.2. Использование фазовой модуляции при определении направления | 232 |
| 7.2.3. Многоканальные пеленгаторы: моноимпульсный с суммарно-разностной обработкой и многобазовый | 233 |
| 7.2.4. Пеленгация методом анализа огибающих сигналов. Следящие измерители направления | 245 |
| 7.2.5. Потенциальная точность измерения угловых координат, ошибки измерения | 249 |
| 7.3. Измерение радиальной скорости | 251 |
| 7.3.1. Эффект Доплера | 251 |
| 7.3.2. Доплеровский частотомер | 256 |

| | |
|--|------------|
| 7.3.3. Потенциальная точность измерений скорости и ошибки измерений | 260 |
| 7.4. Измерение промаха | 261 |
| 7.4.1. Постановка задачи | 261 |
| 7.4.2. Описание метода и оценка его эффективности | 264 |
| 7.4.3. Сравнение с методом наименьших квадратов | 267 |
| 8. Системы селекции движущихся целей | 270 |
| 8.1. Общие вопросы построения систем СДЦ | 270 |
| 8.1.1. Структурная схема системы СДЦ | 271 |
| 8.1.2. Ограничения предельных возможностей | 274 |
| 8.2. Цифровые системы СДЦ | 278 |
| 8.2.1. Цифровая фильтрация | 279 |
| 8.2.2. Дискретное преобразование Фурье | 284 |
| 8.3. Анализ и синтез систем СДЦ | 286 |
| 8.3.1. Метод приведения небелого шума к белому | 286 |
| 8.3.2. Системы СДЦ на основе нерекурсивных цифровых фильтров | 288 |
| 8.3.3. Системы СДЦ на основе рекурсивных цифровых фильтров | 292 |
| 8.3.4. Системы СДЦ на основе многоканальных доплеровских фильтров | 293 |
| 8.3.5. Адаптивные системы СДЦ | 297 |
| 8.4. Особенности цифровой фильтрации сигналов по направлению с использованием понятия пространственных частот | 302 |
| 8.4.1. Использование понятия пространственных частот | 302 |
| 8.4.2. Технология DRFM-S и измерение пеленга | 304 |
| 8.4.3. Нарращивание апертуры окна пространственных выборок | 308 |
| 8.4.4. Некоторые обобщения | 309 |
| 8.4.5. Выявление особенностей построения процессора ПВ обработки сигналов, измеряющего частоту и направление приема сигналов, с использованием технологии DRFM-S | 310 |
| 8.4.6. Измерение пеленга | 311 |
| 8.4.7. Выбор разрядности АЦП | 313 |
| 8.4.8. Реализация антенных устройств | 314 |
| 8.4.9. Обобщение | 314 |
| 9. Принцип неопределенности в радиолокации | 316 |

| | |
|---|-----|
| 9.1. Тела неопределенности при использовании сигналов большой длительности | 316 |
| 9.1.1. Оптимальная обработка когерентных сигналов большой длительности | 318 |
| 9.1.2. Двумерная автокорреляционная функция сигнала | 323 |
| 9.1.3. Влияние вида двумерной автокорреляционной функции на обнаружение, измерение параметров и разрешение сигналов | 328 |
| 9.1.4. Тела неопределенности радиоимпульсов без внутриимпульсной модуляции | 332 |
| 9.1.5. Тела неопределенности радиоимпульсов с линейной частотной модуляцией. Приложение к спектральному анализу | 335 |
| 9.1.6. Тела неопределенности когерентных пачек радиоимпульсов | 339 |
| 9.2. Радиолокация при использовании шумоподобных стохастических сигналов | 342 |
| 9.2.1. Рельеф тела неопределенности шумоподобного сигнала | 342 |
| 9.2.2. Обработка импульсных непрерывных и длинноимпульсных сигналов | 344 |
| 9.2.3. Обработка шумоподобных сигналов в режиме слежения | 348 |
| 9.3. Устранение эффектов дискретизации и квантования в РЛС с ФАР | 350 |
| 9.3.1. Построение цифровых режекторных фильтров и компенсаторов помех по частоте и направлению .. | 351 |
| 9.3.2. Разрядность весовых коэффициентов цифровых фильтров | 355 |
| 9.3.3. Критерии качества | 355 |
| 9.3.4. Учет квантования ВК | 356 |
| 9.3.5. Изменение условий квантования ВК при увеличении порядка ЦРФ | 357 |
| 9.3.6. Квазилинейные обрабатывающие тракты в ФАР с ПВ обработкой сигналов | 357 |
| 9.3.7. Формирование знаковой статистики | 358 |
| 9.3.8. Моделирование амплитудного джиттера | 359 |
| 9.3.9. Уровень боковых лепестков | 360 |
| Заключение | 362 |
| Список сокращений | 363 |
| Литература | 366 |