621.396.9
Н76

В. В. ГРУЗДОВ, Ю. В. КОЛКОВСКИЙ,
А. В. КРИШТОПОВ, А. И. КУДРЯ

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

Содержание

Введение 12
Литература к введению 18
Сокращения 19

Глава 1
Технический облик современных радиолокационных комплексов для дистанционного зондирования земли из космоса 21

1.1. Структура радиолокационного комплекса для дистанционного зондирования Земли из космоса. Требования к его составным частям 21
1.1.1. Структура радиолокационного комплекса ДЗЗ 21
1.1.2. Бортовая аппаратура РСА — программируемая многорежимная система с цифровым управлением . 23
1.1.3. АФАР — фундамент многорежимного космического РСА 25
1.1.4. Оценка перспектив создания АФАР космического базирования с цифровым формированием луча 32
1.1.5. Требования к приемопередающей аппаратуре РСА . 33
1.1.6. Требования к блоку управления РСА 38
1.1.7. Требования к бортовому комплексу управления космического аппарата в части взаимодействия с РСА. 40
1.2. Перспективы интегрирования и унификации космических радиолокационных систем ДЗЗ 45
1.3. Использование бистатических комплексов РСА для получения цифровых моделей рельефа земной поверхности 51
1.4. Калибровка современных комплексов РСА 55
1.4.1. Задачи калибровки 55
1.4.2. Процедуры калибровки и достигнутые результаты .. 56
1.5. Перспективы создания сверхширокополосных и многодиапазонных РСА 62
1.5.1. Пути и особенности построения сверхширокополосных РСА 62
1.5.2. Технический облик многодиапазонных РСА 73
Литература к главе 1 84

Глава 2
Современные тенденции проектирования АФАР космического базирования 87

2.1. Технический облик современной АФАР для РСА ДЗЗ... 87
2.1.1. Особенности построения антенных систем для РСА ДЗЗ..... 87
2.1.2. Структурная схема АФАР с полным поляризационным приемом 90
2.1.3. Антенное полотно АФАР. Определение числа каналов и размера апертуры 95
2.1.4. Энергетический потенциал на передачу и параметр качества приема АФАР 103
2.2. Приемопередающие модули и система управления лучом АФАР..... 106
2.2.1. Приемопередающий модуль. Принципы построения 106
2.2.2. Принципы построения системы управления лучом АФАР..... 109
2.3. Многоканальная распределительная система. Системы питания, охлаждения и функционального контроля 115
2.3.1. Принципы построения распределительной системы СВЧ-сигналов..... 115
2.3.2. Связь параметров АФАР с параметрами сквозного приемного тракта РСА..... 118
2.3.3. Принципы построения системы электропитания, охлаждения и функционального контроля 120
2.4. Внутренняя радиометрическая калибровка АФАР..... 126
2.4.1. Принципы внутренней радиометрической калибровки АФАР 126
2.4.2. Внутренняя калибровка АФАР «EnviSat/ASAR» 128
2.4.3. Внутренняя калибровка АФАР «TerraSAR-X»..... 130
2.4.4. Внутренняя калибровка АФАР «Sentinel-1» 135
2.4.5. Использование данных внутренней радиометрической калибровки АФАР..... 137
2.5. Современные методы производства и измерения характеристик АФАР 138
2.5.1. Обзор современных технологий производства элементов АФАР 138
2.5.2. Методы и средства измерений основных технических параметров АФАР..... 142
Литература к главе 2..... 153

Глава 3
Методы создания перспективной СВЧ-электроники для радиоэлектронных комплексов 156

3.1. Современные тенденции создания СВЧ-электроники для радиоэлектронных комплексов и систем 156
3.2. Критерии эффективности создания СВЧ-электроники для радиоэлектронных комплексов и систем 162
3.3. Единый технологический маршрут создания бортовых радиоэлектронных комплексов 167
3.4. Оптимизация конструкции и технологии нитрид-галлиевой СВЧ-электроники для обеспечения характеристик перспективных радиолокационных комплексов для дистанционного зондирования Земли 171
Литература к главе 3 190

Глава 4
СВЧ-аппаратура на нитрид-галлиевых СВЧ-приборах 194

4.1. СВЧ-транзисторные усилители мощности радиолокационных систем с импульсными зондирующими сигналами 194
4.2. СВЧ-формирователи сложных сигналов 199
4.3. Малошумящие СВЧ-усилители для приемопередающих модулей АФАР 205
4.4. Фазовращатели для приемопередающих модулей АФАР 209
4.5. Влияние шумов активного СВЧ-прибора на формирование спектральной плотности шума стабильных СВЧ-генераторов 215
Литература к главе 4 233

Глава 5
Комплексная методика расчета параметров радиолокационной съемки с помощью космического РСА 236

5.1. Системы координат, используемые при расчетах параметров радиолокационной съемки в космических системах ДЗЗ 236
5.1.1. Орбиты спутников дистанционного зондирования Земли 236
5.1.2. Геоцентрическая гринвичская система координат 238
5.1.3. Антенная и визирная системы координат, используемые при расчете параметров радиолокационной съемки 239

5.1.4. Двумерная радиолокационная система координат ... 243
5.1.5. Системы координат РЛИ, привязанные к земной поверхности ... 244
5.2. Геометрические параметры съемки в визирной плоскости 245
5.3. Полоса обзора и полоса захвата ... 250
5.3.1. Полоса обзора ... 250
5.3.2. Полоса захвата ... 251
5.4. Параметры РСА, связанные с параметрами движения и ориентации КА ... 253
5.4.1. Путевая скорость космического аппарата ... 253
5.4.2. Скорость перемещения следа луча антенны РСА по поверхности Земли ... 253
5.4.3. Ширина доплеровского спектра отраженного сигнала 255
5.4.4. Стандартный и «скошенный» боковые обзоры ... 258
5.5. Параметры электронного сканирования луча АФАР ... 260
5.5.1. Параметры электронного сканирования луча АФАР в режиме маршрутной съемки ... 260
5.5.2. Расчет параметров электронного сканирования луча АФАР в режиме детальной съемки ... 261
5.5.3. Расчет параметров электронного сканирования луча АФАР в режиме обзорной съемки ... 264
5.6. Временные характеристики радиолокационной съемки .. 267
5.6.1. Повторяемость и оперативность радиолокационной съемки ... 267
5.6.2. Принципы расчета периода (частоты) повторения зондирующих импульсов ... 271
5.6.3. Расчет максимально допустимого периода повторения зондирующих импульсов по критерию подавления помех неоднозначности по азимуту ... 272
5.6.4. Расчет минимально допустимого значения периода повторения зондирующих импульсов ... 274
5.6.5. Расчет периода повторения зондирующих импульсов по критерию временной селекции отражений от области надира ... 276
5.6.6. Расчет периода повторения зондирующих импульсов по критерию подавления рекуррентных помех .. 278
5.6.7. Ограничения на скважность зондирующих импульсов РСА ... 281
5.6.8. Алгоритм комплексного расчета периода повторения зондирующих импульсов ... 282
5.6.9. Длительности сеансов радиолокационной съемки и интервалов между сеансами ... 283
5.7. Расчет информационных потоков на выходе РСА ... 284

Литература к главе 5 286

Глава 6
Комплексная методика расчета параметров качества радиолокационных изображений, получаемых с помощью космического РСА 288

6.1. Система параметров качества радиолокационных изображений 288
6.2. Пространственное разрешение РСА 289
6.2.1. Пространственное разрешение по координате угла места 289
6.2.2. Пространственное разрешение по координате азимута 290
6.2.3. Влияние атмосферы Земли на пространственное разрешение РСА 293
6.3. Радиометрическая чувствительность РСА 295
6.3.1. Отношение сигнал/шум в элементе пространственного разрешения 295
6.3.2. Радиометрическая чувствительность РСА по однородному фону земной поверхности 299
6.3.3. Коэффициент энергетических потерь и его составляющие 299
6.3.4. Энергетические потери сигнала РСА в атмосфере Земли. Ослабление сигнала РСА в атмосферных газах 300
6.3.5. Коэффициент энергетических потерь, возникающих при электронном сканировании луча АФАР 304
6.3.6. Коэффициент энергетических потерь, возникающих за счет модуляции пачки принимаемых сигналов азимутальной диаграммой направленности антенны в течение времени синтеза апертуры РСА 305
6.3.7. Порядок расчета радиометрической чувствительности РСА 307
6.3.8. Влияние корреляционного шума зондирующего сигнала на радиометрическую чувствительность РСА 308
6.4. Радиометрический профиль и радиометрическая коррекция радиолокационного изображения 310
6.4.1. Расчет радиометрического профиля РЛИ в режиме маршрутной съемки 311
6.4.2. Расчет радиометрического профиля РЛИ в режиме детальной съемки 313

6.4.3. Расчет радиометрического профиля РЛИ в режиме обзорной съемки 316
6.4.4. Радиометрическая коррекция радиолокационного изображения и ее влияние на показатели радиометрической чувствительности и динамического диапазона РЛИ 320
6.5. Радиометрическое разрешение 323
6.5.1. Статистические характеристики отраженных сигналов от однородной земной поверхности. Спекл-шум и его параметры 323
6.5.2. Влияние некогерентных накоплений на контраст спекл-шума 326
6.5.3. Определение и расчет радиометрического разрешения РСА 327
6.5.4. Влияние корреляционного шума зондирующего сигнала на радиометрическое разрешение РСА 329
6.6. Динамический диапазон радиолокационного изображения 329
6.6.1. Определение и условия расчета динамического диапазона РЛИ 329
6.6.2. Расчет динамического диапазона РЛИ естественных земных покровов 332
6.6.3. Расчет отрицательного контраста в задаче обнаружения локальных провалов УЭПР 333
6.6.4. Расчет динамического диапазона РЛИ, включающих локальные отражатели с высокими значениями ЭПР 335
6.6.5. Динамический диапазон сигнала на входе АЦП приемника РСА. Выбор числа разрядов АЦП 337
6.7. Точность передачи отрицательного радиоконтраста на границах резкого перепада УЭПР. Влияние корреляционного шума 343
6.8. Абсолютная радиометрическая точность передачи значений УЭПР земной поверхности 346
6.8.1. Точность передачи динамического диапазона УЭПР 346
6.8.2. Относительная и абсолютная радиометрические шкалы УЭПР РСА 347
6.8.3. Калибровка радиометрической шкалы РСА 350
6.9. Точность передачи поляризационной картины отражений от земных покровов 352
6.10. Относительный уровень помех за счет неоднозначности по дальности 354
6.11. Относительный уровень помех за счет неоднозначности по азимуту 356

6.12. Точность воспроизведения на РЛИ заданных границ объектов съемки 357
6.13. Точность передачи геометрических характеристик наземных объектов 359
6.14. Точность определения географических координат отдельных объектов, выбранных на радиолокационных изображениях 362
6.14.1. Координатная сетка радиолокационного изображения 362
6.14.2. Составляющие ошибок измерения координат 364
6.14.3. Смещение радиолокационной координатной сетки за счет влияния атмосферной рефракции 367
6.14.4. Оценка суммарной ошибки определения координат объектов на радиолокационных изображениях 368
6.15. Оценка качества радиолокационного изображения по функции отклика РСА на точечную цель 369
Литература к главе 6 374

Глава 7
Улучшение качества радиолокационных изображений путем перехода на когерентные ансамбли дискретно-кодированных зондирующих сигналов 377

7.1. Система параметров зондирующих сигналов РСА 377
7.1.1. Общие подходы к выбору сигналов для РСА 377
7.1.2. Зависимость комплекса параметров качества РЛИ от параметров зондирующих сигналов РСА. Рекомендации по численным параметрам сигналов, влияющим на качество РЛИ 378
7.1.3. Условия соблюдения сквозной когерентности сигналов РСА 380
7.1.4. Импульсный радиосигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) 381
7.1.5. Импульсный сигнал с фазокодовой бинарной модуляцией (ФКМ) 383
7.1.6. Сравнительные характеристики ЛЧМ и ФКМ-сигналов 386
7.1.7. Временные характеристики зондирующих и принимаемых сигналов 388
7.1.8. Спектральные характеристики зондирующих сигналов 390

7.1.9. Необходимая частота выборок АЦП, установленного на выходе приемного тракта РСА 393
7.2. Корреляционные характеристики одиночных зондирующих сигналов 395
7.2.1. Автокорреляционная функция ЛЧМ-сигнала 395
7.2.2. Взаимнокорреляционная функция ЛЧМ-сигнала 398
7.2.3. Автокорреляционная функция ФКМ-сигнала 401
7.2.4. Взаимнокорреляционные функции одиночных пар ФКМ-сигналов с разными номерами генерирующих полиномов 403
7.3. Функции неопределенности одиночных зондирующих сигналов 404
7.3.1. Свойства функции неопределенности 404
7.3.2. Функция неопределенности одиночного ЛЧМ-сигнала 406
7.3.3. Функция неопределенности ФКМ-сигналов 408
7.4. Корреляционные функции когерентных ансамблей зондирующих сигналов 413
7.4.1. Когерентные ансамбли зондирующих сигналов 413
7.4.2. Когерентные ансамбли ЛЧМ-сигналов 414
7.4.3. Когерентные ансамбли M-последовательностей 414
7.4.4. Суммарные корреляционные функции ансамбля M-последовательностей 416
7.4.5. Свойства ансамблей из M-последовательностей с постоянными параметрами 417
7.4.6. Свойства ансамблей из M-последовательностей с постоянными параметрами и переменной инверсией кодов 419
7.4.7. Свойства ансамблей из M-последовательностей с переменным номером генерирующего полинома 420
7.4.8. Свойства ансамблей из M-последовательностей с циклическими сдвигами 425
7.4.9. Свойства ансамблей из M-последовательностей с циклическими сдвигами и переменной инверсией 430
7.4.10. Условия эффективности использования операции переменного инвертирования модулирующих кодов для подавления рекуррентных помех 431
7.4.11. Особенности формирования радиолокационных изображений в присутствии рекуррентных помех ... 437
7.5. Алгоритмы формирования когерентных ансамблей зондирующих радиоимпульсов с фазокодовой модуляцией, обеспечивающие кардинальное снижение помех, связанных с корреляционными шумами 439

7.5.1. Общие принципы формирования блочных ансамблей ФКМ-сигналов 439
7.5.2. Алгоритм формирования блочного ансамбля без использования операции инвертирования МП 440
7.5.3. Алгоритм формирования блочного ансамбля с использованием операции переменного инвертирования M-последовательностей 444
7.6. Примеры ансамблей ФКМ-сигналов для использования в разных режимах космических РСА дистанционного зондирования Земли 446
7.6.1. Пример ансамбля зондирующих ФКМ-сигналов для режима детальной съемки 446
7.6.2. Пример ансамбля зондирующих ФКМ-сигналов для режима маршрутной съемки 451
7.6.3. Пример ансамбля зондирующих ФКМ-сигналов для режима обзорной съемки 456
Литература к главе 7 460

Приложение 1
Специальные термины и определения, используемые при проектировании космических РСА 462