



М И Р наук о земле

В.В. Груздов,
Ю.В. Колковский,
А.В. Криштопов,
А.И. Кудря

Новые технологии
дистанционного зондирования
Земли из космоса

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2018

УДК 528.8
ББК 32.85
Г90

Рецензенты:

К.Л. Енишерлова – д.т.н, начальник лаборатории АО «НПП «Пульсар».

Е.Ф. Певцов – к.т.н, доцент, Директор Центра проектирования интегральных схем нанoeлектроники и микроелектроники МТУ (МИРЭА).

Г90 Груздов В.В., Колковский Ю.В., Криштопов А.В., Кудря А.И.
Новые технологии дистанционного зондирования Земли из космоса
Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 482с. ISBN 978-5-94836-502-2

Зондирование поверхности Земли с применением когерентных радиолокационных систем разных частотных диапазонов, размещенных на космических аппаратах, выгодно отличается от других средств видового мониторинга земной поверхности и расположенных на ней объектов.

В книге последовательно рассматриваются: технический облик современных радиолокационных комплексов для дистанционного зондирования Земли из космоса, современные тенденции проектирования АФАР космического базирования, современные тенденции создания элементной базы для РСА космического базирования, СВЧ аппаратура на нитрид-галлиевых приборах, комплексные методики расчетов параметров радиолокационной съемки и параметров качества радиолокационных изображений с помощью космического РСА, методы улучшения качества радиолокационных изображений путем перехода на когерентные ансамбли дискретно-кодированных зондирующих сигналов.

Расчеты параметров РСА и РЛИ проводятся в книге на основе комплексного подхода, который увязывает их с орбитальными параметрами космического аппарата–носителя РСА, с учетом влияния сферичности Земли и ее вращения, с учетом влияния параметров атмосферы, характеристик антенны РСА, а также отдельных процедур наземной обработки радиолокационной информации.

УДК 528.8
ББК 32.85

© 2018, Груздов В.В., Колковский Ю.В., Криштопов А.В., Кудря А.И.
© 2018, АО РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-502-2

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.	Взаимкорреляционная функция ЛЧМ-сигнала	398
7.2.3.	Автокорреляционная функция ФКМ-сигнала	401
7.2.4.	Взаимкорреляционные 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

Специальные термины и определения, используемые при проектировании космических РСА	462
--	-----

Введение

Историю практического применения космических средств радиолокационного зондирования земной поверхности из космоса и получения радиолокационных изображений открыл американский космический аппарат SEASAT, выведенный на орбиту вокруг Земли в июне 1978 г. Радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА), работающий в L -диапазоне, позволил получить изображения земной поверхности с пространственным разрешением 25 м.

Параллельно в Советском Союзе велась подготовка к запуску орбитальной пилотируемой станции «Алмаз-А», разработанной в ОКБ-52 (впоследствии переименованным в Научно-производственное объединение машиностроения) под руководством главного конструктора академика В.Н. Челомея. Станция «Алмаз-А», подготовленная к запуску в марте 1978 г., имела в своем составе радиолокатор с синтезированной апертурой «Меч-К», работающий в S -диапазоне, для получения радиоизображений земной поверхности с пространственным разрешением 25 м. Однако по решению руководства страны запуск станции в 1978 г. был отменен. Летные испытания РСА «Меч-К» удалось провести на космическом аппарате «Космос-1870» лишь в 1987–1989 гг.

Первые результаты практического успешного картографирования поверхности планеты с орбиты ее спутника в истории отечественной техники были, как ни странно, получены не на земной орбите, а на орбите планеты Венера, покрытой очень плотной, непроницаемой для оптических инструментов атмосферой. Съемка была проведена с советских космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16» с помощью радиолокаторов с синтезированной апертурой в течение 1983–1984 гг. [В.1]. Полученные радиоголограммы были переданы на наземные станции приема информации и в течение последующих трех лет обработаны с целью получения изображений поверхности планеты. Вдохновителем этой титанической по объему работы был академик В.А. Котельников. Космические аппараты создали в научно-исследовательском центре имени Г.Н. Бабакина. Радиолокационную систему с синтезированной апертурой разработали в Особом конструкторском бюро Московского энергетического института под руководством академика А.Ф. Богомолова. Съемка осуществлялась в S -диапазоне (длина волны около 8 см) с высоты от 1000 до 2000 км над поверхностью планеты. На Земле для приема и регистрации информации использовались две крупнейшие в Советском Союзе антенны. Одна — с диаметром зеркала 70 м — под Евпаторией, другая — с диаметром зеркала 64 м — на полигоне Медвежьи озера под Москвой. Обработка радиолокационной

информации проводилась в Институте радиотехники и электроники АН СССР под руководством Котельникова. Достигнутое значение пространственного разрешения было около 1 км. При этом использовался математический аппарат, разработанный в Институте прикладной математики имени М.В. Келдыша. Сжатие траекторного сигнала производилось с помощью когерентного оптического процессора, остальные операции выполнялись на электронных цифровых вычислительных машинах. В 1987 г. было закончено построение полной карты части территории Венеры [В.2, В.3]. Площадь снятой территории составила четвертую часть от общей площади поверхности Венеры. Американцы смогли осуществить радиолокационную съемку Венеры с помощью космической станции «Магеллан» только в 1989–1990 гг. Дальнейшая история развития технологии радиолокаторов с синтезированной апертурой для дистанционного зондирования Земли из космоса подробно рассмотрена в публикациях [В.4, В.5, В.6].

Зондирование поверхности Земли с применением когерентных радиолокационных систем разных частотных диапазонов, размещенных на космических аппаратах (КА), выгодно отличается от других средств видового мониторинга земной поверхности и расположенных на ней объектов:

- более высоким потенциальным пространственным разрешением при условии независимости от метеорологических условий и от условий освещения снимаемого района солнцем;
- возможностью регистрации объектов, расположенных под снежным, растительным или земным покровом;
- возможностью определять состояние растительных покровов (лесов, посевов) и обеспечивать оценки биоресурсов;
- возможностью регистрации по поверхностным проявлениям глубинных процессов в водной среде и геологических образованиях;
- возможностью использования разных поляризационных конфигураций излучаемого и принимаемого сигналов;
- способностью обнаруживать движущиеся объекты на поверхности и измерять параметры их движения;
- возможностью совместно обрабатывать пары (или группы) комплексных радиолокационных изображений, полученных в разное время или одновременно на разных космических аппаратах, образующих интерферометрическую пару, с дальнейшим построением цифровых карт рельефа местности с разрешением по высоте 1–5 м либо выявлять тектонические смещения элементов земной поверхности за несколько лет с ошибкой не более 1 мм.

В последние два десятилетия параллельно с динамичным развитием СВЧ микроэлектроники, методов цифрового формирования и обработки радиолокационных сигналов, а также других передовых технологий наблюдается повышенный интерес многих стран к космическим РСА, которые позволяют реализовать все вышеперечисленные возможности. Наблюдается масштабный рост рынка ДЗЗ в целом ряде стран Европы, Америки и Азии. В ближайшее десятилетие тенденция роста рынка сохранится, а темпы роста значительно увеличатся. Помимо роста числа запущенных КА, на 50% вырастет число участников рынка ДЗЗ. По оценкам специалистов, к 2018 г. на рынок ДЗЗ выйдут 34 страны, по сравнению с 24 странами в 2008 г. и всего восемью в 1997 г. При этом только вышедшие на рынок ДЗЗ страны будут осуществлять 32% всех запусков к 2018 г. по сравнению с 15% запусков, осуществленных за период до 2008 г. [В.7].

В этом процессе можно выделить следующие основные тенденции, касающиеся радиолокационных средств ДЗЗ.

1. Антенные системы для современных РСА в большинстве случаев проектируются на основе технологии активных антенных фазированных антенных решеток (АФАР), которые обеспечивают высокий энергетический потенциал радиолокатора и одновременно высокую надежность передающего и приемного трактов, большую гибкость в задании геометрических, поляризационных конфигураций, высокоточное и безынерционное сканирование луча и разнообразие режимов работы. С 2000 г. практически все эксплуатируемые в космосе РСА построены на основе АФАР (исключение составляют «SAR-Lure» и «TecSAR»). В ближайшей перспективе возможно создание многолучевых АФАР с цифровыми методами формирования лучей. Космический РСА с АФАР представляет собой сложное, многорежимное и многопараметрическое устройство, для управления составными частями которого все в большей степени привлекаются сетевые цифровые технологии адресного управления. Например, АФАР, имеющая 1000 независимо фазуемых приемопередающих каналов, может иметь более 6000 контроллеров для управления СВЧ-фазовращателями, аттенюаторами и линиями задержки, управляющая информация в которые должна передаваться около 100 раз в секунду. Современный тракт формирования зондирующих сигналов строится на основе цифровых технологий, а приемный тракт заканчивается аналого-цифровыми преобразователями и программируемым формирователем кадра радиолокационной информации, суммарный поток которой достигает на выходе РСА 5 Гбит/с (при использовании двухканального поляризационного приемного тракта). Таким образом, бортовая аппаратура современного РСА является программируемой системой с цифровым управлением,

что дает возможность оперативно изменять конфигурацию аппаратуры, режимы и параметры радиолокационной съемки. Преимущества АФАР в РСА, предназначенных для дистанционного зондирования земной поверхности из космоса, и особенности системы сетевого управления бортовой аппаратурой раскрываются в главе 1, а современные тенденции проектирования АФАР для РСА подробно рассмотрены в главе 2 книги.

2. Помимо крупноразмерных РСА, размещаемых на крупногабаритных космических платформах и имеющих массу несколько тонн, находятся в эксплуатации и малые РСА с массой космического аппарата менее полутора тонн («TecSAR» 0,3 т, «SAR-Lupe» 0,77 т, «Кондор-Э» 1,1 т, «TerraSAR-X» 1,2 т, «KOMPSAT-5» 1,4 т, «COSMO-SkyMed» 1,7 т). Одной из причин, открывающих возможности снижения массы космических РСА, является переход на более эффективные технологии создания интегральных полупроводниковых элементов как СВЧ-диапазона, так и предназначенных для цифровых устройств. Этим вопросам посвящены главы 3 и 4 книги.

3. Существующие и вновь создаваемые системы радиолокационного наблюдения трансформируются в бистатические комплексы либо путем увеличения группировки КА («TanDEM-X»), либо созданием новых систем, с самого начала ориентированных на групповое использование в интерферометрических парах [В.8].

4. Все большую ценность приобретают радиолокационные изображения, полученные в разных поляризационных конфигурациях. Это свойство РСА, базирующееся на когерентном характере зондирующего сигнала, и конструкции антенны, позволяющей работать как на горизонтальной (H), так и на вертикальной (V) поляризации, предоставляет серьезное преимущество радиолокационным системам перед оптическими с тем же показателем пространственного разрешения. Вновь создаваемые многоцелевые РСА (например, «ALOS-PALSAR») проектируются с двумя поляризационными каналами в приемном тракте, что позволяет в одном сеансе съемки одного и того же объекта и без дополнительных потерь энергии получать пары радиолокационных изображений со следующими комбинациями поляризаций на передачу и прием: $[H/H + H/V]$ или $[V/H + V/V]$.

5. Каждое новое поколение РСА отличается улучшением показателей пространственного разрешения. Если первый космический РСА «SEASAT-SAR», работавший в L -диапазоне, имел пространственное разрешение 25 м (по координате дальности), то «ALOS-PALSAR» в том же диапазоне радиочастот имеет пространственное разрешение 9 м. В X -диапазоне радиочастот РСА «TerraSAR-X» и «COSMO-SkyMed» достигли пространственного разрешения 1 м, а РСА «TecSAR» показал возможность получения разрешения и 0,5 м.

6. Некоторые задачи ДЗЗ выдвигают требования от космических РСА воспроизведения шкалы радиояркостей радиолокационных изображений с заданной метрологической точностью ее соответствия реальным значениям удельной эффективной отражающей поверхности (УЭПР). Это требование влечет за собой необходимость включения в бортовую аппаратуру РСА элементов абсолютной радиометрической калибровки всех радиочастотных трактов и каналов, а также включения в космическую радиолокационную систему средств внешней радиометрической калибровки РСА. Основными техническими решениями внутренней калибровки, закладываемыми в аппаратуру современных РСА («EnviSat-ASAR», «TerraSAR-X», «COSMO-SkyMed»), являются: введение дополнительных элементов контроля и отвода мощности на выходе приемопередающих модулей АФАР в канал калибровки, наличие дополнительной СВЧ-кабельной распределительной системы калибровочного сигнала в АФАР, наличие в составе приемопередающей аппаратуры РСА устройств формирования, поканального переключения и измерения параметров калибровочных сигналов. Достигнутые высокие точностные характеристики процесса внутренней калибровки показаны, в частности, в работе [В.9].

7. Увеличивается запрос на создание многодиапазонных космических РСА. До настоящего времени имеются результаты опытной эксплуатации только одного варианта многодиапазонного РСА космического базирования — это КА «SIR-C/X/L», выведенный на орбиту в 1994 г. Имелись и незавершенные отечественные проекты многодиапазонных космических РСА: «АЛМАЗ-1Б-С/X/L» [В.4] и «АРКОН-2-Х/L/P» [В.10]. Исследования, проведенные в ФГУП ЦНИИмаш, показали, что в результатах одновременного многочастотного зондирования Земли заинтересован широкий спектр ведомств, региональных администраций, отраслей промышленности. Высокая целевая отдача от применения радиолокационных данных, полученных в нескольких, существенно разнесенных диапазонах (X , L и P), подтверждена в процессе использования авиационных аналогов многочастотных космических радиолокаторов (как зарубежных, так и отечественных). Проникающая способность и ряд других особенностей взаимодействия длинноволнового излучения с зондируемыми объектами позволяют получать о них ценную дополнительную информацию и исключить неоднозначность интерпретации результатов ДЗЗ, которая имеет место во многих приложениях.

8. Возрастают требования к тактико-техническим характеристикам космических радиолокационных систем и параметрам качества радиолокационных изображений. Назрела задача систематизации методик расчета параметров радиолокационной съемки из космоса

и априорной оценки параметров качества РЛИ, получаемых в результате этой съемки. К сожалению, в отечественной литературе внимание, уделяемое этим проблемам, недостаточное. Существующий пробел в некоторой степени устраняется главами 5 и 6 настоящей книги. Расчеты параметров РСА и РЛИ проводятся в книге на основе комплексного подхода, который увязывает их с орбитальными параметрами космического аппарата-носителя РСА с учетом влияния сферичности Земли и ее вращения, параметров атмосферы, характеристик антенны РСА, а также отдельных процедур наземной обработки радиолокационной информации. Следует отметить, что расчетные схемы и формулы, приводимые в книге, игнорируют многие тонкие эффекты космической радиолокации и ориентированы на наглядность и относительную простоту использования в основном на этапе эскизного проектирования, поэтому их точность в большинстве случаев не превышает $1 \div 3\%$.

9. Прогнозируется переход от аналоговых зондирующих сигналов к когерентным ансамблям фазокодированных сигналов. Практически все находящиеся в эксплуатации и проектируемые космические РСА используют зондирующий сигнал в виде последовательности одинаковых радиочастотных импульсов с линейной частотной модуляцией, который был применен еще в самом первом космическом РСА, установленном на космическом аппарате «SEASAT» (1978 г.). Однако за последующие 39 лет накоплен положительный опыт эксплуатации одного космического РСА, установленного на КА «Венера-15/16» [В.1], и ряда самолетных РСА, использующих зондирующие сигналы с фазокодовой модуляцией (M -последовательности, коды Баркера, последовательности Лежандра и др.). Использование дискретного кодирования когерентного ансамбля зондирующих импульсов в РСА открывает перспективу существенного улучшения качества радиолокационных изображений по параметрам, связанным с свойствами суммарных корреляционных функций ансамбля. Этим вопросам посвящена глава 7 книги.

Приведенные в книге расчетные формулы и полученные по ним числовые данные относятся к космическим аппаратам и РСА, эксплуатируемым на низких околоземных круговых орбитах (высоты орбит не более 2000 км).

Литература к введению

- V.1. Ржига О.Н. Новая эпоха в исследовании Венеры (Радиолокационная съемка с помощью космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16»). Новое в жизни, науке, технике / Подписная научно-популярная серия «Космонавтика, астрономия». М.: Знание, 1988. № 3.
- V.2. Котельников В.А., Барсуков В.Л., Аким Э.Л. и др. Атлас поверхности Венеры. М.: Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1989.
- V.3. Перминов В. Первые радиолокационные карты Венеры // Новости космонавтики. 2004. № 9.
- V.4. Верба В.С., Неронский Л.Б. и др. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010.
- V.5. Неронский Л.Б. Перспективы развития методов и систем радиолокационного наблюдения космического базирования. Журнал радиоэлектроники, 2011, № 11.
- V.6. Нониашвили М.И. и др. Обзор современных радиолокаторов с синтезированной апертурой космического базирования и анализ тенденций их развития. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2012.
- V.7. Стратегическая программа исследований Национальной космической технологической платформы. ЦНИИмаш, 2015.
- V.8. Rodriguez-Cassola, M.; Prats, P.; Schulze, D.; Tous-Ramon, N.; Steinbrecher, U.; Marotti, L.; Nannini, M.; Younis, M.; Lopez-Dekker, P.; Zink, M.; et al. First bistatic spaceborne SAR experiments with TanDEM-X. IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 2012, 9, 33–37.
- V.9. Benjamin Brautigam and others. Individual T/R Module Characterisation of the TerraSAR-X Active Phased Array Antenna by Calibration Pulse Sequences with Orthogonal Codes. Proceeding of IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Seite 4. 2007-07-23-2007-07-27, Barcelona, Spain.
- V.10. Кучейко А.А. Перспективный радиолокационный спутник «Аркон-2» // Новости космонавтики. 2005. № 1.

Сокращения

АСН	—	автономная система навигации космического аппарата
АФАР	—	активная фазированная антенная решетка
АФР	—	амплитудно-фазовое распределение
АЦП	—	аналого-цифровой преобразователь
АЧХ	—	амплитудно-частотная характеристика
ААКФ	—	апериодическая автокорреляционная функция
АВКФ	—	апериодическая взаимнокорреляционная функция
БА	—	бортовая аппаратура
БКУ	—	бортовой комплекс управления космического аппарата
БУРСА	—	блок управления бортовой аппаратурой РСА
ВИП	—	вторичный источник электропитания
ВРЛ	—	высокоскоростная радиолиния
ВУМ	—	выходной усилитель мощности
ДЗЗ	—	дистанционное зондирование Земли
ДН, ДНА	—	диаграмма направленности антенны
ЗИ	—	зондирующий импульс
КА	—	космический аппарат
КМА	—	конструктивный модуль антенны
КНД	—	коэффициент направленного действия антенны
КПД	—	коэффициент полезного действия
ЛЗ	—	линия задержки
ЛЧМ	—	линейная частотная модуляция
МИС	—	монолитные интегральные схемы
МП	—	М-последовательность
МШУ	—	маломощный усилитель
ОЭТ	—	оптоэлектронная техника
ППА	—	приемопередающая аппаратура
ППМ	—	приемопередающий модуль, входящий в состав АФАР

РЛИ	—	радиолокационное изображение
РСА	—	радиолокатор с синтезированной апертурой
СВЧ	—	сверхвысокочастотный
СОТР	—	система обеспечения тепловых режимов
СУЛ	—	система управления лучом
СПШ	—	сверхширокополосный
СЭП	—	система электропитания
УЭПР	—	удельная эффективная площадь рассеяния радиоволн
ФКМ	—	фазокодовая модуляция
ФН	—	функция неопределенности
ФЧХ	—	фазочастотная характеристика
ЦАР	—	цифровая антенная решетка
ШП	—	широкополосный
ЭИИМ	—	эквивалентная изотропно излучаемая мощность
ЭПР	—	эффективная поверхность рассеяния
ЭВМ	—	электронная вычислительная машина
ESA	—	European Space Agency — Европейское космическое агентство
ScanSAR	—	режим дискретного сканирования луча АФАР в угломестной плоскости для расширения суммарной полосы захвата РСА

ГЛАВА I

ТЕХНИЧЕСКИЙ ОБЛИК СОВРЕМЕННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

1.1. Структура радиолокационного комплекса для дистанционного зондирования Земли из космоса. Требования к его составным частям

1.1.1. Структура радиолокационного комплекса ДЗЗ

Укрупненная структурная схема радиолокационного комплекса дистанционного зондирования Земли из космоса приведена на рис. 1.1. На этом же рисунке показаны связи бортовой аппаратуры радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) со служебными системами космического аппарата и другими составными частями радиолокационного комплекса ДЗЗ.

Бортовой радиолокационный комплекс состоит из четырех основных частей:

- активная фазированная антенная решетка (АФАР);
- приемопередающая аппаратура (ППА);
- блок управления бортовой аппаратуры РСА (БУРСА);
- бортовая аппаратура высокоскоростной радиолинии передачи данных (БА ВРЛ).

В отдельных вариантах современных радиолокаторов для ДЗЗ вместо АФАР используется зеркальная антенна (например, в отечественном КА «Кондор-Э»). Бортовая аппаратура высокоскоростной передачи радиолокационной информации (БА ВРЛ)

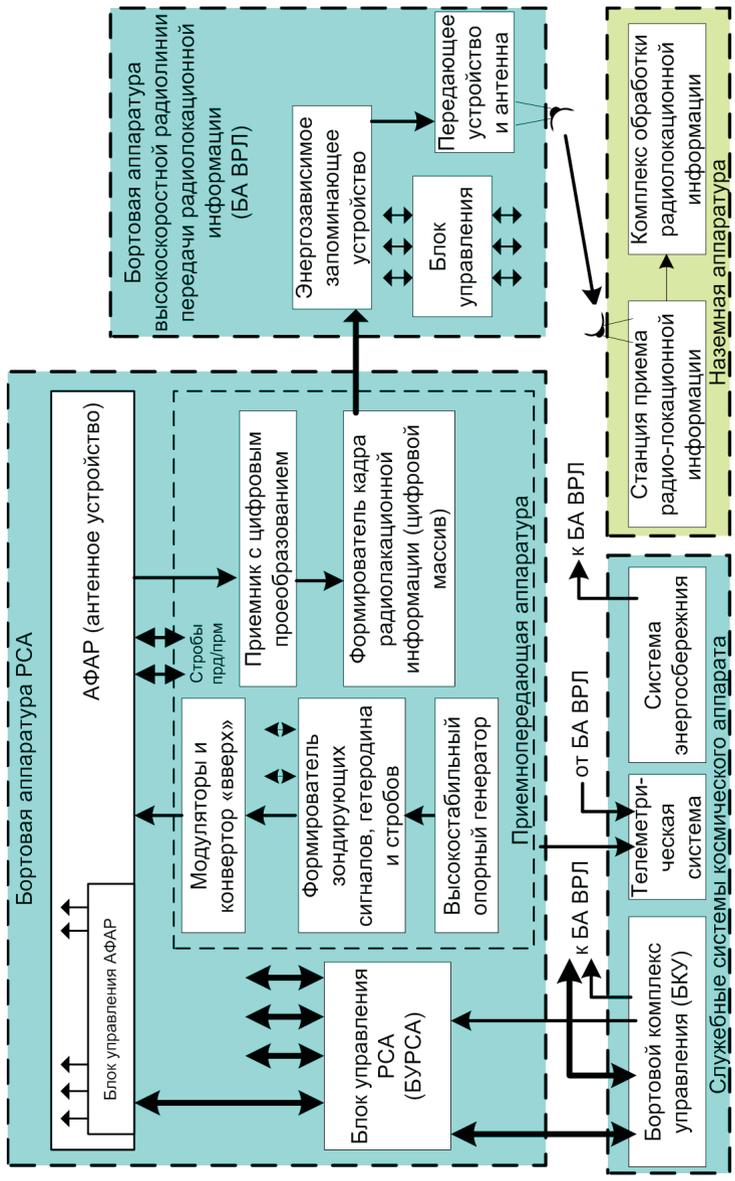


Рис. 1.1. Укрупненная структурная схема радиолокационного комплекса ДЗЗ

радиолинии (БА ВРЛ) чаще всего входит в состав полезной нагрузки КА, т. е. в состав РСА, но может быть отнесена и к служебным системам космического аппарата. Основные функции по формированию зондирующего сигнала радиолокатора и его бортовой радиотехнической обработки сосредоточены в устройстве ППА (приемопередающая аппаратура).

Аппаратура РСА взаимодействует со следующими служебными системами космического аппарата: бортовым комплексом управления (БКУ), телеметрической системой и системой энергоснабжения. Функции БКУ КА в части управления РСА описаны в разделе 1.1.7. БА ВРЛ обеспечивает передачу на наземные разделы приема всю полученную на борту КА радиолокационную информацию — радиоголограммы и служебную информацию, необходимую для наземного синтеза радиолокационных изображений.

1.1.2. Бортовая аппаратура РСА — программируемая многорежимная система с цифровым управлением

С целью повышения производительности и, соответственно, экономической эффективности космической радиолокационной системы заказывающие организации выдвигают требования к максимальному числу разных режимов радиолокационной съемки и минимальному времени настройки аппаратуры на каждый новый сеанс съемки или перехода к другому режиму. Концепция использования космических средств радиолокационного наблюдения, современные методы землеобзора и возможные режимы радиолокационной съемки, выполняемые РСА, описаны в [1.1].

Основными режимами работы РСА являются режимы радиолокационной съемки — детальный, маршрутный и обзорный с применением технологии ScanSAR (одновременная съемка нескольких примыкающих по углу места маршрутов с целью расширения полосы захвата). Дополнительно вводятся и несколько технологических режимов — режим внутренней радиометрической калибровки, режим юстировки начальной позиции луча АФАР в азимутальной плоскости на направление нулевой доплеровской частоты, режим расширенной технической диагностики и др.

Типовые ограничения по времени отработки управляющих воздействий на РСА и его составные части следующие: время, отводимое на включение аппаратуры радиолокатора в начале рабочего участка орбиты и подготовку его к первому сеансу съемки, — $5 \div 10$ с, время на переконфигурацию аппаратуры для работы в другом режиме на том же рабочем участке — $1 \div 5$ с, время перенастройки между

смежными сеансами съемки без смены конфигурации — $0,5 \div 1$ с, периодичность выдачи обновленного массива телеметрических данных — 1 раз в секунду, минимальный интервал между сменами кодов управления фазовращателями и линиями задержки — 10 мс. Все циклограммы смены управляющих воздействий и съема показаний телеметрических датчиков РСА должны быть синхронизированы с бортовой шкалой времени и/или с импульсными сигналами стробирования передающего и приемного трактов.

Структура управления бортовой аппаратурой современного РСА представляет собой многоабонентскую сеть, включающую в себя большое число объектов управления. Для примера, если число независимо фазируемых приемопередающих каналов в АФАР составляет 1000, то в общем случае объектами управления в ней являются: 1000 6-разрядных фазовращателей и 1000 5-разрядных аттенуаторов в тракте передачи, 1000 6-разрядных фазовращателей и 1000 5-разрядных аттенуаторов в тракте приема (для двухполяризационного приемника это число удваивается) и еще несколько десятков фазовращателей, аттенуаторов и дискретных линий задержки в трактах распределения СВЧ-сигналов по апертуре АФАР и вторичные источники электропитания с цифровым управлением включения/отключения.

Число объектов управления в АФАР, превышающее несколько тысяч, требует наличия двухуровневой многоадресной системы цифрового управления. На первом уровне находится блок управления АФАР, который получает от блока управления РСА исходные данные на каждый сеанс работы, подготавливает локальные массивы управляющих воздействий, раздает их контроллерам второго уровня и собирает от них телеметрические данные. На втором уровне имеется ансамбль твердотельных интегрированных контроллеров в приемопередающих модулях блоков распределения сигнала и электропитания, которые преобразуют первичные данные, получаемые от блока управления АФАР, в физические сигналы управления фазовращателями, аттенуаторами, линиями задержки и схемами электронного включения/отключения вторичных источников электропитания. Первый и второй уровни управления АФАР общаются между собой посредством магистральных последовательных интерфейсов (мультиплексных каналов передачи данных), например RS-485. Такой же интерфейс используется и для связи блока управления АФАР с блоком управления РСА.

В других составных частях бортовой аппаратуры современных РСА также применяются программируемые средства цифрового формирования зондирующих сигналов, цифрового преобразования принимаемых сигналов, цифровых средств автоматической регулировки

усиления в приемниках, формирования цифрового массива выходной радиолокационной информации (радиолокационного кадра). Таким образом, все составные части современной бортовой радиолокационной аппаратуры насыщены элементами цифрового управления, формирования, преобразования и телеметрического контроля и все эти элементы должны быть включены в сеть управления, в центре которой находится блок управления бортовой аппаратурой РСА (см. рис. 1.1, БУРСА), который связывается с комплексом управления КА посредством магистрального последовательного интерфейса, выполненного в российских РСА по ГОСТ Р 52070-2003.

Управляющие устройства всех уровней должны включать локальные программы отработки типовых заданий и циклограмм в течение сеанса работы РСА в каждом из рабочих режимов (например, программы смены конфигурации включаемой аппаратуры, смены поляризационной настройки, смены закона внутриимпульсной модуляции зондирующего сигнала, изменения состояния аттенюаторов в СВЧ-трактах, изменения позиции луча АФАР при электронном сканировании, выполнения циклограмм внутренней радиометрической калибровки или расширенного диагностического контроля и т. п.). Таким образом, бортовая аппаратура современного РСА представляет собой программируемую многорежимную систему с цифровым управлением. Именно это свойство обеспечивает быструю перенастройку радиолокатора на новые параметры в пределах одного режима работы или быструю перестройку конфигурации при переходе на новый режим работы, что повышает суммарную производительность космической системы ДЗЗ.

В следующих разделах рассмотрены особенности построения и основные требования к составным частям РСА, исключая аппаратуру высокоскоростной радиолинии, особенности которой не связаны с особенностями радиолокационных комплексов.

1.1.3. АФАР — фундамент многорежимного космического РСА

Антенное устройство в виде активной фазированной антенной решетки (АФАР) выполняет функции распределенного по физической апертуре импульсного приемопередатчика, обеспечивает электронное сканирование луча и является ключевой составной частью многорежимной радиолокационной системы.

Зеркальные антенны успешно применяют в составе относительно недорогих малых космических аппаратов, масса которых не превышает 1200 кг, — «SARLupe», «TECSAR/RISAT-2», «Кондор-Э». Для осуществления прожекторного режима детальной съемки ис-

пользуется изменение положения луча по координате азимута, либо поворотом корпуса КА, либо с помощью последовательного переключения элементов линейки излучателей, размещенных в фокусе зеркала. Основными достоинствами зеркальных (рефлекторных) антенн являются их низкая стоимость и широкая полоса рабочих частот и возможность функционировать на разных поляризациях. К числу недостатков зеркальных антенн следует отнести необходимость использования мощных сосредоточенных передатчиков, которым присущи малая надежность и относительно короткий срок службы, и невозможность получения различных конфигураций апертуры антенны. Однако для РСА узкого назначения с небольшим набором рабочих режимов этот тип антенн имеет и будет иметь в дальнейшем свою нишу в номенклатуре космических средств ДЗЗ. Пример перспективной двухполяризационной рефлекторной антенны L -диапазона описан в [1.2].

АФАР представляет собой значительно более сложное и дорогостоящее устройство, но тем не менее составляет альтернативу зеркальным антеннам в многорежимных радиолокационных системах с большим сроком активного существования благодаря следующим преимуществам:

- высокая надежность и живучесть, обусловленная отсутствием механических элементов для раскрытия зеркала или изменения направления излучения, многоканальностью структуры, отсутствием мощных сосредоточенных передатчиков с высоковольтными источниками электропитания;
- возможность получения больших уровней средней излучаемой СВЧ-мощности (более 1000 Вт) за счет суммирования в эфире множества парциальных излучений от многоканального распределенного передающего тракта с относительно невысокой мощностью отдельных каналов, выполненных на полупроводниковых элементах, что позволяет достичь высоких значений радиометрической чувствительности РСА при большом сроке существования РСА на орбите;
- быстрое изменение конфигурации апертуры, аппаратной конфигурации, формы луча, поляризационной конфигурации в зависимости от параметров заданного режима радиолокационной съемки;
- возможность осуществления безынерционного электронного сканирования луча по двум координатам в широких пределах, что обеспечивает большое разнообразие различных режимов съемки.

Номенклатура целевых требований к АФАР включает: диапазон радиочастот, ширину рабочей полосы частот, размеры апертуры, число передающих и приемных каналов, поляризацию сигналов на прием и на передачу, уровень кроссполяризационной развязки, варианты конфигураций на прием и передачу одновременно формируемых лучей, режимы работы, требования к диаграмме направленности в каждом из рабочих режимов, сектор электронного сканирования по двум координатам, требования к энергетическому потенциалу передающего тракта и минимальному значению скважности зондирующего сигнала в каждом из рабочих режимов, параметр качества приемного тракта, требования к внутренней радиометрической калибровке, ограничения по энергопотреблению и массе.

Параметры АФАР непосредственно влияют на номенклатуру и параметры различных режимов радиолокационной съемки. Так, размер активной части апертуры АФАР по координате угла места (в плоскости, перпендикулярной вектору путевой скорости космического аппарата) определяет максимальную величину полосы захвата в маршрутном режиме и тот же параметр для парциальной полосы съемки в обзорном режиме с применением технологии ScanSAR. Величина рабочего сектора электронного сканирования луча АФАР в угломестной плоскости определяет полосу обзора РСА. Размер апертуры АФАР по координате азимута (вдоль вектора путевой скорости КА) определяет ширину полосы доплеровских частот отраженных сигналов и тем самым величину азимутального пространственного разрешения РСА в маршрутном режиме, а величина сектора электронного сканирования луча АФАР в азимутальной плоскости определяет потенциальную величину азимутального пространственного разрешения РСА в детальном режиме съемки. При отсутствии в АФАР возможности электронного сканирования РСА может работать только в одном режиме маршрутной съемки.

Излучатели современных АФАР имеют возможность работать как на горизонтальной, так и на вертикальной поляризации, а в приемопередающих модулях АФАР создаются независимые приемные каналы для обеих поляризаций. При этом РСА имеет возможность получать радиолокационные изображения с восемью различными поляризационными конфигурациями, перечисленными в табл. 1.1 (H — горизонтальная поляризация, V — вертикальная).

АФАР позволяет путем переконфигурирования апертуры и схем диаграммообразования получать режимы РСА с разной полосой захвата или формировать два (или три) приемных луча с интерферометрической базой. В РСА «Radarsat-2» и, как дополнение к прожекторному режиму, в «TerraSAR-X» используют маршрутный режим «двойного приема». В нем прием сигналов производится дву-

мя секциями антенны с разделенными по азимуту фазовыми центрами и записывается радиоголограмма расширенным спектром доплеровских частот на удвоенной виртуальной частоте повторения, что позволяет избежать неоднозначности сигналов по азимуту. Такой принцип позволяет получить азимутальное пространственное разрешение, близкое к одной четверти от горизонтального размера антенны (около 3 м для «Radarsat-2» и около 1 м для «TerraSAR-X») [1.3]. В перспективных РСА может применяться обобщение этого метода — многоканальный режим ScanSAR с высоким разрешением (HRWS — High resolution wide swath mode), реализация которого, скорее всего, будет осуществляться в варианте многолучевой АФАР с цифровым формированием лучей (раздел 1.1.4).

Таблица 1.1. Возможные поляризационные конфигурации РЛИ для РСА с двухполяризационной АФАР и приемным трактом

Варианты поляризационных конфигураций (передача/прием)	Способ выполнения поляризационной настройки	
1	H/H	Поляризационная настройка осуществляется перед сеансом съемки и далее не изменяется. На выходе РСА формируется одна радиоголограмма.
2	V/V	
3	H/V	Переключение поляризаций происходит перед каждым импульсом передачи и каждым стробом приема. На выходе РСА формируется одна радиоголограмма.
4	V/H	
5	$H/H + H/V$	Одновременно формируются в двух приемных каналах РСА две радиоголограммы — первая относится к РЛИ с одной поляризационной настройкой, вторая — к РЛИ с другой поляризационной настройкой. Поток данных на выходе РСА удваивается по сравнению с вариантами 1÷4.
6	$H/H + V/V$	
7	$V/H + V/V$	
8	$V/H + H/V$	

Примеры нескольких разных возможных конфигураций апертуры АФАР показаны на рис. 1.2. На рис. 1.2,а представлен эскиз конфигурации крупногабаритной АФАР, составленной из активных 40 модулей, каждый из которых имеет по 32 независимо фазуемых приемопередающих канала. Это основная конфигурация, используемая в режиме детальной съемки. Она обеспечивает максимальный энергетический потенциал при относительно небольшой полосе захвата. Рисунок 1.2,б показывает конфигурацию для маршрутного режима съемки, требующую более широкой полосы захвата. В этой конфигурации 10 крайних модулей по длинной стороне переводятся в пассивный режим (отключаются). За счет этого достигается расширение диаграммы направленности в угломестной плоскости на 33%, что позволяет увеличить полосу захвата в той же пропорции. Конфигурация, представленная на рис. 1.2,в, позволяет расширить

полосу захвата в 2 раза по отношению к конфигурации на рис. 1.2,*а*, что требуется для широкозахватного режима обзорной съемки. Следует иметь в виду, что при уменьшении активной части апертуры энергетический потенциал АФАР на передачу и прием уменьшается пропорционально кубу отношения геометрической площади полной апертуры к площади ее активной части. Например, для рис. 1.2,*б* энергетический потенциал АФАР по сравнению с потенциалом для конфигурации на рис. 1.2,*а* уменьшается в 8 раз. Правда, и энергопотребление АФАР падает, но только в 2 раза.

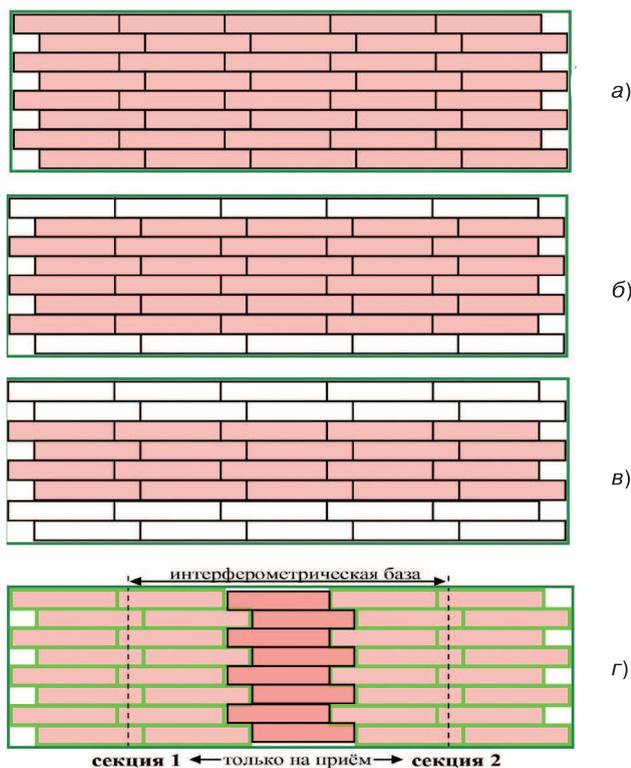


Рис. 1.2. Различные конфигурации АФАР, составленной из 40 подрешеток (розовым цветом обозначены активные модули, белым — отключенные)

Конфигурация, показанная на рис. 1.2,*г*, может использоваться для режима детальной съемки с селекцией подвижных объектов на земной поверхности. В этом варианте все 40 модулей используются в режиме излучения зондирующего сигнала, а в режиме приема, помимо основного луча, сформированного 40 приемными каналами

полной апертуры, формируются еще два приемных луча, сформированных от секций 1 и 2, в состав которых входит по 16 модулей. Расстояние между фазовыми центрами секций 1 и 2 образует интерферометрическую базу, используемую для селекции подвижных объектов.

В табл. 1.2 приведены хронологически упорядоченные данные об испытанных в космосе АФАР зарубежного производства, входящих в состав РСА ДЗЗ [1.4].

Таблица 1.2. Основные характеристики АФАР некоторых РСА космического базирования

Наименование КА, страна, год запуска КА, высота орбиты	Параметры АФАР			
	Тип излучателей, число каналов, поляризация	Размеры, м	Максимальная пиковая мощность излучения, Вт	Диапазон частот
SEASAT США, 1978 г., 800 км	Микрополосковые, 1024 канала, «H/H»	11×2,2	1100	L
ERS-1 ESA, 1991 г., 785 км	Волноводно-щелевые, «V/V»	10×1,0	4800	C
JERS-1 Япония, 1992 г., 568 км	Нет данных	11,9×2,2	1500	L
SIR-C/X/L США, 1994 г., 230 км	Микрополосковые, 252 (L) и 504 (C) канала «H/H, V/V, H/V, V/H»	12×2,95	4400	L
	Волноводно-щелевые (пассивная антенная решетка), 1 канал, «V/V»	12×0,75	1200	C
EnviSat/ASAR , ESA, 2002 г., 800 км	Микрополосковые, 320 каналов, «H/H, V/V, H/V, V/H»,	10,0×1,3	1400	C
TerraSAR-X , Германия, 2007 г. 515 км	Волноводно-щелевые, 384 канала, «H/H, V/V, H/V, V/H»	4,8×0,8	2260	X

Таблица 1.2 (окончание)

Наименование КА, страна, год запуска КА, высота орбиты	Параметры АФАР			
	Тип излучателей, число каналов, поляризация	Размеры, м	Максимальная пиковая мощность излучения, Вт	Диапазон частот
TerraSAR-L Германия, 2008 г., 629 км	Микрополосковые	11×2,9	4740	<i>L</i>
COSMO-SkyMed Италия, 2007 г., 620 км	Микрополосковые, 1280 каналов, «H/H, V/V, H/V, V/H»	5,7×1,4	5100	<i>X</i>
RISAT-1 Индия, 2012 г., 536 км	Микрополосковые, 288 каналов, «H/H, V/V, H/V, V/H», «H/H + H/V», «V/H + V/V»	6×2	2880	<i>C</i>
Sopernicus: Sentinel-1 ESA, 2014 г., 693 км	Волноводно-щелевые, 280 каналов, «H/H, V/V» или «H/H + H/V», «V/H + V/V»	12,3×0,82	4370	<i>C</i>
ALOS-2/ PALSAR-2 Япония, 2014 г., 690 км	Микрополосковые, 1080 канала «H/H, V/V, H/V, V/H», «H/H + H/V», «V/H + V/V»	9,9×2,9	5100	<i>L</i>

Из тринадцати представленных в таблице типов АФАР пять работают в *L*-диапазоне, пять — в *C*-диапазоне и три — в *X*-диапазоне радиочастот. Излучательные системы микрополоскового типа применяются в большинстве АФАР, а волноводно-щелевого типа только в двух — в РСА «TerraSAR-X» и «Sentinel-1». Встроенная система внутренней радиометрической калибровки имеется в АФАР «TerraSAR-X», «EnviSat/ASAR» и «Sentinel-1».

Максимальный энергетический потенциал (ЭИИМ) передающего тракта достигается в *L*-диапазоне — в АФАР «ALOS-2/PALSAR-2» (75 дБ·Вт), в *C*-диапазоне — в АФАР «Sentinel-1» (80 дБ·Вт) и в *X*-диапазоне радиочастот — в АФАР «COSMO-SkyMed» (84 дБ·Вт).

Особенности технического проектирования современных АФАР космического базирования изложены в главе 2.

1.1.4. Оценка перспектив создания АФАР космического базирования с цифровым формированием луча

Все эксплуатируемые в настоящее время космические РСА используют аналоговые схемы для формирования луча, что объясняется простотой и низкой стоимостью такого решения, если от АФАР требуется формирование только одного луча на передачу и прием сигналов. Даже в тех случаях, когда в режиме обнаружения подвижных целей необходимо сформировать два или три луча на прием (для формирования интерферометрической базы от двух половин полной апертуры АФАР) с последующей независимой обработкой сигналов от субапертур, экономически целесообразно применять аналоговые методы диаграммообразования. Однако, если от РСА требуется одновременное формирование многих лучей на передачу и прием, возможной альтернативой становится использование цифровых методов формирования лучей [1.5–1.7].

Эта технология может разрешить проблему, связанную с необходимостью существенно расширить полосу захвата РСА без ухудшения параметра пространственного разрешения по координате азимута и без увеличения уровня рекуррентных помех. Суть технологии заключается в следующем. Передающий тракт формируется с помощью обычных схем аналогового формирования только на части полной апертуры АФАР, обеспечивающей такую ширину луча по координате угла места, чтобы облучить заданную широкую полосу захвата (при этом неизбежно происходит существенное снижение энергетического потенциала радиолокатора). Приемный тракт использует полную апертуру АФАР и с помощью цифровых технологий формирует несколько одновременно функционирующих приемных лучей, каждый из которых обслуживает свою часть полной полосы захвата. Сигналы от парциальных приемных лучей проходят каждый по своему приемному тракту, оцифровываются и включаются в кадр радиолокационной информации. Затем в наземном комплексе приема и обработки радиолокационной информации сигналы от парциальных лучей обрабатываются отдельно с получением парциальных РЛИ, которые объединяются в одно изображение с широкой полосой захвата. В научной литературе предлагаются варианты разделения полномасштабной АФАР на подапертуры как по углу места, так и по азимуту [1.8–1.12]. Другим вариантом применения описанной технологии может быть режим подавления локализованной в пространстве помехи путем формирования нуля диаграммы направленности приемной антенны в направлении на источник помех.

Проектирование РСА с использованием технологии цифрового формирования группы лучей сталкивается как с техническими труд-

ностями (снижение энергетического потенциала передатчика РСА, необходимость оцифровки сигналов подапертур АФАР на промежуточной частоте, вычислительные операции с большими потоками данных), так и с системными проблемами (необходимость резкого понижения частоты повторения зондирующих импульсов для перекрытия стробом приема широкой полосы захвата и необходимость использования специальных изоциренных методов борьбы с возникающей неоднозначностью по азимуту) [1.13]. Учитывая перечисленные трудности, по-видимому, в ближайшее десятилетие РСА с цифровым формированием лучей в космосе не появятся. Часть предлагаемых методов цифрового формирования луча уже опробована на авиационных носителях в РСА L - и P -диапазонах радиоволн [1.14; 1.15].

1.1.5. Требования к приемопередающей аппаратуре РСА

В приемопередающую аппаратуру РСА (рис. 1.1) входит высокостабильный **опорный генератор**, который должен обеспечить внутреннюю когерентность излучаемого и принимаемого сигналов. В когерентной радиолокационной станции от единого опорного генератора формируются сигналы несущей частоты передатчика, частоты гетеродинов приемника, тактовые частоты цифрового формирователя сигналов внутриимпульсной модуляции и частоты выборок аналого-цифрового преобразователя. Требование к предельно допустимой долговременной относительной нестабильности опорного генератора диктуется допустимыми ошибками формирования радиолокационной сетки координат по оси наклонной дальности (или, что то же самое, по оси задержек отраженного сигнала). При максимальной допустимой ошибке координатной сетки ± 2 м в пределах максимального значения наклонной дальности около 1000 км требования к долговременной (за все время штатной работы на орбите) допустимой относительной нестабильности опорного генератора составляют $2 \cdot 10^{-6}$.

Изменение частоты опорного генератора за время распространения радиосигнала до объекта съемки и обратно приводит к появлению дополнительного неучтенного изменения фазы отраженного сигнала, что может привести к нарушению условия когерентности обработки. Нетрудно показать, что если ограничить максимальное значение случайного изменения фазы принимаемого РСА сигнала за счет указанного эффекта величиной $\pi/20$ (9°), то требование к кратковременной нестабильности опорного генератора может быть рассчитано по следующей формуле:

$$\frac{\Delta f}{f_0} \leq \frac{C}{80R_{\text{макс}} \cdot f_0}, \quad (1.1)$$

где f_0 — несущая частота зондирующего сигнала РСА; C — скорость света; $R_{\text{макс}}$ — максимальное значение наклонной дальности до района съемки.

Расчет по формуле (1.1) для $R_{\text{макс}} = 1000$ км и $f_0 = 9,6$ ГГц дает оценку требуемого значения кратковременной нестабильности несущей частоты РСА $(\Delta f/f_0) \leq 4 \cdot 10^{-10}$.

Когерентность сигналов в РСА должна поддерживаться также в пределах интервала времени, равного времени синтеза апертуры, которое обратно пропорционально параметру пространственного разрешения радиолокатора по азимутальной координате (вдоль вектора скорости космического аппарата-носителя РСА). В настоящее время максимальное время синтеза апертуры в режиме детальной съемки для РСА, работающего в X -диапазоне радиоволн, составляет 3 с. За это время уход фазы несущей частоты 9,6 ГГц должен быть не более 45° , что определяет требование к относительной кратковременной нестабильности частоты опорного генератора на уровне $\pm 2 \cdot 10^{-12}$.

Быстрые гармонические отклонения фазы или несущей частоты передатчика РСА приводят к появлению дополнительных боковых лепестков в азимутальном сечении функции отклика системы. Если задать требование, чтобы относительный уровень дополнительных боковых лепестков не превышал величины -20 дБ, в соответствии с [1.16, раздел 5.3] можно получить оценку допустимых значений амплитуды фазовых гармонических колебаний:

$$(\Delta_{\text{фгарм}})_{\text{макс}} \leq 0,2 \text{ радиан } (11^\circ). \quad (1.2)$$

Быстрые случайные фазовые флюктуации разрушают когерентность траекторного сигнала и снижают качественные показатели радиолокационных изображений, полученных с помощью РСА. Понятие «быстрые» в данном контексте рассматривается относительно времени синтеза апертуры, т. е. в пределах интервала в несколько секунд. По данным [1.16, раздел 5.4], при среднеквадратическом значении флюктуаций фазы 1 радиан величина смещения положения максимума отклика РСА на точечную цель по азимуту может достигать 25% от длительности отклика, относительное расширение главного лепестка отклика (ухудшение азимутальной разрешающей способности) составить 0,5%, а уровень первых боковых лепестков функции отклика увеличиться на 5 дБ. Все указанные искажающие параметры могут быть уменьшены до пренебрежимо малых значений, если задать и выполнить требование по величине допустимых среднеквадратических фазовых флюктуаций на уровне

$$(\sigma_\phi)_{\text{доп}} \leq 0,2 \text{ рад } (11^\circ). \quad (1.3)$$

Полоса спектра фазовых флюктуаций для опорного генератора РСА сантиметрового диапазона должна рассматриваться в пределах от 100 Гц, что соответствует времени распространения сигнала до объекта съемки и обратно, до 500 МГц, что соответствует длительности самого короткого символа модулирующего сигнала.

Сводные требования к опорному генератору и тракту формирования зондирующего сигнала приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3. Требования к параметрам опорного генератора РСА

Параметр	Значение
1. Долговременная относительная нестабильность частоты за время штатной работы на орбите 7 лет, не более	$2 \cdot 10^{-6}$
2. Кратковременная относительная нестабильность частоты за время от 4 мс до 3 с, не более	$2 \cdot 10^{-12}$
3. Быстрые гармонические колебания фазы с периодом менее 7 мс, ° не более	11
4. Интегральное среднеквадратическое значение фазовых флюктуаций в полосе частот от 100 Гц до 500 МГц, не более	11

Формирователь сигналов РСА должен вырабатывать следующие сигналы:

- когерентные ансамбли СВЧ-импульсных зондирующих сигналов с внутриимпульсной модуляцией для возбуждения тракта передатчика АФАР. Номинальное значение несущей частоты зондирующих сигналов и максимальная полоса рабочих частот должны соответствовать заданному заказчиком частотному диапазону и международному «Регламенту радиосвязи». Вид внутриимпульсной модуляции — ЛЧМ и/или ФКМ;
- сигналы гетеродинов, когерентные с зондирующими сигналами и имеющие малый уровень фазовых флюктуаций;
- СВЧ-тест-сигнал на несущей частоте без внутриимпульсной модуляции, который используется в режимах внутренней радиометрической калибровки и диагностического контроля АФАР;
- импульсные последовательности стробов тракта передатчика, которые используются в АФАР для включения передающих каналов на время излучения зондирующих импульсов и стробов тракта приемника, которые используются в АФАР для открытия приемных каналов в течение интервала приема отраженных от земной поверхности сигналов;
- импульсы выборки аналого-цифровых преобразователей (АЦП), частота которых должна быть согласована с шириной спектра зондирующего сигнала

Параметры перечисленных сигналов должны на этапе проектирования рассчитываться для каждого режима работы РСА и для каждого угла визирования объекта съемки и храниться в постоянном запоминающем устройстве блока управления РСА либо включаться в массив исходных данных на сеанс работы РСА, передаваемый с наземного раздела управления на борт КА (в бортовой комплекс управления) перед началом рабочего витка орбиты.

Возможности выбора диапазонов и ширины полосы радиосигналов для космических РСА ограничены международным «Регламентом радиосвязи» [1.17], согласно которому для радиолокационной съемки из космоса выделены полосы частот, приведенные в табл. 1.4.

Таблица 1.4. Частотные диапазоны, выделенные для космической радиолокации

Условное обозначение диапазона частот	Разрешенные частоты, МГц	Разрешенная ширина полосы, Δf , МГц	Средняя длина волны, λ , см	Потенциальное пространственное разрешение при $\gamma = 60^\circ$, δ_y , м
<i>P</i>	410 ÷ 440	30	70	10
<i>L</i>	1215 ÷ 1300	85	24	3,5
<i>S</i>	3100 ÷ 3300	200	9,4	1,5
<i>C</i>	5250 ÷ 5350	100	5,7	3,0
<i>X</i>	9300 ÷ 9900	600	3,1	0,5

В последней колонке табл. 1.4 приведены значения потенциального пространственного разрешения РСА по координате угла места (раздел 6.2.1), которое можно получить, если использовать всю разрешенную полосу частот для каждого диапазона радиоволн. Этот параметр рассчитывается по формуле

$$(\delta_y)_{\text{потенц}} = \frac{C}{2\Delta f \cdot \cos \gamma}, \quad (1.4)$$

где $C = 3 \cdot 10^8$ — скорость света; γ — угол скольжения.

Максимальное значение разрешенной полосы частот отведено в *X*-диапазоне и составляет 600 МГц, что позволяет получить потенциальное значение пространственного разрешения РСА 0,5 м. Для дальнейшего улучшения этого параметра требуется, чтобы в международном «Регламенте радиосвязи» разрешенная полоса частот для космических РСА, работающих в *X*-диапазоне, была расширена до 800 ÷ 1000 МГц. Заявки на такие изменения регламента уже поступили от ряда стран, так что в последующие годы можно ожидать появления космических РСА с пространственным разрешением около 0,3 м.

Приемник, входящий в состав приемопередающей аппаратуры (см. рис. 1.1), должен выполнять следующие функции:

- принимать от АФАР отраженный сигнал в паузах между зондирующими импульсами, осуществлять усиление, согласованную с полосой сигнала фильтрацию и преобразование сигнала в цифровую форму. Каждый радиочастотный канал приемного тракта должен быть оснащен дискретными управляемыми аттенюаторами с примерными величинами затухания 20 дБ в тракте СВЧ и 20 дБ в тракте промежуточной частоты. Алгоритмы управления аттенюаторами должны входить в состав специального программного обеспечения блока управления РСА;
- вырабатывать информацию об эффективном уровне сигнала на входе АЦП для использования в схеме автоматической регулировки усиления и для включения ее в состав служебной информации в кадр радиолокационной информации;
- преобразовывать аналоговые видеосигналы с выходов приемника в цифровую форму с заданным числом разрядов.

Максимальное число разрядов АЦП приемника должно быть не менее восьми. Число разрядов выходной информации АЦП может быть ниже максимального значения и устанавливаться по командам от блока управления РСА из следующего ряда: 8/6/5/4/3/2/1 (в отдельных режимах радиолокационной съемки возможно снижение числа разрядов без существенной потери качества выходных продуктов). При наличии технической возможности можно производить дискретизацию отраженных сигналов на промежуточной частоте, без перехода на видеочастоты и без разделения на синфазную и квадратурную составляющие. Частота выборок сигнала в АЦП должна быть связана с несущей частотой зондирующего сигнала целочисленным соотношением и согласована с эффективной шириной спектра принимаемых сигналов в каждом режиме работы РСА. В современных РСА с целью сокращения потока выходной цифровой информации применяются методы и устройства адаптивного квантования, которые позволяют снизить число разрядов на отсчет радиолограммы с исходных восьми до двух-трех разрядов.

В состав бортовой аппаратуры РСА может входить измеритель амплитуд и фаз сигналов, поступающих с выхода АФАР в режиме радиометрической калибровки передающих и приемных каналов. Ошибки измерения указанных параметров должны быть не более $\pm 0,5$ дБ и $\pm 5^\circ$.

Формирователь кадра радиолокационной информации должен решать следующие задачи:

- осуществление буферизации входных импульсных потоков цифровых данных, поступающих с выходов АЦП приемных трак-

- тов в сеансе работы ВРЛК, и хранение полученных первичных радиолокационных данных в течение одного периода зондирования;
- прием от блока управления РСА, обновление и хранение в течение текущего сеанса работы РСА служебной информации для включения в состав радиолокационного кадра;
 - прием от блока управления РСА, обновление и хранение в течение текущего сеанса работы РСА телеметрической информации для включения в состав радиолокационного кадра;
 - формирование кадра радиолокационной информации с привязкой всех данных к бортовой шкале времени и к текущему номеру зондирующего импульса;
 - циклическая передача сформированных в течение сеанса съемки кадров в реальном масштабе времени в бортовую аппаратуру высокоскоростной радиолинии (БА ВРЛ; см. рис. 1.1).

Кадр радиолокационной информации формируется на основе данных, собранных в течение одного периода зондирования радиолокатора, и представляет собой упорядоченную совокупность трех цифровых массивов данных. Первый — так называемые «сырые» радиолокационные данные (RAW), поступающие от АЦП приемного тракта в течение сеанса радиолокационной съемки. Этот массив носит также название «радиоголограмма». Второй — массив (или фрагмент полного массива) служебной информации, сопровождающий радиоголограмму и необходимый в наземном комплексе обработки радиолокационной информации для синтеза радиолокационных изображений и их привязки к топографическим координатам. В эту группу данных входят текущие навигационные параметры КА, текущие фактические параметры настройки радиолокационной аппаратуры и др. Третий — массив (или фрагмент полного массива) текущей телеметрической информации.

Сформированные кадры в темпе следования импульсов зондирования передаются в энергонезависимое запоминающее устройство БА ВРЛ. Конкретная структура радиолокационного кадра и протокол его передачи в БА ВРЛ для каждого типа РСА определяются специальными документами на этапе выпуска рабочей конструкторской документации.

1.1.6. Требования к блоку управления РСА

Блок управления РСА (БУРСА) представляет собой специализированную электронную вычислительную машину, работающую в реальном масштабе времени и предназначенную для расчета исходных параметров, необходимых для выполнения сеанса радиолокационной

съемки, управления всеми составными частями бортовой аппаратуры РСА во всех режимах, а также для сбора телеметрической информации, характеризующей техническое состояние аппаратуры.

БУРСА должен выполнять следующие задачи:

- осуществление функций управления составными частями БА РСА и сбора телеметрической информации при выполнении всех заданных режимов работы по штатным циклограммам;
- прием из БКУ цифрового массива исходных данных на сеанс радиолокационной съемки (навигационно-баллистические данные, координаты района съемки на земной поверхности, идентификатор режима съемки, время начала и длительность сеанса съемки и др.);
- прием из БКУ КА синхроимпульсов меток времени «1 Гц» и кодов идентификации меток времени по стандартной шкале времени «UTC-ГЛОНАСС»;
- прием из БКУ массивов исходных данных на сеанс работы и кодовых команд для управления режимами работы аппаратуры БСК;
- выдача в БКУ КА массивов цифровой телеметрической информации и отчетов о выполнении рабочих режимов;
- поддержание в течение всех сеансов работы РСА бортовой шкалы времени с обеспечением привязки к этой шкале всех системных событий и формируемых данных;
- формирование, периодическое обновление и передача в формирователь кадра радиолокационной информации цифровых массивов служебной и телеметрической информации.

В особых случаях может включаться дополнительное требование об обеспечении возможности модификации специального программного обеспечения БУРСА в течение периода эксплуатации.

БУРСА должен функционировать под управлением БКУ КА, с которым он связывается индивидуальными интерфейсами для передачи и приема разовых команд и магистральными интерфейсами для передачи и приема массивов цифровых данных (по ГОСТ Р 52070-2003). Порядок взаимодействия между БУРСА и БКУ КА определяется специальным протоколом. Объектами управления БУРСА являются приемопередающая аппаратура РСА и блок управления АФАР, взаимодействие с которыми осуществляется с помощью индивидуальных интерфейсов для передачи и приема разовых команд и магистральных мультимплексных интерфейсов для передачи и приема массивов цифровых данных (например, RS-485).

1.1.7. Требования к бортовому комплексу управления космического аппарата в части взаимодействия с РСА

Бортовой комплекс управления космического аппарата в части взаимодействия с РСА должен обеспечивать:

- выдачу цифровых и релейных (разовых) команд управления в блок управления бортовой аппаратуры РСА;
- выдачу в БУРСА импульсной последовательности синхронизирующих меток времени «1 Гц» и кода бортовой шкалы времени;
- выдачу в БУРСА массива программной информации на каждый сеанс работы, содержащего необходимые данные для проведения радиолокационной съемки с привязкой ко времени (номер сеанса, параметры режимов съемки и др.);
- выдачу в БУРСА массивов навигационных данных о текущем и прогнозируемом положениях и параметрах движения центра масс КА, координат опорных точек снимаемого района и данных о фактической ориентации КА;
- формирование команд на включение и отключение напряжения электропитания аппаратуры РСА в начале и конце рабочего участка орбиты;
- прием от БУРСА массивов телеметрической информации о техническом состоянии аппаратуры РСА;
- прием от БУРСА квитанций и отчетов о прохождении сеансов работы.

Структура и форматы команд управления и цифровых массивов данных определяются специальными протоколами.

Особые требования предъявляются к массиву, содержащему навигационные данные КА и координаты опорных точек снимаемого района. Эти требования вытекают из необходимости, с одной стороны, иметь исходные данные на борту КА для настройки параметров РСА перед сеансом съемки и, с другой стороны, иметь навигационную и топографическую информацию для синтеза радиолокационных изображений из полученной радиоголограммы в наземных разделах приема и обработки данных. В случае, когда от РСА требуется предельно высокий уровень пространственного разрешения, необходимая точность навигационных данных для синтеза радиолокационных изображений может быть получена только на борту КА с помощью высокоточной автономной системы навигации (АСН). Эти данные, привязанные к меткам единой шкалы времени, должны обновляться с частотой 1 раз в секунду и передаваться на наземные разделы вместе с радиоголограммой. Исследования, проведенные в

[1.18, глав 3, табл. 3.3], показали, что ошибки определения наклонной дальности, модулей вектора путевой скорости и ускорения КА в зависимости от требуемого пространственного разрешения должны быть не более значений, приведенных в табл. 1.5.

Таблица 1.5. Максимальные допустимые значения ошибок измерения навигационных параметров КА для обеспечения синтеза РЛИ с потенциально достижимым пространственным разрешением для каждого диапазона частот в соответствии с данными табл. 1.4

Составляющие ошибок	Частотный диапазон РСА				
	<i>X</i>	<i>C</i>	<i>S</i>	<i>L</i>	<i>P</i>
1. Ошибка расчета наклонной дальности на основе измерения положения центра масс КА, м	8,0	150	28	64	200
2. Ошибка измерения и расчета модуля вектора путевой скорости КА, м/с	0,041	0,79	0,14	0,33	1,0
3. Ошибка измерения и расчета проекции вектора возмущающего ускорения КА на наклонную дальность, мм/с ²	0,83	16	2,8	6,4	20

При расчете данных табл. 1.5 использовались следующие исходные данные. Потенциально достижимое пространственное разрешение принималось одинаковым по азимутальной и угломерной координатам с учетом максимально допустимой полосы частот зондирующего сигнала, установленной международным «Регламентом радиосвязи» (см. табл. 1.4, последняя колонка). Предельно допустимое значение ошибки фазовой траектории опорного сигнала, используемого при азимутальном синтезе РЛИ, бралось равным $\pi/8$. В расчетах высота полета РСА над поверхностью Земли принималась равной 600 км, наклонная дальность от КА до объекта съемки — 760 км.

Из данных табл. 1.5 следует, что для получения высокого пространственного разрешения радиолокационных изображений, получаемых с помощью космических РСА, предъявляются жесткие требования к точностным характеристикам АСН. По существу, достижимый уровень пространственной разрешающей способности РСА зависит в равной степени как от параметров радиолокационной системы, так и от параметров АСН. Недооценка этого обстоятельства приводит к большим дополнительным затратам времени при обработке радиолограмм в наземных разделах синтеза радиолокационных изображений. В частности, результаты летных испытаний космического аппарата «Кондор-Э» показали, что «расчеты параметров

фокусировки в детальном прожекторном и в детальном непрерывном режимах съемки с помощью штатной навигационной системы не дают желаемого результата. Только комбинируя инструментальный вариант фокусировки с автофокусировкой, удалось добиться «удовлетворительного результата» [1.19].

Бортовой комплекс управления должен обеспечивать и высокие точностные характеристики по ориентации конструкции КА относительно центра масс по трем осям в течение сеанса радиолокационной съемки. Антенная система РСА, как правило, жестко связана с элементами конструкции КА и ее начальная ориентация в пространстве, обуславливающая и начальную ориентацию главного луча, соответствует ориентации КА. На рис. 1.3 схематически показаны варианты смещения следа луча антенны РСА при наличии ошибок ориентации КА.

Имеются два критерия, по которым выдвигаются требования к точностным характеристикам системы ориентации в части обеспечения правильной работы РСА. Первый — это необходимость обеспечения совпадения траверсной плоскости (плоскость, включающая центр масс КА, надир и центр снимаемого объекта) с плоскостью нулевого доплеровского смещения частоты отраженного сигнала. Для обеспечения этого требования необходимо устанавливать азимутальную ось конструкции АФАР параллельно вектору путевой скорости космического аппарата в гринвичской системе координат, что требует программной компенсации вращения Земли в пределах $\pm 4^\circ$. Вторым критерий — необходимость обеспечения точности нацеливания нормали к плоскости апертуры антенны на центр снимаемого сюжета (или центр полосы захвата) с максимальной ошибкой не более 300 м. Оба эти критерия диктуют следующие требования к системе ориентации и стабилизации осей КА по трем осям в гринвичской системе координат в течение сеанса радиолокационной съемки:

- максимальная (3σ) ошибка ориентации осей КА и одновременно осей антенны — не более 1,5 угл. мин;
- максимальное значение остаточной угловой скорости осей КА относительно центра масс — не более 0,4 угл. мин/с;
- случайные угловые колебания осей КА — не более 0,06 угл. мин в полосе частот от 1 до 50 Гц, не более 0,3 угл. мин в полосе частот более 50 Гц.

Помимо навигационной информации, бортовой комплекс управления должен обеспечивать выдачу в РСА перед сеансом и периодически в течение сеанса съемки топографические данные о профиле рельефа снимаемой местности с целью снижения ошибок совмещения центра строба радиолокационного приемника с центром снима-

емого объекта или маршрута. Например, для режима детальной съемки такого рода ошибки допускаются не более 300 м.

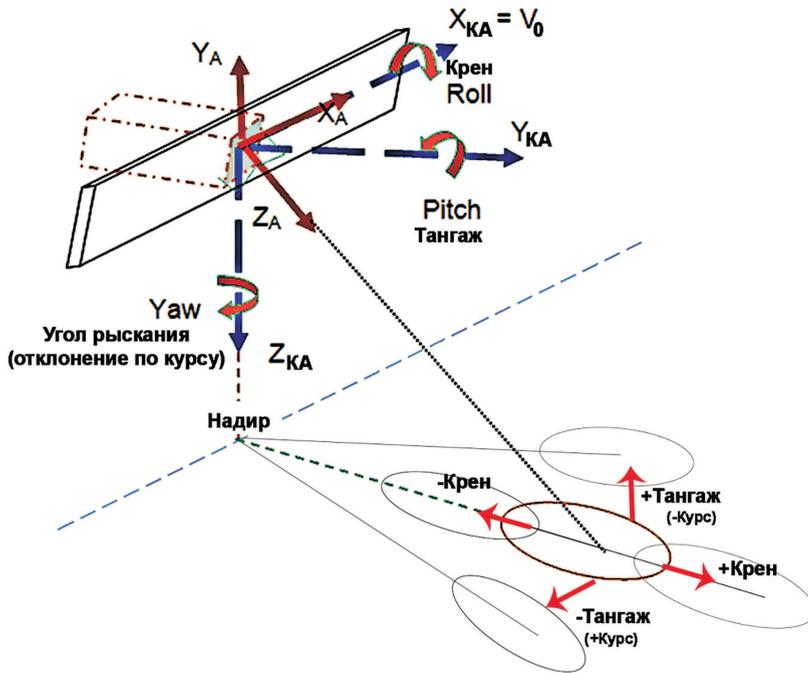


Рис. 1.3. Схема возникновения ошибки положения центра следа луча антенны

Величина ошибки смещения (A)-линии визирования центра снимаемого кадра зависит от угла визирования β (или от угла скольжения γ), как показано на рис. 1.4.

Высота местного рельефа h , приводящая к смещению центра кадра на величину A , рассчитывается по формуле $A = h/\text{tg } \gamma$. Для типовых орбит РСА ДЗЗ среднее значение угла скольжения составляет 45° . При данных условиях максимально допустимое значение ошибки учета рельефа земной поверхности в режиме детальной съемки равно $\Delta b = A = 300$ м.

На рис. 1.5 приведена в качестве примера изменения рельефа трасса КА на рабочем отрезке «Тегеран – Шираз» и соответствующий профиль рельефа земной поверхности в режиме маршрутной съемки с помощью РСА ДЗЗ [расчет профиля высот выполнен по программе <http://www.433175.ru/index.php?do=static&page=map>]. На этом же рисунке приведена отложенная ось текущего времени (t) полета КА в течение сеанса съемки.

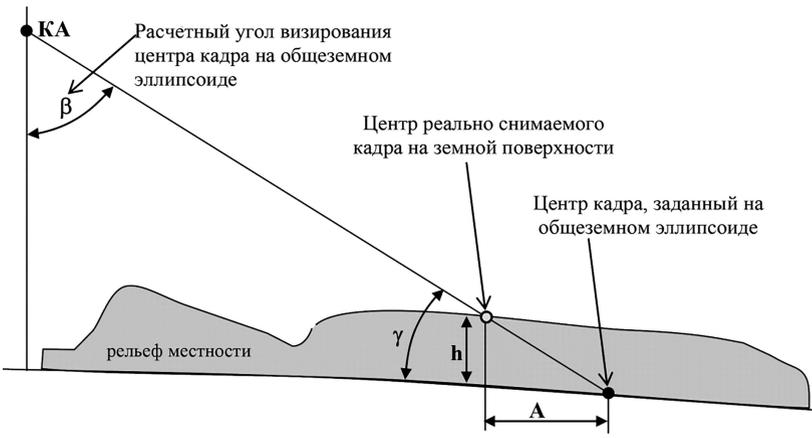


Рис. 1.4. Схема возникновения ошибки смещения центра кадра

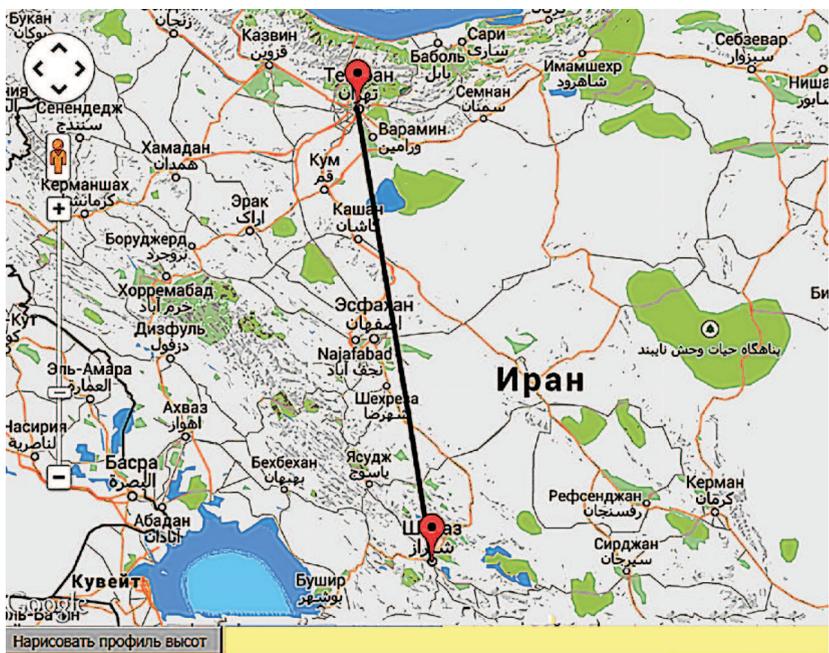


Рис. 1.5. Пример профиля рельефа земной поверхности на отрезке «Тегеран – Шираз»

Из графика профиля высот на рис. 1.5 следует, что величина возвышений рельефа над общеземным эллипсоидом изменяется от 800

до 3000 м. Причем на первом отмеченном участке (30÷37 секунды сеанса) средняя скорость изменения высоты рельефа составила +170 м/с, на втором участке — +45 м/с, а на третьем — -400 м/с. Из приведенного примера следует, что для выполнения требований в части допустимых сдвигов границ снимаемого кадра информация о рельефе земной поверхности в режиме детальной съемки, поставляемая из БКУ КА в РСА с привязкой к бортовой шкале времени, должна обновляться не реже одного раза в секунду. Цифровые карты рельефа районов, предназначенных для проведения радиолокационных съемок с погрешностью отображения высот около 100 м, должны формироваться в наземном центре планирования работы КА и включаться в суточное полетное задание.

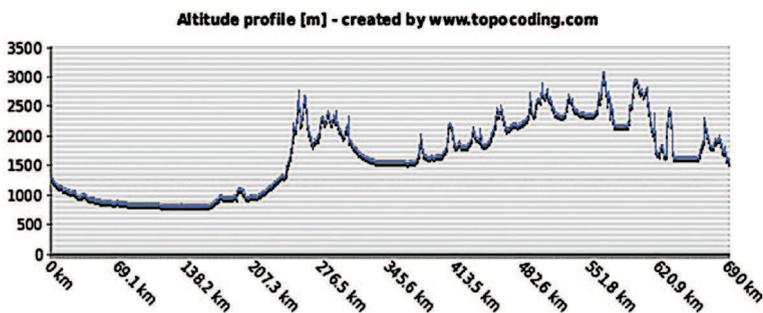


Рис. 1.5 (продолжение). Профиль высот в сечении этого участка

1.2. Перспективы интегрирования и унификации космических радиолокационных систем ДЗЗ

Вопросы интегрирования и унификации космических радиолокационных систем ДЗЗ разделяются на три категории.

Первая категория касается элементной комплектующей базы для бортовой аппаратуры. К аппаратуре космического применения всегда предъявляются требования минимизации размеров, массы и энергопотребления, что предполагает использование электронных компонентов с высоким уровнем интеграции. К примеру, практика проектирования приемопередающих модулей (ППМ) для АФАР показала, что переход от твердотельной микросхеменной технологии на монолитные интегральные микросхемы позволяет уменьшить размеры ППМ в 1,5 раза. Вместе с тем в настоящее время российская

промышленность не в состоянии предложить достаточную номенклатуру высокоинтегрированных радиоэлектронных компонентов с высокими параметрами радиационной стойкости для построения бортовых радиолокационных комплексов. Перспективы развития отечественной СВЧ интегральной электроники рассмотрены в главе 3 книги.

Вторая категория вопросов интегрирования и унификации относится к уровню блоков и устройств. В этом сегменте можно говорить о целесообразности создания унифицированных технологий для производства фрагментов излучательных систем АФАР, унифицированных приемопередающих модулей для АФАР разных диапазонов частот, опорных высокостабильных генераторов, формирователей зондирующих сигналов, блоков приемников, блоков аналого-цифровых преобразователей, бортовых управляющих вычислительных машин. В частности, еще в 2003 г. специалисты 4 ЦНИИ Министерства обороны выделяли такие актуальные направления развития бортовых вычислительных и управляющих машин для изделий космической техники, как унификация бортовых цифровых вычислительных систем различных классов и создание единого унифицированного ряда ЭВМ с использованием единого конструктивно-функционального модуля и максимальная унификация интерфейсов для бортовых ЭВМ [1.20].

К третьей категории относятся системные вопросы интегрирования и унификации. Прежде всего это интегрирование и унификация наземных комплексов приема и обработки данных, получаемых с разных средств ДЗЗ космического базирования (оптических, радиолокационных, отечественных и иностранных). В соответствии с «Концепцией развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года» для решения данной проблемы предполагается создать Единую территориально-распределенную информационную систему дистанционного зондирования (ЕТРИС ДЗ), которая позволит функционально объединить наземные комплексы и центры приема, обработки и распространения космической информации, принадлежащие ведомствам, регионам, крупным компаниям, интегрировать их информационные ресурсы в области ДЗЗ в единое геоинформационное пространство для максимального удовлетворения потребностей различных категорий потребителей.

В настоящее время сеть гражданских наземных комплексов приема, обработки и распространения данных, приемных центров и станций ДЗЗ на территории России включает:

- НКПОР Роскосмоса (Научный центр оперативного мониторинга Земли, г. Москва, район Отрадное);
- центры ДЗЗ предприятий ракетно-космической промышленности (ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара и ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, г. Москва);
- НКПОР Росгидромета в составе пяти приемных центров (города Москва, Долгопрудный, Обнинск, Новосибирск, Хабаровск);
- сеть приемных станций Министерства чрезвычайных ситуаций в составе пяти центров ДЗЗ (города Москва, Вологда, Красноярск, Хабаровск, Владивосток);
- сеть станций приема Минприроды в составе шести центров ДЗЗ (города Москва, Геленджик, Екатеринбург, Иркутск, Якутск, Южно-Сахалинск);
- центр приема информации Росреестра (г. Москва);
- региональный центр ДЗЗ в г. Ханты-Мансийске.

Еще одной системной задачей является интегрирование и унификация бортовой аппаратуры запоминания и передачи на наземные разделы приема и обработки радиолокационной информации, полученной от РСА, т.е. бортовой аппаратуры высокоскоростной радиолинии. В настоящее время наиболее реальной является задача создания унифицированного комплекта бортовой аппаратуры ВРЛ X-диапазона с информационной скоростью около 300 Мбит/с, в дальнейшем — до $600 \div 800$ Мбит/с. Также необходимо создать унифицированный комплект аналогичной аппаратуры для передачи информации через перспективный геостационарный спутник-ретранслятор в Ka-диапазоне, которая может быть интегрирована с аппаратурой прямой передачи информации на Землю. Одновременно для согласования потока цифровых данных от РСА с пропускной способностью радиолинии передачи данных имеет смысл разработать унифицированное устройство сжатия радиолокационной информации на борту КА перед передачей ее через радиолинию на наземные разделы. Обзор возможностей в этом направлении содержится в [1.1].

Наряду с унификацией аппаратуры необходимо утвердить унифицированный высокоскоростной бортовой интерфейс для передачи больших потоков радиолокационных данных в унифицированную бортовую аппаратуру ВРЛ. Возможным вариантом решения этой задачи является российская адаптация интерфейса SpaceWire для применения на космических аппаратах, который позволяет осуществлять передачу данных в одном канале со скоростью до 200 Мбит/с. Предприятие АО «ИСС им. академика М.Ф. Решетнева» приступило к практическим действиям в этом направлении. В частности,

оно инициировало разработку и освоение производства на отечественном предприятии ПАО «Микрон» большой интегральной схемы (терминального узла) бортовой информационной сети с аппаратной реализацией контроллера SpaceWire со сроком реализации 2016–2019 гг. (программа Минпромторга «Импортозамещение ЭКБ ИП»). Одновременно началась разработка проектов группы национальных стандартов (ГОСТ) технологии SpaceWire-RUS (интерфейс SpaceWire, транспортный протокол сети SpaceWire на базе протокола СТП-ИСС) в те же сроки реализации (СЧ НИР «Партитура», ФКП 2016–2025 гг, заказчик ФГУП ЦНИИмаш).

К задачам третьей категории также относятся унификация спецификаций параметров космических РСА и протоколов передачи радиолокационной информации на наземные разделы приема и обработки. В качестве примеров можно привести некоторые из действующих за рубежом спецификаций:

- CEOS. Synthetic Aperture Radar Data Product. Format Standards. Revision 2.0. CEOS-SAR-CCT. 10.03.1989;
- X-SAR CEOS Format. X-SAR-D-CEOS. Version 2.0. 27.04.1995;
- RADARSAT-1 Data Products Specifications». RSI-GS-026, Revision 3/0. August 19, 2004;
- TerraSAR-X. Ground Segment. Basic Product Specification Document. TX-GS-DD-3302, issue 1.9, 09.10.2013;
- Sentinel-1 Product Specification. S1-RS-MDA-52-7441. Revision 2/7. 30.01.2014.

Стандарты CEOS определяют типы радиолокационных продуктов, форматы данных, состав и содержание сопроводительной служебной информации. Для представления радиолокационных данных ДЗЗ в формате CEOS используется структура из четырех файлов, показанных на рис. 1.6: файл каталога тома (Volume directory file), файл заголовка (Leader file), файл данных (Data set file), файл нулевого тома (Null volume file) [1.21].

Каждый файл содержит записи, первые 12 байт которых имеют одинаковую структуру и включают информацию о порядковом номере, типе и длине записи. Каждая запись разделена на области, имеющие в зависимости от содержимого определенный формат, описание которого состоит из двух частей. Для первой части используется буквенное обозначение областей: *A* — буквенно-цифровая, *B* — код CEOS, *I* — целочисленные данные, *F* — числовая с плавающей точкой, *E* — числовая экспоненциальная область.

Вторая часть описания представляется числом, указывающим количество байт, занимаемых данной областью. Если эта часть представлена дробным числом, то целая часть числа дает информацию

об общем количестве байт области, а часть числа после запятой — информацию о количестве байт, отведенных для дробной составляющей.

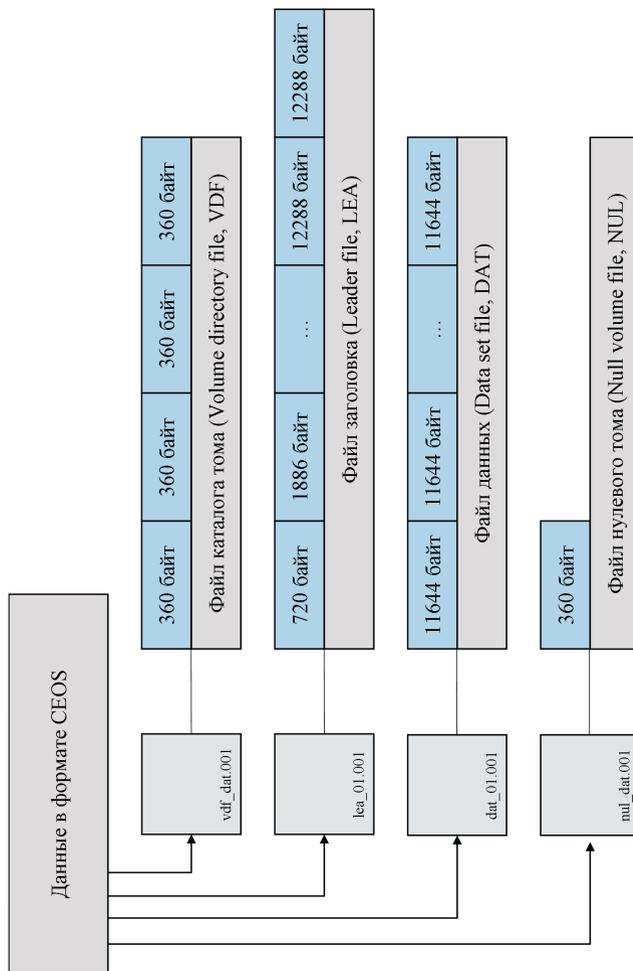


Рис. 1.6. Структура данных в формате CEOS

Файл каталога тома содержит запись его описания, запись указателя на файл заголовка, запись указателя на файл данных и текстовую запись.

Файл заголовка включает запись описания, запись о необработанных данных, запись с необработанными данными о положении платформы, запись данных общего типа для радиолокатора, запись данных качественного типа для радиолокатора. Запись описания

содержит идентификатор формата контрольного документа, номер и имя файла, сведения о локации и наборе данных, информацию о количестве и длине записи картографической проекции, положении платформы, пространственном положении, радиометрических данных, радиометрических коррекциях, спектральных диапазонах, корректировках параметров радара, типе длины записи. Запись о необработанных данных хранит основные параметры радиолокатора, общие параметры для обработки, указатель диапазона сжатия, параметры сцены и особенности, характерные для рассматриваемого участка местности. Запись с необработанными данными о положении платформы включает информацию о позиционировании опорных точек кадра, точное время получения каждой из точек, временной интервал между точками, справку о системе координат, ошибку позиционирования вдоль и перпендикулярно направлению движения платформы, вектора положения и скорости для каждой точки. Запись данных общего типа для радиолокатора содержит информацию о начальной длительности стробирующего импульса, об изменении частоты следования импульсов, о калибровочных коэффициентах, параметрах опорного ЛЧМ сигнала, входных данных статистики, достоверности среднего значения доплеровской частоты, степени достоверности неопределенности сдвига доплеровской частоты, количестве вышеперечисленных изменений, уровнях боковых лепестков кросскорреляционной функции ЛЧМ, расчетных величинах квадратурной и синфазной составляющей входного сигнала, калибровке сигнала.

Файл данных, структура которого показана на рис. 1.7, включает запись описания файла и набор записей необработанных данных.

Запись описания файла содержит идентификатор формата контрольного документа, номер и имя файла, данные об объекте съемки (номер объекта, длительность сеанса съемки, код режима съемки), информацию о количестве записей с необработанными данными, длине каждой записи, количестве строк и пикселей в каждом комплекте данных. Каждая запись с данными необработанного сигнала хранит описание, включающее количество строк, количество пикселей в строке, вспомогательную информацию о параметрах радиолокатора, счетчик пакетов, и представляет собой одну строку радиоголограммы, т. е. отраженные сигналы для одного зондирующего импульса. Каждый элемент строки радиоголограммы представлен двумя байтами, по одному байту на синфазную и квадратурную составляющие отраженного сигнала. Файл нулевого тома содержит запись описания файла, которая включает идентификаторы физического и логического томов, количество томов, их порядковые номера, дату, время, страну, организацию создания тома.