

Проблемы дистанционного зондирования Земли с использованием космических РСА высокого разрешения

В.В. Костров¹, Е.Ф. Толстов²

¹Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Муром, ул. Орловская, 23. E-mail: vvk@mit.ru

²ЗАО «АЭРОКОН», г. Жуковский, МО, ул. Гагарина, д.1. E-mail: E_Tolstov@mail.ru

Приводится общая характеристика систем дистанционного зондирования Земли с использованием радиолокаторов с синтезированием апертуры (РСА) космического базирования. Приведены результаты исследований различных алгоритмов цифровой обработки траекторного сигнала при нормальном и скошенном боковом обзоре в импульсном радиолокаторе с синтезированием апертуры (РСА) космического базирования. Предложен метод построения модели миграций для формирования опорного сигнала. Особое внимание уделено достижению высокой точности определения местоположения цели за счет использования двумерной обработки и построению процессора цифровой обработки сигналов (ЦОС). Проведен анализ влияния тропосферы на траекторию распространения радиоволн в системе радиолокационного дистанционного зондирования Земли. Для низкоорбитального космического аппарата и модели слоистой атмосферы приведено решение задачи оценки точности определения координат точечных наземных целей в автономной системе дистанционного зондирования Земли. Отмечается, что из-за рефракции радиоволн смещение оценки может достигать нескольких десятков метров и существенно зависит от угла визирования, а также от времени года. Обсуждаются нерешенные проблемные вопросы развития радиолокационных космических систем ДЗЗ с высоким разрешением.

In this lecture it is provides an overview of the Earth remote sensing systems using space-based synthetic aperture radars (SAR). The results of studies of various algorithms of digital trajectory signal processing at normal and squint lateral overview in pulsed SAR are submitted. The method of model migration construction is proposed to reference signal forming. Special attention is paid to achieving a high accuracy of target location determining through the use of two-dimensional processing and the construction of the processor for digital signal processing (DSP). The analysis of the troposphere impact on the radio wave propagation trajectory in the system of radar remote sensing is done. The solution of task of estimation of the accuracy of point ground targets coordinates determining in autonomous remote sensing system is given for low-orbit spacecraft and stratified atmosphere model. It is noted that due to refraction the displacement estimates can reach several tens of meters and significantly depends on the angle of sight, and also the time of year. Unresolved problems of radar high-resolution space remote sensing systems development are discussed.

Введение

Радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны (РСА) с развитием информационных технологий находят всё более широкое применение. Они позволяют получать достаточно полную и точную информацию о труднодоступных и слабозаселенных районах Земли. Построенные на основе РСА системы землеобзора космического базирования являются эффективным средством получения оперативной и долговременной информации о состоянии и динамике объектов и районов земного шара в глобальных и региональных масштабах [1–3]. Это свидетельствует о том, что дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) из космоса с помощью РСА становится одной из ключевых технологий XXI века.

Научные и инженерные основы для реализации радиолокационных систем (РЛС) землеобзора были заложены в середине прошлого века [4–6]. Они были подготовлены достижениями в области самолетного приборостроения. Исследования по совершенствованию радиолокаторов бокового обзора, выполненные в 1958–1961 гг.

практически одновременно в СССР (ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского) и в США (Мичиганский технологический институт), привели к созданию принципиально новых средств радиолокационного наблюдения – когерентных радиолокаторов с искусственным синтезированием апертуры, способных решать задачи радиовидения с пространственным разрешением в единицы и доли метра. Метод повышения угловой разрешающей способности РЛС путем создания искусственной антенны с когерентным суммированием сигналов, принятых вдоль траектории полета, был экспериментально подтвержден с помощью РСА 70-сантиметрового диапазона волн в ходе исследовательских работ, проведенных в ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского [7–9].

Принцип синтезирования апертуры основан на использовании перемещения бортовой антенны РЛС для последовательного формирования виртуальной антенной решетки больших размеров на траектории полета. Бортовая антенна, как правило, при этом имеет небольшие размеры и достаточно широкую диаграмму направленности.

Радиолокаторы с синтезированной апертурой применяются для решения задач землеобзора достаточно давно. Большинство из них осуществляет только сканирование земной поверхности и отправку данных на Землю, где и происходит обработка полученных данных и формирование радиолокационных изображений (РЛИ). Весь этот процесс занимает достаточно долгое время и данные радиолокационной съёмки доходят до получателя с большой задержкой. Использование РСА космического базирования с формированием РЛИ непосредственно на борту космического аппарата позволяет значительно сократить время получения данных о земной поверхности.

Радиолокационная съёмка обладает рядом преимуществ и особенностей по сравнению с другими видовыми средствами наблюдения – оптическими, инфракрасными датчиками, а именно, возможностью получения РЛИ в любое время суток и в любую погоду, высокой точностью измерения координат и геометрических характеристик объектов, возможностью наблюдения и обнаружения объектов, невидимых в оптическом или инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра, скрытых снежным или растительным покровом, а также находящихся под поверхностью Земли.

Развитию данного направления космической отрасли в России уделяется пристальное внимание. Это объясняется тем, что по площади занимаемой территории Россия является одной из самых больших стран мира и ей необходимы мощнейшие технологии и средства для мониторинга и контроля большого разнообразия процессов, происходящих и на суше, и на море. В России интенсивно эксплуатируются не только существующие космодромы, но и строится новый космодром «Восточный», развиваются предприятия, занимающиеся проектированием и разработкой систем ДЗЗ. Создаются условия для развития этой отрасли и в виде долгосрочных государственных программ, направленных на поддержку отечественных технологий [2, 3]. Появляются предпосылки к обеспечению независимости от зарубежных средств получения данных из космоса, увеличению оперативности доступа к актуальной информации, появлению возможностей для испытания новых технологий в РСА. Развитие сферы ДЗЗ позволяет использовать данные, полученные со спутников, для решения широкого круга задач, связанных с обеспечением безопасности и производственной деятельности государственных и коммерческих потребителей.

Существует два основных вида землеобзора – широко распространенный оптический метод получения снимков поверхности Земли, на долю которого приходится до 70% всей геоинформации, полученной системами землеобзора космического базирования, и радиолокационный метод. К достоинствам оптического метода можно отнести относительно простую конструкцию блоков и простоту проектирования и постройки данных аппаратов. Проблема использования оптического зондирования

Земли состоит в жесткой зависимости возможности съемки от метеорологических условий и времени суток. Большой объем полученных снимков бракуется из-за большой облачности и плохой освещенности поверхности Земли.

Радиолокационная съемка выгодно отличается от оптической: съемку можно проводить независимо от метеорологических условий, от времени суток и освещенности, а сопоставление и обработка данных, полученных с использованием РСА высокого разрешения, позволяет выявлять незначительные отклонения во многих геофизических и техногенных процессах. При радиолокационной съемке полученные геометрические характеристики объектов отличаются повышенной точностью измерения, появляется возможность трёхмерного портретирования объектов и построения цифровых карт рельефа местности [10–11].

Современные технологии позволяют создавать спутниковые радиолокаторы с РСА, способные получать высокодетальные изображения объектов на Земле с пространственным разрешением менее 1 метра. В связи с увеличением разрешения РСА усложняется и аппаратура, и алгоритмы обработки траекторного сигнала при синтезе РЛИ, появляются новые режимы радиолокационной съемки. Качество получаемых РЛИ становится близким к оптическим снимкам. Разумеется, при построении систем такой сложности возникает множество проблем, усложняющих получение и обработку данных [8–11]. При реализации алгоритмов съемки и обработки информации необходимо учитывать как можно большее количество дестабилизирующих факторов – погрешности, вносимые аппаратурой, средой вокруг объекта съемки, нестабильности траектории носителя, влияние притяжения Земли, Луны и другие. Степень и полнота учета таких факторов существенно влияют на качество получаемых радиолокационных изображений [8]. Некоторые из проблемных вопросов обработки траекторных сигналов в РСА высокого разрешения рассматриваются в данной лекции.

1. Использование космических систем ДЗЗ с РСА

Области применения данных, полученных с помощью радиолокационных средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) высокого разрешения, очень широки. К ним относятся получение высокодетальных снимков местности, мониторинг катастроф и экологических загрязнений, контроль изменений земной поверхности на газопроводах, нефтепроводах, наблюдение за районами крупных строек и добычи полезных ископаемых, составление цифровых карт местности, метеорологические исследования, селекция движущихся целей с определением направления движения и скоростей объектов (кораблей, машин) и др.

В [1–3] поставлены задачи решения этих проблем на мировом уровне для удовлетворения растущих потребностей социально-экономической сферы, науки, обороны и безопасности страны с использованием отечественных космических средств. В [3] ставится задача обеспечения эффективного использования КА двойного применения для решения социально-экономических задач дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Высокие технические характеристики современных РСА позволяют реализовать функции радиолокационного зондирования для всепогодного наблюдения в интересах решения ряда природопользовательских и народнохозяйственных задач ДЗЗ с высокой детализацией. Космический комплекс радиолокационного наблюдения обеспечивает широкий обзор на больших дальностях при высокой разрешающей способности, многообразие режимов функционирования, высокую информативность, оперативность и производительность, а также получение ряда новых данных о рельефе, смещениях, техносфере, биомассе и физико-химических характеристиках земной поверхности [10–12]. В составе системы ДЗЗ одновременно могут функционировать несколько КА с

радиолокационной и оптической аппаратурой. С одной стороны, это повышает информативность системы ДЗЗ, поскольку появляется возможность комплексирования оптических и радиолокационных изображений. Но с другой стороны, такое совмещение предполагает унификацию аппаратуры передачи, приема и регистрации данных ДЗЗ.

Анализ основных направлений развития зарубежных средств ДЗЗ свидетельствует о том, что по уровню разрешения, по оперативности и периодичности наблюдения коммерческие системы приближаются к военным [10, 12]. Представляет также интерес анализ задач, решение которых востребовано потребителями информации. В таблице 1 представлены требования к видам съемки различных потребителей [12].

Таблица 1. Требования к видам съемки по основным потребителям

№ п/п	Потребители	Количество задач по типам съемки	
		Оптические и ИК системы ДЗЗ	Радиолокационные системы ДЗЗ
1	Росреестр	4	3
2	Минприроды	13	4
3	МЧС	44	14
4	Росгидромет	8	3
5	Росрыболовство	6	2
6	Минсельхоз	9	–
7	Минэнерго	13	2
8	Рослесхоз	31	3
9	Минрегион	10	–
Число задач		138	31

Как видно из таблицы 1, по сравнению с оптико-электронными спутниками оперативного наблюдения радиолокационные системы ДЗЗ проигрывают по количеству востребованных задач. На данное обстоятельство, по-видимому, влияет три основных фактора: 1) малое количество разноплановых отечественных коммерческих КА с аппаратурой РСА; 2) отсутствие разветвленной сети центров обработки и распространения радиолокационной информации; 3) сильная зависимость от зарубежных поставщиков информации. Преодоление причин возникновения подобных факторов, которые дают накапливающийся со временем негативный эффект, представляет собой актуальную задачу стратегического уровня в освоении Земли и космоса.

К основной задаче, которая ставится перед разработчиками РСА высокого разрешения, относится способность решения с помощью РСА широкого круга пользовательских задач по дистанционному зондированию Земли (ДЗЗ) [12, 13]. Перечисленный ниже перечень задач определяется информационным содержанием задач потребителей из таблицы 1:

- землепользование, ведение земельного кадастра;
- геологическое и топографическое картографирование;
- формирование цифровых моделей рельефа местности (ЦМР), в том числе высокоточных (с пространственным разрешением менее одного метра и точностью определения высоты около 1–2 метров);
- построение цифровых карт смещений (ЦКС) земной поверхности, измерение деформаций отражающей поверхности с точностью порядка доли длины волны РСА, в частности:
 - мониторинг землетрясений;
 - мониторинг вулканической активности;
 - мониторинг оползнеопасных и карстовых участков;

- выявление просадок, деформации сооружений;
- мониторинг движения поверхности моря;
- высокоточные измерения задержки радиосигналов в атмосфере (напрямую связанной с распределением в атмосфере водяного пара);
- мониторинг сельскохозяйственной деятельности. В частности, комбинация интерферометрических и поляриметрических данных позволяет извлечь информацию о вертикальной структуре лесного покрова, определить высоту деревьев;
- обнаружение и определение скорости подвижных объектов наземного и воздушного базирования;
- обнаружение морских подвижных объектов, контроль судовождения, информационное обеспечение промысла морепродуктов и безопасности морского транспорта;
- мониторинг Мирового океана, океанографические и океанологические исследования по всей поверхности океанов и морей земного шара;
- ледовую разведку по трассам Севморпути в Арктике и других высокоширотных районов Мирового океана;
- экологический мониторинг моря и суши;
- наблюдение за местами поиска и добычи нефти, газа и других полезных ископаемых; транспортировки нефтепродуктов; строительства и функционирования крупных металлургических и иных промышленных комплексов;
- мониторинг растительного покрова, определение биомассы;
- подповерхностное зондирование, обнаружение подповерхностных водных линз и водоносных слоев;
- мониторинг чрезвычайных ситуаций;
- выявление зон и измерение интенсивности осадков.

Нетрудно заметить, что некоторые задачи различных потребителей пересекаются, поэтому в [12] выделяются приоритетные направления развития ДЗЗ:

- получение в глобальном масштабе космических данных ДЗЗ, в том числе о состоянии атмосферы, гидросферы и поверхности для синоптических прогнозов, данных для изучения эволюции климата, решения природопользовательских задач, обеспечения интенсивного ведения хозяйственной деятельности в высокоширотных и полярных регионах, на шельфе морей;

- оперативный мониторинг территорий и океана в целях мониторинга чрезвычайных ситуаций природного, техногенного и военно-политического характера, оценки масштабов и характера разрушений; поиска предвестников и прогнозирование природных и техногенный катастроф.

Для наиболее полного решения всей совокупности задач, стоящих перед радиолокационными средствами ДЗЗ, [3] определяет перспективный состав российской космической системы (РКС) в виде следующих космических комплексов (КК) и самостоятельных космических систем (КС):

1) КС из 2-х средневысотных полярно-орбитальных метеоспутников для комплексного оперативного и регулярного наблюдения в глобальном масштабе за обширной совокупностью гидрометеорологических параметров атмосферы, подстилающей поверхности и околоземного пространства;

2) КК из одного спутника радиофизического наблюдения (в СВЧ-области спектра) в интересах ледовой разведки в высокоширотных районах и для океанографических и океанологических исследований на всей поверхности Мирового океана;

3) КК в составе одного спутника радиолокационного наблюдения с высоким и средним разрешением (1...50 м) для всепогодного наблюдения в интересах решения ряда высокодетальных и детальных природохозяйственных задач ДЗЗ;

4) многоспутниковая КС из малых КА для высокооперативного мониторинга землетрясений, техногенных и природных чрезвычайных ситуаций;

5) многоспутниковая КС из микроспутников для обнаружения очагов возгорания лесных пожаров, стихийных гидрометеорологических явлений, и других задач ДЗЗ, требующих предельно высокую периодичность обзора;

6) периодически запускаемые космические аппараты типа унифицированных орбитальных платформ, оснащаемые при каждом очередном выведении в космос новыми комплексами приборов ДЗЗ для фундаментального научного изучения Земли;

7) картографический космический комплекс.

Система получения и обработки радиолокационной информации в критических ситуациях должна обеспечивать потребителей информацией в режиме реального времени. Поэтому в отдельных космических комплексах целесообразно предусматривать формирование радиолокационных изображений на борту КА и передачу их в сжатом виде наземным потребителям. Это позволяет обеспечить:

- высокую оперативность сброса готовой к использованию информации большинству потребителей на подвижных объектах, в том числе – на малогабаритные передвижные приёмные пункты (автомобиль, самолет) и на корабли различного класса;

- максимальную информационную производительность космических средств радиолокационного наблюдения;

- высокую устойчивость космического радиолокационного комплекса при решении оперативных задач в чрезвычайных ситуациях за счёт высокоскоростной доставки информации потребителю;

- упрощение наземной аппаратуры потребителя, повышение на этой основе надёжности её эксплуатации и снижение требований к квалификации обслуживающего персонала;

- интерактивность решения задач за счет оперативного изменения заданий на съемку интересующих заказчика регионов;

- низкую удельную стоимость добываемых данных, снижение затрат на эксплуатацию КА радиолокационного наблюдения.

Широкий круг подлежащих решению задач определяет следующие требования к космическим комплексам и средствам ДЗЗ:

- аппаратура должна быть универсальной многорежимной;

- желательно, чтобы РСА был двухполяризационным и имел возможность работы, как минимум, в режиме поочередного приема сигналов ортогональных поляризаций (Dual-Pol);

- пространственное разрешение должно быть переменным в зависимости от выбранного (в данный момент) режима съемки (высокое, среднее и низкое разрешение);

- ширина полосы захвата может изменяться от нескольких километров до сотен километров.

В целом такое многообразие задач и особенностей технических характеристик предусматривает в каждом отдельном случае проведение комплекса исследований по анализу технического облика РСА, сформированного для решения основной целевой задачи. В результате формируются классификационные характеристики космического комплекса и определяется, к каким категориям больше тяготеет разрабатываемый комплекс. Возможны следующие варианты:

А) Система КА высокдетального наблюдения (включая КА картографического назначения) – должна преимущественно размещаться на низких орбитах и обеспечивать получение информации сверхвысокого (0,25...0,75 м), высокого (1...10 м) и среднего (10...50 м) разрешения.

Б) Система оперативного мониторинга территории РФ – должна размещаться на низких солнечно-синхронных орбитах (ССО) и обеспечивать глобальный и непрерывный мониторинг с помощью целевой аппаратуры с разрешением 1...10 м по территории России в реальном масштабе времени и осуществлять предсказание природных и техногенных катастроф с вероятностью не менее 0,9. Для оперативного контроля территории требуется группировка низкоорбитальных КА оперативного мониторинга.

В) Система интерферометрических радиолокационных КА высокого разрешения – должна обеспечить получение данных о рельефе местности и малых смещениях земной поверхности.

Г) Гидрометеорологическая система (включая океанографические КА) – должна представлять собой систему с КА на синхронно-солнечных орбитах и полярных высокоэллиптических орбитах и обеспечивать оперативность получения сведений о состоянии атмосферы, океана. Для решения большинства перечисленных задач требуются исходные данные низкого разрешения (порядка 300 м и хуже).

Д) Система геофизических КА – должна представлять собой систему КА на ССО и обеспечивать контроль физико-химических явлений и характеристик, процессов в верхней атмосфере, ионосфере и околоземном космическом пространстве.

Е) Система биофизических КА – должна представлять собой систему КА на ССО и обеспечивать контроль явлений, характеристик и процессов в экосистеме, в биомассе приземного слоя.

Решение задач дистанционного зондирования неразрывно связано с наземным комплексом, который объединяет все специализированные части космического сегмента ДЗЗ. Наземный комплекс обеспечивает прием, обработку, хранение и распространение космических данных ДЗЗ, тесно взаимодействует с Единой территориально-информационной системой дистанционного зондирования Земли [10]. Вычислительные мощности бортовой ЭВМ в настоящее время не могут обеспечить обработку информации высокодетальных режимов в полном объеме, поэтому на борту КА и в наземном комплексе необходимо предусмотреть наличие высокоскоростной радиолинии (космос-Земля), способной пропустить суммарный информационный поток до 10 Гбит/с.

Для успешного функционирования системы ДЗЗ с использованием РСА высокого разрешения необходимо предусмотреть систему калибровки, как активной с помощью различного рода имитаторов сигналов, так и с использованием отражателей (эталонных мишеней), располагаемых на специально выделенных территориях (полигонах). Подобные валидационные системы обеспечивают достоверность, информативность и высокую точность коррекции получаемой космической информации.

2. Базовые режимы радиолокационного обзора

К числу основных режимов радиолокационной съемки с высоким разрешением относятся:

- маршрутный режим (Strip);
- режим скошенного (передне- и заднебокового) обзора;
- прожекторный режим (Spot);
- многолучевой (сканирующий) широкозахватный режим (ScanSAR);
- режимы интерферометрической съемки (с разбиением антенны на отдельные секции, с использованием антенн различных КА, межвитковая интерферометрия);
- поляриметрические режимы;
- режимы селекции движущихся целей.

Среди перечисленных первые три являются базовыми, поскольку остальные режимы съемки представляют собой расширение базового режима. На рис. 1 – 3 представлены классические конфигурации базовых режимов обзора [14].

Маршрутный режим съемки (рис. 1) позволяет получить практически непрерывное РЛИ полосы захвата при максимальном пространственном разрешении на синтезируемом РЛИ. При его реализации используются все потенциальные возможности РСА. Время синтезирования, необходимое для достижения высокой разрешающей способности по азимуту, достигается учетом всех возможных для наблюдения сигналов. Количество импульсов, доступных для синтезирования апертуры, определяется по ширине ДНА в азимутальной плоскости, скорости движения луча по поверхности Земли. Полоса захвата определяется шириной ДНА в угломестной плоскости, а в полосе обзора – начальной установкой луча. Наиболее распространен способ маршрутной съемки, при котором максимум ДНА в процессе съемки не изменяет начального угломестного положения. Однако возможны и другие варианты, например, ступенчатого, чтобы не было пропусков, покадрового сканирования в течение времени синтеза. Для этого при движении КА по орбите осуществляется ступенчатое сканирование луча в угломестной плоскости. Подобные режимы могут быть реализованы только с помощью АФАР.

Маршрутный режим съемки наиболее часто используется для получения РЛИ поверхности Земли, поскольку заметно упрощается решение задачи управления ориентацией КА. С помощью системы реактивных двигателей положение продольной оси КА корректируется таким образом, чтобы эхо-сигнал имел нулевой доплеровский сдвиг по частоте. Такой режим съемки имеет ряд достоинств, обусловленных центральной симметрией наблюдения объектов съемки и, следовательно, траекторного сигнала до и после прохождения траверза по объекту. Отсюда выглядит естественным стремление разработчиков алгоритмического и программного обеспечения максимально использовать возможности нормального бокового обзора.

Режимы скошенного обзора получаются из маршрутного режима путем отворота луча диаграммы направленности от траверза на некоторый фиксированный угол вперед по пути движения КА (переднебоковой обзор) или назад (заднебоковой обзор) [10, 15]. Скошенный обзор обычно применяется для:

- получения криволинейной траектории движения пятна луча ДНА по поверхности Земли;
- случая несинхронно-солнечной орбиты, при которой необходимо компенсировать дополнительное доплеровское смещение за счет вращения Земли;
- получения дополнительной информации об объектах съемки, например, о тангенциальной скорости цели, сдвигов земной поверхности и т.д.

В прожекторном режиме съемки (рис.2) увеличение разрешающей способности достигается за счет увеличения времени синтезирования апертуры. На рис. 2 показан вариант непрерывного слежения за объектом, т.е. переднебоковой обзор плавно переходит в заднебоковой с постоянно изменяющимся углом отворота. Возможен также вариант организации высокодетальной прожекторной съемки, когда угол отворота принимает фиксированные противоположные по знаку значения. Тогда прожекторная съемка будет состоять из фрагментов переднебокового и заднебокового обзора.

Схема съемки, представленная на рис. 2, с двумя КА используется в продольной интерферометрической съемке, результатом которой может быть оценка цифрового рельефа местности или селекция подвижных целей на фоне подстилающей поверхности. При синхронном вращении КА и смещении их по высоте реализуется режим поперечной интерферометрии.

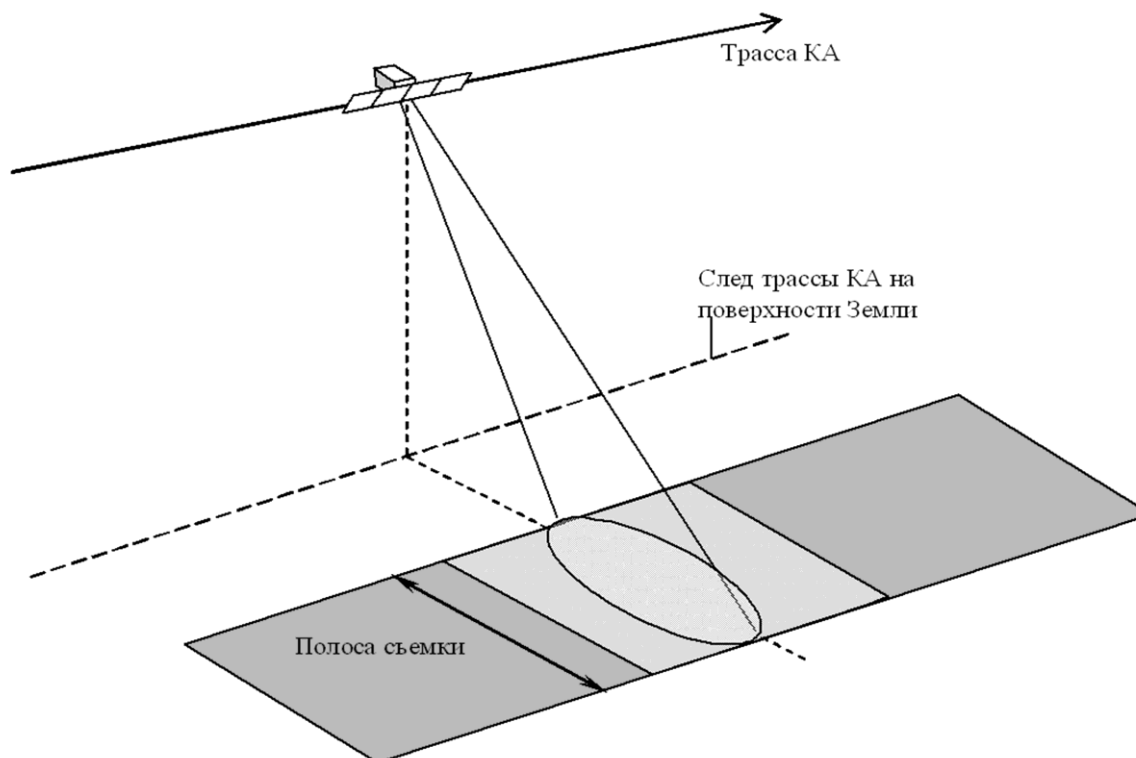


Рис. 1. Маршрутный режим съемки

В многолучевом сканирующем режиме съемки (рис.3) в процессе обзора осуществляется высокоскоростное изменение угломестного положения максимума диаграммы направленности. Ширина полосы захвата определяется размером пятна, которое дает диаграмма направленности на поверхности Земли, и числом используемых позиций луча. Для организации такого режима обзора требуется электрическое сканирование, поэтому в РСА используются активные фазированные решетки или гибридные зеркальные антенны. В настоящее время реализуемые параметры антенны позволяют обеспечить на низкоорбитальных КА размер полосы захвата 500...700 км.

Проблемы обработки сигналов в маршрутных режимах аналогичны проблемам прожекторного режима, поскольку высокая разрешающая способность приводит к необходимости устранения миграции по дальности. Кроме того, глубина резкости в таком режиме невелика (значительно меньше, чем длина кадра по дальности), поэтому при синтезе РЛИ необходимо постоянно корректировать опорные функции или их спектры, применять секционирование сверток и т.п. Необходимость использования двумерной фильтрации приводит к заметному усложнению алгоритма обработки и росту вычислительных затрат.

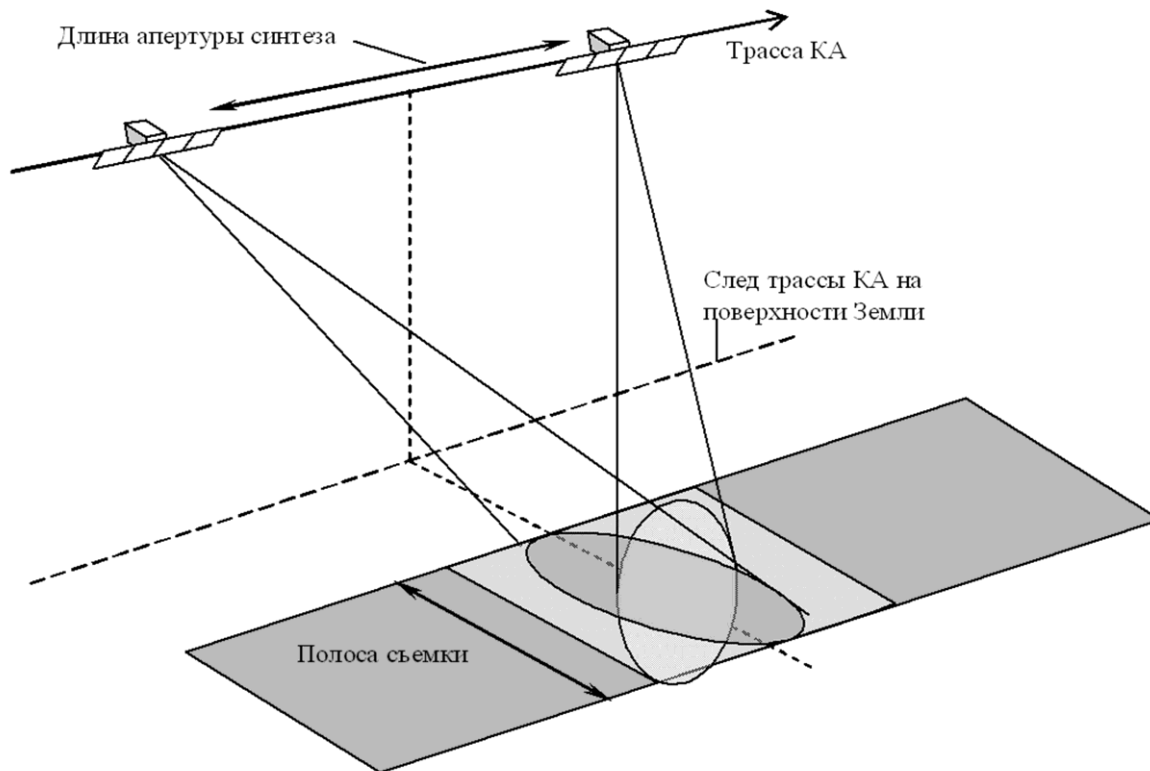


Рис. 2. Проекторный режим съемки

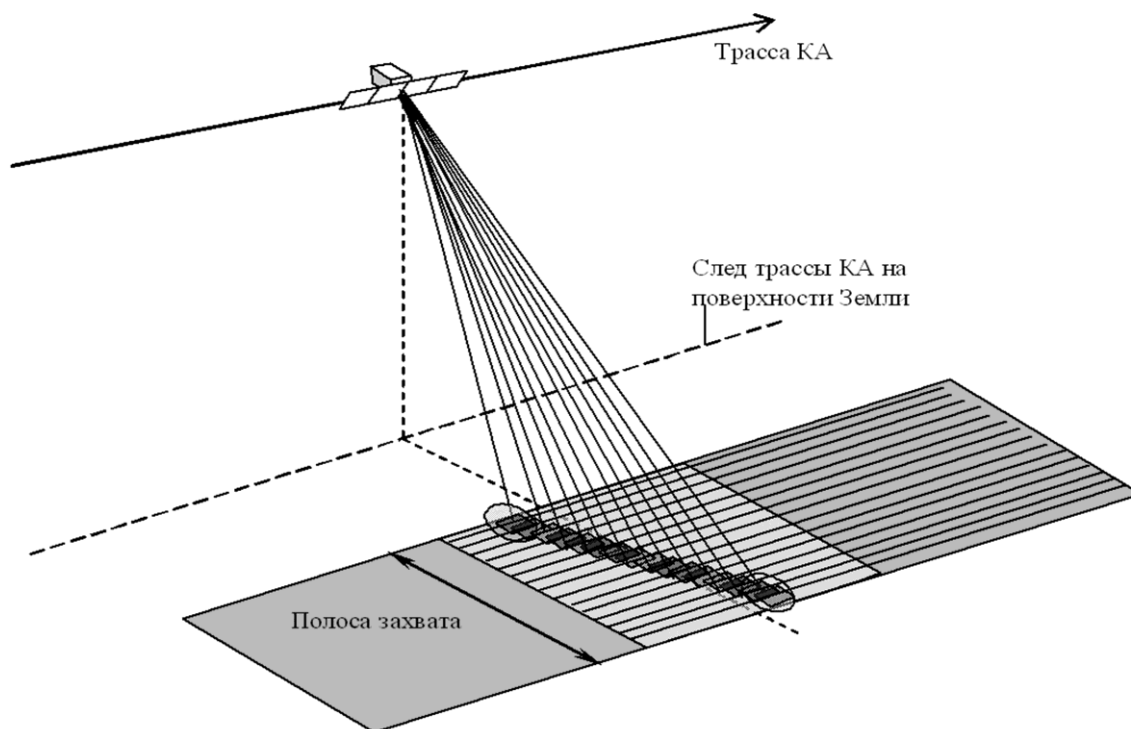


Рис. 3. Многолучевой сканирующий режим съемки

Во всех случаях могут быть организованы поляризметрические режимы, для их реализации необходима техническая возможность быстрого переключения поляризации электромагнитных волн на передачу и/или прием.

3. Влияние диапазона рабочих частот на возможности РСА

Задача выбора рабочей частоты для РСА одной из самых важных, ответственных и актуальных. От ее решения зависят как технический облик РСА, так и пользовательские (эксплуатационные) возможности. Одним из главных требований для пользователя является разрешающая способность. В космических комплексах с РСА в зависимости от режима съемки должны обеспечиваться следующие значения пространственного разрешения и точности измерений:

- режимы маршрутной (Strip) детальной съемки – разрешение 0,75...10 м;
- прожекторные (Spot) режимы – разрешение 0,25...1,5 м;
- режимы объектовой съемки максимального разрешения – разрешение 0,5...1 м;
- режимы обзорной съемки, в том числе широкозахватные (ScanSAR) режимы – среднее разрешение 30...100 м, низкое разрешение 100...200 м;
- режимы с СДЦ – разрешение по скорости 1,5...2 м/с;
- режимы интерферометрической и дифференциально-интерферометрической съемки – точность в вертикальной плоскости 2...10 м, разрешающая способность в вертикальной плоскости 0,1 м, точность измерения смещений 3...70 см.

Увеличение разрешающей способности и точности измерения профиля местности, создание цифровых моделей рельефа (ЦМР) связано с уменьшением длины волны зондирующего сигнала и ограничено максимально допустимой шириной его спектра [10]. В таблице 2 приведены основные диапазоны частот, разрешенные для использования в РСА «Регламентом радиосвязи», и достигаемое в них предельное пространственное разрешение при максимально возможной полосе частот зондирующего сигнала.

Таблица 2. Диапазоны частот для РСА и предельное разрешение по угломестной координате

Диапазон частот	Обозначение (длина волны)	Диапазон частот, ГГц	Полоса сигнала, МГц	Предельное разрешение, м	Основа использования
УВЧ	<i>P</i> (70 см)	0,432 – 0,438	6,0	25,0	Вторичная
УВЧ	<i>P</i> (70 см)	0,44 – 0,46	20	7,5	Вторичная
УВЧ	<i>L</i> (23 см)	1,215 – 1,300	85	1,77	Первичная
СВЧ	<i>S</i> (10 см)	3,1 – 3,3	200	0,75	Вторичная
СВЧ	<i>C</i> (5,6 см)	5,25 – 5,57	320	0,47	Первичная
СВЧ	<i>X</i> (3,5 см)	8,025 – 8,650	625	0,24	Первичная
СВЧ	<i>X</i> (3 см)	9,3 – 9,9	600	0,25	Первичная

В таблице 2 показано предельное разрешение, обеспечиваемое системой по координате «наклонная дальность». Разрешающая способность на местности будет зависеть от угла визирования (углом β между направлением на центр Земли и направлением на центр объекта съемки, $\beta = 20^\circ \dots 55^\circ$). Отличия в разрешающей способности на местности на краях диапазона углов сканирования может достигать 5...7 раз. Данные таблицы 2 показывают, что снижение разрешающей способности начинается с диапазона *S*. В связи с этим для *L* и *S* диапазонов целесообразно рассмотреть возможность расширения полосы сигнала до 150 и 300 МГц соответственно.

При выборе рабочей частоты руководствуются многими критериями. Здесь мы отметим только некоторые особенности влияния длины волны на качество получаемых изображений. Анализ радиолокационных снимков традиционных «узкополосных» РСА, полученных в диапазонах волн, выделенных Регламентом радиосвязи для зондирования

Земли из космоса, показывает, что по общему характеру снимки близки. Рассмотрим особенности использования частотных диапазонов.

На более длинных волнах технически проще обеспечить стабильность частоты и когерентность разнесенных источников, поэтому интерферометрические режимы работы реализовать проще.

На более длинных волнах (S , L и P диапазоны) лучше различаются контрасты растительного покрова, выше проникающая способность под крону леса, выше вероятность обнаружения малоразмерных объектов на фоне маскирующей местности (под растительным покровом). Волны L и P диапазонов дают возможность проникать под слой почвы и обеспечивают возможность обнаружения заглубленных объектов, а также выявления подповерхностных геологических структур.

Волны X диапазона позволяют получить высокое пространственное разрешение до нескольких дециметров, что обеспечивает высокую точность определения координат, распознавание малоразмерных целей по их видеопортретам. В X диапазоне за счет использования некогерентного накопления имеются широкие возможности сглаживания флуктуации (спекл-шума) выходного сигнала от шероховатых поверхностей, что облегчает задачу получения высококачественного изображения с хорошим радиометрическим разрешением.

Уровень отраженного сигнала в X и C диапазонах выше, чем в L и P диапазонах, в которых контрасты изображения подстилающих поверхностей значительно больше. На более длинных волнах (S и L диапазоны) обеспечивается измерение удельных объемов лесной биомассы в отличие от сантиметровых волн (X и C), для которых сигнал быстро достигает максимального значения.

При выборе диапазона волн следует учитывать особенности прохождения радиоволн через тропосферу (затухание радиоволн, отражение от метеообразований, фазовое запаздывание) и ионосферу (вращение плоскости поляризации – эффект Фарадея). В L и P диапазонах более ощутимо влияние ионосферы, а в X и C диапазонах – тропосферы.

Отсюда видно, что компромиссным решением многокритериальной задачи выбора частоты является использование в качестве базового режима работы S диапазона волн. Для решения комплексных тематических задач ДЗЗ этот режим может быть дополнен локатором L или P диапазона для зондирования подповерхностных объектов. В случае требования повышенной точности и разрешающей способности в комплектацию, кроме радиолокатора S диапазона может быть включен радиолокатор X диапазона.

В любом случае задача выбора рабочей частоты решается на основе комплексного критерия, а сам выбор – компромиссом между многочисленными техническими и пользовательскими факторами. Для построения радиолокационных систем ДЗЗ высокого разрешения используются S , C и X диапазоны, что позволяет в предельном случае получить разрешение по наклонной дальности 0,25...0,75 м. Разрешающая способность по дальности на поверхности Земли будет несколько хуже (см. раздел 5 данной лекции).

4. Характеристики некоторых РСА

В целом создание и практическая отработка технологии получения и обработки космической радиолокационной информации являются уникальными наукоемкими проектами. Невозможность проведения многочисленных экспериментов с космическими аппаратами, делает каждый запуск рискованным и требует от разработчиков РСА обеспечения высокой надежности работы аппаратуры в условиях агрессивного воздействия космического пространства. В результате накопленного опыта практической реализации основных режимов работы при ДЗЗ потребители космической информации должны обеспечиваться информационными продуктами высокоуровневой

обработки, которые соответствуют требованиям и стандартам, принятым в мировой практике.

В [1–3] поставлена задача обеспечения мирового уровня эксплуатационно-технических характеристик отечественных космических средств. Сравним достигаемые характеристики различных радиолокационных средств ДЗЗ. В таблице 3 представлены характеристики зарубежных и отечественных РСА *X* и *S* диапазонов [16].

В таблице 3 приняты обозначения: ПП – полный поляризационный режим съемки; ВВ – прием и передача на вертикальной поляризации; ГГ – прием и передача на горизонтальной поляризации; ПР – прожекторный режим; МР – маршрутный режим; СС – широкозахватный режим ScanSAR; ГЗА – гибридная зеркальная антенна; АФАР – активная фазированная антенная решетка; ЩАР – щелевая антенная решетка.

Таблица 3. Тактико-технические характеристики РСА *X* и *S* диапазонов

Параметр	TerraSAR-X	CosmoSky Med	SAR Lupe	Кондор-Э	Северянин -М
Высота орбиты, км	514	620	470. ..505	510	832
Наклонение орбиты, градусов	97,44	97,86	98,5	74,75	98,77
Центральная частота, МГц	9650	9600	9650	3200	9615
Тип антенны, размеры, м	АФАР, 4,8× 0,8	АФАР, 5,7× 1,4	ГЗА, 3,3 × 2,7	ГЗА, Ø6,0	ЩАР 13,4×0,25
Режимы съемки	ПР, МР, СС	ПР, МР, СС	ПР, МР	ПР, МР, СС	МР
Полоса обзора, км	570 (ПР), 350 (МР)	400	—	500	600
Полоса съемки, км	15 (ПР), 30 (МР), 100 (СС)	10 (ПР), 30/40 (МР), 100/200 (СС)	5,5 (ПР), 60 (МР)	10 (ПР), 10..15 (МР), 20..120 (СС)	600
Протяженность кадра, км	5—10	10	5,5 (ПР), 8 (МР)	10 (ПР)	10/500
Разрешение, м	1 (ПР), 3 (МР), 15 (СС)	1 (ПР), 3— 15 (МР), 30/100 (СС)	до 0,5 (ПР)	1...2 (ПР), 1...3 (МР), 6...12 (СС)	450—600/ 800—1300
Поляризация	ПП	ПП	—	ВВ, ГГ	ВВ
Минимальная чувствительность, дБ	-20(ПР), -19 (МР, СС)	-22	—	-20...-30	-20

Сравнительный анализ характеристик представленных аппаратов позволяет сделать следующие выводы о тенденциях развития радиолокаторов ДЗЗ:

- увеличение разрешающей способности за счет расширения полосы зондирующего сигнала и применения метода двойного приема;
- увеличение информативности радиолокационного изображения за счет применения для съемки полного поляриметрического режима;
- увеличение полосы обзора за счет применения сканирующих и многолучевых режимов съемки;
- повышение роли интерферометрических режимов съемки для получения трехмерных радиолокационных портретов, карт рельефа и измерения скоростей движущихся объектов.

Решение данных задач обычно связывают с применением в РСА активных фазированных антенных решеток (АФАР), однако для малых космических аппаратов в качестве компромиссного решения принимается использование ГЗА.

Одной из трудно решаемых проблем, как отмечалось в [2], является улучшение радиометрического разрешения. В [3] также ставится задача получения снимков Земли картографического качества, по которым важно фиксировать геометрические очертания природно-хозяйственных объектов с высокой точностью. Для решения таких задач необходимо использовать высокдетальный режим съемки с высокой радиометрической разрешающей способностью и полной поляризацией, что с технической точки зрения предъявляет противоречивые требования к РСА. Однако, реализация предельных параметров делает высокой потенциальную полезность снимков от КА в интересах социальной экономики, сможет расширить круг потребителей космической информации.

Остановимся более подробно на характеристиках некоторых РСА и их носителей – космических аппаратов.

TerraSAR-X, TanDEM-X – КА, запущенные, соответственно, 15 июня 2007 года и 21 июня 2010 года с космодрома Байконур; разработаны Германским аэрокосмическим центром DLR. Масса каждого спутника – 1250 кг, орбита – круговая солнечно-синхронная, высота орбиты 514 км, расчетный срок функционирования 5 лет. КА оснащены новейшими РСА, позволяющими выполнять съемку земной поверхности с беспрецедентно высоким пространственным разрешением (до 0,25 м). Спутники являются одними из наиболее совершенных инструментов дистанционного зондирования Земли и работают синхронно (TerraSAR-X работает в бистатическом режиме в паре с РСА TanDEM-X). Орбита КА TerraSAR-X стабильная, а КА TanDEM-X движется около КА TerraSAR-X на расстоянии 300...600 м. По данным, полученным с этих КА, создается глобальная цифровая модель местности и рельефа, беспрецедентная по площади покрытия и точности. Общий вид КА TerraSAR-X представлен на рис. 4, основные параметры режимов съемки приведены в таблице 4.

Таблица 4. Режимы съемки РСА TerraSAR-X

Режим	Пространственное разрешение, м	Ширина полосы съемки, км
Улучшенный сверхвысокого разрешения (Staring SpotLight – ST)	0,25	4
Сверхвысокого разрешения (High Resolution SpotLight – HS)	1	10
Высокого разрешения (SpotLight – SL)	2	10
Широкополосный высокого разрешения (StripMap – SM)	3	30
Среднего разрешения (ScanSAR – SC)	16	100
Низкого разрешения (Wide ScanSAR – WS)	40	270

Основные решаемые задачи:

- создание и обновление топографических и специальных карт, вплоть до масштаба 1:10 000;
- оценка сейсмической опасности, прогнозирование землетрясений, извержений вулканов;

- высокоточное наблюдение за состоянием инфраструктурных сетей (трубопроводы, железные дороги, телекоммуникации);
- контроль береговых зон и наблюдение за судами;
- задачи обеспечения обороны и безопасности и др.

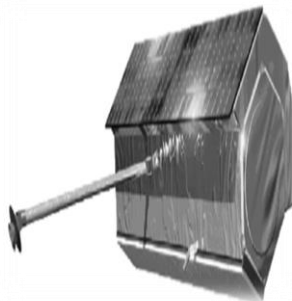


Рис. 4 .Облик КА TerraSAR-X

COSMO-SkyMed 1–4 – это серия КА двойного назначения (Constellation of Small Satellites for Mediterranean basin Observation – созвездие малых спутников для наблюдения за Средиземноморским бассейном), разработана Итальянским космическим агентством (ASI) совместно с Министерством обороны Италии. Даты запуска спутников соответственно: 8 июня 2007 года, 8 декабря 2007 года, 24 октября 2008 года, 6 ноября 2010 год. Стартовая площадка – авиабаза Ванденберг (США). Масса спутников – 1900 кг, орбита круговая, солнечно-синхронная, высота орбиты 619,6 км. Расчетный срок функционирования – 5 лет. Все спутники группировки оснащены РСА, позволяющим выполнять интерферометрическую съемку земной поверхности с высоким пространственным разрешением (лучше 1 м на местности) [16]. Общий вид КА COSMO-SkyMed представлен на рис. 5, а основные параметры режимов сведены в таблице 5.

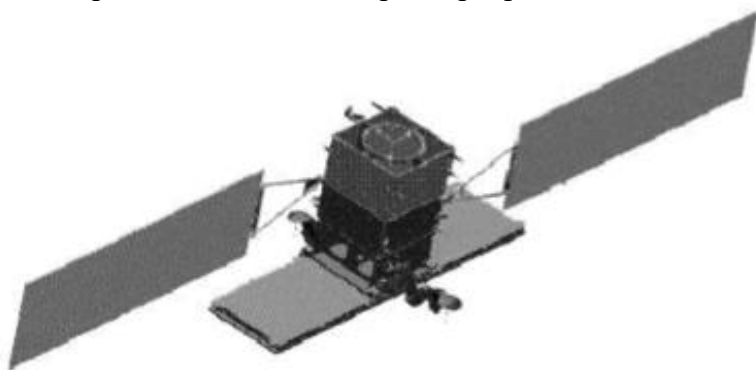


Рис. 5. Облик КА COSMO-SkyMed

Основные задачи, решаемые созвездием малых спутников COSMO-SkyMed:

- задачи обеспечения обороны и безопасности, как Италии, так и других стран;
- создание ЦМР и ЦММ высокой точности (2–4 м по высоте);
- всепогодное наблюдение за природными и антропогенными катастрофами (половодья, засухи, оползни, аварии);
- картирование сельскохозяйственных культур, определение состояния посевов, точное сельское хозяйство.

Таблица 5. Режимы съемки РСА COSMO-SkyMed

Режим	Номинальное пространственное разрешение, м	Ширина полосы съемки, км
Сверхвысокого разрешения (High Resolution SpotLight – HS)	≤ 1	10
Высокого разрешения (Stripmap – SL)	3...5	40
Среднего разрешения (ScanSAR Wideregion – SC)	30	100
Низкого разрешения (ScanSAR Hugeregion)	100	200
Среднего разрешения с двойной поляризацией (Polarimetric)	15...20	30

В качестве примера РСА *S* диапазона рассмотрим радиолокатор космического аппарата «Кондор-Э», в котором реализовано метровое разрешение. Изобразительные свойства радиолокационных снимков при наблюдении растительного покрова, а также при изучении геологической структуры земной поверхности выше в *S*-диапазоне, чем в *X* и *C* диапазонах волн. Для измерения удельных объемов лесной биомассы *S* диапазон подходит лучше, чем более коротковолновые диапазоны. РСА космического аппарата «Кондор-Э» является российским и разработан АО «Концерн «Вега». При проектировании этого РСА ставилась цель создать универсальную многорежимную аппаратуру, позволяющую решать широкий круг задач. В [10] сделан вывод, что для совмещения задач детального наблюдения заданных районов и ДЗЗ оптимален *S* диапазон волн с реализацией широкого набора режимов работы:

- детальный прожекторный режим (ДПР) максимального разрешения при РЛИ в виде кадра местности (разрешение около 1 м);
- детальный непрерывный режим (ДНР) высокого разрешения для съемки маршрута с РЛИ в виде полосы местности
- обзорный режим (ОР) среднего разрешения на основе широкозахватной съемки полосы местности;
- широкозахватный СС (ScanSAR) низкого разрешения.

Срок активного существования «Кондора-Э» составляет 5 лет.

КА был выведен на орбиту в декабре 2014 года с космодрома "Байконур", высота орбиты – 510 км [17]. Общий вид КА Кондор-Э приведен на рис. 6, а основные характеристики режимов – в таблице 6.

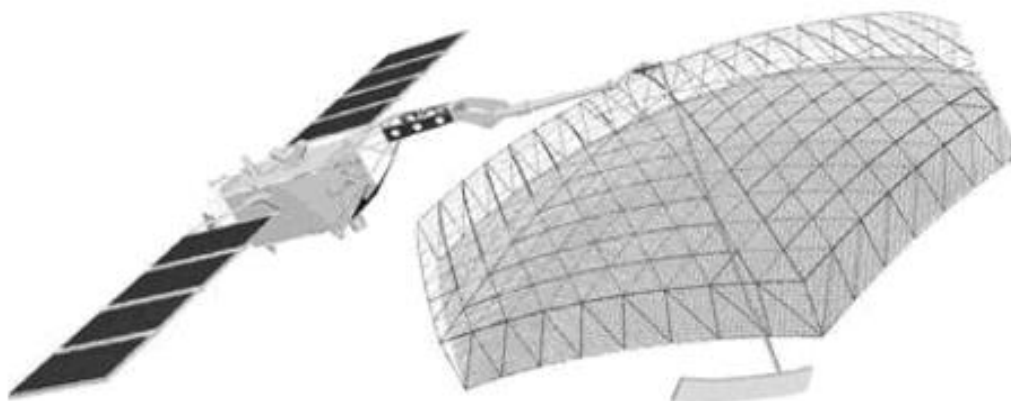


Рис. 6. Облик КА Кондор-Э

Таблица 6. Режимы съемки РСА Кондор-Э

Режим	Номинальное пространственное разрешение, м	Ширина полосы съемки, км
Детальный прожекторный режим (дальность × азимут)	2...1 × 1	10x10...15x30 (кадр)
Детальный непрерывный режим	2...1 × 3	10...15...30 (полоса)
Обзорный режим	14...12...5,5 × 12	30...100 (полоса)
Широкозахватный режим	8...12 × 12	30...100 (полоса)

В результате испытаний российских космических аппаратов Кондор-Э (а также по результатам моделирования) был выявлен ряд проблем, без решения которых невозможна реализация высокого разрешения. Например, при анализе записей радиоголограмм выяснилось, что зондирующий сигнал РСА имеет заметные амплитудные и фазовые искажения, а когерентность принятого сигнала в ходе синтезирования апертуры в ряде режимов нарушается [18]. Эти результаты наглядно показали сложность отладки высоко детальных режимов съемки, необходимость использования автоматической фокусировки, коррекция получаемых радиолокационных изображений, алгоритмы которой должны быть встроены в процедуры обработки. Кроме того, результаты испытаний дали основание ужесточить ряд технических требований к вновь разрабатываемым РСА, которые позволят системе ДЗЗ получить высокое разрешение.

В целях решения поставленных задач в России к 2025 году планируется создание и ввод в эксплуатацию ряда космических аппаратов, оснащенных бортовыми радиолокационными комплексами (БРЛК) низкого и высокого разрешения (в соответствии с Концепцией развития космической системы дистанционного зондирования Земли в России на период до 2025 г.) [2]. Реализация основных мероприятий по созданию систем ДЗЗ осуществляется в рамках Федеральной космической программы России. Ожидается, что к 2020 г. орбитальная группировка ДЗЗ будет состоять из 33 спутников, 10 из которых будут оснащены БРЛК [3].

Среди КА орбитальной группировки космических средств ДЗЗ следует отметить космические аппараты серии Метеор-М, Метеор-МП (метеорологическое и океанографическое наблюдение), Смотр-Р (мониторинг нефтегазовой инфраструктуры); Аркон, Обзор-Р (комплекс радиолокационного оперативного всепогодного круглосуточного наблюдения, картография); Радар, Кондор-ФКА (интерферометрическая съемка).

5. Общие вопросы радиолокационной съемки

Как следует из рис. 1–3, реализация различных режимов съемки связана с управлением диаграммой направленности антенны (ДНА) в пространстве. В некоторых режимах съемка осуществляется при неподвижном луче антенны; реализация ряда режимов предполагает сканирование в одной плоскости (как правило, в вертикальной, или угломестной плоскости); часть режимов требует сканирования диаграммы направленности в двух плоскостях. Однако на начальных стадиях проектирования систем ориентируются на маршрутный режим съемки, когда направление максимума ДНА перпендикулярно направлению движения КА и находится в плоскости траверза. Такое положение луча при движении КА на синхронно-солнечной орбите обеспечивает отсутствие дополнительного доплеровского смещения частоты, что существенно облегчает обработку сигналов. Далее рассматривается именно такой случай (маршрутный режим съемки), а также варианты скошенного режима, когда в силу различных причин луч ДНА отвернут от плоскости траверза на некоторый угол в азимутальной плоскости.

Угловое положение максимума ДНА по отношению к надиру (к линии, соединяющей КА и центр Земли) в угломестной плоскости обозначим через $\beta_{ум}$. Этот угол часто называют углом визирования. Для космических РСА наиболее типичные значения угла визирования находятся в пределах от $\beta_{ум\ min} = 20$ до $\beta_{ум\ max} = 55...60$ градусов: при малых углах визирования мощный сигнал фона «ослепляет» радиолокатор, а при больших – резко возрастает наклонная дальность до точки съемки, и отношение сигнал-шум ухудшается. Для изменения угла визирования могут быть использованы различные методы, которые, по существу, определяют способ формирования зоны обзора.

При механическом управлении ДНА изменение угла визирования осуществляется за счет разворота антенны или КА, что позволяет использовать как правосторонний, так и левосторонний обзор, т.е. существенно расширить зону обзора. Ясно, что такой способ является, не смотря на невесомость, энергетически затратным, поскольку на совершение маневров и стабилизацию КА после маневрирования потребуется дополнительный запас топлива.

Изменять угловое положение максимума ДНА $\beta_{ум}$ в угломестной плоскости можно за счет использования электронных методов сканирования, которые реализуются, например, в активных фазированных антенных решетках (АФАР). Данный способ сканирования является универсальным и позволяет реализовать самые разнообразные методы обзора, в том числе правосторонний и левосторонний обзор.

Расчет зоны действия для космических РСА заметно отличается от расчетов для авиационных систем в первую очередь тем, что принципиально необходимо учитывать кривизну Земли. Поэтому рассмотрим геометрические параметры режимов съемки с учётом кривизны Земли.

Орбитальная скорость космического аппарата равна

$$V_0 = \sqrt{\frac{\mu}{R_3 + H_{КА}}}$$

где $\mu = 3,986 \cdot 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2$ – гравитационная постоянная,

$R_3 = 6,371 \cdot 10^6 \text{ м}$ – радиус Земли,

$H_{КА}$ – высота орбиты КА.

Скорость перемещения подспутниковой точки по земной поверхности меньше параметра V_0 и равна:

$$V_1 = V_0 \frac{R_3}{R_3 + H_{КА}}$$

На высоте орбиты $H_{КА} = 600...650 \text{ км}$ эти скорости изменяются в пределах: $V_0 = 7562...7535 \text{ м/с}$, $V_1 = 6911...6837 \text{ м/с}$.

Угол падения (скольжения) луча антенны на поверхность Земли (угол γ между направлением линии визирования и плоскостью горизонта в рассматриваемой точке на поверхности Земли) находится из соотношения

$$\gamma = \arccos \left[\left(1 + \frac{H_{КА}}{R_3} \right) \cdot \sin \beta_{ум} \right].$$

Значение критического угла $\beta_{кр}$, когда луч скользит по поверхности Земли, не создавая отраженного сигнала, находится из данной формулы при $\gamma = 0$

$$\beta_{кр} = \arcsin\left(\frac{R_3}{R_3 + H_{КА}}\right).$$

При $\gamma = 0$ луч ДНА будет только касаться Земли, поэтому зондирование Земли возможно только при $\beta_{ум} < \beta_{кр}$. Для примера при высоте орбиты $H = 650$ км критический угол равен $\beta_{кр} = 65$ градусов.

Луч ДНА перемещается вместе с космическим аппаратом. Скорость перемещения следа луча антенны по земной поверхности определяется формулой

$$V_{A0} = V_1 \sin(\beta_{ум} + \gamma).$$

Коэффициент $K_{л}$ снижения скорости движения луча по отношению к скорости движения КА равен

$$K_{л} = \frac{\text{tg}^2 \beta_{ум} + \sqrt{\text{tg}^4 \beta_{ум} - (1 + \text{tg}^2 \beta_{ум}) (\text{tg}^2 \beta_{ум} - R_3^2 (R_3 + H_{КА})^{-2})}}{1 + \text{tg}^2 \beta_{ум}}.$$

Предельным значением коэффициента снижения скорости движения луча $K_{л}$ является значение для подспутниковой точки $K_{л} = \frac{R_3}{R_3 + H_{КА}}$. Проведём анализ степени изменения скорости луча для низкоорбитального КА с высотой орбиты $H_{КА} = 650$ км и типичного диапазона углов визирования $20^\circ \dots 60^\circ$. Средний радиус Земли принят равным 6371 км. На рис. 7 под цифрой 1 представлена зависимость $K_{л}$ от угла визирования $\beta_{ум}$. Под цифрой 2 для удобства сравнения приведена линия, определяющая предельное значение $K_{л}$, рассчитанное при $\beta_{ум} = 0$.

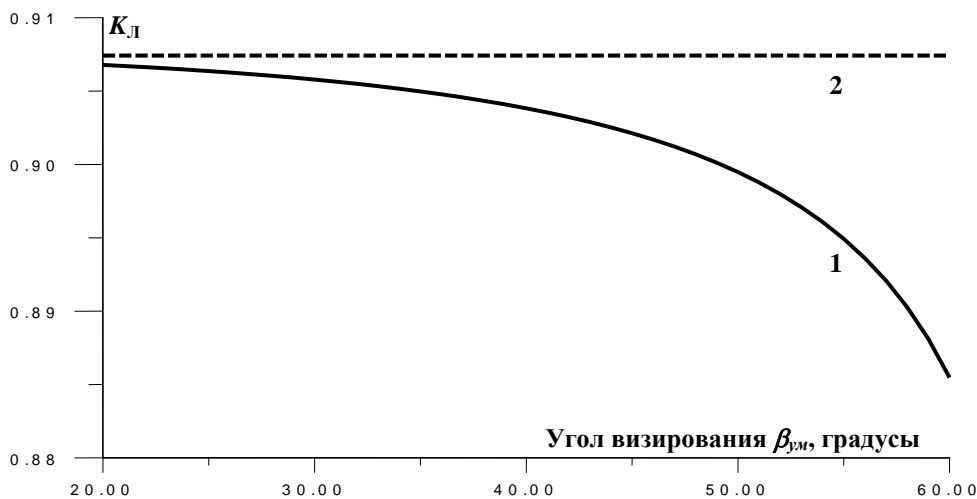


Рис. 7. Зависимость коэффициента снижения скорости движения луча от угла визирования $\beta_{ум}$

Наклонная дальность, отсчитываемая от фазового центра антенны до точки пересечения максимумом ДНА поверхности Земли

$$R_H = R_3 \cdot \frac{\cos(\beta_{ум} + \gamma)}{\sin \beta_{ум}}.$$

Полоса захвата $R_{зах}$ определяется как интервал дальностей, в пределах которого производится съемка земной поверхности и получение её РЛИ с заданным качеством. В

случае использования режима ScanSAR (рис.3) полоса захвата составляется из парциальных полос, число которых задается кинематикой АФАР. Поэтому

$$R_{зах} = \sum_{i=1}^{N_{SS}} R_{зaxi},$$

где $R_{зaxi}$ – полоса захвата i -й парциальной полосы,

N_{SS} – число парциальных полос.

Ширину полосы захвата при известных углах визирования можно приближенно оценить соотношением

$$R_{зax}^{(0)} = R_3 \left\{ (\beta_{y, \min} + \gamma_{\min})_{рад} - (\beta_{y, \max} + \gamma_{\max})_{рад} \right\},$$

где индексы \min и \max указывают на значения углов при минимальном и максимальном углах визирования. Для маршрутного режима съемки в качестве разности углов $\beta_{y, \max} - \beta_{y, \min}$ берется ширина ДНА по уровню половинной мощности (минус 3 дБ).

Данная формула не учитывает увеличение полосы захвата за счет дополнительного охвата поверхности Земли следом ДНА на краях зоны съемки. Размеры следа диаграммы направленности антенны на поверхности Земли, образованного пересечением эллиптическим конусом главного лепестка ДНА на уровне минус 3 дБ сферической поверхности Земли, проводится по следующим формулам:

– размер следа луча антенны на поверхности Земли по угломестной координате

$$\Delta Y = \frac{2 \cdot R_H \cdot \operatorname{tg}(\Theta_{ay}/2)}{\sin \gamma} \approx \frac{R_H \cdot \Theta_{ay}}{\sin \gamma};$$

– размер следа луча антенны на поверхности Земли по азимутальной координате

$$\Delta X = 2 \cdot R_H \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\Theta_{ax}}{2}\right) \approx R_H \cdot \Theta_{ax},$$

где Θ_{ay} – ширина ДНА по уровню минус 3 дБ в угломестном сечении, Θ_{ax} – ширина ДНА в азимутальном сечении.

Если при съемке полностью используется след луча ДНА, то полоса захвата

$$R_{зax} = R_{зax}^{(0)} + \frac{\Delta Y(\beta_{y, \min}) + \Delta Y(\beta_{y, \max})}{2}.$$

Следует отметить, что размер следа луча антенны на поверхности Земли зависит от угла визирования, поскольку изменяется наклонная дальность до района съёмки. Наиболее сильно эта зависимость проявляется по угломестной координате, так как дополнительно изменяется угол γ . Размер кадра при обработке может быть сделан меньше, чем размер следа антенны. Это позволит выровнять энергетический профиль РЛИ и размеры различных парциальных кадров по дальностной координате.

Важным параметром съемки является пространственная разрешающая способность, которую можно задать двумя параметрами: разрешающей способностью по азимутальной координате и разрешающей способностью по дальностной (угломестной) координате. Следует учитывать, что в современных РСА широко используются сложные сигналы.

Потенциальная пространственная разрешающая способность по дальностной координате на поверхности Земли δ_y определяется соотношением

$$\delta_y = \frac{c \cdot \tau_{сж}}{2 \cos \gamma},$$

где c – скорость распространения радиоволн,

$\tau_{сж}$ – длительность сжатого сигнала.

Отсюда видно, что разрешающая способность по дальностной координате определяется длительностью сжатого зондирующего сигнала и углом визирования $\beta_{\text{ум}}$, причем увеличение $\beta_{\text{ум}}$ приводит к улучшению разрешающей способности.

Разрешающая способность по азимутальной координате зависит от размеров синтезированной апертуры антенны и, в конечном счете, от времени синтеза апертуры T_c . Величина потенциального разрешения по азимутальной координате δ_x равна

$$\delta_x = \frac{\lambda R_H}{2V_0 T_c},$$

где λ – длина волны зондирующего сигнала.

При использовании режима съемки ScanSAR общее возможное время синтеза распределяется между парциальными полосами, поэтому разрешающая способность по азимутальной координате ухудшается пропорционально числу парциальных полос. Кроме того, следует учитывать ухудшение разрешающей способности по азимутальной координате, которая возникает за счет применения весовой обработки. Степень ухудшения зависит от вида применяемой весовой функции, например, использование окна Хэмминга дает увеличение δ_x примерно в 1,4 раза.

Разрешающая способность РСА по азимутальной координате δ_x зависит сложным образом от параметров антенны, высоты орбиты и скорости движения КА. Если учесть эти факторы, то для потенциальной разрешающей способности по азимутальной координате можно получить достаточно простое соотношение

$$\delta_x = \frac{D_a}{2} K_{\text{л}},$$

где D_a – ширина раскрыва антенны в азимутальной плоскости.

Таким образом, разрешающая способность МРЛК по азимутальной координате имеет физический предел, определяемый в первую очередь габаритами антенной системы. Для повышения разрешающей способности нужно уменьшать D_a , однако это приводит к уменьшению коэффициента направленного действия антенны и, как следствие, энергетического потенциала МРЛК.

Для снижения уровня спекл-шума, повышения радиометрической чувствительности и радиометрического разрешения при обработке сигнала может быть использовано некогерентное накопление внутри синтезированного РЛИ. В этом случае величины пространственного разрешения увеличиваются пропорционально числу некогерентных накоплений. После некогерентного накопления имеем

$$\delta_y^{\text{нн}} = N_y \cdot \delta_y, \quad \delta_x^{\text{нн}} = N_x \cdot \delta_x,$$

где N_y – число некогерентных накоплений по дальностной координате,

N_x – число некогерентных накоплений по азимутальной координате.

Снижение уровня спекл-шума, повышение радиометрической чувствительности и радиометрического разрешения может быть достигнуто также за счет накопления разновременных изображений одного и того же объекта. Такая возможность появляется при использовании многопозиционной съемки, например, при наличии тандема КА, при межвитковой съемке и т.п.

Качество радиолокационного изображения наряду с разрешающей способностью определяется также динамическим диапазоном. Динамический диапазон (ДД) характеризует возможность правильной передачи на изображении отражающих свойств различных объектов и оценивается интервалом эффективных поверхностей рассеивания (ЭПР) одновременно наблюдаемых целей. При этом точность оценки ЭПР целей в

пределах динамического диапазона определяется радиометрическим разрешением. Чем выше радиометрическое разрешение, тем меньшую разницу между двумя значениями ЭПР целей можно оценивать. Величина радиометрического разрешения зависит от отношения сигнал/шум и числа некогерентных накоплений $N_{\text{нн}} = N_y \times N_x$ при получении изображения целей. Обычно радиометрическое разрешение РСА равно 2...3 дБ. Для оценки ЭПР однородных поверхностных целей требования к радиометрическому разрешению возрастают до 1 дБ.

Динамический диапазон изображения определяется как характеристиками объектов (функцией отражения) и их взаимным расположением, так и свойствами РСА (функцией неопределенности, амплитудной характеристикой всего тракта РСА и шумами). Динамический диапазон может быть измерен при изображении:

- одиночных точечных целей;
- двух близкорасположенных точечных целей;
- распределенных (многоточечных) целей с малой ЭПР на фоне поля отражателей с большой ЭПР (отрицательный контраст).

Выходной динамический диапазон РСА землеобзора при изображении одиночных целей обычно не превышает 30...50 дБ. Для близкорасположенных друг к другу точечных целей он определяется уровнем первых боковых лепестков функции неопределенности РСА и обычно не превышает 30...40 дБ. Отрицательный контраст, например, изображение дороги в лесу, определяется уровнем суммарной мощности всех боковых лепестков (интегральным уровнем) и обычно не превышает 15...20 дБ.

Для визуального наблюдения РЛИ используются индикаторы, а также бумага, фотопленка, фотобумага. Эти средства наблюдения снижают динамический диапазон до величины 15...20 дБ для индикаторов, и до 25...30 дБ при записи на бумагу, фотобумагу, фотопленку.

Рассмотрим основные факторы, которые влияют на динамический диапазон (ДД) РСА землеобзора. В сильной степени наблюдается влияние функции неопределенности РСА. Применение оптимальной обработки дает динамический диапазон для двух близкорасположенных точечных целей, одна из которых попадает в первый боковой лепесток, –13 дБ, что обусловлено большим уровнем боковых лепестков функции неопределенности (ФН). Весовая обработка обеспечивает достаточно низкий уровень боковых лепестков при небольшом расширении основного лепестка (снижается разрешающая способность) и существенном улучшении ДД. Чтобы учесть случайный характер местонахождения целей, вводится интегральный (суммарный) уровень боковых лепестков, который вычисляется относительно основного пика.

В реальных системах уровень боковых лепестков определяется также большим числом других факторов: нестабильностями траектории, среды распространения, приемопередающего тракта и системы обработки, влиянием неоднозначности ФН по азимуту и дальности, конечной разрядностью вычислений в процессорах и т.п. При этом максимальный уровень боковых лепестков повышается с –42 дБ (оконная функция Хэмминга) до –30...–35 дБ, а интегральный уровень может достигать –15...–20 дБ. Интегральный уровень боковых лепестков ФН при наличии таких нестабильностей определяется среднеквадратичным отклонением фазовых флуктуаций σ_φ :
$$P_{\text{инт}} = 20 \lg \sigma_\varphi \text{ при } \sigma_\varphi \ll 1 \text{ (} \sigma_\varphi \text{ в радианах).}$$

В случае одиночных целей на динамический диапазон РСА на выходе системы обработки влияют максимальная мощность сигнала при его ограничении, которая определяется числом разрядов АЦП, и мощность минимального сигнала. Основное ограничение динамического диапазона радиолокационного изображения одиночных

целей обычно определяется индикатором. Поэтому на индикатор выносят лишь часть динамического диапазона всех целей в зависимости от решаемой тактической задачи.

Недостаточный динамический диапазон может привести к появлению ложных отметок на изображении. Основными причинами этого является низкий уровень подавления пиков неоднозначности по азимуту и дальности, а также значительный уровень боковых лепестков выходного сигнала при наблюдении мощных отражателей на слабоотражающем фоне. Примером этого может быть появление ложных отметок береговой черты на фоне изображения морской поверхности или серии отметок боковых лепестков по азимуту и дальности (“крест”) вблизи изображения точечной цели с большой ЭПР.

Радиометрическое разрешение характеризует возможность различения объектов, имеющих яркостные контрасты, т.е. отличающиеся по значениям ЭПР или удельной ЭПР (УЭПР). При оценке радиометрического разрешения наиболее устойчивым параметром является оценка среднеквадратичного отклонения флуктуаций наблюдаемого процесса. Повышение точности измерений и повышение вероятности различения контрастов между участками достигается увеличением числа наблюдений, в том числе путем усреднения отсчетов по площади наблюдаемого участка (межэлементное некогерентное накопление) или накопления различных одновременных изображений.

Радиометрическое разрешение можно вычислить по формуле:

$$\delta_r = 10 \lg \left\{ 1 + \frac{1}{\sqrt{N_{HH}}} \left(1 + \frac{\sigma_{0ШЭ}}{\sigma_0} \right) \right\},$$

где N_{HH} – число некогерентных суммирующих отсчетов,

$\sigma_{0ШЭ}$ – шумовой эквивалент УЭПР (радиометрическая чувствительность),

σ_0 – УЭПР снимаемого участка земной поверхности.

6. Модель цифровой обработки траекторного сигнала РСА

В качестве примера, который позволяет выявить особенности модели цифровой обработки информации, рассмотрим последовательность операций в типовом (маршрутном режиме), которые обеспечивают первичную обработку данных, синтез РЛИ в различных режимах съемки с последующим сжатием полученной информации, первичную обработку РЛИ с целью формирования управляющих воздействий на КА и МРЛК. На начальном этапе работы одновременно осуществляется контроль и защита от поступления некорректных входных данных, а также анализируются действия оператора (пользователя) для обеспечения защиты от его ошибочных действий.

1. Проверка поступающих входных данных.
2. Формирование данных в массив в памяти (двумерный массив).
3. Инициализация параметров:
 - параметры съемки;
 - класс съемки;
 - коррекция ошибочно введенных данных;
 - расчет геометрических и системных параметров съемки.
4. Формирование радиолокационного изображения:
 - прямое БПФ массива данных по азимуту;
 - фокусировка сигнала по дальности;
 - формирование спектра опорной функции по дальности;
 - формирование вектора корректирующих смещений;
 - формирование вектора компенсации миграций;

- компенсация миграций;
 - алгоритм быстрой свертки по дальности;
 - фокусировка сигнала по азимуту;
 - формирование спектра опорной функции по азимуту;
 - алгоритм гармонического анализа или быстрой свертки по азимуту;
 - геоференцирование выходного растра;
 - формирование структуры координатной информации.
5. Формирование выходных файлов:
- бинарный файл с РЛИ;
 - отчетные материалы о работе программы.

Структурная схема одного из вариантов цифровой обработки сигналов (ЦОС) для формирования изображения в РСА представлена на рис. 8, где БПФ – быстрое преобразование Фурье; ОБПФ – обратное БПФ; КП – комплексный множитель; ВМ-НН – вычисление модуля и некогерентное накопление; ВК-Д, ВК-А – весовые коэффициенты по дальности и по азимутальной координате.

Данная структура отражает использование на этапе сжатия сложного сигнала алгоритм быстрой свертки по дальности, при обработке по азимуту – алгоритма гармонического анализа. Обобщенный алгоритм преобразований имеет вид

$$S(n, m) = F_{azim} \left\{ W_a * \left(F_{range}^{-1} \left[W_r F_{range} \{ x \} \right] \right) \right\},$$

где $S(n, m)$ – массив обработанных данных;

x – вектор-строка развертки по дальности;

$F\{ \cdot \}, F^{-1}\{ \cdot \}$ – прямое и обратное БПФ;

$\{ \cdot \} * \{ \cdot \}$ – поэлементное произведение массивов;

W_a, W_r – весовые (оконные) функции по азимуту и дальности.

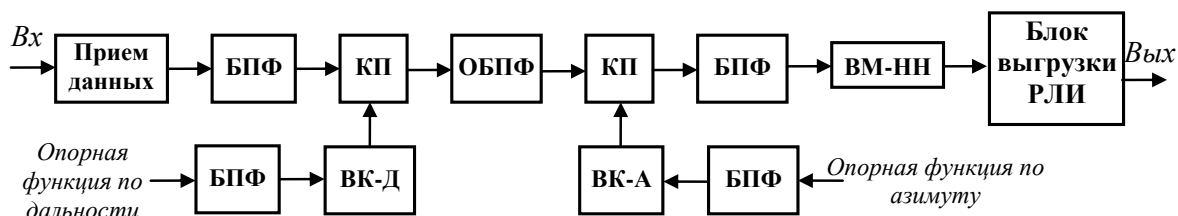


Рис. 8. Базовая структурная схема блока ЦОС

Основным требованием к РСА землеобзора с обработкой траекторного сигнала на борту КА является получение изображения заданной зоны обзора в реальном масштабе времени. Для этой цели необходима работа блока ЦОС с минимальной задержкой информации. Существует три основных причины задержки в выдаче первичных изображений.

Первая причина задержки связана с необходимостью формирования требуемого размера синтезированной апертуры, который определяет разрешающую способность по азимуту. Минимальная начальная задержка получения и накопления данных для формирования изображения равна времени синтеза T_c . Время задержки уменьшается с ростом скорости носителя РСА. Если для уменьшения спекл-шумов используется несколько некогерентно складываемых изображений N_H , то время задержки увеличивается в N_H раз и составляет $T_c N_H$.

Вторая причина задержки состоит в том, что требуется формировать изображение определенного (заданного) участка зоны обзора по путевой дальности A_x . При боковом

обзоре и постоянной скорости носителя РЛС задержка $T = A_x/V$. Если участок A_x меньше ширины следа ДНА на заданной дальности, можно использовать многоканальную обработку по азимуту, и время задержки будет определяться только временем синтезирования.

Третьей причиной задержки получения изображения является конечное время выполнения операций в системе обработки, которое в сильной степени зависит от вида системы обработки. Уменьшить это время можно путем использования ЦОС.

Рассмотри кратко работу приведенной схемы обработки, приведенную на рис. 8. В блоке ЦОС оцифрованный после АЦП сигнал поступает в модуль быстрого преобразования Фурье (БПФ). Параллельно с этим осуществляется БПФ опорного сигнала. Далее преобразованные принятый и опорный сигналы перемножаются в КП и производится обратное преобразование Фурье (ОБПФ) от результата перемножения. Тем самым, осуществляется процесс быстрой свертки сигналов с помощью преобразований Фурье. Результат свертки умножается на оконную функцию и преобразуется БПФ. Это необходимо, чтобы снизить уровень боковых лепестков. Затем вычисляется модуль результата преобразования, и на выходе получаем радиолокационное изображение.

Таким образом, базовой операцией в алгоритмическом обеспечении процесса обработки сигналов является преобразование Фурье. Главными характеристиками блока ЦОС будут являться быстродействие процессора и разрядность данных, весовых коэффициентов, операндов. Для реализации дискретного преобразования Фурье в классе быстрых алгоритмов необходимо иметь все основные временные параметры съемки, как по дальности, так и по азимутальной координате.

7. Особенности обработки траекторного сигнала РСА в условиях скошенного режима и миграции по дальности

Из приведенных выше характеристик космических РСА нетрудно заметить, что размеры радиолокационного снимка высокого разрешения получаются относительно небольшими, порядка 10...15 км. Несмотря на это, радиолокационные изображения с метровым и субметровым пространственным разрешением становятся все более востребованными. Они используются для решения таких тематических задач как картография, кадастровые и строительные работы, контроль обстановки и в других областях. На их основе могут быть построены системы распознавания и идентификации малоразмерных объектов, контроль трафика автомобильного и воздушного транспорта.

Случай обработки траекторного сигнала, получаемого с помощью РСА КА при маршрутном режиме, рассматривался в разделе 6, где приведена структурная схема организации ЦОС. Однако задача обработки траекторного сигнала в современных РСА усложняется тем, что успешный синтез высокодетальных радиолокационных изображений (РЛИ) требует точного и полного учета всех факторов и параметров съемки.

Одним из основных последствий использования высокого разрешения РСА является миграция траекторного сигнала по каналам дальности [8, 10, 19, 20]. Эффект миграции сигналов заключается в том, что время задержки эхо-сигнала от одной и той же цели в процессе синтезирования изменяется на величину, превышающую интервал дискретизации в приемнике и блоке ЦОС. Следствием такого изменения времени задержки является то, что эхо-сигнал поступает в разные каналы дальности, определяемые дискретизацией, т.е. мигрируют по каналам. Эффект миграции сигналов свойственен всем РСА с высоким пространственным разрешением [8, 19, 20], к которым в первую очередь относится группа прожекторных режимов. Он может возникать и в нормальном маршрутном режиме съемки, и в скошенных режимах. При определенных

соотношениях параметров РСА эффект миграции наблюдается в сканирующих режимах среднего разрешения.

Таким образом, проблема цифровой обработки траекторного сигнала с миграциями является общей для всех РСА с высоким разрешением. Для решения данной проблемы к настоящему моменту времени предложены различные методы и алгоритмы [8, 10, 19–26]. К наиболее известным относятся:

- алгоритм коррекции миграции дальности (RMA);
- алгоритм коррекции «дальность-Доплер»;
- алгоритм ЛЧМ масштабирования;
- алгоритм разделимой двумерной свертки;
- алгоритм неразделимой двумерной свертки.

Чем выше разрешение, достигаемое РСА, тем больше степень необходимости учета миграции сигнала по дальности и всех факторов, влияющих на качество когерентной обработки. Особый интерес представляет группа скошенных режимов, которая к настоящему времени мало изучена, но потенциально обладает высокой информативностью [15, 24]. При скошенном режиме съемки (переднебоковой или заднебоковой – в зависимости от угла между траверзом и направлением максимума ДНА) в спектре траекторного сигнала возникает отличная от нуля регулярная доплеровская составляющая, определяемая скоростью КА, рабочей длиной волны и углом скоса. Автоматическая оценка частоты доплеровского центроида с использованием наиболее известных алгоритмов (MLBF, MLCC, CDE, SDE) обеспечивает достаточно высокую точность оценок, однако не снимает других проблем.

Рассмотрим более подробно основные геометрические соотношения для скошенного режима, определяющие параметры съемки и, в конечном итоге, траекторный сигнал. На рис. 9 представлено взаимное расположение КА и объекта съемки на поверхности Земли в плоскости, проходящей через КА, объект и линию пути. Для упрощения анализа будем считать, что движение КА осуществляется с равномерной орбитальной скоростью V_0 ; скорость перемещения следа луча антенны по поверхности Земли V_{A0} считаем также постоянной.

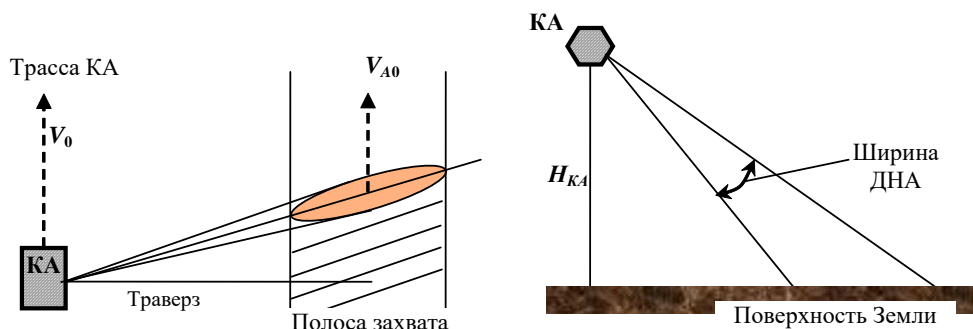


Рис. 9. Общая геометрия съемки при скошенном режиме

Для числовых расчетов принята модель низкоорбитального КА. Основные расчетные параметры приведены в таблице 7. На поверхности Земли находится точечная цель P_t , размеры которой существенно меньше размера элемента разрешения (рис.10). Максимум ДНА повернут относительно траверзного направления на угол скоса β_{sq} , положительный для переднебокового обзора и отрицательный – для заднебокового.

Таблица 7. Основные геометрические параметры съемки и характеристики КА

Параметр	Значение
----------	----------

Высота орбиты КА	600,0 км
Орбитальная скорость космического аппарата V_0	7561,7 м/с
Скорость перемещения подспутниковой точки V_1	7046,1 м/с
Скорость перемещения следа луча антенны V_{A0}	6900,3 м/с
Критический угол	68,1°
Угол визирования в траверзной плоскости	25°...55°
Разрешающая способность по наклонной дальности	0,25...0,75 м
Наклонная дальность в траверзной плоскости при угле визирования 30°	704059,2 м

Расстояние от КА по траверзу до линии, вычерчиваемой максимумом ДНА на поверхности Земли, обозначено через R_{trz} , а для момента прохождения максимумом ДНА цели – R_0 . К основным эффектам, возникающим в скошенном режиме и отличающим этот режим от нормального бокового обзора, относятся:

- нарушение симметрии огибающей пачки импульсов принимаемого сигнала;
- смещение спектра доплеровских частот;
- появление нелинейности в зависимости доплеровской частоты траекторного сигнала;
- нарушение симметрии закона миграции траекторного сигнала по каналам дальности.

Рассмотрим кратко эти отличия. Нарушение симметрии огибающей пачки импульсов эхо-сигнала обусловлено различием времени облучения цели до момента прохождения точки P_t максимумом ДНА T_{tag}^+ и после его прохождения T_{tag}^- . В качестве точек отсчета времени облучения возьмем, как это принято в радиолокационных системах, ширину ДНА Θ_{ax} по уровню половинной мощности. Тогда

$$\Delta T_{tag} = T_{tag}^+ - T_{tag}^- = \frac{R_{trz}}{V_0} \cdot [\text{tg}(\beta_{sq} + 0,5 \cdot \Theta_{ax}) + \text{tg}(\beta_{sq} - 0,5 \cdot \Theta_{ax}) - 2 \cdot \text{tg}(0,5 \cdot \Theta_{ax})].$$

На рис. 11 представлены зависимости относительного времени $\delta_{az} = \Delta T_{tag} / (T_{tag}^+ + T_{tag}^-)$ от угла скоса при различной ширине ДНА. В общем случае даже при малых углах скоса β_{sq} зависимости являются нелинейными, а в абсолютном времени перекося во времени может достигать значительных величин, до десятков миллисекунд, что соизмеримо со временем синтеза.

Как уже отмечалось, наличие угла скоса приводит к появлению регулярной доплеровской составляющей в принимаемом траекторном сигнале, равной

$$F_{Dsq} = \frac{2 \cdot V_0 \cdot \sin \beta_{sq}}{\lambda},$$

где λ – рабочая длина волны.

При этом в дополнение к линейному закону изменения частоты траекторного сигнала появляется нелинейный компонент, приводящий к асимметричному поведению закона частотной модуляции. Нарушение линейности ЛЧМ траекторного сигнала оценим по 3-м значениям частоты Доплера: в центре пачки эхо-сигнала и по краям, соответствующим ширине ДНА, причем за степень отклонения примем разность частот между расчетным значением в центре пачки, полученным с помощью линейной аппроксимацией по двум крайним точкам, и истинным значением в центре пачки. На рис. 12 приведено семейство нормированного смещения частоты, характеризующее отклонение доплеровской частоты от закона ЛЧМ.

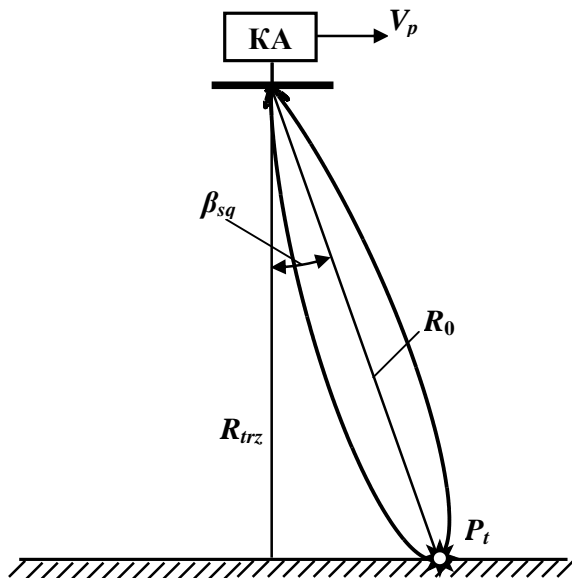


Рис. 10. Геометрия съемки в скошенном режиме (вид со стороны траверза)

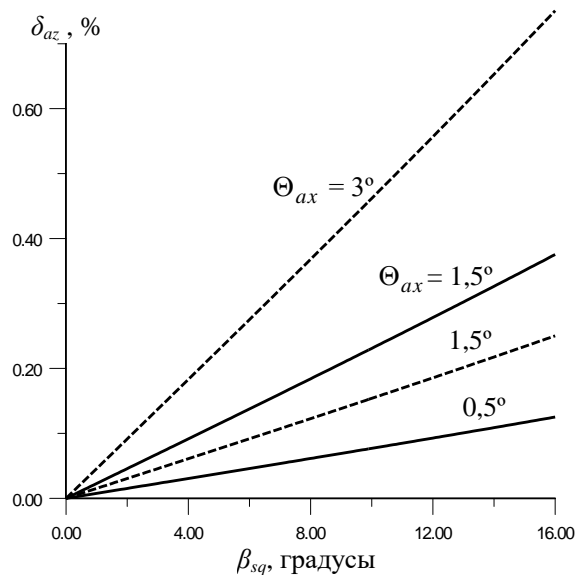


Рис. 11. Зависимости относительного времени от угла скоса

Использование скошенного режима вызывает также нарушение симметрии закона миграции траекторного сигнала по каналам дальности. На рис. 13 представлено семейство функций зависимости $\Delta R_{tag} = R_t - R_0$, где R_t – текущее значение наклонной дальности до объекта, от азимутальной координаты X_{az} . Как и следовало ожидать, при нормальном боковом обзоре ($\beta_{sq} = 0$) закон миграций является симметричным квадратичным [8–10].

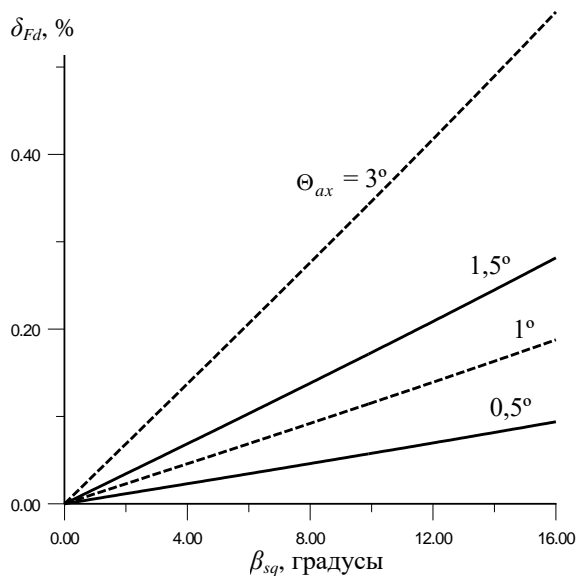


Рис. 12. Относительное доплеровское смещение

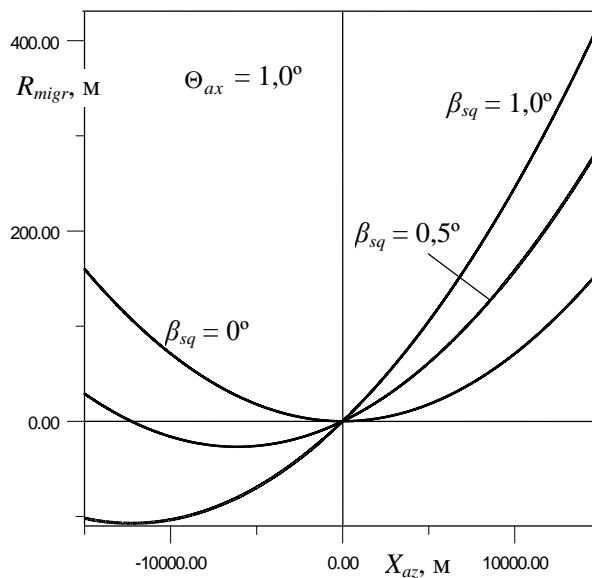


Рис. 13. Закон миграции сигнала по дальности

В случае скошенного обзора ($|\beta_{sq}| > 0$) закон миграций остается квадратичным, однако относительно цели ($X_{az} = 0$) он становится несимметричным. Характерной

особенностью закона миграций для этого режима становится появление отрицательной миграции, что не позволяет получить оптимальный результат использованием в качестве опорного колебания вырезки из опорного колебания при нормальном боковом обзоре. Таким образом, в случае скошенного режима обзора требуется разработка нового алгоритмического и программного обеспечения.

Степень и полнота учета подобных факторов оказывает существенное влияние на качество формируемого РЛИ, поэтому необходима оптимизация двумерной обработки траекторного сигнала РСА космического базирования. Основной операцией при обработке траекторного сигнала с миграциями по каналам дальности является вычисление двумерной дискретной свертки

$$S(n, m) = \sum_{l=0}^{N_{azim}-1} \sum_{k=0}^{N_{range}-1} x(k, l)h(k-n, l-m),$$

где $x(k, l)$ – комплексный сигнал на входе устройства ЦОС траекторного сигнала;

$h(k, l)$ – опорная функция;

N_{azim} , N_{range} – число отсчетов сигнала, используемое для синтезирования по азимутальной и угломестной координате.

При записи алгоритма вычисления свертки предполагалось, что обработка траекторного сигнала осуществляется устройством ЦОС, у которого отсутствует отрицательная индексация. Это по существу означает, что миграция сигнала по дальности должна иметь только положительный знак. Данное требование без ущерба для вычисления дискретной свертки удовлетворяется смещением индексации в опорной функции на $N_{azim}/2$ по азимутальной координате и на максимальное число мигрирующих каналов с отрицательным смещением $N_{rangemax}^-$. В результате вычислений получается один дискрет на РЛИ, т.е. один пиксель изображения.

При большом времени синтезирования (большой величине $N = N_{azim} \cdot N_{range}$) объем вычислений свертки прямым методом является значительным. К более эффективным методам относится метод быстрой свертки, основанный на быстрых алгоритмах вычисления коэффициентов дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Отметим, что применение быстрого преобразования Фурье, как правило, предполагает приведение значений N_{azim} и N_{range} к степени двух, что достигается дополнением нулей в соответствующих массивах.

В общем случае маршрутного нормального бокового или скошенного режима необходимо провести 2-мерное ДПФ над массивом отсчетов траекторного сигнала. Обобщенный алгоритм преобразований имеет вид

$$S(n, m) = F_{azim}^{-1} \left\{ F_{range}^{-1} \left[\left(F_{azim} \left[W_a F_{range} \{ W_r h \} \right] \right) * \left(F_{azim} \left[F_{range} \{ x \} \right] \right) \right] \right\},$$

где $F\{\cdot\}$, $F^{-1}\{\cdot\}$ – прямое и обратное БПФ;

$\{\cdot\} * \{\cdot\}$ – поэлементное произведение массивов;

W_a , W_r – весовые (оконные) функции по азимуту и дальности.

Структурная схема, соответствующая двумерной обработке, представлена на рис. 14, где через 2D БПФ обозначено устройство вычисления по алгоритму двумерного преобразования Фурье. Отметим, что вся информация о миграциях заложена в двумерную опорную функцию $h(k, l)$, которая рассчитывается на прием сигналов с определенной точки дальности и азимута, например, отраженных от точки P_t . Для других объектов той же сцены данная опорная функция не будет оптимальной.

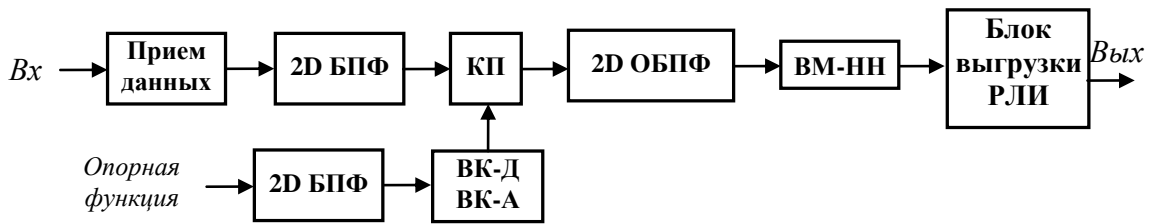


Рис. 14. Оптимальная двумерная обработка

Для сокращения вычислительных затрат может быть использована разделяемая двумерная обработка, заключающаяся в следующем. Проведем дискретизацию азимутальной координаты $l = X_{az}/(V_{A0}T_p)$, где V_{A0} – путевая скорость луча на поверхности Земли, X_{az} – размер зоны синтезирования в азимутальной плоскости, T_p – период следования зондирующих импульсов. Такая дискретизация возникает естественным путем за счет непрерывного движения КА и импульсной работы РСА. Далее аппроксимируем непрерывную функцию миграции ступенчатой функцией

$$R_{migr}(i, l) = \langle R_{migr}(X_{az})/dR \rangle,$$

где dR – разрешающая способность по наклонной дальности,

$\langle \cdot \rangle$ – целая часть числа.

Максимальное число мигрирующих каналов в рассматриваемом примере достигает 1000, а число отсчетов в каналах миграции изменяется от 7 до 200. Дискретизация дальностной координаты позволяет использовать свойство дискретного преобразования Фурье (ДПФ) о сдвиге последовательности, в соответствии с которым для сдвига сигнала во временной области на i позиций k -ю гармонику надо повернуть по фазе на величину $\Delta\varphi_{ik} = -2\pi ik/N_{azim}$. Такое преобразование в спектральной области позволяет приблизительно компенсировать миграции сигналов по каналам дальности, разделить обработку по азимуту и дальности, а двумерную опорную функцию свести к двум одномерным. При этом естественно, снижается вычислительная сложность цифровой обработки траекторных сигналов.

Упрощенная структурная схема блока ЦОС, предназначенного для синтеза РЛИ, представлена на рис.15. В данной структуре обработка по азимутальной и дальностной координатам разделены, опорная функция по дальности рассчитывается на центральные элементы обрабатываемого кадра, а фазовращатель поворачивает гармоники в спектре на величину $\Delta\varphi_{ik}$, в результате чего миграции сигнала компенсируются.

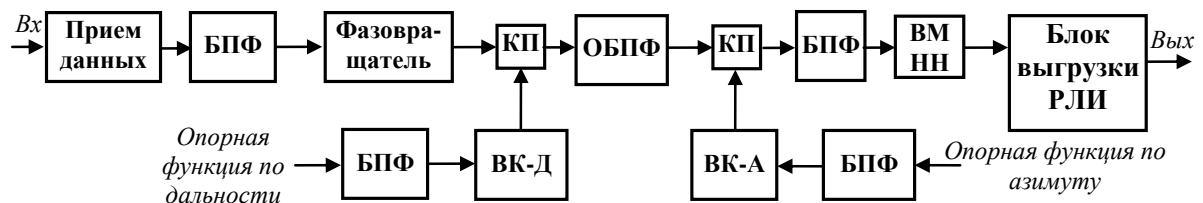


Рис. 15. Разделяемая обработка по дальности и азимуту

На рис. 16 представлен отклик от точечной цели, полученный на РЛИ при разделяемой двумерной обработке. Горизонтальная ось на рисунке соответствует угломестной (дальностной) координате, вертикальная – азимутальной координате.

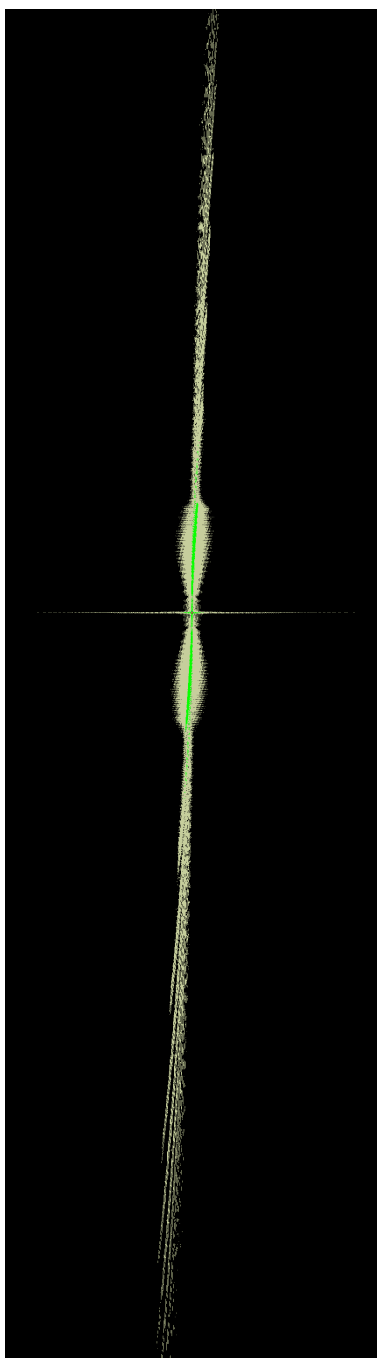


Рис. 16. Отклик от точечной цели при разделимой двумерной обработке

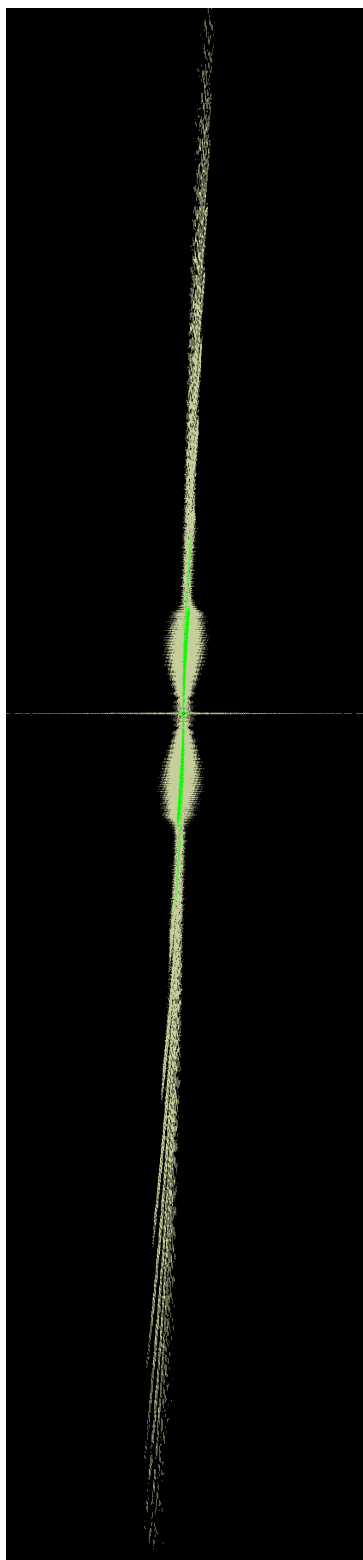


Рис. 17. Отклик от точечной цели при разделимой двумерной обработке и смещении цели на 0,5 дискрета

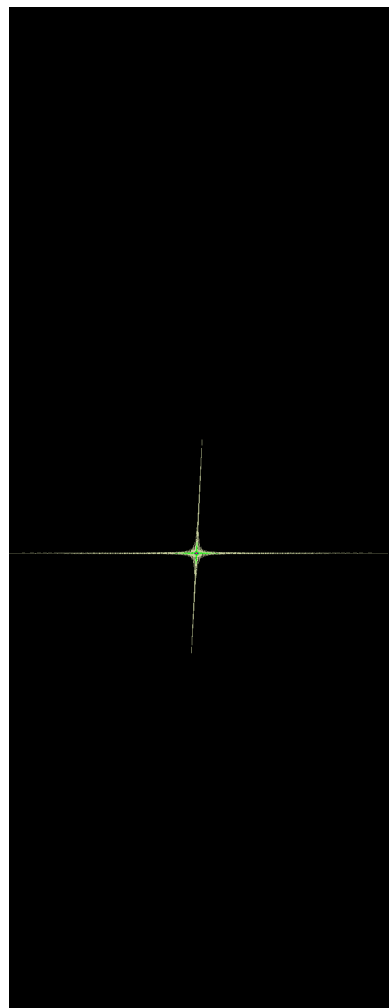


Рис. 18. Отклик от точечной цели, полученный на РЛИ при оптимальной двумерной обработке

Из рис.16 видно, что в результате сжатия траекторного сигнала на РЛИ остаются заметные артефакты. Наблюдаются протяженные боковые лепестки, как по дальности, так и по азимуту, т.е. отклик от точечной цели дает четырёхлучевую звезду, что является

характерным признаком использования ЛЧМ сигнала. Азимутальные боковые лепестки с увеличением расстояния от цели несколько рассеиваются и занимают достаточно большую площадь на РЛИ. Смещение цели внутри элемента разрешения приводит к еще большему расширению области, занимаемой лепестками (рис. 17). Как следствие, снижается уровень отклика от цели (в рассматриваемом случае наблюдалось снижение на 0,7 дБ).

Как отмечалось в [8], отдельная двумерная обработка не является корректной, что собственно и показывают результаты моделирования. Более точный учет миграций сигнала по каналам дальности, искажений закона огибающей и изменения доплеровской частоты приводит к тому, что опорная функция не факторизуется, т.е. не разделяется на последовательную обработку по азимутальной и угломестной координатам.

На рис. 18 приведен отклик от точечной цели, полученный на РЛИ при оптимальной (неразделимой) двумерной обработке. Как и следовало ожидать, оптимальная обработка дает более качественные результаты: расположение боковых лепестков по азимутальной координате стало компактным, отсутствует их рассеяние по изображению. Уровень отклика по сравнению с предыдущими случаями возрос на 4,1 дБ и 3,4 дБ соответственно.

8. Влияние тропосферы на точность определения координат объекта с помощью РСА космического базирования

Ряд явлений и эффектов затрудняет получение высококачественных РЛИ. В [10] отмечалось, что на качество получаемых РЛИ с высоким разрешением влияет отклонение траектории распространения радиоволн от прямолинейной при прохождении через атмосферу Земли. В [27] также описаны некоторые эффекты, способные ухудшать качество РЛИ – ослабление, временные задержки распространения сигналов, шумы мерцания, вызванные содержащимися в тропосфере газами, облаками, туманом. Наиболее сильные искажения дают атмосферные осадки – дождь и снег, потому что эти явления вызывают большое затухание и рассеяние радиоволн на трассе их распространения и возникают наиболее часто.

Еще один эффект, который проявляется при работе РСА С и Х диапазонов, заключается в искривлении траектории движения луча. Рассмотрим влияние нижних слоев атмосферы на траекторию распространения радиоволн в пространстве и точность определения местоположения объектов с помощью РСА. Для упрощения анализа будем считать, что движение космического аппарата КА осуществляется с равномерной орбитальной скоростью V_0 ; скорость перемещения следа луча антенны по поверхности Земли V_{A0} также постоянна. Режим съемки – нормальный боковой. Алгоритм обработки настраивается на случай, когда на поверхности Земли наблюдается точечная цель, размеры которой меньше размера элемента разрешения. Для числовых расчетов принята, как в разделе 7, модель низкоорбитального КА. Параметры орбиты и другие геометрические параметры режима съемки приведены в таблице 7. При исследовании влияния тропосферы на распространение радиоволн принята верхняя граница тропосферы, равная 12 км.

Установлено [28], что при прохождении сигнала от КА до объекта наблюдения или Земли, он претерпевает отклонение от прямолинейного пути распространения, т.е. траектория распространения сигнала искривлена. Это обусловлено различными значениями коэффициента преломления в атмосфере, который, в свою очередь, зависит от высоты. При расчетах атмосферу будем рассматривать как слоистую структуру, при прохождении через каждый из слоев волна преломляется (см. рис.19, где обозначено: h_i , $n(h_i)$, γ_i – высота расположения слоя, коэффициент преломления и угол вхождения

волны в слой соответственно). Коэффициент преломления ее зависит от давления в тропосфере, температуры и влажности.

Для однородной безоблачной атмосферы на частотах X диапазона, которые существенно ниже дискретных линий поглощения водяного пара и кислорода, принимается частотно-независимая модель вещественной части коэффициента поглощения [28]

$$n = 1 + \frac{77.8}{T} \left(P + \frac{4810e}{T} \right) \cdot 10^{-6},$$

где T – температура в градусах Кельвина;

P – атмосферное давление;

e – парциальное давление водяных паров в миллибарах.

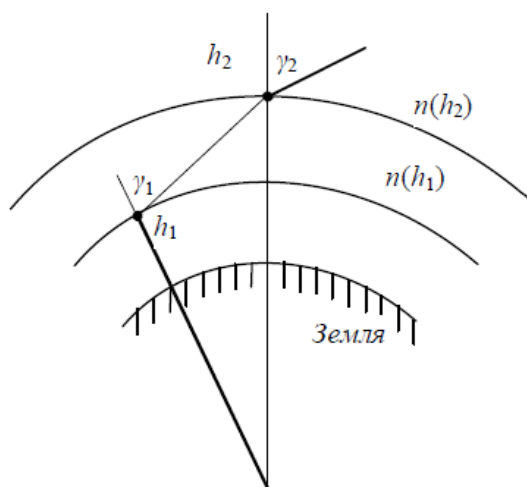


Рис. 19. Представление тропосферы как слоистой структуры

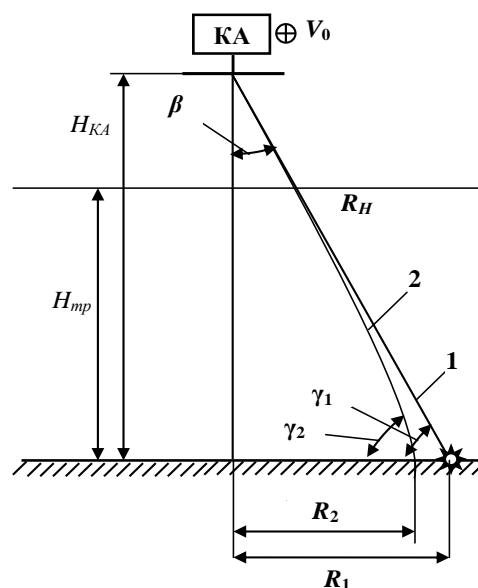


Рис. 20. Траектория распространения радиоволны с учетом и без учета тропосферы

В тропосфере давление и влажность в среднем убывают с высотой h по экспоненциальному, а температура – по линейному закону, поэтому высотный профиль приведенного коэффициента преломления можно аппроксимировать экспоненциальной зависимостью

$$n(h) = 1 + n_0 \exp(-b_1 h),$$

где n_0 – приповерхностное значение приведенного коэффициента преломления.

Величины n_0 и b_1 зависят от сезона. Так, в средних широтах зимой n_0 в среднем равно $3,06 \cdot 10^{-4}$, а летом эта величина близка к $3,3 \cdot 10^{-4}$. Параметр b_1 в среднем равен $0,13 \text{ км}^{-1}$ и подвержен изменениям в пределах от $0,12 \text{ км}^{-1}$ до $0,14 \text{ км}^{-1}$.

Рассмотрим точность определения координат объектов на поверхности Земли. На рис.20 условно представлена траектория распространения волны с учетом тропосферы (под цифрой 1 обозначено прямолинейное распространение волны, 2 – распространение волны с учетом тропосферы). На рис.20 приняты обозначения: $H_{КА}$ – высота орбиты КА, измеряется от поверхности Земли; $H_{тр}$ – высота тропосферы; R_H – наклонная дальность от КА до объекта съемки; γ_1 и γ_2 – углы скольжения между направлением на

КА и местным горизонтом без учета и с учетом влияния тропосферы соответственно; β – угол визирования.

Ошибка позиционирования определяется по формуле

$$\Delta R = \frac{H_{КА}}{\text{tg}(\gamma_2)} - \left(\sum_n \frac{H_{n-1} - H_n}{\text{tg}(\gamma_n)} + \frac{H_{КА} - H_{мп}}{\text{tg}(\gamma_0)} \right),$$

где H_n – высота расположения n -го слоя;

γ – угол падения волны.

При проведении моделирования получены следующие зависимости: на рис.21 приведена зависимость приведенного коэффициента преломления $n_1 = n(h) - 1$ от высоты в разные времена года. Как видно из графиков, на низких высотах сезонные расхождения составляют порядка 10%, но с увеличением высоты эти различия стираются.

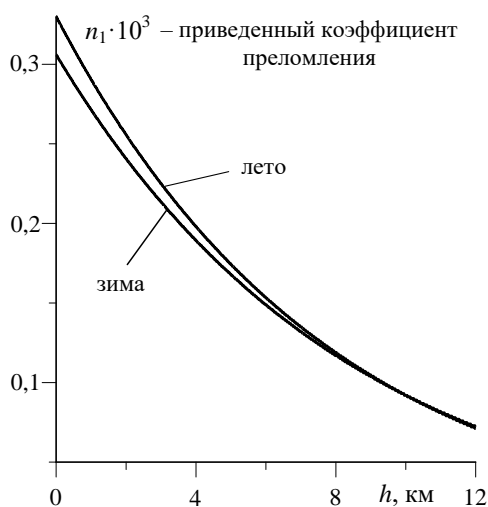


Рис. 21. Зависимость приведенного коэффициента преломления от высоты в разные времена года

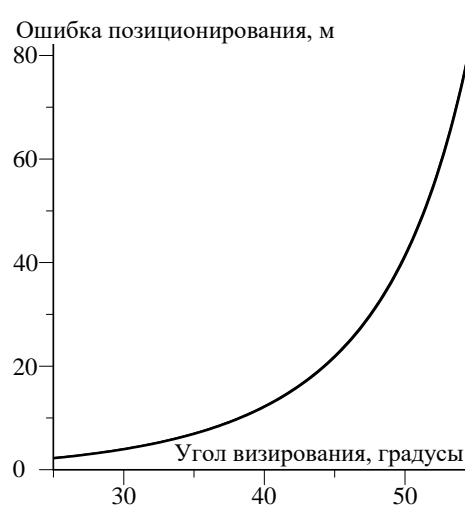


Рис. 22. Зависимость ошибки позиционирования от угла визирования

На рис. 22 представлена зависимость систематической погрешности позиционирования цели от угла визирования в типичном для РСА X диапазоне. Зависимость показывает, что при больших углах визирования смещение может достигать 86...87 м, причем различия в значении ошибки позиционирования для разных сезонов возрастают и могут достигать 1 м.

График на рис. 22 показывает общие тенденции изменения ошибок измерения координат целей. В связи с тем, что на рис. 22 не удастся проследить сезонные изменения, более подробные графики представлены отдельными участками по 3 градуса на рис. 23–25.

Анализ результатов исследований показал, что при угле визирования 30° систематическая ошибка измерения местоположения объекта летом составляет 4,04 м, а зимой – 3,95 м, то есть различие в разносезонных РЛИ составляет 9 см. При предельной разрешающей способности это составляет 36%, поэтому такие межсезонные вариации нужно учитывать. Выявлена существенная зависимость систематической ошибки от угла визирования.

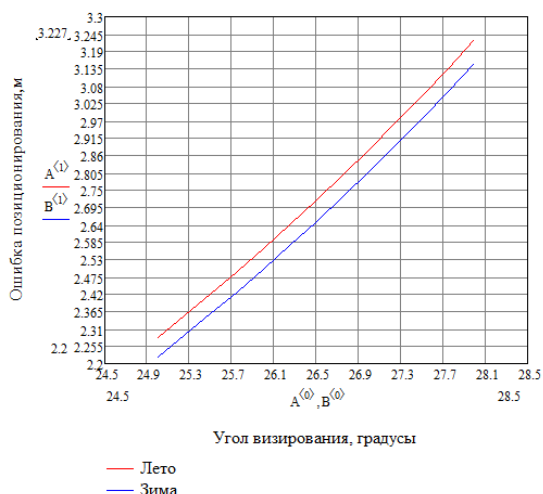


Рис. 23. Ошибка позиционирования летом и зимой в зависимости от угла визирования ($\beta = 24.5..28.5$ градусов)

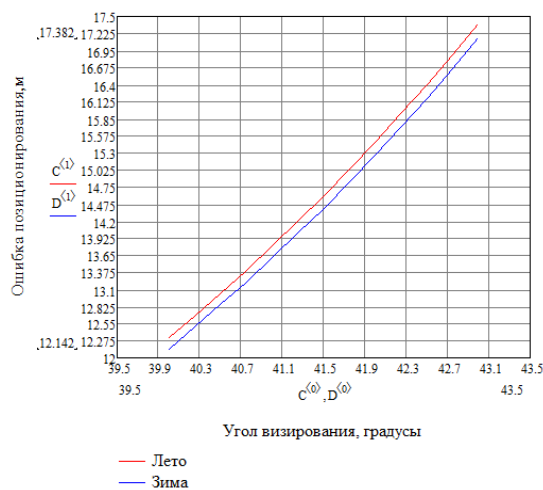


Рис. 24. Ошибка позиционирования летом и зимой в зависимости от угла визирования ($\beta = 39.5..43.5$ градусов)

Моделирование показало, что из-за неоднородностей тропосферы траектория распространения радиоволн заметно отклоняется от прямолинейной, что вызывает появление ошибок в оценки координат объекта.

Ошибка измерения местоположения и координат объекта при больших углах визирования составляет порядка 86...87 м. Для решения высокоточных задач геодезии такие различия можно признать существенными.

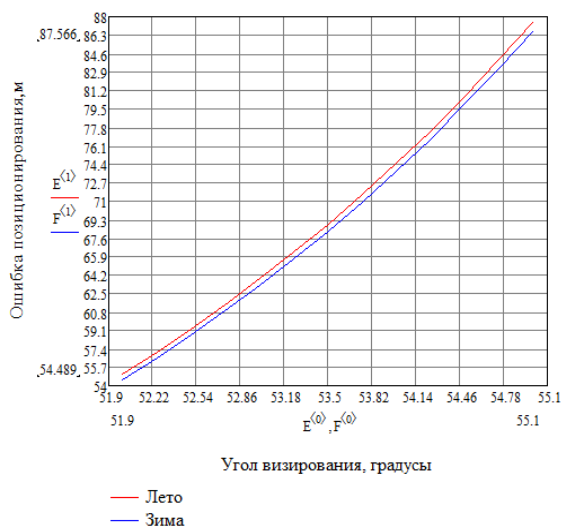


Рис.25. Ошибка позиционирования летом и зимой в зависимости от угла визирования ($\beta = 51,9...55,1$ градусов)

Отсюда видно, что при обработке высокодетальных РЛИ необходимо учитывать сезонные изменения в атмосфере Земли. Анализ результатов показывает, что при получении высокодетальных РЛИ учет ошибок позиционирования в алгоритме обработки поможет улучшить точность определения координат объекта. Одним из направлений подобного рода коррекции данных является использование при обработке траекторного сигнала метеоданных рассматриваемой области на момент съемки. Этот алгоритм можно применить при формировании опорной функции по азимуту в алгоритме неразделимой двумерной обработки (раздел 7).

Заключение

Таким образом, в лекции дан анализ особенностей формирования траекторного сигнала в РСА космического базирования высокого разрешения и его цифровой обработки при маршрутном, включая скошенный, режиме съемки. В частности, показано, что для получения более четкого радиолокационного изображения и обеспечения высокой точности определения координат объектов необходимо учитывать миграцию траекторного сигнала по дальности, несимметричность огибающей импульсов

из-за перекоса диаграммы направленности, нелинейность закона частотной модуляции по азимутальной координате, а также влияние тропосферы на распространение радиоволн. Оптимизация процедур обработки приводит к двумерным алгоритмам обработки, которые нелинейным образом зависят от дальностной и азимутальной координат. Вместе с тем такая неразделимая двумерная обработка имеет ограниченную область фокусировки, вне которой отклик от точечной цели начинает расплываться по азимутальной оси. Для устранения этого недостатка может быть использована секционированная двумерная свертка или коррекция азимутального спектра в процессе формирования РЛИ, основанная на приближенных методов оценивания функциональных связей азимутального и дальностного спектров. Существенную роль в повышении качества высокодетальных изображений играют привязка РЛИ к реперным точкам и геометрическая коррекция, призванная снизить эффекты влияния тропосферы.

Основные направления развития и совершенствования РСА с высоким разрешением космического базирования заключаются в следующем:

- повышение информативности РЛИ;
- увеличение полосы обзора при сохранении высокой разрешающей способности;
- создание трехмерных радиолокационных портретов объектов;
- повышение оперативности наблюдения.

Повышение информативности радиолокационного изображения (РЛИ) в космических РСА можно достичь за счет реализации следующих мер:

1) расширение полосы зондирующего сигнала, что ведет к увеличению разрешения по дальностной координате; использование сложных сигналов с предельно допустимой полосой 600...625 МГц; цифровое формирование и управление диаграммой направленности антенны РСА;

2) использование многочастотных РСА, поскольку одновременная съемка в различных частотных диапазонах значительно увеличивает информативность РЛИ; комплексирование методов тематической обработки с использованием РЛИ, полученных в различных частотных диапазонах разными РСА;

3) использование многолучевых РСА с возможностью одновременного независимого управления лучами; применение на космических аппаратах АФАР и АФАР-ГЗА;

4) реализация полнополяриметрических режимов работы РСА. РЛИ, полученные при съемке в таком режиме, позволяют выявить поляризационные характеристики наблюдаемых объектов;

5) применение режима двойного приема, что позволяет двукратно увеличить разрешение РСА; использование интерферометрических режимов обзора для построения трехмерных радиолокационных портретов, цифровых карт местности и рельефа.

Повышение оперативности радиолокационного наблюдения особенно актуально для решения задач разведки и достигается за счет:

- увеличения численности орбитальной группировки РСА;
- расширения полосы съемки до 600 км и более;
- увеличения времени съемки на одном витке до 20% и более.

Важно отметить, что совершенствование радиолокационной техники требует дальнейшего развития смежных отраслей:

- рост информационных потоков требует увеличения пропускной способности цифровых каналов по предварительным оценкам до 10..20 Гбит/с, быстродействия вычислительных средств;

- совершенствование каналов радиосвязи и увеличение их пропускной способности, что позволит существенно увеличить доступное время для передачи информации в наземные пункты.

Литература

1. Федеральная космическая программа России на 2006-2015 гг.: Утв. Постановлением Правительства РФ от 22.10.2005 г. № 635. – 167 с.
2. Концепция развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года. – М.: Федеральное космическое агентство, 2006. – 72 с.
3. Стратегии развития космической деятельности России до 2030 года и на дальнейшую перспективу.— М.: Роскосмос, 2012. – 54 с.
4. Радиолокационные станции бокового обзора / Под ред. *А.П. Реутова*. – М.: Сов. радио, 1970. – 370 с.
5. Радиолокационные станции обзора Земли / Под ред. *Г.С. Кондратенкова*. – М.: Радио и связь, 1983. – 272 с.
6. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / Под ред. *В.Т. Горяинова*. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.
7. *Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю.* Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
8. Цифровая обработка сигналов в РСА / Под ред. *Е.Ф. Толстова*. – Смоленск: Изд-во ВА ВПВО ВС РФ, 2005 – 232 с.
9. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений / Под ред. *Л.А. Школьного*. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. – 531 с.
10. *Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э.* Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В.С. Вербы. – М.: Радиотехника, 2010. – 676 с.
11. Авиационные системы радиовидения / Под ред. *Г.С. Кондратенкова*. – М.: Радиотехника, 2015. – 648 с.
12. *Стратилатов Н.Р., Крошин В.М., Нечаев А.А.* Возможный облик, характеристики и эффективность перспективного КА ДЗЗ с высокодетальным, мультиспектральным и ИК-каналом наблюдения // Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли: Материалы IX научно-технической конференции – М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, филиал ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС» – НПП «ОПТЕКС», 2012. С.79-82.
13. *Заичко В.А., Селин В.А.* Мероприятия Федерального космического агентства России по созданию космических средств радиолокационного наблюдения и технологий комплексной обработки данных // Материалы Международной научной конференции «Зондирование земных покровов радарными и радиометрами с синтезированной апертурой» 24 – 29 июня 2013 года г. Улан-Удэ – п. Энхалук. Вестник СибГАУ. № 5(51). 2013
14. *Карпов О.А., Толстов Е.Ф.* Виды обзора земной поверхности в РСА авиационного и космического базирования // Радиотехника. 2009. №3. С.46-51.
15. *Бабокин М.И., Ефимов А.В., Зайцев С.Э., Костров В.В.* Обнаружение сдвигов на земной поверхности с помощью РСА интерферометра при переднебоковом обзоре // VII Всероссийские Армандовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн: Всероссийская научная конференция (27.06–29.06. 2017 г., Муром). – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2017.
16. *Нониашвили М.И., Крючков И.В., Лесников Г.А., Нефедов С.И., Семенов А.Н.* Обзор современных радиолокаторов с синтезированной апертурой космического базирования и анализ тенденций их развития // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2012. С.94-114.

17. *Зайцев С.Э.* Космический аппарат – носитель РСА «Кондор-Э» как основа радиолокационной космической системы «Кондор-ФКА» // VI Всероссийские Армандовские чтения: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред: VII Всероссийская научная конференция (31.05–2.06. 2016 г., Муром). – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2016. – С.431-442.
18. *Бабочкин М.И., Ефимов А.В., Зайцев С.Э., Карнов О.А., Костров В.В., Неронский Л.Б., Савосин Г.В., Туттов М.П., Толстов Е.Ф., Турук В.Э., Цветков О.Е.* Итоги и уроки лётных испытаний РСА малого космического аппарата «Кондор-Э» // VI Всероссийские Армандовские чтения: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред: VII Всероссийская научная конференция (31.05–2.06. 2016 г., Муром). – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2016. – С.16-36.
19. *Reigber A., Scheiber R., Jäger M., Prats-Iraola P., Hajnsek I., Jagdhuber T., Papathanassiou K.P., Nannini M., Aguilera E., Baumgartner S., Horn R., Nottensteiner A., Moreira A.* Very-High-Resolution Airborne Synthetic Aperture Radar Imaging: Signal Processing and Applications // Proc. of the IEEE. 2013. Vol.101. No.3.Pp.759-783.
20. *Prats-Iraola P., Scheiber R., Rodriguez-Cassola M., Mittermayer J., Wollstadt S., De Zan F., Brautigam B., Schwerdt M., Reigber A., Moreira A.* On the Processing of Very High-Resolution Spaceborne SAR Data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2014. Vol.52. No.10. Pp.6003-6016.
21. *Raney R.K., Runge H., Bamler R., Cumming I.G., Wong F.H.* Precision SAR Processing Using Chirp Scaling // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, Vol.32, No.4, P.786-799.
22. *Moreira A., Mittermayer J., Scheiber R.* Extended Chirp Scaling Algorithm for Air- and Spaceborne SAR Data Processing in Stripmap and ScanSAR Imaging Modes // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 34, No. 5, September 1996. P.1123-1136.
23. *Zhai Q., Wang W., Hu J., Zhang J.* Azimuth Nonlinear Chirp Scaling Integrated with Range Chirp Scaling Algorithm for Highly Squinted SAR Imaging // Progress in Electromagnetics Research, 2013, Vol. 143, P.165-185.
24. *An D.-X., Zhou Z.-M., Huang X.-T., Jin T.* A Novel Imaging Approach for High Resolution Squinted Spotlight SAR Based on the Deramping-Based Technique And Azimuth NLCS Principle // Progress in Electromagnetics Research, 2012. Vol. 123. P.485-508.
25. *Сидоров А.А., Костров В.В.* Исследование характеристик алгоритмов устранения эффекта миграции сигнала в каналах дальности для РСА бокового обзора / Радиопромышленность. 2012. Вып. 2. С.97-104.
26. *Костров В.В., Сидоров А.А.* Обработка траекторного сигнала РСА в условиях скошенного режима и миграции по дальности // Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред / VI Всероссийская научная конференция (Муром, 27-29 мая 2014 г.) – Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2014. – С.236-242.
27. *Горячкин О.В.* Влияние атмосферы Земли на деградацию характеристик изображений космических радиолокационных станций с синтезированной апертурой // Компьютерная оптика. 2002. Вып. 24. С.177-182.
28. *Колосов М.А., Арманд Н.А., Яковлев О.И.* Распространение радиоволн при космической связи. – М.: Связь, 1969. – 156 с.