

ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ШИРОКОЗАХВАТНЫХ РАДИОЛОКАТОРОВ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ ДЛЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

С.Л. Внотченко, А.И. Коваленко, В.В. Риман,
С.Н. Смирнов, А.В. Шишанов
(ОАО «НИИ ТП»)

Выполнен анализ характеристик различных радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) космического базирования, и сформулированы основные требования, предъявляемые к РСА для малых космических аппаратов (МКА). Кроме обеспечения минимальных габаритно-массовых характеристик и энергопотребления отечественный РСА при высоких основных тактико-технических характеристиках должен иметь широкую полосу захвата для возможности зондирования больших территорий. Приведены основные результаты проектных проработок РСА диапазонов X и L для МКА.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой, малый космический аппарат, активная фазированная антенная решётка, АФАР, гибридно-зеркальная антенна.

Разработка радиолокаторов с синтезированной апертурой в ОАО «НИИ ТП»

Космические системы наблюдения на основе радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) предназначены для получения изображений естественных и искусственных объектов на поверхности Земли, а в некоторых случаях и под поверхностью. Радиолокационные средства позволяют вести съёмку любых территорий независимо от времени суток, освещённости и метеоусловий. Опыт практического использования космических РСА подтверждает возможность эффективного использования радиолокационных данных в научных, хозяйственных и военных целях, поэтому их разработке уделяется большое внимание во всем мире.

НИИ точных приборов имеет значительный научно-технический опыт в области создания РСА. Начиная с 1970 г., на предприятии был разработан ряд РСА для различных классов летательных аппаратов. Разработанные бортовые комплексы на основе РСА в 1980-х гг. выпускались десятками комплектов в год несколькими заводами. Тогда же был создан первый отечественный космический РСА, в 1983 – 1984 гг. использовавшийся при геофизических экспериментах в составе орбитальной станции «Салют-7». Позже проводились исследовательские работы для разных носителей. Была проведена разработка РСА «Северянин-М» для КА «Метеор-М», запущенного на орбиту в 2009 г. Масса аппаратуры и площадь антенны этого РСА в 5 – 6 раз меньше, чем у других РСА на крупных КА, но этого оказалось достаточно для получения заданного пространственного разрешения – 500 м, вполне приемлемого для метеорологического КА. При всем этом РСА «Северянин-М» имеет рекордную ширину полосы захвата (750 км), что весьма важно для нашей страны с её огромной территорией. Кроме РСА космического базирования

были разработаны и поставлены в Китай и Южную Корею самолётные варианты РСА.

В настоящее время разработаны РСА авиационного базирования высокого разрешения семейства «Компакт»: диапазона X с разрешением 0,5 м, диапазона L с разрешением 0,8 м, диапазона P с разрешением 2,5 м, диапазона VHF с разрешением 3,5 м. Масса бортовых приборов РСА в каждом диапазоне составляет 16 – 18 кг. Эти РСА широко используются при прикладных исследовательских работах.

Требования к РСА для МКА

На начальном этапе развития космические РСА имели военное назначение, и они размещались на крупных КА, таких как 18-тонный «Алмаз» или 14-тонный «Lacrosse». Позже были созданы КА с РСА гражданского назначения с гораздо меньшей массой – ERS-1 (2,3 т), ERS-2 (2,5 т), RADARSAT (2,7 т). Мощность энергетических установок этих КА лежит в диапазоне от 2 до 3 кВт. За короткий исторический период космические РСА прошли путь от первого РСА на КА SEASAT-A (1978 г.) до современных систем с размером элемента разрешения 1 м и менее, дополненных режимами селекции движущихся целей, поляриметрического и интерферометрического зондирования. Это существенно расширило возможности получения подробной информации о любой точке поверхности земного шара, позволяя решать широкий круг задач. Но расширение круга задач не позволяет резко уменьшать массу КА с многофункциональными РСА. Улучшение массовых характеристик за счёт использования новейших материалов и технологий парируется усложнением бортовой аппаратуры. Финансовые затраты на создание и эксплуатацию таких систем тоже остаются на высоком уровне (стоимость ERS-1 около 800 млн. дол.). В итоге существующие

универсальные космические РСА характеризуются большой массой, объёмом и энергопотреблением. Такое положение тормозит создание экспериментальных систем и порождает проблемы при интенсивном потоке заявок на съёмку.

Совершенно ясно, что размещение РСА на МКА требует принципиально новых подходов. Наиболее важной особенностью РСА для МКА является необходимость обеспечения минимальных габаритно-массовых характеристик и энергопотребления при сохранении высоких тактико-технических характеристик. Такая цель частично может быть достигнута комплексом конструктивно-технологических и организационных мер. Современные универсальные РСА сантиметрового диапазона строятся с использованием двумерных активных фазированных антенных решёток (АФАР) с электронным сканированием в широком секторе углов и с массой в сотни килограммов. Для небольших спутников (SAR-Lupe, TecSAR) применяют РСА с лёгкими зеркальными антеннами. При этом перенацеливание полосы съёмки и прожекторный режим съёмки реализуются разворотами КА, что резко упрощает построение РСА и, соответственно, весьма положительно сказывается на их габаритно-массовых характеристиках [1, 2] (табл. 1).

Не только типом антенн отличаются эти группы КА. РСА на крупных спутниках реализуют съёмку на разных поляризациях и на их комбинациях, позволяют снимать широкие полосы местности длиной до нескольких тысяч километров и многое другое. РСА на небольших МКА (SAR-Lupe и TecSAR) для экономии электропитания используют режимы с

короткими полосами съёмки. Для этой же цели в качестве усилителей зондирующего сигнала используются электронно-вакуумные приборы с КПД существенно лучшим по сравнению с твердотельными приёмопередающими модулями (ППМ) АФАР. Но при этом возникают проблемы с реализацией ширины полосы захвата в сотни километров, необходимой для обеспечения заданной оперативности наблюдения. В определённой мере эта важная для многих применений задача может быть решена созданием многоспутниковых (до 5 единиц) орбитальных группировок МКА. Правда экономически это не самый выгодный метод.

Очевидно также, что существенно сократить массу РСА для МКА можно путём сокращения функций, предъявляемых к нему. В связи с этим такие параметры РСА, как поляризация, разрешающая способность, ширина полосы захвата и др. должны быть выбраны так, чтобы удовлетворять не всем, а наиболее важным и массовым требованиям будущих заказчиков информации этих МКА. Ведь нужно учитывать, что редко используемые и сложные виды информации всегда можно получить посредством универсальных РСА на крупных КА. Не претендуя на абсолютную истину, в табл. 2 приведены требования к параметрам РСА для МКА общей массой не более 700 – 1230 кг. В качестве минимального уровня требований за основу можно принять характеристики МКА типа SAR-Lupe и TecSAR, а в качестве максимального – близкие к характеристикам КА типа TerraSAR-X.

Ориентируясь на данные табл. 2, можно сформулировать

Таблица 1

Характеристики РСА диапазона X

Параметр	COSMO-SkyMed (Италия)	TerraSAR-X (Германия)	TecSAR (Израиль)	SAR-Lupe (Германия)
Высота орбиты (средняя), км	620	514	550	500
Масса, кг	1700 (КА)	1230 (КА) 400 (РСА)	295 (КА) 100 (РСА)	770 (КА)
Тип антенны, размер, м	АФАР 5,7 × 1,4	АФАР 4,8 × 0,7	Параболическое зеркало Ø3	Параболическое зеркало 3,7 × 2,7
Энергопотребление РСА (среднее), Вт	1000	800	*	250
Пространственное разрешение, м	<1 (ПР) / 3-5 (МКР) / 30-100 (ОР)	1-2 (ПР) / 3(МКР) / 16 (ОР)	1 (ПР) / 3* (МКР) / 8 * (ОР)	0,7 (ПР) / 3 (МКР)
Ширина полосы съёмки, км	10 (ПР) / 40 (МКР) / 100-200 (ОР)	15 (ПР) / 30 (МКР) / 100 (ОР)	5* (ПР) / 15* (МКР) / * *(ОР)	5,5 (ПР) / 8 (МКР)
Поляризация	Одна из ВВ, ГГ, ВГ, ГВ	Комбинация поляризаций	ВВ, ГГ, ВГ, ГВ	ВВ*

П р и м е ч а н и я. Поляризации: В – вертикальная; Г – горизонтальная; ВГ – вертикальная на передачу и горизонтальная на приём; ГВ – горизонтальная на передачу и вертикальная на приём. Режимы съёмки: ПР – прожекторный; МКР – маршрутный/кадровый; ОР – обзорный (скансар); * – нет точных данных.

Таблица 2

Требования к параметрам РСА на МКА

Параметр	Минимальный уровень	Максимальный уровень	Выбранный уровень
Режимы съёмки	ПР, МКР	ПР, МКР, ОР	ПР, МКР, ОР
Поляризация сигнала	ВВ или ГГ	Комбинация поляризаций	Комбинация поляризаций
Пространственное разрешение, м	1-3 (ПР), 3 – 8 (МКР)	1 (ПР) / 3 (МКР) / 16 (ОР)	1 (ПР) / 5 (МКР) / 100 (ОР)
Ширина полосы захвата, км	5 (ПР) / 8 – 15 (МКР)	5 (ПР) / 30 (МКР) / 100 (ОР)	5 (ПР) / 30 (МКР) / >300 (ОР)
Энергопотребление (среднее), Вт	250 – 400	400 – 800	250 – 400
Масса аппаратуры, кг	100 – 200	Не более 400	200 – 250

Примечания. Обозначения те же, что и в табл. 1.

требования к РСА среднего уровня с массой 200 – 250 кг для гипотетического отечественного МКА. В отношении режимов съёмки очевидно, что необходимы все три основных типа: прожекторный, маршрутный (или кадровый) и обзорный, а при особой необходимости и другие (например мозаичный). Относительно поляризации сигнала наилучший по массе и энергопотреблению вариант – только одна поляризация (любая, скорее всего ВВ), но при наличии резерва по массе можно реализовать комбинацию поляризаций. При выборе ширины полосы захвата нужно учитывать российскую специфику – огромные пространства. В связи с этим в дополнение к прожекторному режиму (с кадром размером 5×5 км и разрешением 1 м), маршрутному или кадровому режиму (с шириной полосы порядка 30 км и разрешением около 5 м) необходима организация обзорного режима с максимально широкой полосой захвата (до 300 – 600 км) и разрешением порядка 50 – 100 м. Масса аппаратуры РСА косвенно связана с величиной энергопотребления (среднего за виток), поэтому для не превышения массой РСА уровня 200 – 250 кг необходимо ограничить величину среднего на витке энергопотребления на уровне порядка 250 – 400 Вт. Так как среднее энергопотребление в значительной мере определяется суммарным временем работы РСА на излучение, суммарная длина снимаемых за виток полос должна быть ограничена условием баланса допустимого и реального энергопотребления. Выбранные значения параметров представлены в правом столбце табл. 2.

Облик РСА для МКА

При создании РСА с малой массой важным фактором является выбор типа антенны. Для реализации широкозахватного режима наблюдения РСА для МКА и запрета при этом использовать двумерную АФАР требуется найти приемлемый вариант

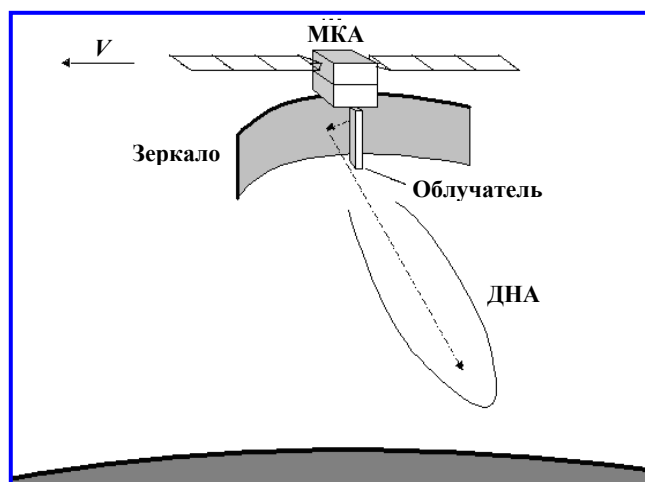


Рис. 1. Размещение антенны РСА на МКА: ДНА – диаграмма направленности антенны

построения антенны РСА диапазона X среди зеркальных антенн. Наиболее подходящими свойствами в данном случае обладают гибридно-зеркальные антенны, у которых в фокусе зеркала размещают облучатель с линейной фазированной антенной решёткой. Управляя распределением фаз в элементах этой решётки, можно безинерционно управлять ориентацией луча в плоскости облучателя. Вид такой антенны представлен на рис. 1.

В данном случае целесообразно использовать зеркало в виде сектора параболического цилиндра. Предварительные проработки показывают, что для выполнения заданных характеристик антенна должна иметь размер зеркала $5 \times 2,5$ м. Для размещения под обтекателем такого зеркала его конструкция должна быть складной. Фокусное расстояние зеркала составит 2 м, а длина линейного облучателя – 2,2 м, на котором должны разместиться 96 элементов решётки в один ряд при одном виде поляризации или 192 элемента в два ряда при двух поляризациях с возможностью получения полной поляризационной матрицы. Ширина главного ле-

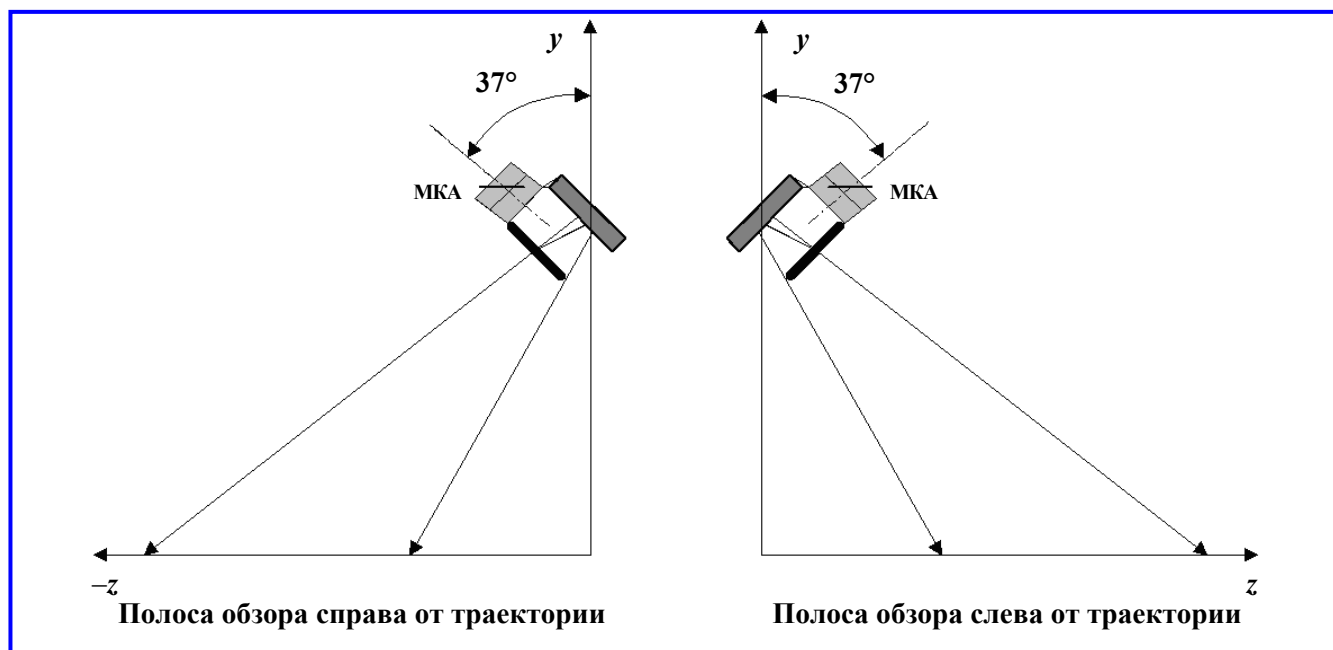


Рис. 2. Ориентация осей антенны на МКА

пестка диаграммы направленности ориентировочно составляет: в плоскости большого размера – $0,4^\circ$, в плоскости малого размера – $0,7 - 0,9^\circ$. Очевидно, что в полёте максимум главного лепестка диаграммы направленности должен быть направлен в дальний край полосы обзора. В связи с этим сканирование в штатных режимах необходимо только в одну сторону, а именно вниз. При этом выравнивается мощность принимаемого сигнала по полосе захвата и обзора.

Во время сеансов съёмки образующая зеркала антенны должна быть ориентирована под углом около 37° к местной вертикали. Такое положение может быть обеспечено соответствующей установкой антенны на платформе или постоянным отклонением поперечной оси МКА на такой угол. При съёмках справа или слева от трассы полёта необходимо разворачивать МКА (один из известных МКА делает подобное за 5 с) в горизонтальной плоскости (рис. 2).

Необходимые углы визирования в вертикальной плоскости должны реализовываться за счёт сканирования луча без поворота МКА. При этом управление угловым положением обеспечивается изменением распределения фаз линейного облучателя, выполненного в одном из двух вариантов:

- в виде пассивной фазированной антенной решётки (ПФАР);
- в виде активной фазированной антенной решётки (АФАР).

Вариант с ПФАР. Этот вариант РСА соответствует классической структуре РСА, в которой передатчик, приёмник и антенна реализуются в виде самостоятельных устройств. Управление распределением фаз в облучателе производится пассивными фазовращателями, управляемыми компьютером. Такое построение радиолокатора обладает рядом достоинств, к которым можно отнести: относительную простоту разработки, отладки и настройки отдельных устройств комплекса; полноту и эффективность методов контроля и тестирования всех устройств; относительно небольшую стоимость разработки. Недостатками такого варианта РСА являются: относительно невысокие ресурсные показатели и надёжность; необходимость постоянного нагрева катода при использовании электронно-вакуумных приборов в передатчике; значительные энергетические потери в тракте и элементах управления антенной; существенное энергопотребление блока управления фазовращателями.

Вариант с АФАР. Этому варианту РСА, в основном, присущи все достоинства и недостатки, типичные для двумерной АФАР и используемой твёрдотельной технологии. К достоинствам этого варианта можно отнести: высокие ресурсные и надёжные показатели твёрдотельных приборов; умеренные энергетические потери во всех элементах тракта. Недостатками РСА, основывающегося на такой технологии, являются: относительная сложность отработки и тестирования ан-

тенного устройства; технологические проблемы создания ППМ; относительно высокая общая стоимость комплекса.

Проработки двух указанных вариантов РСА для МКА показывают, что габаритно-массовые характеристики обоих вариантов примерно одинаковы, позволяя получить массу порядка 200 кг (при конструкторско-технологической проработке возможно некоторое снижение массы). Сравнение вариантов по энергопотреблению показывает значительное преимущество (в 1,6 – 2 раза) варианта РСА с АФАР. При равном же энергопотреблении вариант с АФАР позволяет повысить радиометрическую чувствительность РСА на 2 – 3 дБ, что улучшает качество получаемых радиолокационных изображений.

Уже несколько лет ЗАО «НПФ «Микран» (г. Томск) по заданию НИИ точных приборов выполняет работы по созданию ППМ диапазона X с требуемыми характеристиками. В настоящее время в НИИ точных приборов проводится макетирование двумерной космической АФАР на этих ППМ, и проходят самолётные испытания усечённого макета АФАР с получением пространственного разрешения на уровне 40 – 50 см.

Теперь рассмотрим возможности создания РСА L -диапазона (23 см). Этот диапазон особенно полезен в приложениях к задачам лесного хозяйства и к подповерхностному зондированию. Также в этом диапазоне могут эффективно решаться некоторые военные задачи. Многие из указанных выше соображений по принципам построения РСА диапазона X для МКА в значительной мере относятся и к принципам построения РСА диапазона L . Так и в этом случае вполне рационально применение гибридно-зеркальной антенны. Но в этом диапазоне зеркало антенны должно иметь размер 9×6 м, что требует для своей реализации специальных конструкторских и технологических решений.

Это может быть, например, ферменная конструкция зеркальной антенны, технология созда-

ния которой давно освоена в РКК «Энергия» («КРТ-30») и ОКБ МЭИ («Траверс»). Зеркало антенны этого типа состоит из основного базисного элемента – тетраэдра, что позволяет выполнять рефлектор в виде объёмной конструкции, обладающей достаточной жёсткостью. Такая конструкция также позволяет удовлетворять требованиям по упаковке антенны в транспортном положении. Масса зеркала размером 9×6 м зависит от используемых материалов, составляя в варианте углепластика величину в 30 – 50 кг. Облучатель длиной 4 м должен содержать один ряд из 24 элементов фазированной решётки при одном виде поляризации. Для приёма сигналов двух ортогональных поляризаций элементы решётки должны иметь два приёмных канала.

По сравнению с диапазоном X использование длинноволнового диапазона позволяет получить ряд важных преимуществ, в том числе: относительно меньшие потери во всех СВЧ элементах; большие значения КПД активных элементов; более простую реализацию значительных коэффициентов усиления и возможность обеспечения высоких выходных мощностей.

РСА диапазона L может быть реализован в виде гибридно-зеркальной антенны тоже в двух вариантах: с облучателем на ПФАР и сосредоточенным транзисторным усилителем мощности зондирующего сигнала или с облучателем на АФАР с распределённой приёмопередающей системой. И также как в диапазоне X , более выигрышным вариантом является антенна с облучателем на АФАР. Только нужно учитывать, что создание моноблочного усилителя зондирующего сигнала является значительно более простой задачей, чем создание ППМ в этом диапазоне. В связи с этим окончательный выбор варианта построения РСА диапазона L требует дополнительного исследования. Также точная оценка массы такого РСА, в определённой мере зависящая от конструкции зеркала и облучателя, в настоящее время затруднительна.

Тем не менее полная масса в 250 кг представляется

Таблица 3

Характеристики РСА для МКА

Параметр	РСА диапазона X			РСА диапазона L		
	Масса, кг	200			250	
Размер зеркала антенны, м	$5 \times 2,5$			9×6		
Энергопотребление среднее, Вт	200 – 250			200 – 250		
Полоса обзора, км	560 (возможно расширение)			310 (возможно расширение)		
Режим съёмки	Детальный	Кадровый	Обзорный	Детальный	Кадровый	Обзорный
Разрешение, м	3 – 5*	10 – 30	100 – 200	5 – 10*	30 – 80	120
Ширина полосы захвата/кадра	10 – 18	30 – 160	400 – 560	25 – 40	60 – 160	310

*При повороте МКА по курсу возможна реализация прожекторного режима с разрешающей способностью порядка 1 м.

достаточно реальной величиной. В табл. 3 представлены предварительные оценки характеристик РСА для МКА, работающих в диапазонах X и L .

Имея массу 200 кг (диапазон X) и 250 кг (диапазон L), а также среднее за виток энергопотребление порядка 200 – 250 Вт, РСА может быть размещён на платформах МКА, разрабатываемых отечественными предприятиями. Для передачи информации такого РСА на наземный пункт может использоваться одна из радиолиний передачи данных разработки НИИ точных приборов, в частности, высокоскоростная радиоли-

ния «Квазар» со скоростью передачи данных 300/600 Мбит/с и массой порядка 50 кг.

Литература

1. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В. С. Верба, Л. Б. Неронский, И. Г. Осипов [и др.]; под редакцией В. С. Вербы. – М. : Радиотехника, 2010. – 680 с.
2. Обзор современных радиолокаторов с синтезированной апертурой космического базирования и анализ тенденций их развития / М. И. Нониашвили, И. В. Крючков, Г. А. Лесников [и др.] // Инженерный журнал: наука и инновации. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – № 8. – С. 10.

Поступила в редакцию 23.07.2013

Сергей Леонидович Внотченко, канд. техн. наук, ведущий научн. сотрудник.

Александр Иванович Коваленко, канд. техн. наук, начальник отдела.

Виктор Владимирович Риман, канд. техн. наук, ст. научн. сотрудник.

Станислав Николаевич Смирнов, ст. научн. сотрудник.

Анатолий Васильевич Шишанов, канд. техн. наук,

генеральный директор – главный конструктор.

Т. (495) 231-38-22.

E-mail: info@niitp.ru.