

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО РАДИОЛОКАТОРА С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ АНТЕННЫ L- И P-ДИАПАЗОНА

© 2016

О. В. Горячкин доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ радиотехники и связи, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара, gor@psati.ru

И. В. Маслов аспирант кафедры теоретических основ радиотехники и связи, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара, macloff@mail.ru

В статье приводится анализ возможных вариантов конструкций антенной системы (АС) для космического радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) в L- и P-диапазонах. Проведён анализ современного состояния создания космических аппаратов (КА) с РСА L- и P-диапазонов, в которых используются достаточно большие раскладывающиеся конструкции антенн. Показано, что для получения высоких тактико-технических (ТТХ) показателей РСА в L- и P-диапазонах используются большие раскладывающиеся рефлекторы диаметром до 15 метров. Далее рассматриваются варианты антенных систем и проводится их сравнение с целью определения наилучшего сочетания с точки зрения получаемых характеристик и конструктивной сложности. В статье предложена АС, использующая в качестве элементов антенной решётки (АР) антенны типа Уда-Яги. Показана возможность создания космической системы (КС), состоящей из нескольких унифицированных малых космических аппаратов (МКА) с РСА L- и P-диапазона на борту.

Дистанционное зондирование Земли, радиолокатор с синтезированной апертурой, P-диапазон, L-диапазон, малые космические аппараты.

Цитирование: Горячкин О.В., Маслов И.В. Особенности конструкции антенной системы для космического радиолокатора с синтезированной апертурой антенны L- и P-диапазона // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 3. С. 153-162. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-153-162

Введение

Многолетний международный опыт использования космических РСА показывает, что L, P диапазоны являются оптимальными при решении многочисленных научных, природоресурсных и большинства прикладных задач, а также предпочтительным и при интерферометрических исследованиях. К таковым относятся исследования растительных покровов (лесов), большой круг задач в области гидрологии, гляциологии, геологии, океанографии [1-4].

К основным особенностям использования «длинноволновых» РСА относят необходимость наличия полного поляризационного базиса, повышающего чувствительность измерений к объёмной структуре, и преимущественной ориентации отражателей в поверхностном слое, позволяющей существенно улучшить интерпретацию измерений. Широкая полоса захвата уменьшает интервал между съёмками выбранной территории, повышая оперативность наблюдений. Этим же обеспечивается быстрое глобальное покрытие районов Крайнего Севера, что важно для гляциологических исследований при обеспечении ледовой навигации.

В связи с использованием дециметровых диапазонов длин волн антенны РСА должны иметь большую площадь реальной апертуры. Поэтому облик космического аппарата и возможность выведения его на орбиту будут, в основном, определяться конструкцией антенной системы бортового радиолокационного комплекса (БРЛК), особенно в P-диапазоне.

Целью данной работы является сравнение нескольких вариантов построения антенной системы БРЛК L- и P-диапазонов с учётом их радиотехнических параметров, габаритных размеров и физической реализуемости раскладной конструкции:

- активная фазированная антенная решётка (АФАР);
- гибридная зеркальная антенна (ГЗА) с облучателем в виде АФАР (или ФАР);
- антенная решётка из элементов в виде антенн Уда-Яги.

Исходные данные для расчёта размеров АС для РСА выбраны следующими:

1. Пространственное разрешение около 3...5 метров в L-диапазоне и около 10 метров в P-диапазоне.

2. Суммарная неоднозначность не хуже минус 20...25 дБ, что позволяет обеспечить высокое качество радиолокационных данных.

3. Обеспечение чувствительности не хуже минус 25 дБ на дальней границе полосы обзора.

Анализ конструктивных особенностей космических РСА L-диапазона

В настоящее время L-диапазон является наиболее исследованным (освоенным) в космических системах с РСА и в то же время самым низкочастотным диапазоном, который используется для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В табл. 1 приведены характеристики КА с РСА L- и P- диапазонов настоящего времени и ближайшего будущего. При этом реализация РСА в P-диапазоне пока только планируется, и возможно первым космическим радаром будет бистатический РЛК на МКА «АИСТ-2Д».

Таблица 1. Характеристики КА с РСА L- и P- диапазонов

Система-прототип	Tandem-L (2КА) (2020 г.)	ALOS-2 (2014 г.)	SAOCOM (2КА) (2015, 2016 г.)	MAPSAR	TerraSAR-L	Biomass (2018 г.)
Тип инструмента наблюдения	РСА L-диапазон					РСА P-диапазон
Полоса частот	84 МГц					6 МГц
Антенная система	ГЗА ЦАФАР диаметр 15 м	АФАР 10×3 м	АФАР 10×3,5 м	ГЗА 7,5×5 м	АФАР 11×2.86 м	ГЗА ФАР диаметр 12 м
Ориентировочная удельная масса рефлектора, кг/м ²	0,4...0,5	-	-	2	-	0,4...0,5
Масса, кг	~1500	КА 2000 РСА < 660	КА 1500	КА 520 РСА 280	КА 2800	КА 1200 РСА 300
Высота орбиты, км	760	628	630	620	630	634...666
Режим съёмки, пространственное разрешение, полоса захвата	<3×3 м, 350 км <1×3 м, 50 км	ПР 1×3 м, 25×25 км МР 3...10 м, 50...70 км СР 100 м, 350 км/490 км	МР 7-10 м СР 60...100, 390 км	МР 3...20 м, 20...55 км	МР 5 × 9 м, 40 км СР 50 м, >200 км	МР < 50×60 м 60 км
Чувствительность, σ^0 , дБ	-	-28, -26	-25	-23...-30	-30	-27...-30
ПР – прожекторный режим, МР – маршрутный режим, СР – сканирующий режим						

Основные расчёты проводились для базового («классического») маршрутного режима работы РСА, который позволяет оценить характеристики АС как «пространственного» фильтра и при практически равных условиях сравнить разные варианты РСА. Современные РСА являются многорежимными комплексами, решающими широкий круг задач. Так для повышения разрешения применяется прожекторный режим съёмки, позволяющий достигать разрешения до 1 м по азимуту, а для увеличения полосы захвата и повышения оперативности съёмки заданных районов применяется обзорный режим со сканированием по углу места. Реализация режимов, отличных от базового, в основном, определяется цифровой «начинкой» РСА и её сложностью. Поэтому в статье сравнение проводилось только в маршрутном режиме.

В соответствии с регламентом радиосвязи полоса частот, разрешённая для использования в космической радиолокации в L-диапазоне – 84 МГц, позволяет говорить о возможности достижения хорошего разрешения по поверхностной дальности, в зависимости от угла визирования, до 3 м. В азимутальной плоскости разрешение до 3 м обеспечивается соответствующим режимом работы РСА.

Исходя из заданных требований, был выбран размер полотна АФАР РСА L-диапазона (по горизонтали) по азимуту 10 м и по углу места (по вертикали) 3,6 м. Предельное разрешение в маршрутном режиме по азимуту ограничено 5 м. Для улучшения разрешения по азимуту необходимо использовать прожекторный режим съёмки с электронным сканированием лучом по азимуту (и/или программный разворот КА).

На рис. 1 представлены КА с АФАР L-диапазона со схожими характеристиками и размерами АФАР.

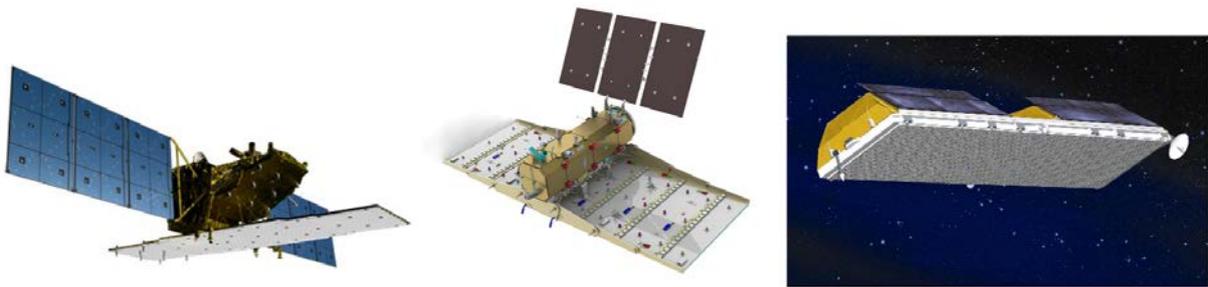


Рис. 1. КА Alos-2 [1], КА SAOCOM [2], КА TerraSAR-L [3]

Рассматриваются два варианта раскладывающегося рефлектора для РСА L-диапазона на базе ГЗА, близкие по характеристикам, но различающиеся геометрической формой (квадратный с размером 6×6 м и круглый с диаметром 7 м), влияющей на схему раскрытия [8]. При использовании зеркальной антенной системы есть возможность отказаться от прожекторного режима, так как оптимальное разрешение (около 3 м) достигается в маршрутном режиме.

Возможна реализация и прожекторного режима, но только не за счёт электронного сканирования по углу азимута, а за счёт динамического разворота КА и отслеживания заданного участка местности.

Для реализации обзорного режима, с целью увеличения полосы захвата и оперативности получаемых данных, необходима реализация электронного сканирования только по углу места (облучатель в виде АФАР).

Полоса захвата в обоих вариантах лежит в пределах 25...45 км с пространственным разрешением от 3 до 7 м в зависимости от угла визирования.

В целом оба варианта удовлетворяют заданным исходным данным и в дальнейшем выбор рефлектора будет определяться возможностью физической реализуемости.

Дополнительно, для сравнения, рассмотрен рефлектор диаметром 15 м. Полоса захвата в пределах 10...30 км с пространственным разрешением $7,5 \times (2,2...6,9)$ м в зависимости от угла визирования. Стоит отметить, что хотя данная система и обеспечивает высокое разрешение по дальности (до 2 м) и имеет хорошие энергетические показатели при больших углах визирования, но она имеет маленькую полосу захвата и пространственное разрешение в маршрутном режиме не лучше 7,5 м. Для компенсации указанных недостатков и реализации всего потенциала такого рефлектора в качестве облучателя должна обязательно использоваться АФАР с возможностью цифрового формирования луча.

На рис. 2 представлены системы-прототипы с ГЗА L-диапазона, различающиеся конструктивным исполнением АС.

В табл. 2 представлены основные результаты расчёта для всех рассматриваемых антенных систем в L-диапазоне.

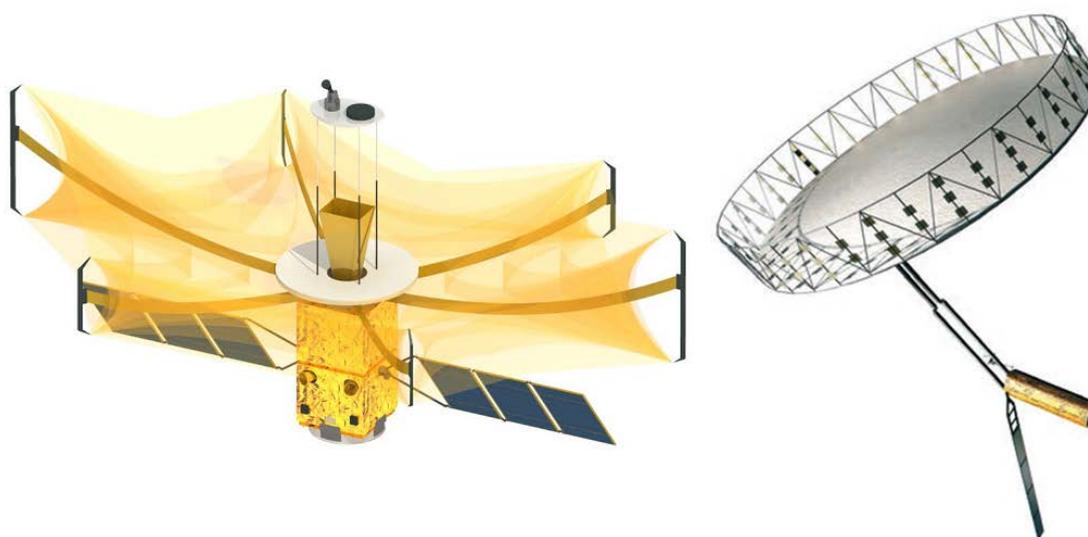


Рис. 2. КА MAPSAR (слева) $7,5 \times 5$ м [4],
КА Tandem-L (справа) с рефлектором типа Astromesh диаметром 15 м [5]

Таблица 2. Результаты расчёта АС

Тип инструмента наблюдения	РСА L-диапазон (полоса частот 84 МГц)			
	Предельное разрешение по наклонной дальности 1,8 м			
Антенная система	АФАР	ГЗА АФАР		
	10×3,6 м	диаметр 7 м	рефлектор 6×6 м	диаметр 15 м
Площадь, м ²	36	38,5	36	176
Полоса обзора, км	410	475	410	750
Полоса захвата, км	47...73	24...43	28...46	10...30
Пространственное разрешение, м	$5 \times (2,7...6,9)$	$3,5 \times (2,5...6,9)$	$3 \times (2,7...6,9)$	$7,5 \times (2,2...6,9)$
Чувствительность РСА, σ^0 , дБ	-25	-25	-25	-30
Импульсная мощность, кВт	6	6,4	6	6
Соотношение С/Ш для точечной цели 10 м ² , дБ	23,2	25,5	25,9	27,8
Радиометрическое разрешение для распределённой цели, (-20 дБ), дБ	3,6	3,6	3,6	3,2
Площадь съёмки за сутки, млн. км ²	3...4,7	1,5...2,7	1,7...2,9	0,63...1,9

Анализ конструктивных особенностей космических РСА Р-диапазона

Основная сложность реализации РСА Р-диапазона заключается в необходимости использования антенных систем с большой площадью раскрытия. Кроме этого, трудно реализуемым режимом является прожекторный режим со сканированием в азимутальной плоскости как за счёт электронного сканирования, так и за счёт программных разворотов КА. Поэтому маршрутный режим съёмки будет являться основным режимом работы для БРЛК Р-диапазона. Также немаловажным требованием к БРЛК Р-диапазона является обеспечение полнополяриметрического режима для повышения дешифрующих свойств радиолокационных данных.

В соответствии с регламентом радиосвязи полоса частот, разрешённая для использования в космической радиолокации в Р-диапазоне, составляет 6 МГц, но по согласованию с ГКРЧ возможно отступление от регламента и расширение полосы частот до 30 МГц. В связи с этим ТТХ для БРЛК Р-диапазона рассматриваются в двух вариантах – с полосой 6 и 30 МГц. При использовании полосы частот 6 МГц может быть достигнуто максимальное пространственное разрешение по дальности около 35 м на дальнем краю полосы обзора. В экспериментальных режимах может быть достигнуто пространственное разрешение около 7...8 м (при применении адаптивных алгоритмов) при использовании полосы частот 30 МГц.

В табл. 3, 4 представлены основные результаты расчёта для всех рассматриваемых антенных систем в Р-диапазоне.

Исходя из приведённых выше требований, был выбран размер ФАР РСА Р-диапазона 21 на 3,6 м.

На рис. 3 представлена возможная схема разложения и общая компоновка КА. Для РСА Р-диапазона на базе ГЗА были рассмотрены два варианта раскладывающегося рефлектора размером 12×12 м и диаметром 12 м, близкие по характеристикам, но различающиеся геометрическими параметрами, влияющими на схему раскрытия. Полоса захвата в обоих вариантах лежит в пределах 40...80 км в зависимости от угла визирования. Возможна реализация более широкой полосы при использовании излучателя в виде небольшой АФАР (или ФАР).

На рис. 4 представлена система-прототип по исследованию биомассы Земли Европейского Космического Агентства [7]. В основу положен рефлектор (диаметр 12 м), сходный по конструкции с готовыми коммерческими рефлекторами от компании Harris Corporation (HC) и Northrop Grumman (NG). Предполагается, что из двух вариантов будет выбран вид антенной системы.

Дополнительно рассмотрен рефлектор диаметром 15 м. Такая антенная система характеризуется большой полосой обзора (690 км), полосой захвата в пределах 34...84 км с максимальным пространственным разрешением по азимуту 7,5 м и чувствительностью не менее 30 дБ при максимальных углах падения. Также для повышения ТТХ данной системы желательно использование излучателя в виде АФАР.

Для сравнения с остальными вариантами в табл. 2, 3, 4 представлены основные расчётные значения для РСА Р-диапазона на базе АР из элементов в виде антенн Уда-Яги, предложенные ПГУТИ, как развитие задела, созданного при реализации бистатического РСА на МКА «АИСТ-2Д», разработанного и изготовленного кооперацией ПГУТИ и СОНИИР (г. Самара).

Таблица 3. Результаты расчёта АС для полосы 6 МГц

Тип инструмента наблюдения	РСА Р-диапазон (полоса частот 6 МГц) Предельное разрешение по наклонной дальности 25 м				
	АФАР	ГЗА АФАР			АР Уда-Яги
Антенная система	21×3,6 м	12×12 м	диаметр 12 м	диаметр 15 м	10 антенн
Площадь, м ²	76	144	113	176	-
Полоса обзора, км	370	485	485	690	410
Полоса захвата, км	142...185	43...80	43...80	34...84	140...180
Пространственное разрешение, м	10,5×(38...96)	6×(33...73)	6×(33...73)	7,5×(30...73)	6×(35...73)
Чувствительность РСА, σ^0 , дБ	-30	-30	-30	-30	-30
Импульсная мощность, кВт	0,8	0,4	0,8	0,6	1,1
Соотношение С/Ш для точечной цели 10 м ² , дБ	13,8	16,7	16,7	16,5	16,3
Радиометрическое разрешение для распределённой цели, (-20 дБ), дБ	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2

Таблица 4. Результаты расчёта АС для полосы 30 МГц

Тип инструмента наблюдения	РСА Р-диапазон (полоса частот 30 МГц) Предельное разрешение по наклонной дальности 5 м				
	АФАР	ГЗА АФАР			АР Уда-Яги
Антенная система	21×3,6 м	12×12 м	диаметр 12 м	диаметр 15 м	10 антенн
Площадь, м ²	76	144	113	176	-
Полоса обзора, км	370	485	485	690	410
Полоса захвата, км	142...185	43...80	43...80	34...84	140...180
Пространственное разрешение, м	10,5×(7,7...19,3)	6×(6,7...15)	6×(6,7...15)	7,5×(6,3...15)	6×(12...18)
Чувствительность РСА, σ^0 , дБ	-27	-27	-27	-27	-27
Импульсная мощность, кВт	1,8	0,88	1,6	1,08	2,1
Соотношение С/Ш для точечной цели 10 м ² , дБ	17,8	21	21	20,3	20
Радиометрическое разрешение для распределённой цели, (-20 дБ), дБ	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4

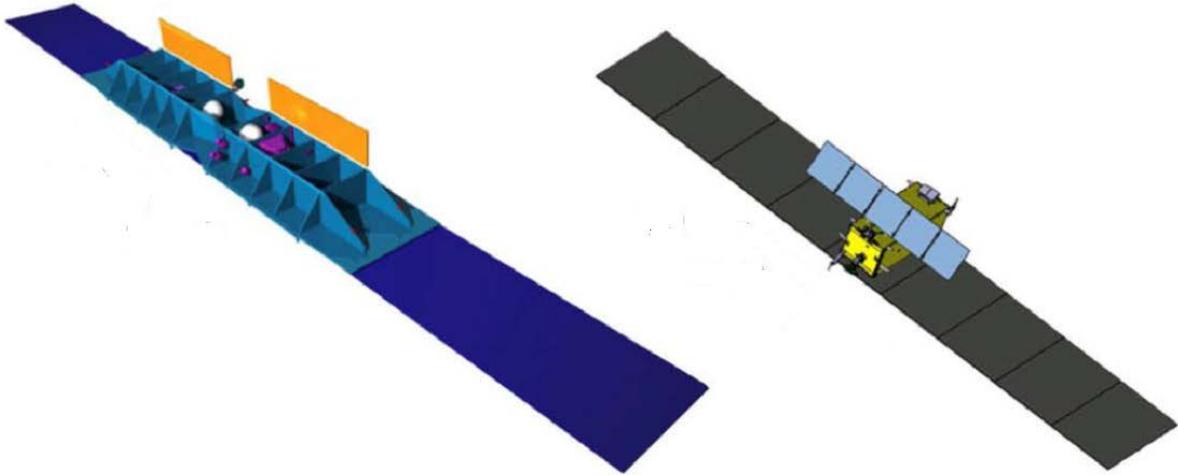


Рис. 3. ФАР, складываемая пополам вместе с платформой КА (слева); ФАР состоит из нескольких панелей складываемых панелей (справа) [6]

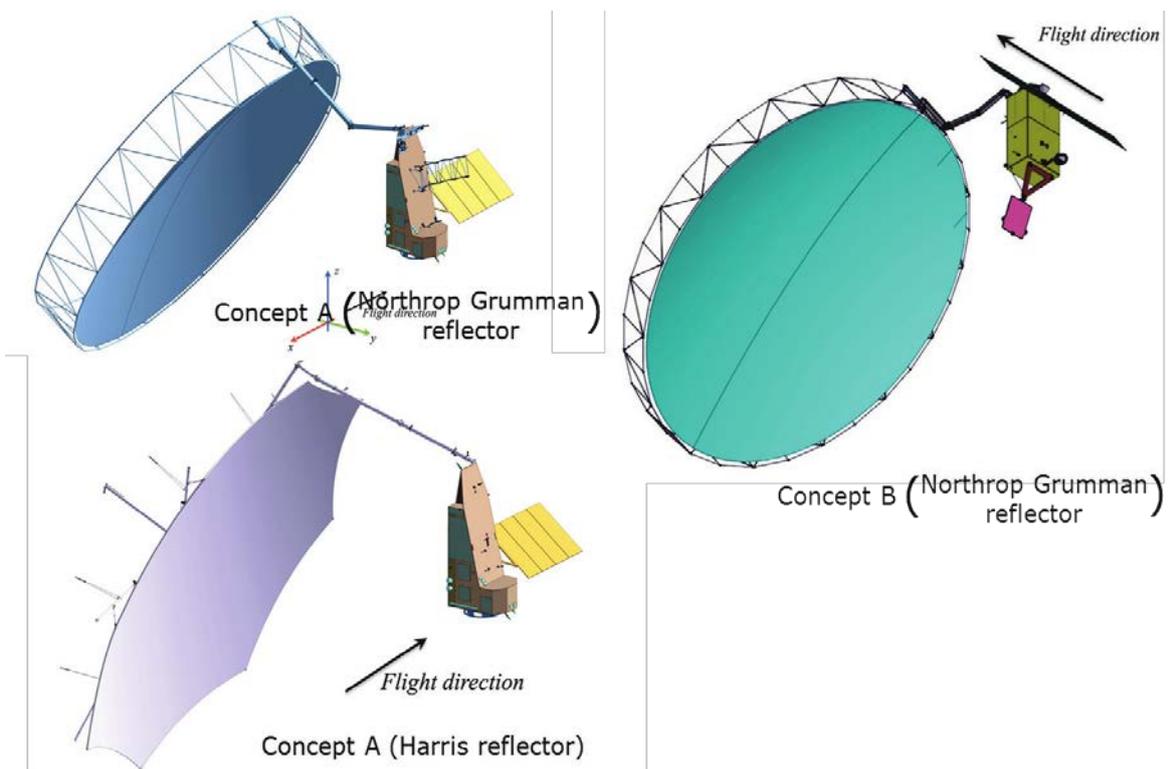


Рис. 4. Варианты КА BIOMASS (диаметр зеркала 12 м) по исследованию биомассы Земли

На рис. 5 показан вариант КА с антенной решёткой Р-диапазона, состоящей из 10 одинаковых антенн длиной около 4,5 м, где возможно использование в качестве передающей системы передатчиков, аналогичных РПДУ из состава РЛК изделия «АИСТ-2Д». Из-за габаритных ограничений предполагается использовать раскладывающуюся конструкцию для крайних антенн.

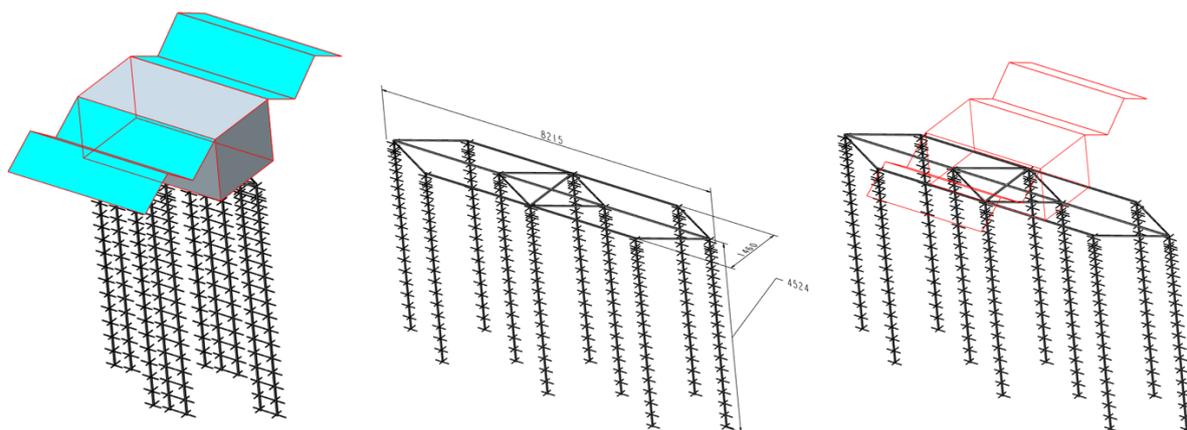


Рис. 5. Вариант КА с БРЛК Р-диапазона с 10 антеннами типа Уда-Яги, сложенное и разложенное состояние

Основной особенностью КА с РСА указанных диапазонов является необходимость использования достаточно больших по площади АС. Для получения приемлемого значения полосы обзора и энергопотенциала системы в целом эффективная площадь антенны должна составлять не менее 36 м^2 в L-диапазоне и 75 м^2 – в Р-диапазоне при высоте орбиты не более 700 км.

Заключение

Из проведённого анализа применительно к размещению РЛК на МКА (до 1000 кг) при обеспечении запуска ракетой-носителем типа «Союз-2.1а» можно сделать следующие выводы.

Для построения РСА L-диапазона предпочтителен вариант использования жёстко закреплённой на корпусе МКА ГЗА с простым облучателем или в виде «небольшой» АФАР, позволяющей реализовывать электронное сканирование по углу места. При этом относительно небольшие размеры рефлектора позволяют достаточно просто реализовать складывающуюся конструкцию. Это позволит повысить оперативность получения данных за счёт одновременного запуска 2-3 унифицированных МКА и создания на их основе космической системы.

Для построения РСА Р-диапазона показана возможность использования достаточно конструктивно простой АС из антенн типа Уда-Яги, которая имеет ряд преимуществ перед «традиционными» АС типа АФАР и ГЗА. Показана возможность отказа от сложных и дорогостоящих раскладывающихся конструкций, что приведёт к общему конструктивному упрощению КА. Кроме того, гарантируется минимальная деградация характеристик антенной системы под воздействием неблагоприятных факторов космического пространства, в том числе микрометеоров.

Реализация РСА L- и Р-диапазонов на МКА не только оправдано конструктивна, но и повышает оперативность получения данных и производительность КС, созданной на их основе.

Библиографический список

1. Shimada M., KANKAKU Y., Watanabe M., Motooka T. Current Status of the ALOS-2/PALSAR-2 and the CALVAL Program. http://sarvc.ceos.org/site_media/media/documents/Current_Status_of_ALOS-2_M.Shimada.pdf

2. Tandem-L. Satellite Mission Proposal for Monitoring Dynamic Processes on the Earth's Surface.

http://www.dlr.de/hr/en/Portaldata/32/Resources/dokumente/broschueren/Tandem-L_web_Broschuere2014_en.pdf

3. Heliere F., Fois F., Arcioni M., Bensi P., Fehringer M., Scipal K. Biomass P-band SAR interferometric mission selected as 7th Earth Explorer Mission // EUSAR 2014 – 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar. 2014. P. 1152-1155.

4. Armand N.A., Goriachkin O.V., Van't Klooster K., Makridenko L.A., Neiman I.S., Osipov I.G., Shishanov A., Zakharov A.I. Alternative of Active Array Technology Use in Spaceborne L-band SAR // EUSAR 2000 – 3rd European Conference on Synthetic Aperture Radar. 2000. P. 369-372.

5. SAOCOM Mission and SMAP Cal/Val Site. Marc Thibeault CONAE. http://smap.jpl.nasa.gov/files/smap2/24_Thibeault.pdf

6. Zink M. The TerraSAR-L Interferometric Mission Objectives. http://earth.esa.int/fringe03/proceedings/papers/123_zink.pdf

7. Kono J., Paradella W.R., Quintino da Silva M.M., De Morisson V.D., Farias Costa M.P., Schroeder R., Puls J., Hajsek I., Jochim F., Neff T. MAPSAR: A New L-band spaceborne SAR mission for assessment and monitoring of terrestrial natural resources // Anais XI SBSR. 2003. P. 2193-2200.

8. Scipal K., Arcioni M., Chave J., Dall J., Fois F., LeToan T., Lin C-C., Papanthassiou K., Quegan S., Rocca F., Saatchi S., Shugart H., Ulander L., Williams M. The BIOMASS mission – An ESA Earth Explorer candidate to measure the BIOMASS of the earth's forests // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2010. DOI: 10.1109/igarss.2010.5648979

ANALYSIS OF AN ANTENNA SYSTEM DESIGN FOR A SYNTHETIC L- AND P-BAND APERTURE RADAR

© 2016

O. V. Goryachkin Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of Department, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation, gor@psati.ru

I. V. Maslov postgraduate student, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation, macloff@mail.ru

The article presents an analysis of options for designs of the antenna system for a synthetic aperture space radar (SAR), with acceptable performance characteristics in L- and P-bands. At the first stage the analysis of the current state of producing spacecraft with L- and P-band radars that use quite large folding antenna structures is carried out. It is shown that to obtain high performance of SAR in L- and P-band large folding reflectors with the diameter of up to 15 meters are used. Further, variants of antenna systems are discussed and compared to determine the best combination in terms of the characteristics obtained and design complexity. An antenna system is proposed in the paper that uses antennae of the Yagi-aerial type as antenna array elements. The possibility of creating a space system consisting of several unified small spacecraft with L- and P-band SAR on board is shown.

Synthetic aperture radar (SAR), P-band, L-band, small satellite.

Citation: Goryachkin O.V., Maslov I.V. Analysis of an antenna system design for a synthetic L- and P-band aperture radar. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2016. V. 15, no. 3. P. 153-162. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-153-162

References

1. Shimada M., KANKAKU Y., Watanabe M., Motooka T. Current Status of the ALOS-2/PALSAR-2 and the CALVAL Program. Available at: http://sarcv.ceos.org/site_media/media/documents/Current_Status_of_ALOS-2_M.Shimada.pdf
2. Tandem-L. Satellite Mission Proposal for Monitoring Dynamic Processes on the Earth's Surface. Available at: http://www.dlr.de/hr/en/Portaldata/32/Resources/dokumente/broschueren/Tandem-L_web_Broschuere2014_en.pdf
3. Heliere F., Fois F., Arcioni M., Bensi P., Fehringer M., Scipal K. Biomass P-band SAR interferometric mission selected as 7th Earth Explorer Mission. *EUSAR 2014 – 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar*. 2014. P. 1152-1155.
4. Armand N.A., Goriachkin O.V., Van't Klooster K., Makridenko L.A., Neiman I.S., Osipov I.G., Shishanov A., Zakharov A.I. Alternative of Active Array Technology Use in Spaceborne L-band SAR. *EUSAR 2000 – 3rd European Conference on Synthetic Aperture Radar*. 2000. P. 369-372.
5. SAOCOM Mission and SMAP Cal/Val Site. Marc Thibeault CONAE. http://smap.jpl.nasa.gov/files/smap2/24_Thibeault.pdf
6. Zink M. The TerraSAR-L Interferometric Mission Objectives. Available at: http://earth.esa.int/fringe03/proceedings/papers/123_zink.pdf
7. Kono J., Paradella W.R., Quintino da Silva M.M., De Morisson V.D., Farias Costa M.P., Schroeder R., Puls J., Hajnsek I., Jochim F., Neff T. MAPSAR: A New L-band space-bornesar mission for assessment and monitoring of terrestrial natural resources. *Anais XI SBSR*. 2003. P. 2193-2200.
8. Scipal K., Arcioni M., Chave J., Dall J., Fois F., LeToan T., Lin C-C., Papanthassiou K., Quegan S., Rocca F., Saatchi S., Shugart H., Ulander L., Williams M. The BIOMASS mission — An ESA Earth Explorer candidate to measure the BIOMASS of the earth's forests. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2010. DOI: 10.1109/igarss.2010.5648979