

А.И. Захаров<sup>\*</sup>,  
доктор физико-математических наук;  
А.А. Калинин<sup>\*\*</sup>,  
кандидат физико-математических наук;  
Б.Г. Кутуза<sup>\*\*</sup>,  
доктор физико-математических наук, профессор;  
Ю.В. Смирнов<sup>\*\*\*</sup>;  
В.И. Стасевич<sup>\*\*\*\*</sup>,  
кандидат физико-математических наук;  
В.Э. Турук<sup>\*\*\*\*\*</sup>,  
кандидат техн. наук

<sup>\*</sup> Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино.

<sup>\*\*</sup> Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН, г. Москва.

<sup>\*\*\*</sup> ПАО РКК «Энергия».

<sup>\*\*\*\*</sup> ОАО «НПП "РОБИС"».

<sup>\*\*\*\*\*</sup> АО «Концерн радиостроения "ВЕГА"».

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО РАДИОЛОКАТОРА С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ P-ДИАПАЗОНА В КОМПЛЕКСЕ С РАДИОЛОКАТОРОМ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ L/S-ДИАПАЗОНОВ

Рассмотрены возможности использования двухчастотных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), одновременно работающих в P- и в L- или S-диапазонах длин волн. Приведены требуемые характеристики РСА. Показаны преимущества двухчастотных радиолокационных измерений в выбранных диапазонах длин волн, что связано с улучшением интерпретации данных, а также уменьшением влияния ионосферы. Задачи поверхностного и подповерхностного зондирования с помощью предлагаемого комплекса РСА включают исследование растительных, ледовых и почвенных покровов.

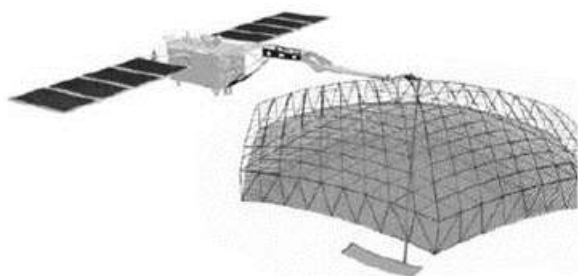
Ключевые слова: РСА P- и S-диапазонов длин волн, влияние ионосферы, зеркальная гибридная антенна, исследование растительных, ледовых, почвенных покровов.

Создание космического радиолокатора с синтезированной апертурой P-диапазона дает возможность получить эффективный инструмент для решения актуальных проблем лесного хозяйства, геологии, океанологии, подповерхностного зондирования в глобальных масштабах и на гораздо более высоком уровне в силу большего проникновения сигнала этого длинноволнового диапазона.

В настоящее время самолетные РСА P-диапазона активно используются в России, Германии, Франции, Швеции и других странах для исследования природных ресурсов. Большое внимание уделяется использованию самолетных РСА этого диапазона для изучения влажности почв, биометрических и влажностных характеристик леса, сельскохозяйственных культур, морских льдов, снежного покрова и др. Идея создания космического РСА P-диапазона активно обсуждается в последние 15 лет. Одним из наиболее известных и наиболее продвинутых проектов с использованием радаров этого диапазона является проект *Biomass*, поддерживаемый ЕКА и находящийся на стадии реализации [1]. В России также идет проработка вопроса создания подобного радара [2]. В этом проекте радар P-диапазона планируется установить на борт международной космической станции (МКС).

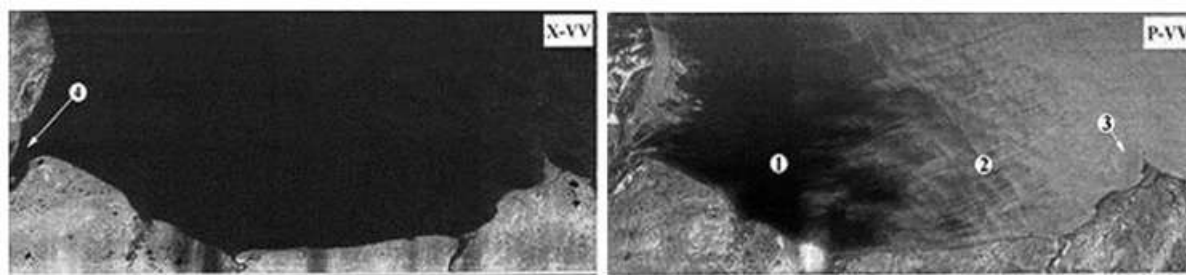
Опыт эксплуатации РСА показывает, что значительное число задач дистанционного зондирования Земли целесообразнее решать с использованием РСА различных частотных диапазонов вследствие различной проникающей способности сигналов в зондируемые среды и чувствительности к шероховатости поверхности разного масштаба. Это приводит к мысли одновременного использования в проекте радара P-диапазона, планируемого для установки

на борт МКС, второго диапазона длин волн. В качестве антенного устройства рассматривается гибридно-зеркальная антенна разработки ОКБ МЭИ, которая использовалась на борту малого аппарата «Кондор-Э» [3], и прошла успешные испытания в 2013 году. На рис. 1 изображена гибридная зеркальная антенна РСА для космического аппарата «Кондор-Э». В случае проведения космического эксперимента с РСА Р-диапазона вопрос выбора второго частотного диапазона в дополнение к Р-диапазону является весьма сложным. С одной стороны, имея в виду приоритетность исследования природных, растительных покровов, это не должен быть слишком коротковолновый диапазон. С другой стороны, второй диапазон можно было бы использовать для оценки влияния неоднородной, нестатической ионосферы Земли на технические характеристики РСА Р-диапазона (например, на пространственную разрешающую способность). Следует отметить, что, несмотря на то, что большее разнесение частот может быть более информативно с точки зрения большего круга задач дистанционного зондирования, оно усложняет вопрос интерпретации результатов мало изученного Р-диапазона при использовании его с космического аппарата.



*Рис. 1. Гибридная зеркальная антенна РСА для малого космического аппарата «Кондор-Э»*

На рис. 2 представлены радиолокационные изображения морской поверхности, а на рис. 3,а,б территории с наличием разнообразных объектов, включая лесные массивы, торфяные разрабатки, поселки, поймы реки и т. д. [4].



*Рис. 2. Радиолокационные изображения участка Баренцева моря, полученные одновременно в диапазонах  $\lambda=4$  см (VV поляризация),  $\lambda=68$  см (VV поляризация):  
1 – район моря с различной соленостью; 2 – область волнения; 3 – вихрь за утесом;  
4 – устье реки*

Анализ показывает, что использование L-диапазона в качестве второго диапазона важно для объяснения особенностей отражения сосновых лесов в зимнее время года. Однако S-диапазон может оказаться более перспективным, так как разрешенный для использования частотный диапазон позволяет получать более высокую пространственную разрешающую способность при меньшем влиянии ионосферы на результаты зондирования. В виду того, что к настоящему времени отработаны технологии изготовления зеркально-гибридной антенны и

радиолокатора S-диапазона, наиболее перспективным представляется использование 2-частотного РСА Р- и S-диапазонов.

Совместное использование данных S- и Р-диапазонов является интересной комбинацией вследствие существенных различий во взаимодействии сигналов этих диапазонов с зондируемыми средами, а также средой прохождения сигнала, ионосферой.

Задачи природопользования предполагают зондирование подстилающих покровов с проникновением в подповерхностные слои. Данные S- и Р-диапазонов предпочтительны для исследования растительных покровов, лесных массивов. Вследствие различия в глубине прохождения сигналов можно более полно изучать высотную структуру лесной растительности, более полно измерять биомассу леса, а также методами интерферометрии измерять толщину растительного слоя.

В области *исследования растительных покровов*, таких как лесные массивы, при использовании данных упомянутых двух частотных диапазонов можно более надежно проводить классификацию типов лесов, измерения биомассы растительности вследствие большей проникающей способности радиоволн Р-диапазона под кроны деревьев и регистрации отражения от стволов и крупных ветвей. При этом обеспечивается изучение состояния почвы под лесными покровами, контроль степени влажности и обнаружение подтоплений, в то время как в S-диапазоне происходит отражение от кроны и сравнительно мелких веток.

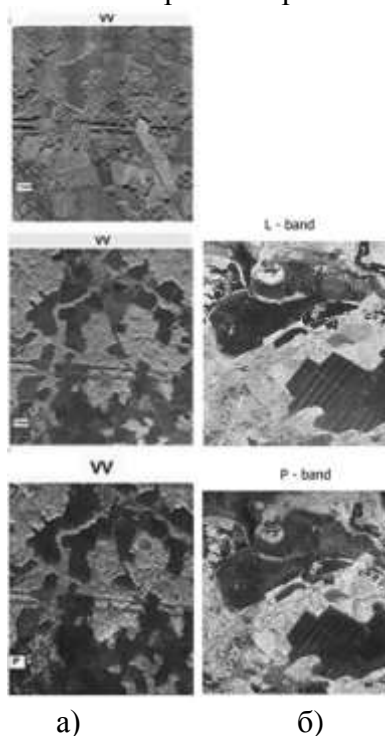


Рис. 3. Радиолокационные изображения территории с наличием разнообразных объектов, включая лесные массивы, торфяные разработки, поселки, пойму реки

Оценка параметров *состояния почв* в хозяйственной деятельности, таких как влажность, также более надежно осуществляется в Р-диапазоне вследствие меньшего влияния растительности и большей глубины подповерхностного зондирования, хотя классификация типов ландшафтов по степени мелкомасштабной шероховатости поверхности (масштаба длины волны несущей) предпочтительна в S-диапазоне, где почти все типы поверхности являются шероховатыми в разной степени.

В *геологии* в Р-диапазоне возможно наблюдать геологические структуры под осадочными слоями, а также растительными покровами. По этой же причине в этом диапазоне более информативно изучение засушливых, пустынных районов.

В *гидрологии* длинноволновый диапазон предпочтителен при изучении влажности подстилающих покровов вследствие меньшего влияния шероховатости поверхности почв и чувствительности к влажности большего по толщине поверхностного слоя. Более надежно выделяются водоемы вследствие меньшего влияния ветровой ряби на водной поверхности. В то же время картины крупномасштабного волнения, очищенного от ветрового волнения, лучше наблюдать в Р-диапазоне. Исследование зон подтоплений и их динамики в областях, покрытых лесом, также лучше реализуется в Р-диапазоне вследствие прохождения радиоволны сквозь толщу леса.

В *гляциологии* Р-диапазон лучше обеспечивает изучение структуры ледовых покровов мелководных пресноводных бассейнов вследствие проникновения сигнала сквозь толщу льда и взаимодействия с донным рельефом, однако для классификации типов морского льда более предпочтительны данные S-диапазона вследствие большей близости масштаба шероховатостей льда к длине волны. Изучение ледников и структур ледниковых покровов под снежными покровами, зон вечной мерзлоты также предпочтительнее проводить в Р-диапазоне.

При *интерферометрической съемке поверхности* с повторяющихся орбит Р-диапазон обеспечивает меньшую чувствительность измерений к временной декорреляции отраженного радиосигнала, особенно при больших интервалах между съемками, когда измерения на более коротких волнах практически невозможны.

При *исследовании влияния атмосферы* использование данных S- и Р-диапазонов позволит исследовать деструктивное влияние ионосферы на синтез радиолокационных изображений, а также отработать алгоритмы компенсации эффектов расфокусировки изображений, Фараде-евского вращения плоскости поляризации, а также нежелательных фазовых сдвигов, искажающих интерферометрические измерения рельефа.

Технические характеристики.

Гибридная зеркальная антенна с рефлектором раскрывается в космосе. Апертура рефлектора имеет форму шестигранника с расстоянием между гранями 6 м. Фокусное расстояние рефлектора – 4 м. Для двухдиапазонной РСА облучатель рефлектора выполнен в виде трех линейных антенных решеток, направленных горизонтально и расположенных в фокальной плоскости рефлектора.

Назовем технические характеристики комбинированного антенного устройства (АУ) Р- и S-диапазонов:

диапазон рабочих частот в диапазоне Р, МГц.....	432 ± 30;
диапазон рабочих частот в диапазоне S, МГц.....	3150 ± 100;
ширина ДН в вертикальной плоскости в Р диапазоне, град .....	7,5;
ширина ДН в вертикальной плоскости в S диапазоне, град.....	2;
сектор сканирования в вертикальной плоскости в Р диапазоне, град.....	± 7;
сектор сканирования в вертикальной плоскости в S диапазоне, град.....	± 5;
импульсная мощность в Р диапазоне, Вт.....	500;
импульсная мощность в S диапазоне, Вт.....	600.

Антенное устройство РСА ИРЭ может быть выполнено в виде гибридной зеркальной антенны с рефлектором, раскрываемым в космосе, и облучателем в виде коммутируемой антенной решетки. Апертура рефлектора имеет форму шестигранника с расстоянием между гранями 6 м. Фокусное расстояние рефлектора – 4 м. Рефлектор выполнен в виде ферменной конструкции стержней и шарнирных соединений с закрепленной в узловых точках фермы отражающей поверхности в виде трикотажного полотна из микропроволоки. В сложенном положении рефлектор имеет габариты: длина 1280 мм, поперечное сечение 744×720 мм. Масса рефлектора составляет 63,5±1,7 кг. Облучатель имеет форму прямоугольного параллелепипеда. Габариты облучателя в сложенном состоянии: длина 1400 мм, ширина 600 мм, глу-

бина 300 мм. В раскрытом рабочем положении длина облучателя увеличивается до 2800 мм, глубина уменьшается до 150 мм. Масса облучателя – 25 кг, электропотребление – 5 Вт.

Электрические параметры антенного устройства РСА ИРЭ:

- коэффициент усиления – 25 дБ;
- сектор сканирования луча в горизонтальной плоскости (по уровню –3 дБ) – 31,5°;
- уровень пересечения соседних лучей –1,5 дБ.

#### **Список используемых источников**

1. Scipal, at all “The Biomass Mission – an ESA Earth Explorer Candidate to measure the Biomass of the Earth’s Forests”, IGARSS 2010 // International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – P. 52–55.

2 Space experiment on the International Space Station with P-band SAR. / B. Kutuza, A. Kalinkevich, A. Zakharov, V. Stasevich, Yu. Smirnov // EUSAR-2014 Conference, Berlin, Germany, 02-06 June, 2014.

3. Choice of engineering performances in designing multipurpose synthetic aperture radar for small satellites EUSAR 2002 / LB. Neronskiy, I.O. Osipov, V.E. Turuk, V.I. Andrianov, I.O. Porokhov.

4. ISTC Project № 2866. Application of multi-frequency polarimetric synthetic aperture radar at decimeter) L,P0 and meter (VHF) bands for surface and subsurface sensing of soils and vegetation covers.