

## **К вопросу проведения эксперимента по радиолокационному исследованию Земли в P-диапазоне с МКС.**

А.А.Калинкевич \*, В.А.Черепенин\*, Б.Г.Кутуза \*, М.С.Крылова \*, В.И.Стасевич \*\*, А.А.Прилуцкий \*\*\*, Ю.В. Смирнов \*\*\*\*

\* - ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН

\*\* - ООО "НППРОБИС".

\*\*\* - ООО "НПКНИИДАР".

\*\*\*\* - ОАО РКК "Энергия"

*Институт Радиотехники и Электроники им. В.А. Котельникова РАН, 103907, Москва, ул. Моховая, 11, E-mail: [kalinkevich@newmail.ru](mailto:kalinkevich@newmail.ru)*

*Рассматриваются основные вопросы использования и построения радиолокационной станции бокового обзора с синтезированной апертурой P – диапазона для размещения ее на МКС. Предлагаемый космический эксперимент направлен на развитие радиолокационных исследований Земли из космоса.*

*Main questions of the use and building of SAR operating at P band for the International Space Station (ISS) are considered. The proposed experiment is directed on development of radar studies of the Earth from cosmos.*

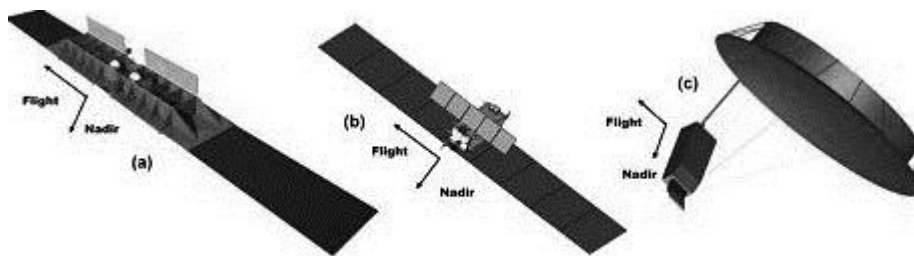
### **Введение**

Лесная биомасса является главным хранилищем растительного углерода и одним из важнейших элементов глобального углеродного цикла, который непосредственно связан с климатом на Земле. Существует множество путей решения проблемы дистанционного изучения динамики пространственного распределения лесного покрова. Применение оптических датчиков хорошо зарекомендовало себя для классификации лесных формаций (лиственные, хвойные, смешанные) и осуществления мониторинга динамики обезлесивания и лесовосстановления [1,2]. Однако эти методы мало подходят для измерения с высокой точностью биомассы леса, которая в основном заключена в стволах и крупных ветвях деревьев. Основная причина – недостаточная чувствительность к структуре леса. Для решения проблемы измерения биомассы лесного покрова, которая в основном заключена в крупных ветках и стволах, наиболее подходящими дистанционными методами являются дистанционные сверхвысокочастотные (СВЧ) методы зондирования, и предпочтение следует отдавать длинноволновым (P и VHF) диапазонам. В настоящее время самолётные РСА P - диапазона активно используются в США, России, Германии, Франции, Швеции и др. странах для исследования земных ресурсов. В работах [3,4] делается обзор возможностей использования C, L, P, VHF диапазонов РСА с учетом поляриметрических и интерферометрических измерений для определения биомассы лесного покрова. Самая низкая частота в используемых в настоящее время РСА космического базирования составляет 1,3 ГГц (длина волны 23 см), что относится к L-диапазону. Глобальное пространственное распределение лесов, их изменений во времени являются критичным для улучшения знаний земного компонента в углеродном цикле. Для уменьшения этих неопределенностей необходимо не менее двух раз в год получать информацию о площади лесов, о запасах биомассы лесных покровов (при пространственном разрешении 100-200 м с точностями лучше, чем 20-30%). В то же

время максимальная длина электромагнитного излучения, которую можно использовать из космоса  $\lambda = 70$  см., определяется влиянием ионосферы.

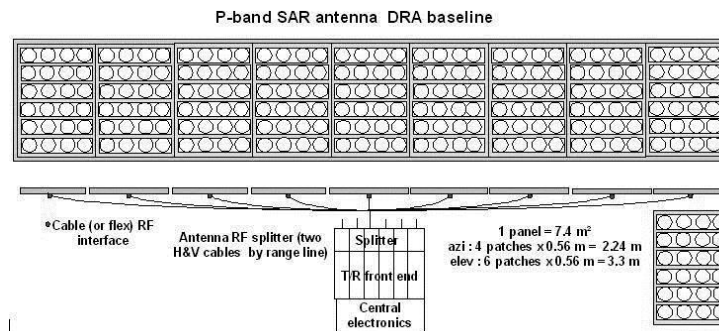
### Зарубежные разработки космических РСА Р-диапазона

В последние годы на многих Международных конференциях (BioGeoSAR-2007, EUSAR-2006,-2008,-2010, IGARSS-2010) по радиолокации и дистанционному зондированию Земли обсуждался вопрос о разработке РСА космического базирования в Р-диапазоне. Основные проблемы по реализации создания РСА космического базирования в Р-диапазоне связаны с трудностями учета влияния ионосферы, а также сложностями построения антенной системы. Действительно проработки зарубежных специалистов показывают, что размеры для полноценной РСА Р-диапазона должны быть порядка  $30 \times 3$  м<sup>2</sup> [6,7]. В работе [5] рассматриваются несколько концепций построения такой РСА (рис.1)



**Рис.1. Варианты построения РСА Р-диапазона**  
 а – случае размер антенны  $27,6 \times 2,52$  м<sup>2</sup> ( $S=69,6$ м<sup>2</sup>), б -  $20,1 \times 3,25$  м<sup>2</sup> ( $S=65,3$ м<sup>2</sup>), с – диаметр апертуры зеркала 12 м ( $S=113$ м<sup>2</sup>).

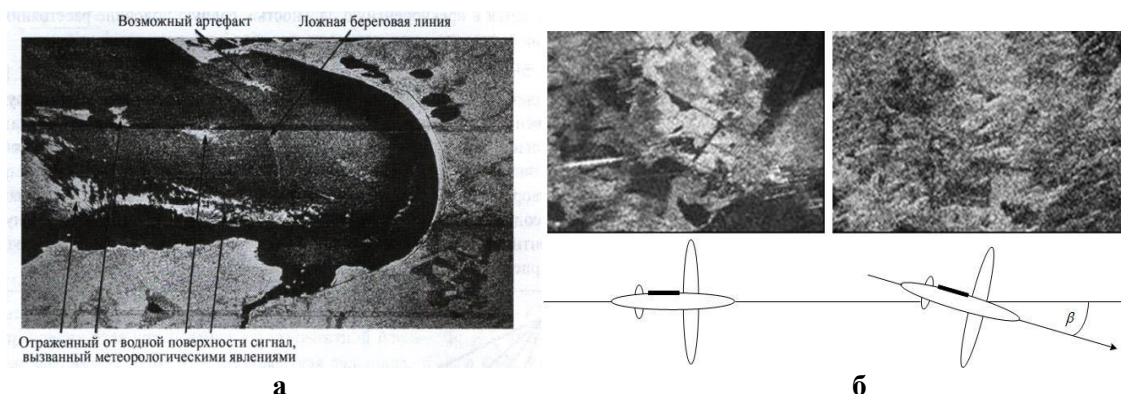
При этом предполагается получить следующие технические параметры:  
 Полноценная поляриметрическая РСА (НН, VV, HV, VH поляризации);  
 Кросс-поляризационная развязка  $\geq 30$  дБ;  
 Угол падения  $23^0 - 25^0$ ;  
 Полоса обзора 60км – 80 км для случая наблюдения на всех поляризациях и >110 км для одной поляризации;  
 Пространственное разрешение 50 м х50 м (при 4-х независимых усреднениях);  
 $\sigma_0$  шумового эквивалента < -27 дБ;  
 Абсолютная радиометрическая точность < 1.0 дБ;  
 Стабильность < 0.5 дБ  
 В другом проекте [6] антенная система имеет вид, показанный на рис.2



**Рис.2. Эскиз предполагаемой антенны для РСА Р-диапазона.**

### Влияние неопределенности на размер антенной системы.

Большие размеры антенн определяются тем, чтобы свести к минимуму влияние неоднозначностей по дальности и азимуту. Основные принципы возникновения неопределенностей можно найти в работе [7]. На рисунках рис.3 (а,б,) показано влияние неоднозначности на радиолокационные изображения.



**Рис.3(а,б).** примеры влияния неоднозначности на РЛИ  
а) РЛИ, полученное с помощью космического аппарата из[7]      б) при выполнении радиолокационной съемки с борта самолета.

Вопросам борьбы с неоднозначностью посвящено много работ. В России ведущим специалистом по этой проблеме является Коваленко А.И. из НИИТГП. Основной вывод - технические характеристики РСА (частота повторения), условия полета носителя, размеры и угол визирования антенны связаны между собой, и при рассмотрении создания РСА это следует учитывать. На подавление неоднозначностей можно сильно повлиять, только за счет увеличения площади антенны, но для того, чтобы получить хорошо воспринимаемое изображение можно просто размазать неоднозначности по всему изображению. Для этого существует ряд методов. Для прикладных задач это целесообразно, но для изучения параметров подстилающей поверхности, изучения биомассы леса это неприемлемо. Таким образом, при создании космической РСА основополагающим является то, какую максимальную площадь апертуры можно развернуть на космическом объекте и какая цель использования такой РСА.

### О проблемах установки опытного образца РСА Р-диапазона на МКС

Между ИРЭ им.В.А.Котельникова РАН и РОСКОСМОС при активном участии ОАО РКК "Энергия" достигнуто соглашение о возможности установки на МКС опытного образца РСА Р-диапазона. Предварительные проработки указали на ряд ограничений, которые существенно влияют на размещение ее на аппарате. Основная проблема - возможность установки на МКС антенной системы, имеющую площадь только  $S_{\text{ант}} = 16 \text{ м}^2$ , что примерно в пять раз меньше требуемой. По международному соглашению в данном диапазоне для радиолокационного зондирования можно использовать на вторичной основе полосу частот  $f = 432-438 \text{ МГц}$ . По техническим причинам накладываются жесткие условия на среднюю мощность радиоизлучения (не более 5 Вт.). Поэтому оказалось, что решить все проблемы по построению полноценной РСА невозможно. Из-за ограничений на размеры антенны в

азимутальном направлении требуется использовать повышенную частоту повторения посылаемых радиолокационных импульсов (уменьшить влияние неоднозначности по азимуту). Повышенная частота повторения приводит к неоднозначностям сигналов РСА по дальности, и тем более к получению полной матрицы обратного отражения. Расчеты показывают, РСА будет иметь относительно низкую чувствительность в виде удельной ЭПР шумового эквивалента, что приведет к сужению количества объектов исследований (энергетический потенциал должен, по крайней мере, быть повышен на 6-8 дБ). Возникли осложнения и с тем, что ось МКС вдоль полета может медленно, но в значительных пределах, изменять направление. Для того чтобы обойти перечисленные выше сложности, было предложено приблизить направление оси диаграммы направленности к надиру, это в свою очередь резко ухудшает разрешающую способность по наклонной дальности. В опытном образце РСА для установки на МКС предлагается использовать антенну размером  $3.6 \times 3.6 \text{ м}^2$ . Диаграмма направленности  $11^\circ \times 11^\circ$  (по уровню 3дБ). Антенна состоит из панелей  $1200 \times 600 \text{ мм}^2$  (из 18 элементов). На рис. 4,5 приведена схема расположения антенны в направлении полета станции и схемы с предполагаемым вариантом расположением антенны на МКС.

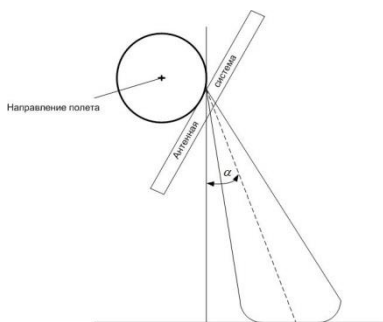


Рис.4. Схема расположения антенны РСА по отношению к носителю.



Рис.5. Схема МКС с предполагаемым вариантом расположением антенны.

Ось диаграммы направленности направлена на угол  $\alpha = 12^\circ$ . Полоса обзора становится таковой, что обратное отражение формируется квазизеркальной областью обратного отражения Рис.6.

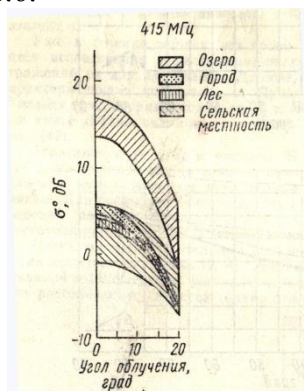


Рис.6. Пределы изменений коэффициента радиолокационного рассеяния различными классами поверхности для углов облучения близких к вертикальному [8].

Резкая зависимость обратного отражения от угла визирования уменьшает роль неопределенностей по дальности (как правило, в РСА космического базирования углы зондирования от 25 градусов и более). Однако анализ показывает, что

чувствительности радара в виде удельной ЭПР шумового эквивалента  $\sigma_N = -(14-16)$  дБ при углах зондирования  $6^0-17^0$  хватает для изучения практически всех типов подстилающих поверхностей, но приводит к проблеме интерпретации, т.е. требуется специальная наземная система абсолютной калибровки радиолокационных изображений. Колебания оси МКС по азимуту (хотя и медленные) накладывают дополнительные требования на построение антенной системы. Механическую стабилизацию антенной системы выполнить трудоемко, предполагается осуществлять стабилизацию направления антенны осуществлять электронным способом.

#### **Характеристики предлагаемой РСА Р-диапазона для размещения ее на МКС.**

Ширина ДНА в вертикальной плоскости на уровне -3дБ составляет вдоль линии полета центральный угол визирования  $12^0$ .

Полоса обзора с высоты  $H=450$ км составляет  $\square 70$  км.

Разрешающая способность по наклонной дальности на поверхности 120м.

Частота повторения зондирующих импульсов 4КГц.

Используется ЛЧМ сигнал с длительностью 30 мксек.

Пиковая мощность 40 Вт (средняя мощность излучения  $\square 5$  вт).

Чувствительность радара в виде удельной ЭПР составляет -22 дБ.

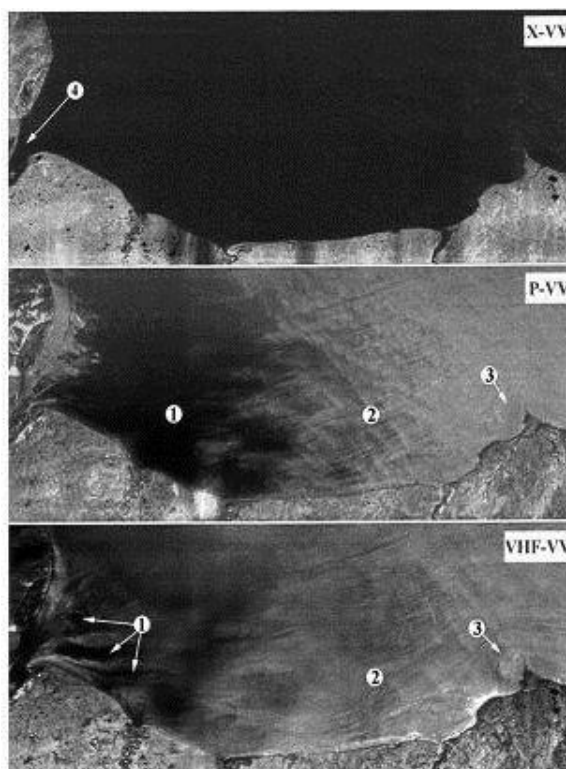
#### **Задачи, решаемые в процессе проведения КЭ.**

Использование РСА Р-диапазона не ограничивается изучением только лесных массивов. Как показали самолетные исследования, данный диапазон длин волн уникален по изучению явлений на морской поверхности. Анализ радиолокационных изображений морской поверхности в различных диапазонах длин волн (рис.7.) показывает, что стратификация движения морской воды наиболее четко проявляется в *Р* и *VHF* диапазонах. Таким образом, с помощью радиолокатора Р-диапазона значительно повышаются возможности исследования волнения, морских течений, процессов, происходящих в устьях рек, впадающих в моря, и т.д. Из-за большой проникающей способности электромагнитных волн этого диапазона использование РСА Р-диапазона перспективно для исследований почвенного, растительного, снежного, ледового покровов.

Кроме вопросов размещения большой антенны на космическом аппарате, важной проблемой является отработка методических вопросов, связанных с учетом влияния ионосферы, отработка методических вопросов, связанных с внешней калибровкой РСА Р-диапазона.

В процессе проведения КЭ решаются следующие задачи:

- отработка методических вопросов измерения, цифровой обработки и тематической интерпретации данных об обратном радиолокационном рассеянии, измеряемом из космоса с помощью РСА Р-диапазона;
- отработка методических вопросов измерения, цифровой обработки и тематической интерпретации данных о величине и поляризационных характеристиках радиолокационного сигнала Р-диапазона, рассеянного в обратном направлении точечными и распределенными объектами на земной поверхности;



**Рис.7. Радиолокационные изображения участка Баренцева моря, полученные одновременно в диапазонах  $\lambda = 4\text{см}$  (VV поляризация),  $\lambda = 68\text{см}$  (VV поляризация),  $\lambda = 254\text{см}$  (VV поляризация) [3].**

**1 – район моря с различной соленостью. 2 – область волнения. 3 – вихрь за утесом. 4 – устье реки. Радиолокационные изображения взяты из материалов открытой Государственной премии РФ 2000г. [9].**

- определение фактических параметров геометрических и поляризационных искажений, возникающих благодаря влиянию ионосферы;
- отработка методических вопросов, связанных с учетом влияния ионосферы на распространение дециметровых волн и соответствующей коррекцией получаемых данных;
- отработка методических вопросов, связанных с внешней калибровкой РСА Р-диапазона;
- изучение возможностей оценки параметров волнения, стратификации (включая морские течения) и солености морской поверхности;
- получение данных об отражательной способности хвойных, лиственных и смешанных лесов и оценка возможности их классификации;
- изучение возможностей определения биомассы леса по данным космических измерений путем сопоставления её с результатами наземных тестовых полигонов;
- изучение возможностей получения данных о гидрологическом режиме почвенного покрова;
- исследование возможности оценки характеристик поверхности, находящейся под снежным и ледяным покровами;
- исследование возможностей выявления и изучения крупно- и среднemasштабных поверхностных загрязнений

С учетом орбиты МКС исследуемыми объектами являются:

- лесные и почвенные участки Бурятии, Марийской Республики, леса южной части Красноярского края, леса Мещеры, в которых имеются наземные полигоны;
- леса экваториальной Африки и Южной Америки;
- Охотское море в разные периоды года;
- горные ледники (крупные трещины, стратификация верхних слоев) Кавказа, Алтая, Альп, Гималай, в том числе находящихся под снежным покровом;
- стратификация водных масс в районах крупных морских течений в первую очередь Куроисио и Гольфстрима.

### **Литература**

1. Wharton S.W. Knowledge-based spectral classification of remotely sensed image data in Theory and applications of optical remote sensing, New York: John Wiley&Sons, 1989, P.548–577.
2. Козодеров В.В., Кондранин Т.В. Методы оценки состояния почвенно-растительного покрова по данным оптических систем дистанционного аэрокосмического зондирования. – М: МФТИ, 2008. – 190 с.
3. Israelsson H., Ulander L., Martin T., Askne J.H. A Coherent scattering model to determine forest backscattering in the VHF-band // IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing. January 2000. V. 38, № 1. pp. 238–248.
4. Smith G., Ulander L. A Model Relating VHF-band backscatter to stem volume of coniferous boreal forest//IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. March 2000. V. 38. № 2. – P. 728–740.
5. S. Quegan, M. Davidson, H. Balzter, P. Paillou, K. Papathanassiou, S. Plummer, F. Rocca, S. Saatchi, H. Shugart, and L. Ulander, "The BIOMASS Mission: Mapping global forest biomass to better understand the terrestrial carbon cycle," Remote Sensing of Environment, in press.
6. Shadi Khureim-Castiglioni and Cyril Mangenot , “Very large space antenna apertures for future earth observation missions”, Antenna workshop, 2009, Tbilisi, Georgia.
7. В.С.Верба, Л.Б., Неронский, И.Г., Осипов, В.Э., Турук Радиолокационные системы землеобзора космического базирования Изд. Радиотехника М.2010
8. A.R.Edison, R.K.Moore, B.D.Warner, Radar return Measured at Near-vertical Incidence, IRE Trans., v.AP-8, p.246-254, May 1960, Справочник по радиолокации, Т.1. под редакцией М.Сколник)
9. „IMARC“ – Multi-Frequency Airborne Polarimetric Radar System Operating on Board of TU-134A Flying Laboratory for Remote Observations of the Earth’s Surface. M.: VEGA-M Corp., 1998. P. 8.