

ПРОЕКТНЫЙ ОБЛИК МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С БИСТАТИЧЕСКИМ РАДИОЛОКАЦИОННЫМ КОМПЛЕКСОМ P-VHF ДИАПАЗОНОВ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

©2017

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

И. В. Маслов инженер-конструктор;
АО «Ракетно-космический центр «Прогресс», г. Самара;
macloff@mail.ru

Б. Г. Женгуров кандидат технических наук, ведущий инженер-конструктор;
АО «Ракетно-космический центр «Прогресс», г. Самара;
loir47@rambler.ru

Пространственное разрешение является одной из наиболее важных характеристик радиолокационного изображения (РЛИ). При разработке радиолокационного комплекса в длинноволновых диапазонах частот (Р или VHF) следует учитывать существенные ограничения регламента связи, что не позволяет получить РЛИ с высоким разрешением. В статье представлен возможный проектный облик малого космического аппарата (МКА) с бистатическим двухчастотным радиолокационным комплексом (БиРЛК) P-VHF диапазонов. Конфигурация рассматриваемой системы предполагает перемещение передающей позиции в процессе съёмки и стационарное размещение приёмной позиции. Синхронизация системы обеспечивается в результате организации прямого канала распространения сигнала между передатчиком и приёмником. Особенностью комплекса является то, что зондирующие импульсы бортового радиопередающего устройства излучаются одновременно в двух диапазонах. Влияние атмосферы на разрешающую способность радиолокатора компенсируется в результате совместной обработки в наземном приёмном пункте. Предполагается, что за счёт одновременной работы в двухчастотных диапазонах суммарное пространственное разрешение может быть доведено до двух метров. Приведены результаты натурального наземного эксперимента, имитирующего работу предлагаемого радиолокационного комплекса. Определён укрупнённый состав и масса бортовых аппаратур. Представлен общий вид МКА с совмещённым БиРЛК.

Дистанционное зондирование Земли; малый космический аппарат; бистатический радиолокатор с синтезированной апертурой; P-VHF диапазоны частот.

Цитирование: Горячкин О.В., Маслов И.В., Женгуров Б.Г. Проектный облик малого космического аппарата с бистатическим радиолокационным комплексом P-VHF диапазонов высокого разрешения // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16, № 4. С. 31-40.
DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-4-31-40

Введение

В последние годы широко обсуждаются вопросы реализации космических РСА (радиолокатор с синтезированной апертурой) для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), работающих в Р и VHF диапазонах частот. Радиолокационное изображение в этих диапазонах несёт в себе информацию о распределении коэффициента отражения в толще растительности и почвы.

Размещение таких радиолокаторов затруднено известными техническими проблемами [1-4]: разрушительное влияние атмосферы, ограничения регламента радиосвязи, необходимость использования больших по площади раскрыва антенн, значительная импульсная мощность передатчика. Так, например, основные проектные параметры

космического аппарата BIOMASS с моностатическим РСА Р-диапазона предполагают достижение пространственного разрешения не лучше 30 м при использовании зеркальной антенны диаметром 12 метров [5]. В [6] описан проект моностатической космической РСА Р-диапазона на базе антенной решётки (АР) из элементов в виде антенн Уда-Яги, предложенный как развитие задела, созданного при реализации бистатического РСА на МКА «АИСТ-2Д», разработанного и изготовленного кооперацией Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ) и Самарского отделения научно-исследовательского института радио (СОНИИР). Ожидаемое пространственное разрешение для данной РСА составляет 15-25 м в зависимости от возмущения ионосферы.

В [7-10] было показано, что технологии мультистатического (в частности бистатического) радиолокационного наблюдения открывают возможности по созданию космической аппаратуры радиолокационного зондирования в VHF и/или Р-диапазонах частот высокого разрешения. Необходимость наличия наземной стационарной или мобильной приёмной станции на относительно небольшом расстоянии (до 20 км) до наблюдаемого объекта ограничивает области применения подобных систем ДЗЗ. Тем не менее можно указать некоторые области применения, в которых предлагаемые технологии имеют преимущества: контроль изменения ландшафта; контроль ледовой обстановки вокруг морских нефте- и газодобывающих платформ; точное земледелие; тактическая разведка; мониторинг лесных ресурсов и т.п.

Бистатический РСА малого КА «АИСТ-2Д» является первым в истории космического ДЗЗ радиолокационным комплексом, работающим в Р-диапазоне частот и реализующим эти идеи. В рамках программы создания малого КА «АИСТ-2Д» предполагается отработка ключевой технологии в виде развёртывания бистатического радиолокационного комплекса с синтезированной апертурой Р-диапазона (БиРЛК). Выбор Р-диапазона связан с необходимостью соответствия радиолокатора действующему в настоящее время регламенту радиосвязи.

Однако схема работы радиолокатора в районе наземного приёмного пункта предполагает возможность постановки вопроса перед разрешительными органами о расширении полосы разрешённых регламентом радиосвязи частот с 5 до 30 МГц в Р-диапазоне и выделении 50 МГц в VHF-диапазоне (эти диапазоны разрешены для соответствующих наземных и авиационных систем).

Облик РЛК для МКА

В этом случае бортовая аппаратура БиРЛК представляет собой импульсный передатчик, обеспечивающий гамму стабильных ЛЧМ (линейная частотная модуляция) сигналов на несущих частотах 435 и 145 МГц, в полосе до 30 и 50 МГц соответственно. Бортовые передающие и наземные приемные антенны представляют собой антенны Уда-Яги. Наземная стационарная аппаратура представляет собой два двухканальных малошумящих приёмника прямого усиления (до 110 дБ) с цифровой регистрацией 16-разрядных квадратурных компонентов на частоте до 200 МГц и последующей цифровой обработкой сигналов.

Данная конфигурация радиолокационного комплекса позволяет не только получить синхронные радиолокационные изображения местности в Р и VHF-диапазонах частот, но и получить комбинированные радиолокационные изображения высокого разрешения за счёт использования сигнала в полосе 30 и 50 МГц одновременно. Идею этого способа наблюдения иллюстрирует рис. 1.

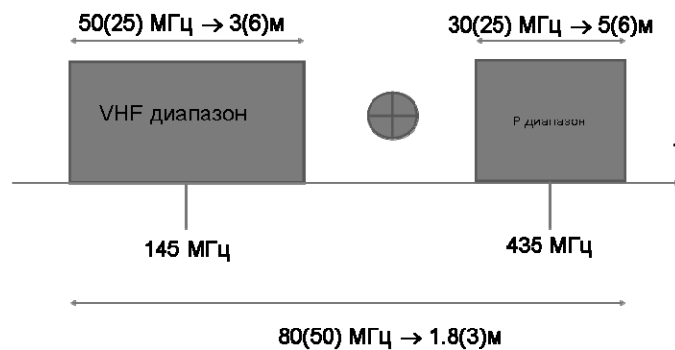


Рис. 1. Комбинация частотных диапазонов с целью увеличения разрешения РСА по дальности

Результаты наземного эксперимента

В статье приводятся результаты наземного эксперимента по реализации схемы бистатического двухчастотного радиолокационного комплекса для малого космического аппарата. Для проведения эксперимента использовался комплект бортовой аппаратуры (БА) БиРЛК МКА «АИСТ-2Д» № 2, работающий в R-диапазоне частот, комплект проверочной аппаратуры БА БиРЛК МКА «АИСТ-2Д», штатный комплект наземной аппаратуры БиРЛК МКА «АИСТ-2Д» [10]. Для организации облучения в VHF-диапазоне используется комплекс приёмо-передающей аппаратуры МРЛК [11].

Для работы БиРЛК необходимо, чтобы передающая позиция перемещалась в пространстве. В данном случае для организации процесса перемещения использовался автомобиль,двигающийся по мосту (высота моста примерно 20 м). На рис. 2 показана геометрия съёмки.

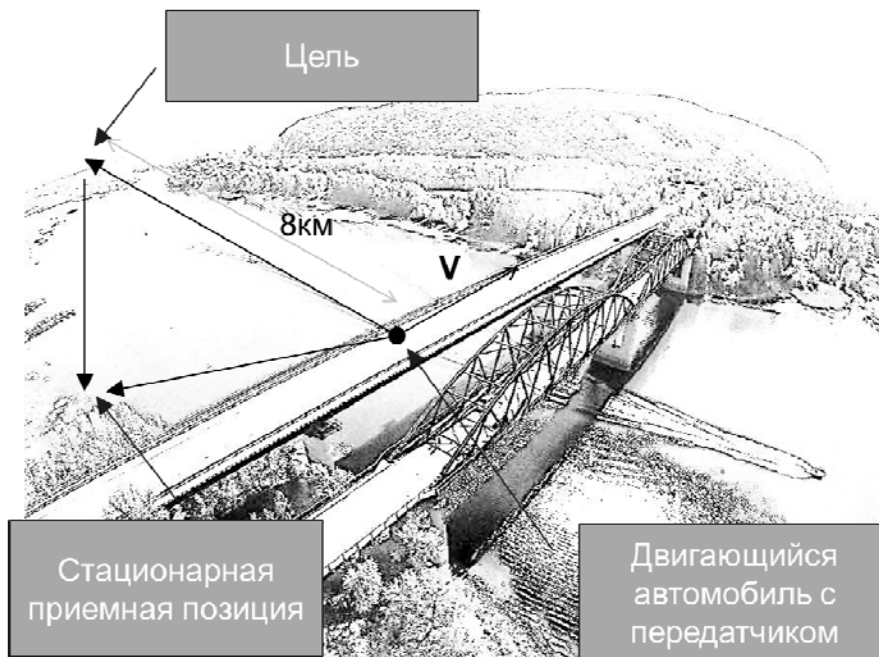


Рис. 2. Геометрия наземного эксперимента

На рис. 3 показано радиолокационное изображение местности (4×8 км), полученное в процессе эксперимента и совмещённое с оптическим изображением из сервиса Google maps.



Рис. 3. География эксперимента

На рис. 4, 5 показаны РЛИ местности в Р и VHF-диапазонах частот соответственно, полученные в процессе наземного эксперимента, шаг пикселей 1.5×1.5 м, время синтеза апертуры 40 с. На рис. 4 использовалась полоса частот 30 МГц, что соответствует пространственному разрешению 5 м; на рис. 5 эффективная полоса частот – 25 МГц, что соответствует пространственному разрешению 6 м по наклонной дальности.

На рис. 6 показано РЛИ местности в объединённом Р+VHF-диапазонах частот, что соответствует пространственному разрешению 3 м по наклонной дальности.

На рис. 7, 8 показаны совпадающие фрагменты радиолокационных изображений в VHF, Р, VHF+Р-диапазонах частот, иллюстрирующие факт улучшения разрешения.

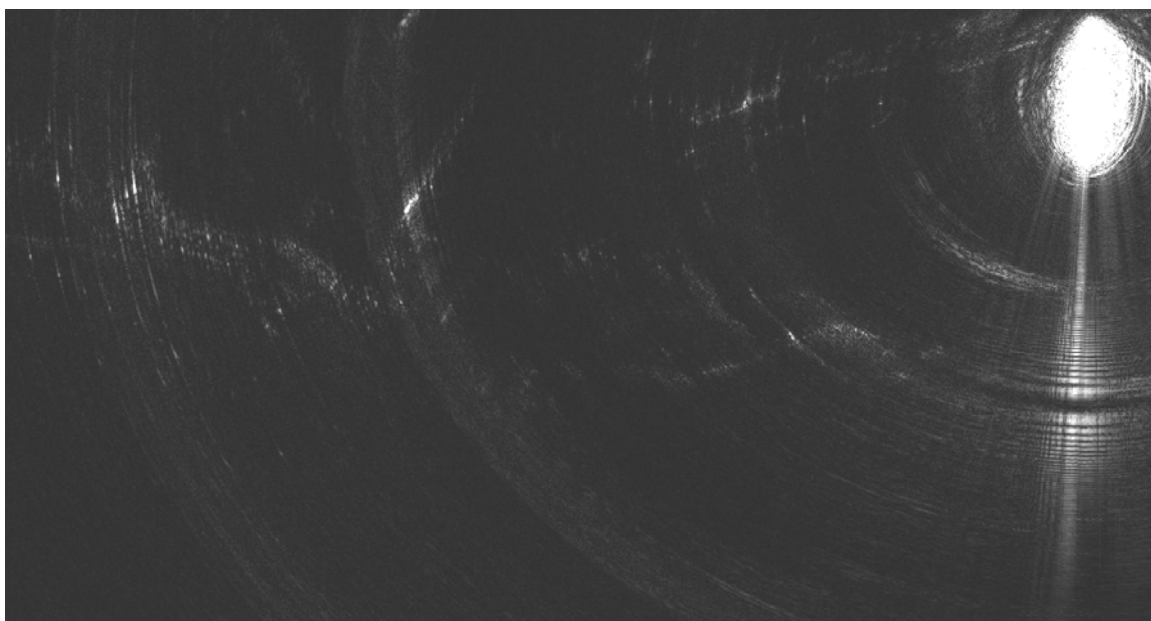


Рис. 4. Радиолокационное изображение (РЛИ) местности в Р-диапазоне частот, полоса частот 30 МГц, режим излучения ЛЧМ импульсов, шаг пикселей 1.5×1.5 м, время синтеза 40 с

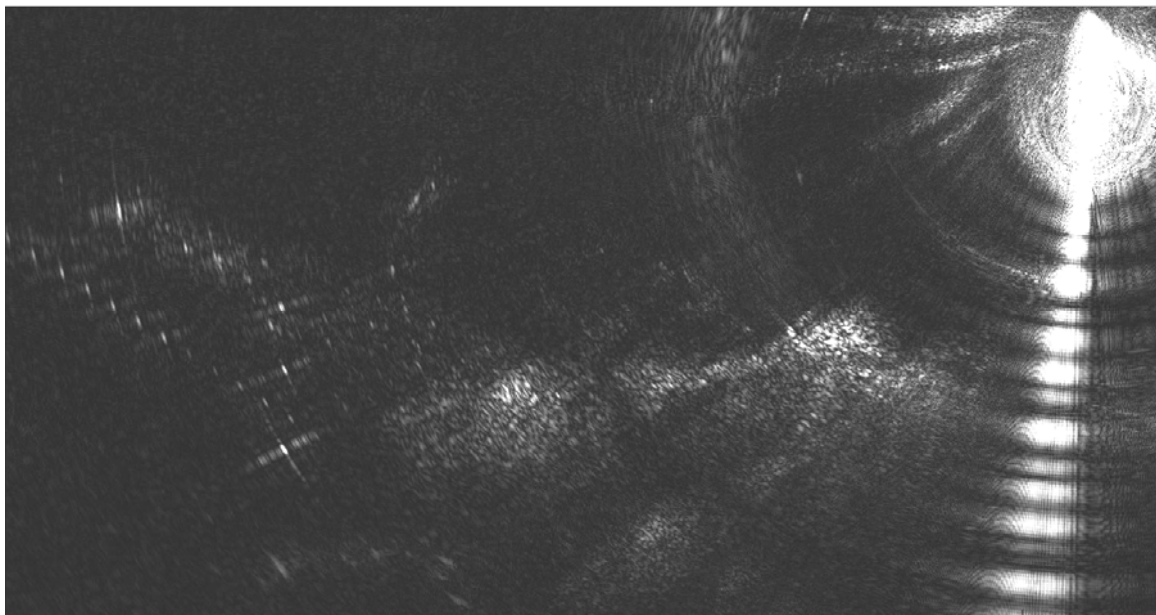


Рис. 5. Радиолокационное изображение (РЛИ) местности в VHF-диапазоне частот, полоса частот 25 МГц, режим излучения ФМС, шаг пикселей 1.5×1.5 м, время синтеза 40 с

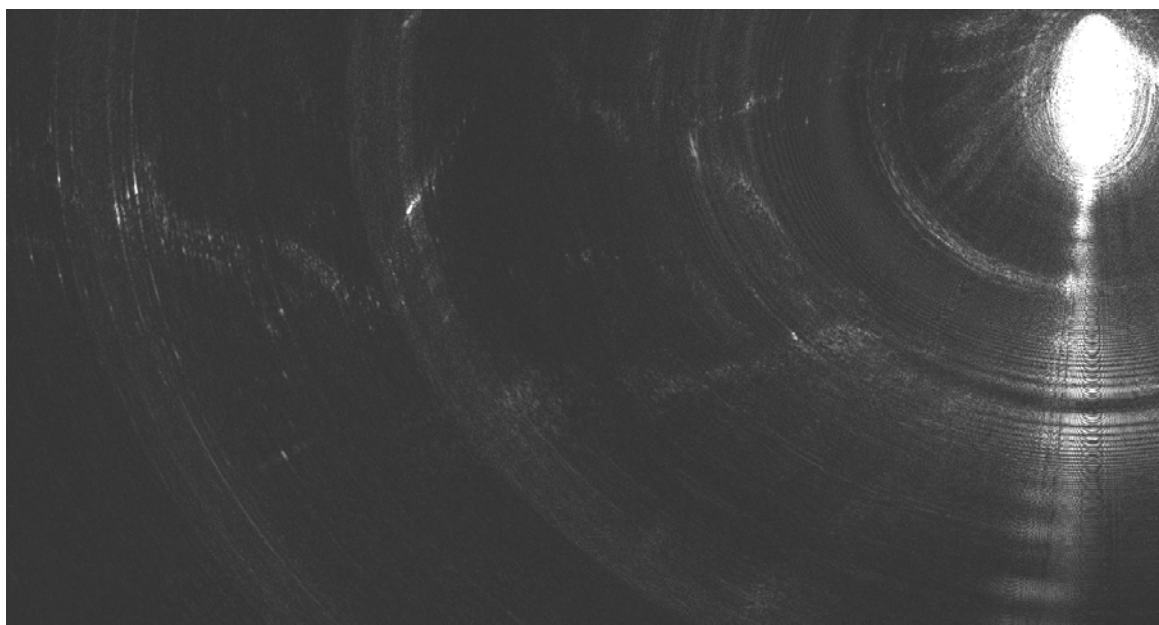


Рис. 6. РЛИ, полученное объединением спектров в P и VHF-диапазонов, полоса частот 80 МГц, шаг пикселей 1.5×1.5 м, время синтеза 40 с

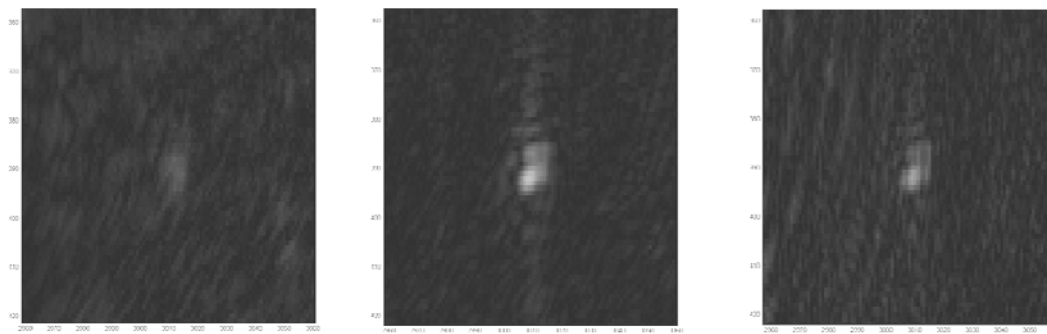


Рис. 7. РЛИ объекта, слева направо РЛИ VHF, P, VHF+P-диапазонов, шаг пикселей 1.5×1.5 м

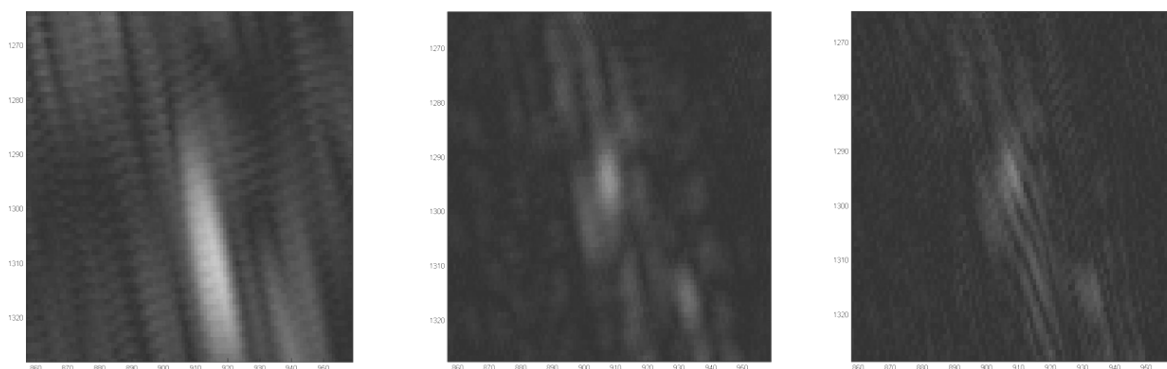


Рис. 8. РЛИ объекта, слева направо РЛИ VHF, P, VHF+P-диапазонов, шаг пикселей 1.5×1.5 м

В процессе эксперимента местность наблюдалась под малыми углами места (не более 5-7°), поэтому на радиолокационных изображениях видны в основном высокие объекты: мачты, столбы линий электропередач, высокие здания, одиночные высокие деревья, лесопосадки и т.п. По результатам проведенного эксперимента можно сделать вывод о возможности реализации комплекса бортовой и наземной аппаратуры, программно-алгоритмического обеспечения БиРЛК для МКА «АИСТ-2Д», обеспечивающего получение радиолокационных изображений в VHF, P-диапазонах частот и достижение пространственного разрешения до 2 м в режиме P+VHF.

Возможный облик МКА с БиРЛК P-VHF-диапазонов

Проведён анализ необходимых обеспечивающих систем и оценены основные тактико-технические характеристики:

1. Срок активного существования не менее трёх лет.
2. Высота орбиты 500 км.
3. Система электропитания должна обеспечивать энергопотребление не более 200 Вт при одновременном использовании двух диапазонов в течение не менее 10 мин на одном витке (ориентировочно площадь солнечных батарей не менее 3 м²).
4. Система управления движением должна обеспечивать ориентацию МКА по каналам рыскания, крена и тангажа не хуже 30', по угловой скорости 0,005°/с.

Дополнительно стоит отметить:

1. Радиолиния сброса целевой информации на Землю и бортовое запоминающее устройство могут отсутствовать. Сброс необходимой телеметрической информации и управление осуществляются через командную радиолинию.

2. В качестве антенн для командной радиолинии возможно рассмотреть антенны из состава БиРЛК, которые работают в тех же диапазонах частот.

В таблице представлен укрупнённый бортовой состав аппаратуры и ориентировочные значения масс бортовых систем, способных обеспечить указанные характеристики, что позволяет говорить о возможности создания МКА (до 150 кг) с БиРЛК P-VHF-диапазонов.

Укрупнённый бортовой состав МКА

Наименование	Масса, кг
1. Целевая аппаратура БиРЛК	28
1.1 Антенна Р-диапазона	2
1.2 Антенна VHF-диапазона	6
1.3 Передающая часть	
1.3.1 РПУ для Р-диапазона (аналогичное РПУ из состава БиРЛК МКА «АИСТ-2Д»)	10
1.3.2 РПУ для VHF-диапазона	10
2. Бортовая аппаратура высокоскоростной радиолинии	13
3. Бортовой комплекс управления	40
4. Система электропитания (включая солнечные батареи)	18
5. Система обеспечения теплового режима (датчики, нагреватели, ЭВТИ)	1
6. Конструкция	30
7. Бортовая кабельная сеть	5
8. Резерв	3
Итого	138

Примечание: РПУ – радиопередающее устройство; ЭВТИ – экранно-вакуумная теплоизоляция.

Общий вид МКА приведён на рис. 9. Конструктивно МКА состоит из корпуса, батареи солнечной и элементов общей сборки. Габаритные размеры МКА в рабочем положении (по крайним точкам) составляют 5200×1400×2650 мм.

Корпус МКА представляет собой негерметичный отсек, имеющий форму прямоугольного параллелепипеда. Корпус состоит из рамы и шести панелей, которые являются силовыми и используются для размещения бортовой аппаратуры. На нижней панели располагаются антенны Р и VHF-диапазонов, установленные на металлических пластинах, выполняющие роль рефлекторов и обеспечивающие необходимые характеристики диаграмм направленности. Наземная отработка показала, что для антенн БиРЛК достаточно разнесения в пространстве на один метр.

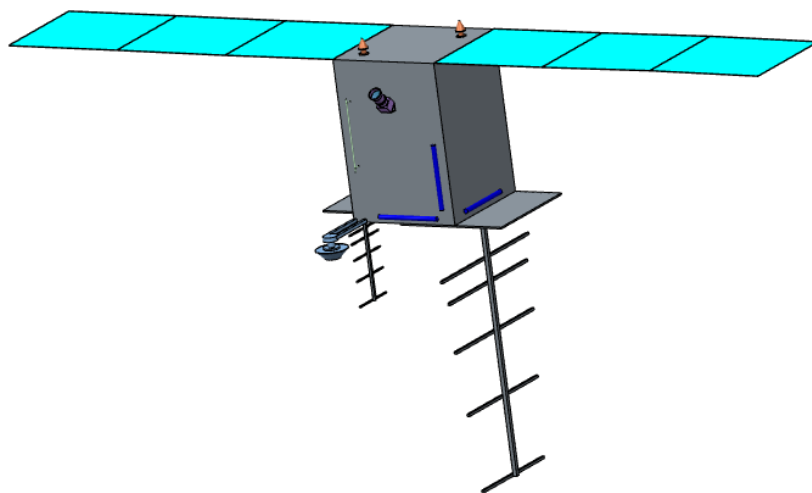


Рис. 9. Общий вид МКА с совмещённым БиРЛК Р-VHF-диапазонов

Заключение

В случае благоприятного прогноза по преодолению ограничений регламента радиосвязи возможно построение бистатического космического РСА, работающего в Р и VHF-диапазонах частот с высоким (до двух метров) пространственным разрешением.

По результатам натурного наземного эксперимента можно заключить, что при фактическом разрешении в VHF-диапазоне 6 м, в Р-диапазоне 6 м получены РЛИ с разрешением 3...5 м по дальности. Предлагаемая технология позволяет утверждать о возможности интеграции сигналов РЛК Р и VHF-диапазонов с целью увеличения разрешающей способности бистатических радаров с синтезированной апертурой.

Представлен проектный облик МКА с совмещённым БиРЛК Р-VHF-диапазонов, который позволяет сделать вывод о возможности создания микроспутника (до 100 кг) при соответствующем изменении некоторых бортовых систем.

Библиографический список

1. Ishimaru A., Kuga Y., Liu J., Kim Yu., Freeman T. Ionospheric effects on synthetic aperture radar at 100 MHz to 2 GHz // *Radio Science*. 1999. V. 34, Iss. 1. P. 257-268. DOI: 10.1029/1998rs900021
2. Goriachkin O.V., Kloovsky D.D. Some problems of realization spaceborne SAR in P, UHF, VHF bands // *Proceedings IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'99)*. 1999. V. 2. P. 1271-1273. DOI: 10.1109/igarss.1999.774601
3. Goriachkin O.V. Влияние атмосферы Земли на деградацию характеристик изображений космических радиолокационных станций с синтезированной апертурой // *Компьютерная оптика*. 2002. № 24. С. 177-182.
4. Горячкин О.В. Методы слепой обработки сигналов и их приложения в системах радиотехники и связи. М.: Радио и связь, 2003. 229 с.
5. Ramongassie S., Valle P., Orlando G., Arpesi P.G., Hélière F., Arcioni M. P-band SAR instrument for BIOMASS // *Proceedings of the European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR)*. 2014. P. 1156-1159.
6. Горячкин О.В., Женгуров Б.Г., Маслов И.В. Моностатический радиолокационный комплекс Р-диапазона для перспективного малого космического аппарата // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета)*. 2016. Т. 15, № 1. С. 38-45. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-1-38-45
7. Горячкин О.В. Пути развития радиолокационных космических систем дистанционного зондирования Земли // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета)*. 2010. № 2 (22). С. 92-104.
8. Горячкин О.В., Женгуров Б.Г., Бакеев В.Б., Барабошин А.Ю., Невский А.В., Скоробогатов Е.Г. Бистатический радиолокатор с синтезированной апертурой Р-диапазона для МКА «АИСТ-2» // *Электросвязь*. 2015. № 8. С. 34-39.
9. Горячкин О.В., Борисенков А.В., Женгуров Б.Г. Формирование радиолокационных изображений в наземной бистатической РЛС с синтезированной апертурой Р-диапазона // *Радиотехника*. 2017. № 1. С. 117-122.
10. Кирилин А.Н., Ахметов Р.Н., Шахматов Е.В., Ткаченко С.И., Бакланов А.И., Салмин В.В., Семкин Н.Д., Ткаченко И.С., Горячкин О.В. Опыт-технологический малый космический аппарат «АИСТ-2Д». Самара: Самарский научный центр РАН, 2017. 324 с.
11. Борисенков А.В., Горячкин О.В., Долгополов В.Н., Женгуров Б.Г., Курков И.Г., Калимуллин Р.Г., Мовчан В.К., Хохлов С.М. Мобильный радиолокационный ком-

плекс с синтезированной апертурой УКВ диапазона для дистанционного зондирования Земли // Инфокоммуникационные технологии. 2015. Т. 13, № 4. С. 424-432. DOI: 10.18469/ikt.2015.13.4.11

CONCEPTUAL DESIGN OF SMALL SPACECRAFT WITH A HIGH RESOLUTION P-VHF BAND BISTATIC SAR SYSTEM

©2017

- 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** Design Engineer; Joint Stock Company Space Rocket Centre Progress, Samara, Russian Federation; macloff@mail.ru
- B. G. Zhengurov** Candidate of Science (Engineering), Senior Design Engineer; Joint Stock Company Space Rocket Centre Progress, Samara, Russian Federation; loir47@rambler.ru

Spatial resolution is one of the most important characteristics of a radar image. Significant limitations in communication regulations should be taken into account concerning radar facilities in long-wave frequency ranges (P or VHF). These limitations do not allow high resolution of a radar facility. The article presents a possible conceptual design of a small spacecraft with a bistatic dual-frequency P-VHF radar facility. The system under consideration is characterized by the displacement of the transmitting station in the process of imaging and stationary position of the receiving station. The synchronization of the system is ensured by organizing a direct channel of signal propagation between the transmitter and receiver. The distinctive feature of the system is simultaneous radiation of direct impulses of the space-borne radio transmitting device in two bands. The influence of the atmosphere on the radar resolution is compensated as a result of joint processing at the ground receiving station. It is expected that total spatial resolution can be brought up to 2 meters due to the simultaneous operation in dual-frequency ranges. The results of a full-scale ground-based experiment simulating the work of the proposed radar complex are presented in the article.

Earth remote sensing; bistatic synthetic aperture radar (SAR); P-band; L-band; small satellite.

Citation: Goryachkin O.V., Maslov I.V., Zhengurov B.G. Conceptual design of small spacecraft with a high resolution P-VHF band bistatic SAR system. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2017. V. 16, no. 4. P. 31-40. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-4-31-40

References

1. Ishimaru A., Kuga Y., Liu J., Kim Yu., Freeman T. Ionospheric effects on synthetic aperture radar at 100 MHz to 2 GHz. *Radio Science*. 1999. V. 34, Iss. 1. P. 257-268. DOI: 10.1029/1998rs900021
2. Goriachkin O.V., Kloovsky D.D. Some problems of realization spaceborne SAR in P, UHF, VHF bands. *Proceedings IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'99)*. 1999. V. 2. P. 1271-1273. DOI: 10.1109/igarss.1999.774601
3. Goriachkin O.V. Influence of the Earth's atmosphere on the degradation of characteristics of synthetic aperture spacecraft radar images. *Computer Optics*. 2002. No. 24. P. 177-182. (In Russ.)
4. Goriachkin O.V. *Metody slepoy obrabotki signalov i ikh prilozheniya v sistemakh radiotekhniki i svyazi* [Methods of blind processing of signals and their applications in systems of radio engineering and communication]. Moscow: Radio i Svyaz' Publ., 2003. 229 p.

5. Ramongassie S., Valle P., Orlando G., Arpesi P.G., Hélière F., Arcioni M. P-band SAR instrument for BIOMASS. *Proceedings of the European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR)*. 2014. P. 1156-1159.

6. Goryachkin O.V., Zhengurov B.G., Maslov I.V. Monostatic P-band radar system for advanced small satellites. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2016. V. 15, no. 1. P. 38-45. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-1-38-45. (In Russ.)

7. Goryachkin O.V. Ways of the development of the radar space systems of the remote sensing of the Earth. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2010. No. 2 (22). P. 92-104. (In Russ.)

8. Goriachkin O.V., Gengurov B.G., Bakeev V.B., Baraboshin A.Yu., Nevsky A.V., Skorobogatov E.G. Bistatic P-band SAR for spacecraft «AIST-2D». *Electrosvyaz*. 2015. No. 8. P. 34-39. (In Russ.)

9. Goriachkin O.V., Borisenkov A.V., Zhengurov B.G. Imaging in ground-based P band bistatic SAR. *Radioengineering*. 2017. No. 1. P. 117-122. (In Russ.)

10. Kirilin A.N., Akhmetov R.N., Shakhmatov E.V., Tkachenko S.I., Baklanov A.I., Salmin V.V., Semkin N.D., Tkachenko I.S., Goryachkin O.V. *Opytno-tekhnologicheskiiy malyy kosmicheskiiy apparat «AIST-2D»* [Small engineering test satellite AIST-2D]. Samara: Samarskiy Nauchnyy Tsentr RAN Publ., 2017. 324 p.

11. Borisenkov A.V., Goriachkin O.V., Dolgopolov V.N., Zhengurov B.G., Kurkov I.G., Kalimullin R.G., Movchan V.K., Khokhlov S.M. Mobile VHB-band SAR for Earth remote sensing. *Infokommunikacionnye Tehnologii*. 2015. V. 13, no. 4. P. 424-432. DOI: 10.18469/ikt.2015.13.4.11. (In Russ.)