

Анализ положения дел в области создания бистатических РСА

М.П. Титов¹, М.И. Бабокин¹, А.М. Рабочий², В.В.Костров³

¹АО «Аэрокон», 140187 г. Жуковский, Московская обл., ул. Жуковского, 1,

²АО «ВПК «НПО Машиностроения»

143966, Московская область, г. Реутов, ул. Гагарина, д.33

E-mail: alexrabochiy@mail.ru

³Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
602263 г.Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23

В докладе производится анализ состояния разработок в области многопозиционных РСА обзора земной поверхности. Приводятся примеры полученных с помощью бистатических РСА радиолокационных изображений объектов, полученных в различных режимах съемки. Ключевые слова: радиолокатор с синтезированием апертуры, бистатический обзор, радиолокационное изображение, синхронизация, активная и пассивная системы

Analysis of the state of affairs in the field of creating bistatic SAR

M.P. Titov¹, M.I. Babokin¹, A.M. Rabochiy², V.V. Kostrov³

¹JSC «Aerocon»

²JSC «MIC «NPO Mashinostroyeniya»

³Murom Institute (branch) Vladimir State University

The report analyzes the state of developments in the field of multi-position radar survey of the Earth's surface. Examples of radar images obtained using bistatic radar images of objects obtained in various shooting modes are given. Keywords: synthetic aperture radar, bistatic survey, radar image, synchronization, active and passive systems

Введение

Несмотря на известные [1,2] положительные качества моностатических радиолокаторов с синтезированием апертуры антенны (РСА), эти радиолокаторы имеют ряд известных недостатков, которых лишены многопозиционные РСА [3,4]. Особенностью многопозиционных РСА является то, что передающая и приемная части (позиции) РЛС разнесены в пространстве, т.е. находятся на разных носителях. На рис.1 приведена конфигурация такой системы, в которой имеются так называемые активные КА, несущие передатчики, и пассивные, несущие приемники. Активные КА производят подсвет цели, а пассивные – принимают отраженные от цели сигналы, обрабатывают их в режиме синтезирования апертуры и получают РЛИ. При этом носители пассивных РСА могут двигаться под любым ракурсом к объекту, в том числе и непосредственно на него. Синтезирование в этом случае будет в этом осуществляться за счет движения носителя активной РСА. Частным случаем многопозиционной системы является случай, когда носителей всего два: один активный (подсвечивающий), а другой – пассивный (принимающий). Такая система называется бистатической (БиРСА). Для упрощения в дальнейшем, без нарушения общности, будем рассматривать именно такой случай (рис. 2). Угол β называется бистатическим углом. Угол β_{Π} – угол между направлением на объект и вектором скорости пассивного носителя может быть любым,

в пределах которого антенна может следить своей диаграммой направленности (ДН) за объектом съемки. Такая конфигурация использования РЛС обеспечивает следующие преимущества БиРСА перед моностатическими РСА:

- возможность получения высококачественного РЛИ прямо по направлению полета,
- повышение скрытности работы,
- повышение помехозащищенности,
- повышение вероятности обнаружения объектов, изготовленных по технологии «стелс» за счет того, что эта технология рассчитана на минимизацию переизлучения радиоволн в сторону облучения (в сторону передатчика), и, следовательно, повышение переотражения в других направлениях (в нашем случае в направлении приема).

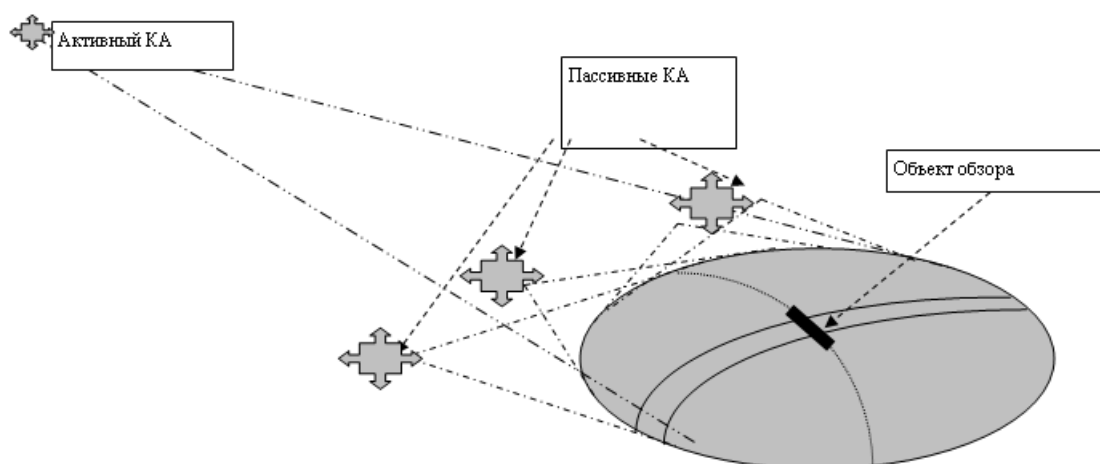


Рис. 1. Конфигурация многопозиционной системы

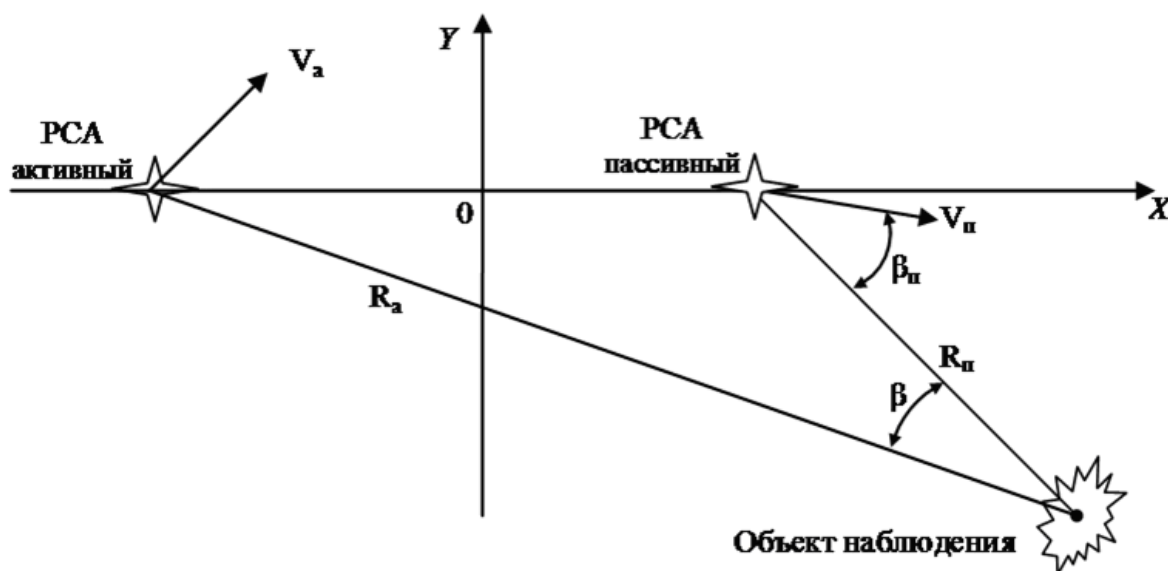


Рис. 2. Геометрия бистатического РСА

Обычно бистатические РСА делят на космические (КА), авиационные (ЛА), авиационно-космические (АК) и стационарно-космические (КС), стационарно-авиационные (АС). При этом излучающая и приемная части могут размещаться в любых конфигурациях.

Большое количество исследований вплоть до серийного производства таких систем выполнено с целью обнаружения воздушных объектов (самолетов, БПЛА, крылатых

ракет и т.д.) [5,6]. В России таким комплексом является «Струна-1», который прошел государственные испытания в 1998 г. и принят на вооружение в 2005 году. Одним из основных преимуществ этой РЛС (как отмечается в зарубежной прессе) становится значительное увеличение (в 2...4 раза, а иногда на 2...3 порядка) ЭПР целей (особенно разработанных по технологии СТЕЛС) [6]. Такие РЛС излучают очень незначительные мощности (2...3 ватта), что повышает их скрытность.

Известно [7], что для успешной работы многопозиционной РЛС требуется обеспечить несколько синхронизации: пространственную, временную, фазовую и синхронизацию временных диаграмм. Первые три выполняются легко. Последняя потребует определенных усилий. Но для наземной системы (как «Струна-1») вопрос синхронизации временных диаграмм может быть решен достаточно несложно. Однако для подвижных РЛС, какими являются РСА различного базирования, этот вопрос становится не тривиальным. В зависимости от конфигурации бистатической РСА (БиРСА) могут применяться различные алгоритмы синхронизации [8]. Многие из них реализованы в экспериментах. К вопросам построения БиРСА внимательно относятся зарубежные исследователи. Существует и достаточное количество проведенных экспериментов на эту тему [9–16]. Для реализации экспериментов по бистатическому синтезированию использовались специально организованные летающие лаборатории и/или космические РСА.

Так, в статье [9] представлены возможности съёмки пассивного самолётного РСА переднего обзора в комбинации с космической облучающей системой. Вне сомнения, система РСА переднего обзора имеет множество применений, таких как помощь при навигации и посадке самолётов. По мнению авторов, это первый эксперимент по бистатическому радиолокационному обзору, демонстрирующий способности и возможности получения РЛИ высокого разрешения по направлению полета (для справки: аналогичный эксперимент был успешно проведен в России в 2004 г.). Радиолокационный спутник TerraSAR-X использовался как передатчик, а самолётная система РСА РАМІR как приёмник. Схема организации эксперимента по бистатической съёмке с приемником переднебокового обзора приведена на рис. 3.

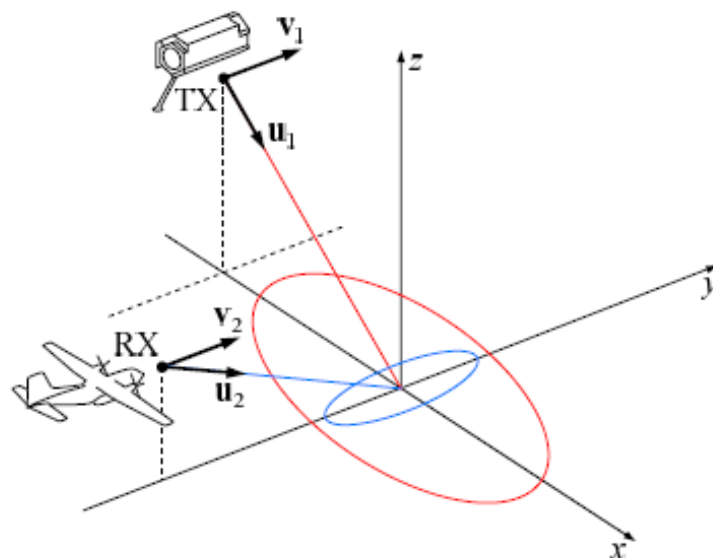


Рис. 3. Геометрия бистатического РСА с приёмником переднебокового обзора

Разрешение по дальности на местности определяется по формуле:

$$\delta a_g = \frac{c}{B \cdot |\Gamma_{xy} \cdot (\mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_2)|}, \quad (1)$$

где c – скорость света, B – полоса частот сигнала, \mathbf{u}_1 и \mathbf{u}_2 – единичные вектора, направленные от передатчика и приёмника к точечной цели, а Γ_{xy} – проекция на плоскость горизонта.

Доплеровское разрешение определяется выражением:

$$\delta b_g^D = \frac{\lambda}{T_b \cdot |\Gamma_{xy} \cdot (\omega_1 + \omega_2)|}, \quad (2)$$

где λ – длина волны, T_b – общее время облучения наземной цели, а ω_1 и ω_2 – угловые скорости передатчика и приёмника по отношению к точечной цели, которые задаются делением индивидуальной тангенциальной скорости на расстояние между датчиком и целью.

В ноябре 2009 г. проводился эксперимент по бистатической съемке с применением приемника небокового обзора. Спутник РСА X-диапазона TerraSAR-X работал в прожекторном режиме высокого разрешения, в результате которого время облучения снимаемого участка составляло около 3-х с. Зондирующий сигнал на центральной частоте 9,65 ГГц имел ширину спектра 300 МГц. Условия проведения эксперимента приведены в таблице 1.

Самолётная система РСА PAMIR (Phased Array Multifunctional Imaging Radar), разработанная в институте высокочастотной физики и радиолокационной техники им. Фраунгофера (FHR), использовалась как пассивный приёмник на борту самолёта Transall C-160.

Таблица 1. Параметры гибридного эксперимента

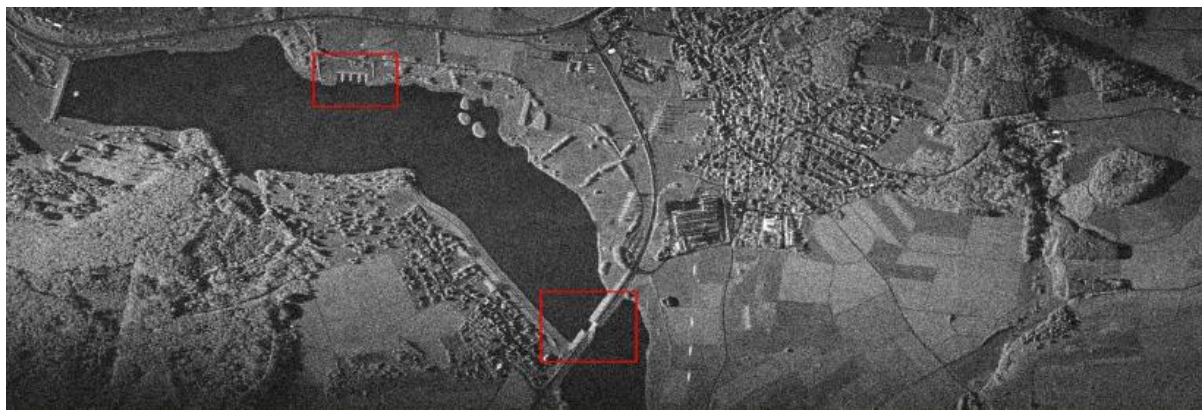
Параметры	PAMIR	TerraSAR-X
Наклонная дальность, км	2,9	559
Высота, км	1,5	515
Угол падения, град.	60°	24°
Ширина луча антенны по азимуту, град.	27°	0,33°
Ширина луча антенны по углу места, град.	27°	2,3°
Скорость платформы, м/с	100	7600
Частота повторения импульсов, Гц	1490	4471
Длина волны, см	3,1	
Ширина полосы частот, МГц	300	
Поляризация	VV	
Время съёмки, с	3	

Использование стандартного усилительного рупора и маломощных усилителей, установленных в ВЧ-тракте антенны PAMIR'a, позволило увеличить ширину луча антенны до 27° по азимуту и углу места, соответственно. В целях синхронизации, а также определения начала отсчета наверху фюзеляжа самолёта была установлена дополнительная антенна для приёма прямого сигнала спутника. Этот сигнал использовался системой импульсной синхронизации, которая синхронизовала контроллер времени PAMIR'a. После включения контроллер времени работал с постоянной частотой повторения, в этом случае частота повторения контроллера составляла примерно одну четвёртую часть от частоты повторения передатчика. Оставалось небольшое смещение частоты повторения импульсов вследствие влияния различных генераторов опорных синхронизирующих импульсов, что вызывало линейный сдвиг по дальности записываемого сигнала, который устранялся при обработке данных. Теоретический анализ эксперимента показал, что разрешение по

наземной дальности составляет около 0,7 м, а доплеровское разрешение изменяется от 1,2...3 м.



Рис. 4. Геометрия АК БиРСА (TerraSAR-X / PAMIR)



БиРСА изображение

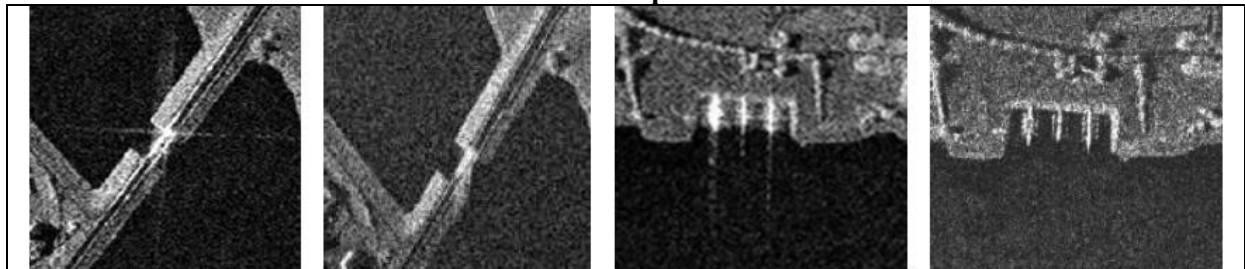


Рис. 5. Сравнение моностатического и бистатического РСА изображений:
а) моностатическое РСА изображение PAMIR'a; б) РСА изображение TerraSAR-X/PAMIR;

в) моностатическое PCA изображение PAMIR'a; г) PCA изображение TerraSAR-X/PAMIR

Далее приведен пример экспериментов с самолётной/стационарной конфигурацией. Самолётный/стационарный бистатический эксперимент был успешно выполнен в 2007 г. Геометрия съёмки показана на рис. 6. В этом эксперименте PAMIR работал в прожекторном режиме, действуя как подвижный приёмник. Передатчик был расположен выше Рейнской долины вблизи города Бонн. Передатчик и приёмник имели азимутальную ширину луча 27° и 6° , соответственно. Как передатчик, так и приёмник работали в X-диапазоне и занимали общую полосу частот 380 МГц с центральной частотой 9,65 ГГц.

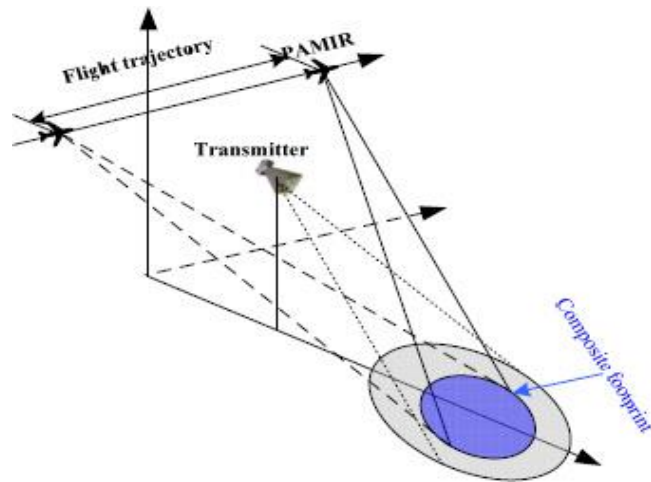


Рис. 6. Геометрия съёмки в самолётной/стационарной конфигурации



Рис. 7. Самолётное/стационарное бистатическое радиолокационное изображение

Рассмотрим другой пример экспериментов с космической/стационарной конфигурацией. С июля по октябрь 2009 г. было успешно выполнено несколько космических/стационарных бистатических экспериментов, когда TerraSAR-X работал как передатчик в скользящем прожекторном режиме, а пассивный стационарный приёмник с двумя каналами использовался для приёма отражённого сигнала облучаемого участка и прямого сигнала TerraSAR-X [17,18]. Геометрия съёмки

показана на рис. 8. При этом отражённый сигнал синхронизировался путём использования прямого сигнала TerraSAR-X [17].

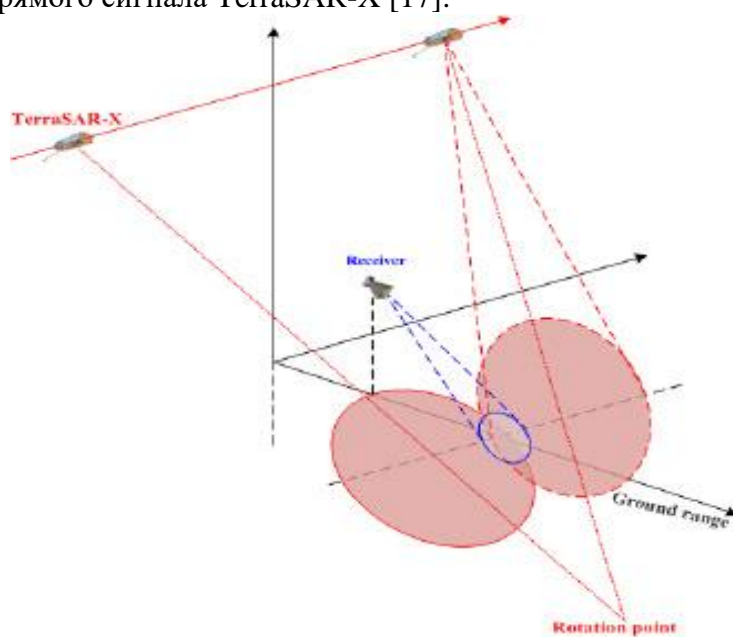


Рис. 8. Геометрия съёмки при космической/стационарной конфигурации

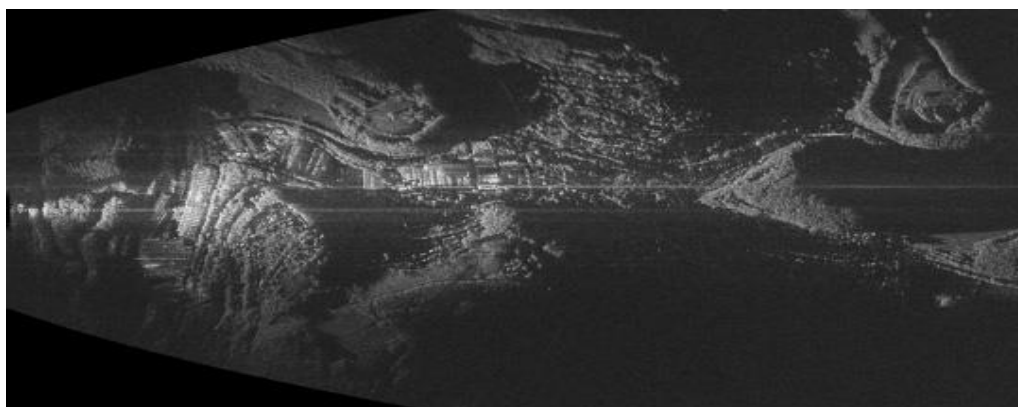


Рис. 9. Космическое/стационарное бистатическое радиолокационное изображение

Ниже на рис. 10 приведен пример РЛИ бистатического межсамолетного эксперимента (ЛА БиРСА) проведенного в 2003 году.

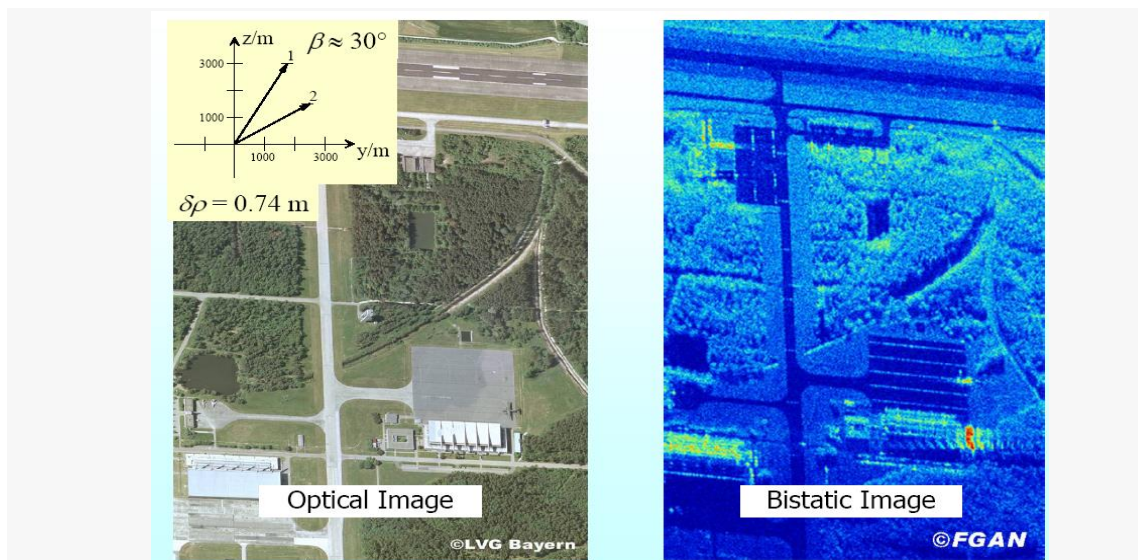


Рис. 10. РЛИ межсамолетного бистатического эксперимента (АЕR-II и Рамir, октябрь 2003 г.)

В России также уделялось внимание бистатическому синтезированию. Так в 2004 году был проведен эксперимент по межсамолетной БиРСА с помощью двух самолетов МИГ-29 со штатными РСА (Жук-Э) на борту [8]. В эксперименте участвовало несколько организаций (НПЦ «Элсов», РСК МиГ, «НПО им. Лавочкина», НПО «Фазатрон»). На рис. 11 схематично показан использованный в летном эксперименте вариант взаимного положения активного (ЛА-а) и пассивного (ЛА-п) самолетов. В процессе эксперимента производилась запись принимаемой голограммы на цифровой регистратор для последующей обработки и анализа на земле. Кроме того, на борту пассивного самолета производилась обработка в реальном времени штатным процессором по штатным алгоритмам получаемых сигналов.

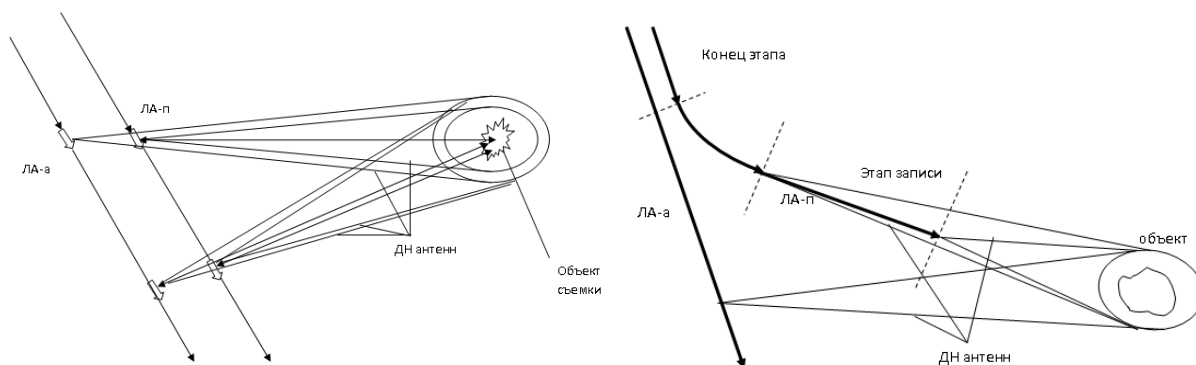


Рис. 11. Варианты взаимного положения активного и пассивного самолетов при эксперименте

Рис. 12 иллюстрирует два изображения одного и того же участка местности, полученные одновременно на индикаторах активного (справа) и пассивного (слева) самолетов, РЛС которых работали в режиме бистатического РСА. Качества РЛИ практически не отличаются друг от друга. Самолеты при этом летели в пределах взаимной видимости (сотни метров друг от друга), направление полета обозначено стрелками в нижней части рисунков.

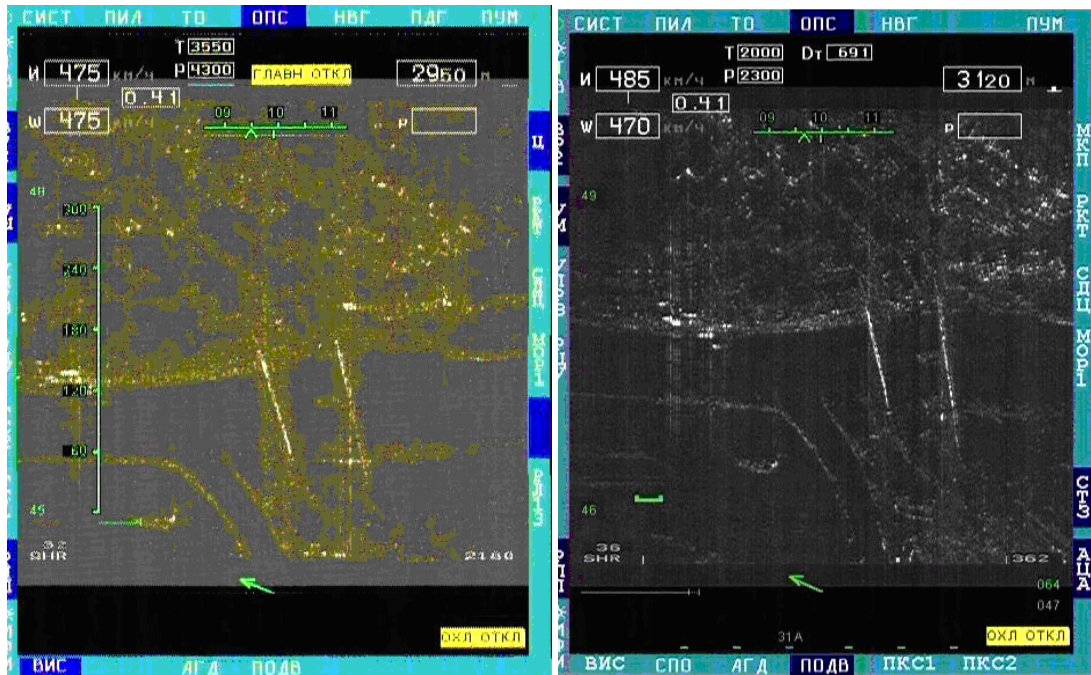


Рис. 12. РЛИ межсамолетного синтезирования

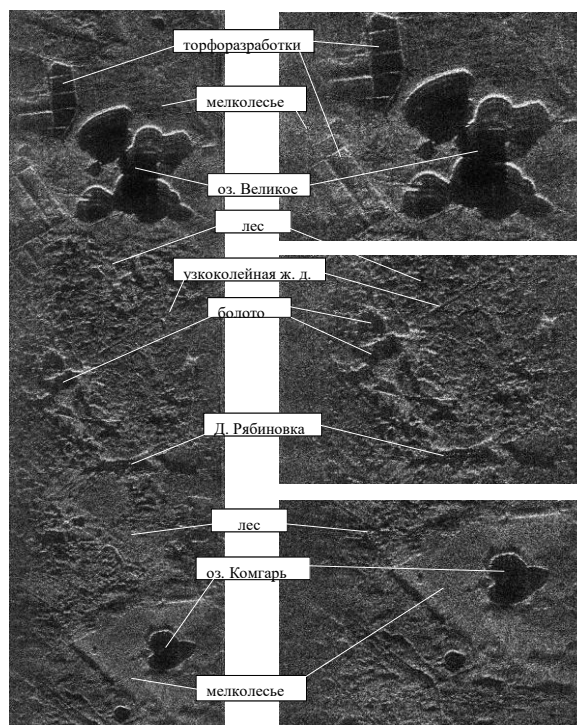


Рис. 13. Расшифрованное РЛИ межсамолетного синтезирования

Большой интерес представляет собой использование для работы БиРСА сигналов, излучаемых сторонними передатчиками. Так проведен эксперимент, где для синтезирования применялись сигналы навигационной системы ГНСС ГЛОНАСС. Эксперимент проводился ОАО «МАК «Вымпел» в 2012 году [19]. Однако ввиду небольшой полосы излучаемого сигнала достичь высокого разрешения пока не удастся. На рис. 14 приведен пример РЛИ такой РСА.

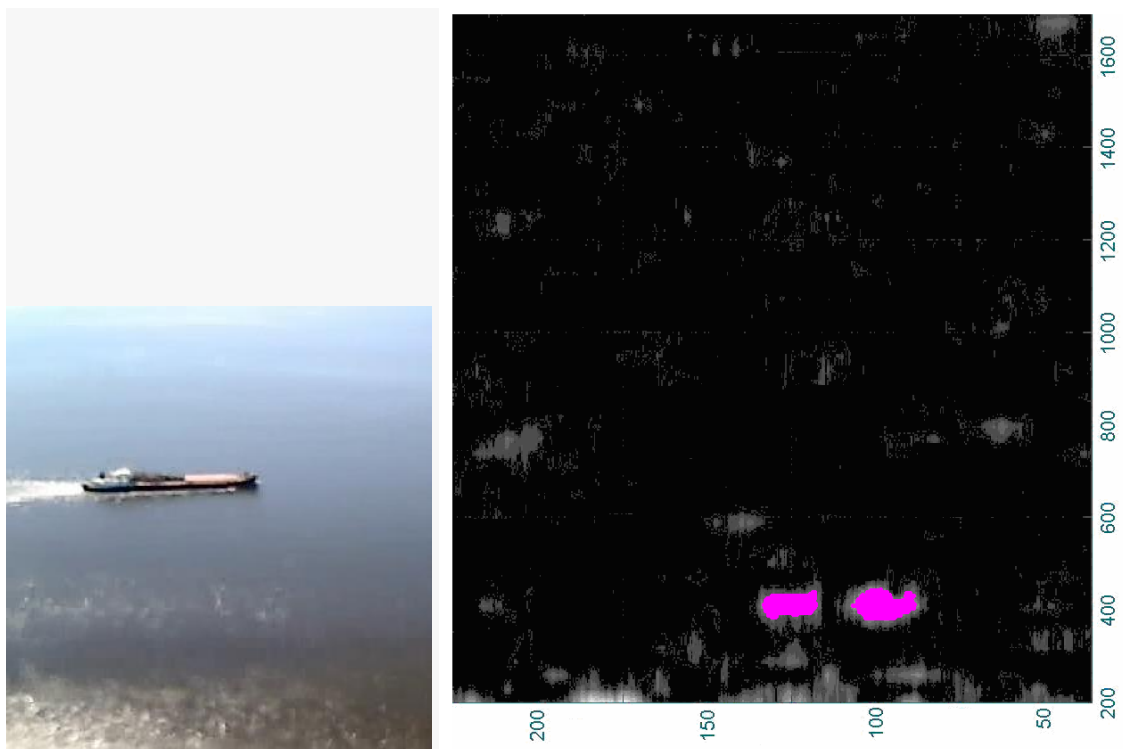


Рис. 14. Результаты обнаружения одиночной самоходной баржи проекта Ф-1000 класса РР регистра “М”

В качестве сигналов, излучаемых сторонними передатчиками, для работы БиРСА могут использоваться также постоянно присутствующие телевизионные сигналы, в том числе эфирного аналогового (SECAM) и цифрового (DVB-T2) телевидения. Использование таких сигналов позволяет осуществить не только съемку местности, но и производить построения цифровых моделей рельефа [20, 21].

Другим примером использования сигналов с постоянным излучением может быть построение БиРСА с подсветом с геостационарного спутника, а приемом на низкоорбитальном спутнике или ЛА (БПЛА) [22]. Архитектура такого построения представлена на рис. 15.

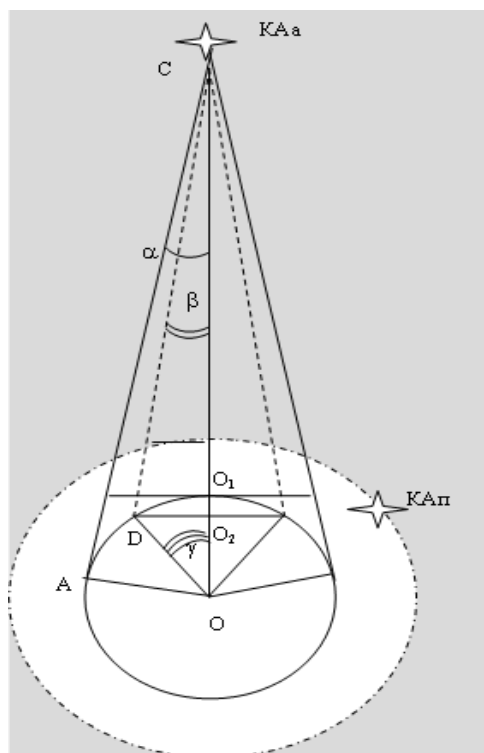


Рис. 15. Пример построения БиРСА на базе геостационарного спутника

Выводы

1. Современное состояние технологии позволяет реализовать режим бистатического синтезирования апертуры антенны в РСА космического базирования
2. В процессе организации бистатического режима РСА необходимо решить четыре задачи синхронизации обеих частей РСА: пространственную, временную, фазовую и временных диаграмм.
3. Наибольшую сложность в технической реализации представляет собой синхронизация временных диаграмм.
4. Применительно к ГЕО РСА большой интерес вызывает организация бистатического режима в составе геосинхронного КА.
5. Большую помощь в организации ГЕО БиРСА должно сыграть проведение летного эксперимента (возможно и с привлечением самолетной РСА).

Литература

1. Радиолокационные станции обзора Земли / Г.С. Кондратенков, В.А. Потехин, А.П. Реутов, Ю.А. Феоктистов; Под ред. Г.С. Кондратенкова. М.: Радио и связь, 1983.
2. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В.Н. Антипов, В.Т. Горяинов, А.Н. Кулин и др.; Под ред. В.Т. Горяинова. – М.: Радио и связь, 1988.
3. Черняк В.С., Заславский Л.П., Осипов Л.В. Многопозиционные радиолокационные станции и системы // Зарубежная радиоэлектроника. 1987. №5. С.9-70.
4. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993.
5. РЛК 52Э6 «Струна-1». Многозвенный радиолокационный барьер (<https://topwar.ru>).
6. The National Interest: бистатический радар "Струна-1" сможет обнаруживать самолеты-невидимки – <https://discover24.ru>.
7. Титов М.П. Виды обзора бистатических РСА // VI Всероссийские Армандовские чтения: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред / Материалы VII Всероссийской научной конференции. – Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2016. С.443-450.

8. Гуськов Ю.Н., Карпов О.А., Малёв В.И., Титов М.П., Толстов Е.Ф. Формирование радиолокационных изображений в экспериментальном полете и в наземных условиях при бистатическом синтезировании апертуры антенны // Цифровая обработка сигналов в РСА / Под ред. Е.Ф. Толстова. – Смоленск: Изд-во ВА ВПВО РФ, 2005.
9. Walterscheid I., Espeter T., Klare J., Brenner A. Bistatic Spaceborne-Airborne Forward-Looking SAR // Proc. of 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar Conference EUSAR 2010 (Aachen, Germany, June 2010). Pp.986-989.
10. Nicholas J. Willis. Bistatic Radar. – SciTech Publishing Inc. 2005.
11. Wendler M., et al. Results of a Bistatic Airborne SAR Experiment // Proc. of IRS 2003, Dresden, Germany.
12. Yates G., et al. Bistatic SAR image formation // Proc. of EUSAR 2004, Ulm, Germany.
13. Krieger G., et al. Impact of Oscillator Noise in Bistatic and Multistatic SAR // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. Vol. 3. No. 3. July 2006. Pp. 424-428.
14. Sanz-Marcos J., et al. SABRINA: a SAR bistatic receiver for interferometric applications // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 4(2): 307-311, April 2007.
15. Wei M., Time and Frequency Synchronisation Aspects for Bistatic SAR Systems // FGAN-FHR/EL, Neuenahrer Stra.е 20, D- 53343 Wachtberg, Germany.
16. Eineder M., TerraSAR-X Ground Segment Basic Specification Document. CAF – Cluster Applied Remote Sensing, TX-GS-DD-3302, 2009.
17. Nies H., et al. SAR Experiments in a Bistatic Hybrid Configuration for Generating PolInSAR Data with TerraSAR-X Illumination // Proc. of 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar Conference EUSAR 2010 (Aachen, Germany, June 2010). Pp.994-997.
18. Sanz-Marcos J., et al. SABRINA: A SAR Bistatic Receiver for Interferometric Applications // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., Vol. 4. No. 2. 2007.
19. Фатеев В.Ф. и др. Экспериментальный бистатический радиолокационный комплекс // Электромагнитные волны и электронные системы. 2012. №5. С.58-61.
20. Горячкин, О.В., Борисенков, А.В., Долгополов, В.Н., Женгуров, Б.Г. Радиолокатор с синтезированной апертурой, паразитирующий на сигналах ТВ вещания // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева. 2014. № 2. С.16-24.
21. Горячкин О.В., Маслов И.В. Построение рельефа местности с помощью радиолокатора с синтезированной апертурой, паразитирующего на сигналах ТВ вещания // Инфокоммуникационные технологии. 2016. Т.14. № 4. С.416-422.
22. Технический отчёт по НИР «Расчетно-теоретические исследования в обеспечение выбора рационального технического облика, сравнительной оценки достижимых целевых характеристик и функциональных возможностей различных вариантов реализации многопозиционной космической системы радиолокационного наблюдения земной поверхности». Шифр СЧ НИР: «Авангард» (ГЕОСАР) – Аэрокон.