

## Особенности применения режима бистатического синтезирования апертуры антенны

А.В. Ефимов, В.Н. Куренков, М.П. Титов

ГУП НППЦ «Спурт», Москва, Зеленоград, 4-й западный проезд, д.8, E-mail: titovmp@mail.ru

*В статье рассмотрены подходы к построению бистатических (многопозиционных) радиолокационных комплексов дистанционного зондирования Земли космического, авиационного и авиационно-космического базирования. Показаны основные преимущества таких систем перед однопозиционными (моностатическими). В статье также приведены основные проблемы создания таких систем и предъявлены требования к системам обеспечения всех видов синхронизации. Приведены результаты экспериментов по бистатическому зондированию Земли как в нашей стране, так и за рубежом и планы по проведению будущих экспериментов. Сделан вывод о том, что современный уровень развития техники позволяет создавать многопозиционные РСА обзора Земли.*

*The main advantages and challenges of the airborne and spaceborne bi-and multistatic SAR systems are presented. The technical requirements for such systems are also discussed. The description of the foreign and Russian already conducted airborne and hybrid and planned spaceborne experiments is done. The RADAR images of those experiments and the designed SAR configurations for planned flights are shown. The conclusion is: current technology is ready for designing and creating bistatic airborne and spaceborne RADARs.*

К настоящему времени всеобщее признание и широкое распространение в авиации и космосе получили РЛС землеобзора с цифровым синтезированием апертуры антенны (ЦРСА). Практически все современные и разрабатываемые бортовые РЛС, как отечественные, так и зарубежные имеют режимы синтезирования апертуры. Это связано с тем, что ЦРСА наряду с общеизвестными качествами РЛС (большая дальность, независимость от погодных условий и т.д.) обладают такими дополнительными уникальными качествами как:

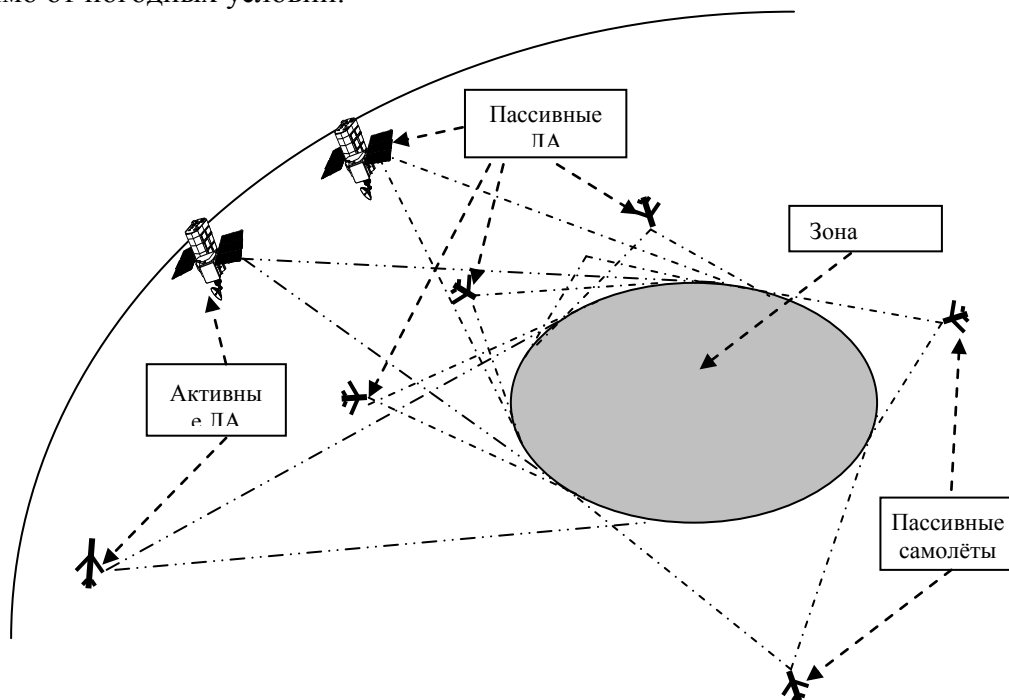
- высокая разрешающая способность (вплоть до долей метра), обеспечивающая получение детальных радиолокационных изображений (РЛИ) местности, сравнимых по качеству с оптическими,
- оперативность формирования РЛИ и отображения его на борту самолета или на наземном пункте (при наличии канала передачи на землю) практически в реальном масштабе времени,
- гибкость цифровой обработки сигналов, которая обеспечивает большое разнообразие и быструю смену режимов работы РЛС,
  - повышенную помехозащищенность,
  - легкость модернизации РЛС за счет смены лишь программного обеспечения и т.д.

Однако, несмотря на перечисленные выше положительные качества ЦРСА, они имеют ряд существенных недостатков, самый основной из которых – невозможность получения РЛИ с высоким разрешением непосредственно по направлению полета. Этому недостатка лишены многопозиционные ЦРСА. Их особенностью 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 летательные аппараты (ЛА) (самолеты и/или космические аппараты), несущие передатчики, и пассивные – несущие приемники. Активные РЛС производят подсвет цели, а пассивные – принимают отраженные сигналы, обрабатывают их в режиме синтезирования апертуры и получают РЛИ, используемые для картографирования и/или других задач. При этом пассивные ЛА

могут лететь под любым ракурсом к цели, в том числе и непосредственно на нее. Синтезирование в этом случае будет осуществляться за счет движения активной РЛС.

В зависимости от типов ЛА многопозиционные системы называют межсамолетными (МС), космическими (КК) или авиационно-космическими (АК). Частным случаем многопозиционной системы является случай, когда ЛА всего два: один активный (подсвечивающий), а другой – пассивный (принимающий). Геометрия такой системы, называемой бистатической (БиРСА), приведена на рис. 2. Угол  $\beta$  называется бистатическим углом. Угол  $\beta_{\Pi}$  – угол между направлением на объект и вектором скорости пассивного самолета 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 приемной стороны;
- повышение вероятности обнаружения объектов, изготовленных по технологии «стелс»;
- возможность измерения высот картографируемых объектов с достаточно высокой точностью, т.е. этот режим (особенно при космическом базировании) может обеспечить построение цифровых карт местности больших территорий в любое время суток независимо от погодных условий.



**Рис. 1. Конфигурация многопозиционной системы**

Перечисленные выше преимущества БиРСА перед моностатическими обусловлены специфической конфигурацией РСА – разнесением в пространстве приемной и передающей систем. Однако разнесение передающей и приемной частей РЛС на разные носители приводит и к новым проблемам, отсутствовавшим в моностатических РЛС – это вопросы синхронизации взаимодействия активной и пассивной сторон. Для нормального функционирования БиРСА требуются обеспечить функционирование

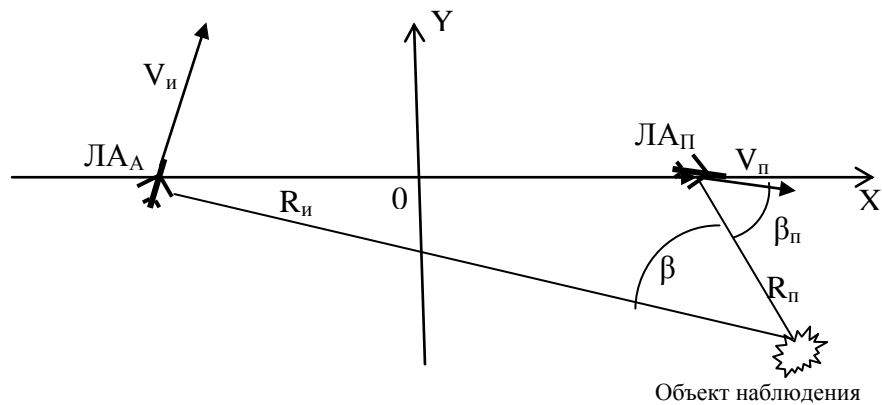
обеих разнесенных составных частей как единого устройства, т.е. обеспечить три вида синхронизации: пространственную, фазовую и временную:

- передающая и приемная диаграммы направленности антенн (ДНА) должны быть направлены на один и тот же район земной поверхности (пространственная синхронизация);

- относительный уход частоты задающих гетеродинов приемной и передающей позиций не должен превышать допустимого значения (фазовая синхронизация);

- на приемной позиции должны быть точно известны моменты времени излучения сигнала на всем интервале накопления (временная синхронизация).

Отметим, что все эти требования равнозначны с точки зрения их необходимости, но существенно различаются по степени возможности их технической реализации.



**Рис. 2. Геометрия БиРСА**

#### *Пространственная синхронизация*

Под пространственной синхронизацией будем понимать отслеживание ДНА приемной позиции положения центральной точки зоны обзора передающей позиции, т.е. на ЛА, работающем в пассивном режиме, должны быть данные о положении зоны обзора, времени ее подсвета и характеристиках зондирующего сигнала (литера, вид зондирующего сигнала, период повторения), излучаемого активным ЛА. Эти вопросы обычно решаются с помощью организационных мероприятий. Для точной настройки положения ДНА приемной позиции, после выхода ЛА в зону видимости района цели, могут быть использованы адаптивные алгоритмы автоматического поиска.

В настоящее время технически наиболее сложными задачами для реализации являются фазовая и временная синхронизации.

#### *Фазовая синхронизация*

Фазовая синхронизация обуславливает требования к когерентности начальной фазы зондирующих импульсов на интервалах времени сопоставимых с длительностью ИС ("кратковременная когерентность").

Требования к «кратковременной когерентности» можно определить, исходя из требований к стабильности фазы примерно (0.1 – 0.01) долей рабочей длины волны [1].

В бистатическом режиме при использовании независимых задающих генераторов (ЗГ) их фазовые флуктуации некоррелированы и определяются:

$$\sigma_{\Psi_{мп}}^2 = \sigma_{\Psi_{оп1}}^2 + \sigma_{\Psi_{оп2}}^2 = 2\sigma_{\Psi}^2,$$

где  $\sigma_{\Psi_{мп}}^2$  – дисперсия фазы, обусловленная некогерентностью генератора в бистатическом режиме;  $\sigma_{\Psi_{оп1(2)}}^2$  – дисперсия фазы, обусловленная некогерентностью

генератора на одной из позиций,  $\sigma_{\Psi}^2$  – дисперсия фазы опорного генератора, при  $\sigma_{\Psi_{оп1}}^2 = \sigma_{\Psi_{оп2}}^2$ .

Считая, что  $\sigma_{\Psi_{мп}}^2$  должна быть не хуже чем в моностатической РСА получим:

$\sigma_{\Psi_{мп}} = \sqrt{2}\sigma_{\Psi}$ , откуда  $\sigma_{\Psi} = \frac{\sigma_{\Psi_{оп}}}{\sqrt{2}}$ , т.е. требования к стабильности фазы в  $\sqrt{2}$  раз

повысились по отношению к моностатической и составляют (2.55 – 25.5) градусов.

При представлении требований к "долговременной когерентности" [2] обычно исходят из допустимого квадратичного набега фазы  $\varphi_{кв}$  (расфокусировки) и линейного ухода частоты, вызывающего смещение РЛИ. Для первого (при  $\varphi_{кв} = \pi/4$ ,  $f_0 = 10$  ГГц,  $T_c = 2$  с)  $\delta_f$  должна быть не хуже  $\approx 5 \cdot 10^{-11}$ , а для второго при аналогичных условиях и 3-х некогерентных накоплениях получим  $\delta_f \leq 8 \cdot 10^{-11}$ , т.е. требования к стабильности фазы, обусловленные наличием неизвестной нескомпенсированной частоты в этом случае ниже требований, обусловленных расфокусировкой РЛИ.

Следует подчеркнуть, что приведенные выше требования сформулированы без учета возможности использования адаптивных алгоритмов автофокусировки при формировании РЛИ. Использование адаптации позволит снизить требования по долговременной стабильности частоты.

С практической точки зрения для организации БиРСА целесообразной представляется система, автономно обеспечивающая высокую стабильность ЗГ. Это может быть достигнуто установкой на элементах БиРСА высокоточных стандартов частоты с последующей периодической коррекцией. Для этого применяют дополнительные часы (например, атомные), служащие для юстировки ЗГ. В тех случаях, когда гетеродины достаточно стабильны и нет необходимости в подстройке фазы опорного сигнала в течение всего времени полета, фаза принимаемого сигнала будет являться только функцией расстояния "передатчик – объект – приемник".

Повышение требований к характеристикам ЗГ является объективной потребностью современных радиолокационных комплексов, обеспечивающих высокие линейные разрешения, в том числе по высоте. Так в [2] предъявляются требования к относительной нестабильности генераторов  $2,5 \cdot 10^{-11}$  при времени накопления 1 секунда,  $f_0 = 10$  ГГц и допустимом фазовом набеге  $90^\circ$ , которые близки к результатам приведенных выше расчетов. Из приведенных в работе условий, очевидно, что полученные цифры относятся к требованиям по кратковременной нестабильности. Там также отмечается, что указанная характеристика легко достигается с помощью применения термостабилизированного кварцевого генератора. Это, по видимому, соответствует действительности, т.к. характеристики ЗГ большинства современных РЛС удовлетворяют требованиям по кратковременной нестабильности. С обеспечением долговременной стабильности дело обстоит сложнее.

*Временная синхронизация (на примере синхронизации периодов зондирования).*

Кроме рассмотренного выше ограничения на допустимые фазовые рассогласования при определении требований к долговременной относительной нестабильности, имеется еще и ограничения со стороны требований к синхронизации временной диаграммы БиРСА. Одной из наиболее сложных представляется синхронизация периодов зондирования активной и пассивной РЛС.

Обычно для формирования единой сетки опорных частот в РЛС используют единый генератор стабильной частоты, на основе которого формируются все

временные интервалы. Отклонения частоты этого генератора приводят к искажению всей временной диаграммы работы РСА. Если в моностатической РСА изменения всех временных соотношений происходят одновременно и для передающей, и для приемной частей РЛС, то в БиРСА, в связи с наличием двух независимых генераторов (для активной и для пассивной частей), временные диаграммы начинают расходиться [2].

Требования к долговременной относительной нестабильности генераторов зависят от требований к допустимому сдвигу строка приемника по полоскам дальности равным половине элемента разрешения  $\delta x$ . Тогда  $\Delta f = \frac{\delta x}{2CT_c}$ , где  $T_c$  – интервал

синтезирования,  $C$  – скорость света. Так, например, для разрешения по дальности и азимуту не хуже 10 м (интервал синтезирования около 1,5 с), долговременная нестабильность должна быть не хуже  $10^{-8}$ . Если это условие не выполняется, то требуется периодически корректировать период повторения.

Таким образом, долговременная нестабильность генератора опорных частот существенно влияет на нормальное функционирование БиРСА, что приводит к необходимости ее тщательного учета.

Интерес к бистатическому синтезированию проявляют многие развитые страны. Свидетельством этому служат многочисленные публикации на эту тему [2, 4-8]. Особое значение при этом приобретают широко проводимые экспериментальные исследования. Далее приведены результаты экспериментальных полетов МС и АК БиРСА, выполненные как за рубежом, так и в России. Так, на рис. 3 приведен пример РЛИ, полученного МС БиРСА в результате экспериментального полета в октябре 2003 г, выполненного на экспериментальных РЛС АЕР-II и Ramir [4]. Для сравнения на рисунке слева показано изображение того же района в оптическом диапазоне. На рис. 4 приведена схема построения эксперимента АК РСА, выполненного в 2007– 2008 гг с помощью космической РСА TerraSAR и авиационной РСА Ramir [4]. На рис. 5 и 6 показаны конфигурация и концепция орбитального построения КА TanDEM-X и TerraSAR-X, планируемых для работы в бистатическом режиме [8].

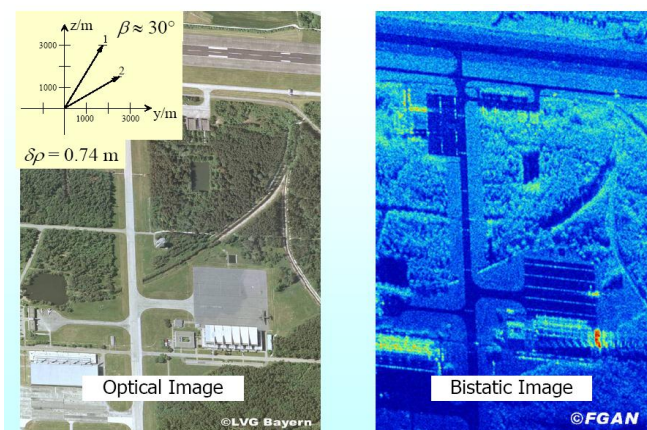


Рис. 3. РЛИ межсамолетного бистатического эксперимента (АЕР-II и Ramir, октябрь 2003 г)



Рис.4. Построение авиационно-космического бистатического эксперимента (TerraSAR и Ramir, 2008 г)





Выполненные в нашей стране и за рубежом исследования подтверждают возможность разработки и создания, многопозиционных РЛС обзора земной поверхности уже на современном уровне развития технических средств.

### Литература

- 1 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.
2. Time and Frequency Synchronisation Aspects for Bistatic SAR. Systems Matthias Wei., FGAN-FHR/EL, Neuenahrer Stra.е 20, D-53343 Wachtberg, Germany.
3. 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.
4. Bistatic exploration using TerraSAR-X and the airborne SSAR sensor PAMIR. J.HG. Ender, A.R.Brenner, J.Klare, I.Walterscheid, M.Wei. Research institute for high frequency physics and radar techniques (FGAN-FHR), Wachtberg-Werthhoven, Germany, 2nd TerraSAR-X Science Team Meeting, Oberpfaffenhofen.
5. Navigation and Control of the TanDEM-X Formation. Oliver Montenbruck, Ralph Kahle, Simone D'Amico, Jean-Sebastien Ardaens, German Space Operations Center, Deutsches Zentrum fur Luft- und Raumfahrt, 82230 We.ling, Germany, Journal of the Astronautical Sciences, Tapley Symposium Special Issue, Version 1.0, 25 Feb. 2008.
6. The TanDEM-X Acquisition Timeline and Mission Plan Hauke Fiedler, Gerhard Krieger, Manfred Zink, Michael Geyer, Jurgen Jager Deutsches Zentrum fur Luft- und Raumfahrt, Germany, EURSAR-2008.
7. The TanDEM-X Mission Concept Manfred Zink, Gerhard Krieger, Hauke Fiedler, Irena Hajnsek, Alberto Moreira Microwaves and Radar Institute, German Aerospace Center (DLR).82234 Oberpfaffenhofen, Germany, EURSAR-2008.
8. The TanDEM-X Mission. Michael Bartusch, Hermann J.Berg, Oliver Siebertz, German Aerospace Center (DLR), Space Agency, Project Directorate Earth Observation, 53227 Bonn-Oberkassel, Germany, EURSAR-2008.
9. Титов М.П. Синхронизация периодов зондирования при регистрации сигналов в бистатических РСА / Под ред. Е.Ф. Толстова. – Смоленск: Изд-во ВА ВПВО ВС РФ, 2005.
10. Анохин И.Г., Живетьев Г.А., Овчинников А.А., Орлов М.С., Титов М.П. Экспериментальная оценка временной и частотной нестабильностей многофункциональной РЛС в режиме бистатического синтезирования апертуры антенны / Под ред. Е.Ф. Толстова. – Смоленск: Изд-во ВА ВПВО ВС РФ, 2005.
11. Антонович О.В., Гуськов Ю.Н., Диордица Н.Ф., Карпов О.А., Малёв В.И., Титов М.П., Толстов Е.Ф., Четверик В.Н., Яковлев А.М. Анализ радиоголограмм, зарегистрированных в полете при бистатическом синтезировании апертуры антенны / Под ред. Е. Ф. Толстова. – Смоленск: Изд-во ВА ВПВО ВС РФ, 2005.
12. 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 / Под ред. Е.Ф. Толстова. – Смоленск: Изд-во ВА ВПВО ВС РФ, 2005.