

Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - «Муром 2020»

## **Двухъярусный бистатический радиолокационный обзор земной поверхности**

М.П. Титов, О.Е. Цветков

АО «Аэрокон», 140187, г. Жуковский, МО, ул. Жуковского, 1.  
E-mail: [TitovMP@mail.ru](mailto:TitovMP@mail.ru)

*Рассмотрены принципы бистатической радиолокации с синтезированием апертуры антенны при расположении носителей в разных эшелонах высоты. Проанализированы основные виды синхронизации активного и пассивного радиолокаторов: пространственная, временная, фазовая и временных диаграмм. Определены требования к каждому виду синхронизации; показано, что кратковременная нестабильность должна составлять не хуже  $2,5 \cdot 10^{-11}$ , а долговременная -  $2 \cdot 10^{-9}$ . приведены радиолокационные изображения, полученные в летном эксперименте двух самолетов, которые при съемке располагались в двух ярусах.*

*The principles of bistatic synthetic aperture radars at the location of carriers in different levels of altitude are considered. The main types of synchronization of active and passive radars are analyzed: spatial, temporal, phase and time diagrams. The requirements for each type of synchronization are defined; it is shown, that short - term instability should be no worse than  $2,5 \cdot 10^{-11}$ , and that long - term instability should be no worse than  $2 \cdot 10^{-9}$ . The radar images obtained in the flight-experiment of two aircraft, which were located in two tiers when Earth surface monitoring, are presented.*

К настоящему времени всеобщее признание и широкое распространение в авиации и космосе получили радиолокационные станции (РЛС) землеобзора с цифровым синтезированием апертуры антенны (ЦРСА) [1, 2]. Практически все современные и разрабатываемые бортовые РЛС (БРЛС), 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 КА 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.

Среди недостатков РСА космического базирования следует отметить большое время между повторными наблюдениями объектов, исчисляемое несколькими сутками, что особенно сильно сказывается при обработке сигналов на основе фазовых методов (фазовое портретирование, съемка рельефа местности и т.п.). Поэтому весьма привлекательным был бы постоянный подсвет заданного участка местности и прием отраженных сигналов. Для этого в средствах связи используют космические аппараты (КА) на геостационарной орбите. Но известно [3], что для таких орбит недоступными являются широты более  $70...75$  градусов. Поэтому для решения задач обзора земной поверхности предлагается использовать КА с РСА на квазигеосинхронных орбитах (ГЕО РСА). По данным [3] запаса топлива на таких КА должно хватать до 10 лет. Но

это вопрос разработчиков КА. Остановимся на требованиях к РСА. Известно [3], что такие орбиты расположены довольно далеко от земной поверхности: порядка 36000 км.

Мощность принимаемого отклика радиосигнала [4] задаётся уравнением:

$$P_r = \frac{P_t G_t A_r \sigma F^4}{(4\pi)^2 R_t^2 R_r^2}.$$

Здесь приняты обозначения:

$P_r$  – мощность сигнала приёмной антенны;  $P_t$  – мощность радиопередатчика;  $G_t$  – коэффициент усиления передающей антенны;  $A_r$  (иногда  $S$ ) – эффективная площадь (апертура) приемной антенны,  $A_r = G_r \lambda^2 / 4\pi$ ;  $G_r$  – коэффициент усиления приемной антенны;  $\lambda$  – длина волны;  $\sigma$  – эффективная площадь рассеяния цели в данном ракурсе;  $F$  – коэффициент потерь при распространении сигнала;  $R_t$  – расстояние от передающей антенны до цели;  $R_r$  – расстояние от цели до приёмной антенны.

Решив его относительно мощности передатчика, получим

$$P_t = \frac{(4\pi)^2 R_t^2 R_r^2}{P_r G_t A_r \sigma F^4} \quad (1)$$

Для моностатических РСА или бистатических РСА (БиРСА), расположенных примерно на одной высоте,  $R_t = R_r = R$ , тогда получаем известное уравнение

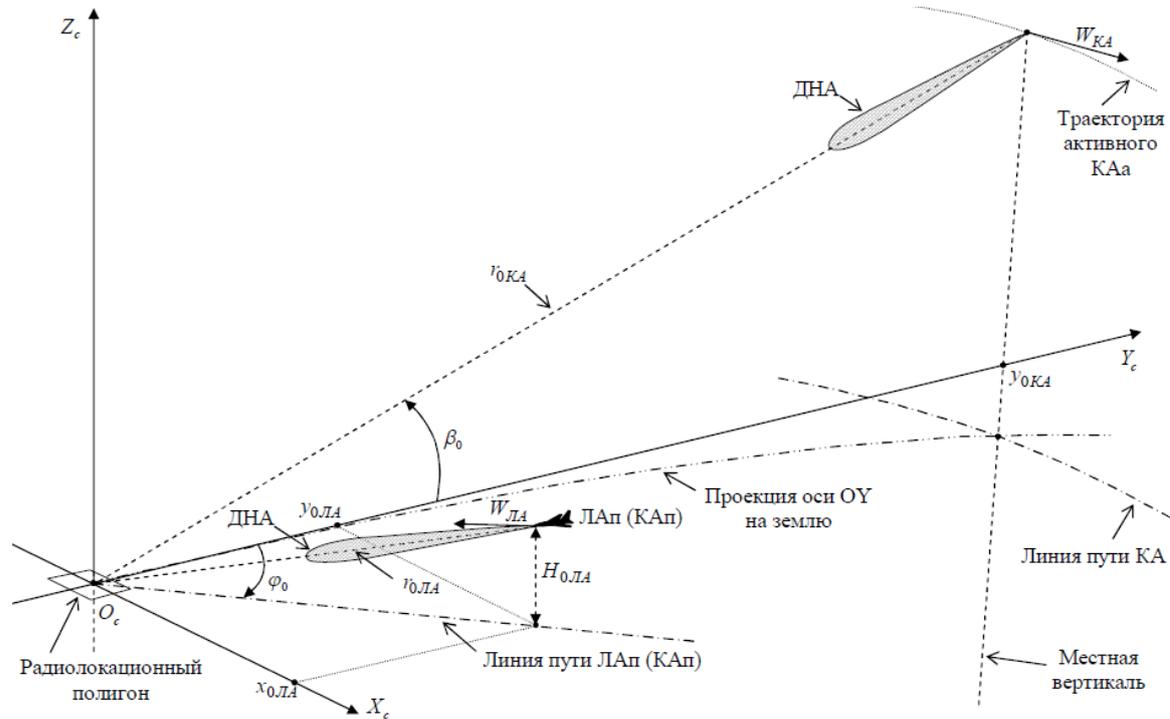
$$P_t = \frac{(4\pi)^2 R^4}{P_r G_t A_r \sigma F^4} \quad (2)$$

Для такого случая мощность передатчика пропорциональна четвертой степени от дальности, что потребует мощных источников питания и принятия серьезных мер для охлаждения. Это особенно актуально, исходя из того, что режим «подсвета» должен быть непрерывным. Для облегчения указанных проблем предлагается использовать бистатическое размещение РСА, причем приемную часть размещать на низколетах: КА на низких орбитах, самолетах (в том числе и рейсовых), беспилотных аппаратах и т.п. летательных аппаратах (ЛА) (рис. 1). В этом случае  $R_t \gg R_r$  и требуемая мощность передатчика в соответствии с (1) при прочих равных условиях может быть многократно снижена.

Известные преимущества БиРСА перед моностатическими обусловлены специфической конфигурацией РСА – разнесением в пространстве приемной и передающей систем. При этом, если приемная (пассивная) часть РСА располагается не рядом с передающей (что имеет место в моностатических РСА) [5– 8].

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. В однопозиционных БРЛС все составные части располагаются вместе, синхронизируются от одного опорного генератора и управляются одной бортовой ЦВМ по единой циклограмме. Для нормального функционирования БиРСА так же требуются обеспечить функционирование обеих разнесенных составных частей как единого устройства, т.е. обеспечить четыре вида синхронизации: пространственную, фазовую, временную и временных диаграмм:

- передающая и приемная диаграммы направленности антенн (ДНА) должны быть направлены на объект (пространственная синхронизация);
- передающая и приемная позиции должны осуществлять работу одновременно (временная 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 (синхронизация временных диаграмм).



**Рис. 1. Геометрические соотношения в двухъярусной БиРСА:  
КАа – активная часть, ЛАп (КАп) - пассивная часть Би РСА**

Отметим, что все эти требования равнозначны с точки зрения их необходимости, но существенно различаются по степени возможности их технической реализации. В настоящее время технически наиболее сложной задачей для реализации БиРСА является синхронизация временных диаграмм.

### **Пространственная синхронизация**

Под пространственной синхронизацией будем понимать отслеживание ДНА приемной позиции положения центральной точки зоны обзора передающей позиции.

Особенностями бистатического режима при космическом варианте функционирования многопозиционной системы следует считать:

1) детерминированный характер траектории полета КА и выбор режимов обзора земной поверхности;

2) жесткое, заранее планируемое функционирование обеих позиций РСА.

Таким образом, на космическом носителе, работающем в пассивном режиме, имеются данные о положении зоны обзора, времени ее подсвета и характеристика зондирующего сигнала активной позиции. Эти вопросы обычно решаются с помощью организационных мероприятий и заранее (за несколько дней) закладываются в БЦВМ РЛС.

### Временная синхронизация

Под временной синхронизацией будем понимать одновременность работы обеих частей БиРСА: и передающей, и приемной. В этом для космических задач нам поможет уже упомянутая выше относительная стабильность орбит космических аппаратов и довольно точное планирование работы БРЛС. Поэтому этот вопрос решается достаточно несложно.

### Фазовая синхронизация

Этот вопрос уже неоднократно рассматривался в различных работах [9]. При обосновании требований к фазовой синхронизации следует предъявить требования к когерентности начальной фазы зондирующих импульсов на интервалах времени сопоставимых с длительностью интервала синтезирования (ИС) ("кратковременная когерентность").

Требования к «кратковременной когерентности» можно определить, исходя из следующих соображений.

В однопозиционной РСА для обеспечения когерентности применяют один и тот же генератор несущей частоты для передачи и для гетеродинирования при приеме. При этом стабильность фазы должна составлять примерно (0,1...0,01) долей рабочей длины волны [9].

В бистатистическом режиме при использовании независимых задающих генераторов их фазовые флуктуации некоррелированы и определяются:

$$\sigma_{\psi_{\text{МП}}}^2 = \sigma_{\psi_{\text{оп1}}}^2 + \sigma_{\psi_{\text{оп2}}}^2 = 2\sigma_{\psi}^2,$$

где  $\sigma_{\psi_{\text{МП}}}^2$  – дисперсия фазы, обусловленная некогерентностью генератора в бистатистическом режиме;  $\sigma_{\psi_{\text{оп1,2}}}^2$  – дисперсия фазы, обусловленная некогерентностью генератора на одной из позиций.

Считая, что  $\sigma_{\psi_{\text{МП}}}^2$  должна быть не хуже, чем в однопозиционных РСА, получим:

$$\sigma_{\psi_{\text{МП}}} = \sqrt{2}\sigma_{\psi},$$

откуда  $\sigma_{\psi} = \frac{\sigma_{\psi_{\text{МП}}}}{\sqrt{2}}$ , т.е. требования к стабильности фазы в  $\sqrt{2}$  раз повысились и составляют 2,55...25,5 градусов.

Повышение требований к характеристикам задающих генераторов является объективной потребностью современных радиолокационных комплексов. Поэтому, сформулированные выше требования можно считать оправданными при определении характеристик перспективных РСА. Так в [8] 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 представленных выше расчетов. Из приведенных в работе [8] 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 задающих синхронизаторов большинства современных БРЛС удовлетворяют требованиям по кратковременной нестабильности.

Следует подчеркнуть, что приведенные выше требования сформулированы без учета возможности использования адаптивных алгоритмов автофокусировки при формировании РЛИ, учет которой позволит снизить указанные требования.

### Синхронизация временных диаграмм

Как уже отмечалось выше, этот вид синхронизации является наиболее сложным по реализации. В работе [9] подробно изложен вопрос такого вида синхронизации. Приведем лишь результат этого рассмотрения. Для азимутального разрешения 1 м и допустимом сдвиге РЛИ на 10 элементов разрешения будем иметь

$$\Delta f = \frac{10\delta x}{CT_c}, \quad (3)$$

где  $\Delta f$  – относительная нестабильность задающего генератора;  $C$  – скорость света;  $T_c$  – время накопления.

Тогда требования к долговременной относительной нестабильности составят  $2 \cdot 10^{-9}$ , что позволяет синхронизироваться один раз перед интервалом синтезирования.

При использовании двухъярусной БиРСА вопрос синхронизации временных диаграмм решается достаточно несложно. Основная причина необходимости синхронизации временных диаграмм заключается в сдвиге получаемого РЛИ по дальности относительно заданного участка. На рис. 2, 3 приведены РЛИ, полученные в летном эксперименте двух самолётов-истребителей, двигавшихся в разных эшелонах высоты. Синхронизация РСА отсутствовала, причем на одном самолёте (ЛАА) РСА работал в активном режиме, включая штатный моностатический режим. На втором самолёте (ЛАП) РСА работал только на прием. Таким образом, два носителя с аппаратурой РСА образовали двухъярусный бистатический РСА. Отсутствие синхронизации временных диаграмм привело к тому, что полученные РЛИ активной частью БиРСА (рис. 2) и пассивной частью (рис. 3) представляют смежные, но разные участки района съемки. На рис. 4 представлен общий вид района съемки и выделены участки полученных ЛАА и ЛАП изображений.

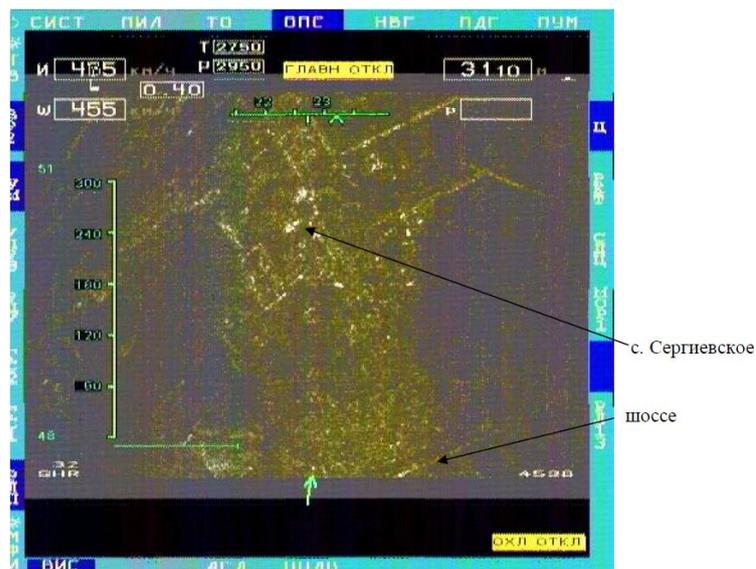


Рис. 2. Радиолокационное изображение, полученное с активной части БиРСА (моностатический режим)



Рис. 3. Радиолокационное изображение, полученное с пассивной части БиРСА

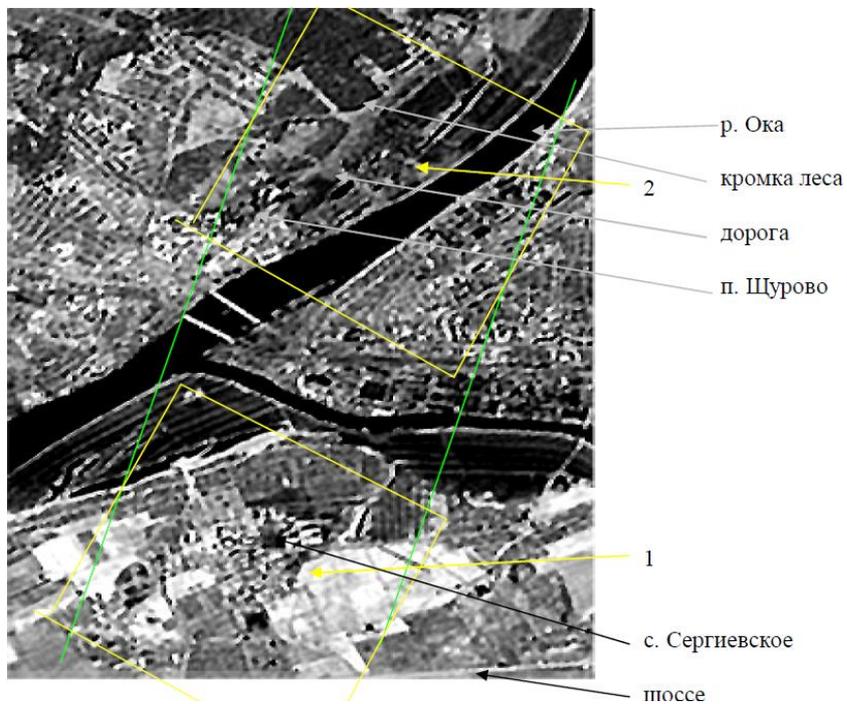
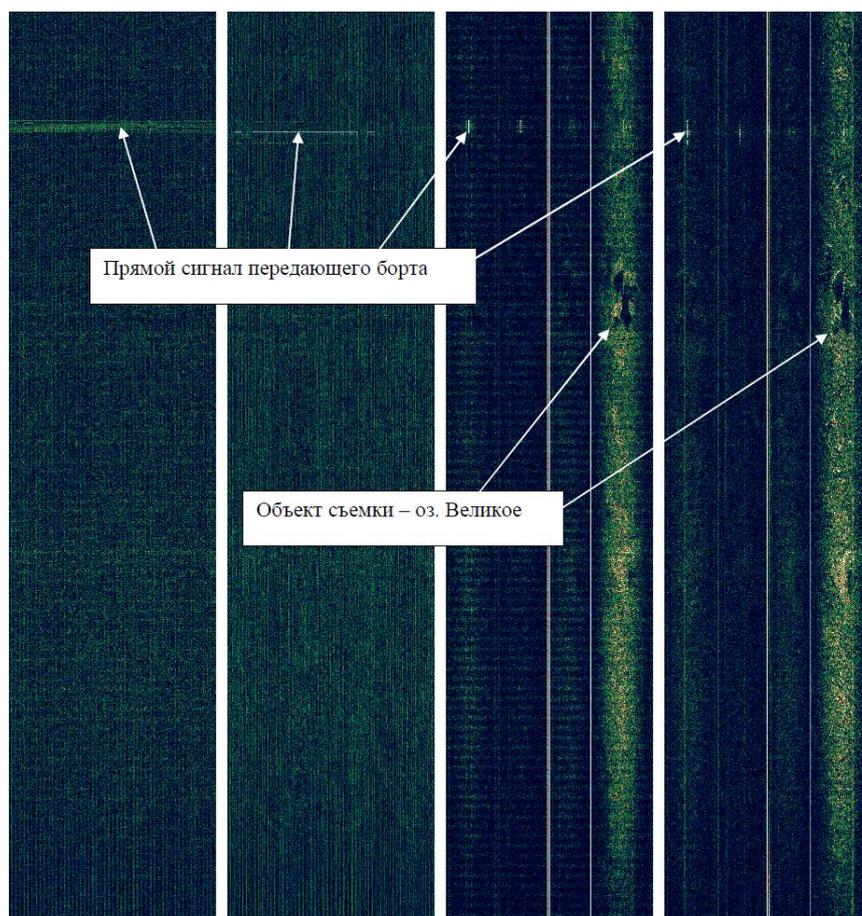


Рис. 4. РЛИ района летного эксперимента

В этом же эксперименте показано, что зондирующие импульсы передатчика ЛАа легко обнаруживались при обработке сигналов в ЛАП (рис. 5).



**Рис. 5. Двумерная развертка траекторного сигнала летного эксперимента**

Двухъярусное расположение передающей (на КАа части БиРСА) и приемной (на КАп части БиРСА) дает возможность приемной части быть в зоне видимости передающей части, что дает возможность принимать зондирующий импульс и синхронизироваться относительно него, т.е. с высокой точностью определять расстояние до объекта съемки и, соответственно, начало строба открытия приемника [10].

### **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. Применительно к ГЕО РСА большой интерес вызывает организация бистатического режима в составе квазигеосинхронного КА и КА на низковысотной орбите.
4. Большую помощь в организации ГЕО Би РСА 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. <https://www.radartutorial.eu/01.basics/rb13.ru.html>
4. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Основное> уравнение радиолокации
5. Черняк В.С., Заславский Л.П., Осипов Л.В. Многопозиционные радиолокационные станции и системы // Зарубежная радиоэлектроника. 1987. № 5. С.9-70.
6. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993.
7. Отчёт по НИР «Кабирия»-02. НПОЛ, 2002.
8. Time and Frequency Synchronisation Aspects for Bistatic SAR
9. Systems Matthias Wei., FGAN-FHR/EL, Neuenahrer Stra.е 20, D-53343 Wachtberg, Germany.
10. Титов М.П. Синхронизация периодов зондирования при регистрации сигналов в бистатических РСА // Цифровая обработка сигналов в РСА. Сб. науч. статей. / Под ред. Е.Ф. Толстова. – Смоленск: Изд-во ВА ВПВО РФ, 2005.
11. 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.