

## Предложения по бистатическому радиолокационному обзору земной поверхности при размещении активной позиции на геостационарной орбите

С.Э. Зайцев<sup>1</sup>, М.П. Титов<sup>2</sup>, Е.Ф. Толстов<sup>2</sup>, О.Е. Цветков<sup>2</sup>

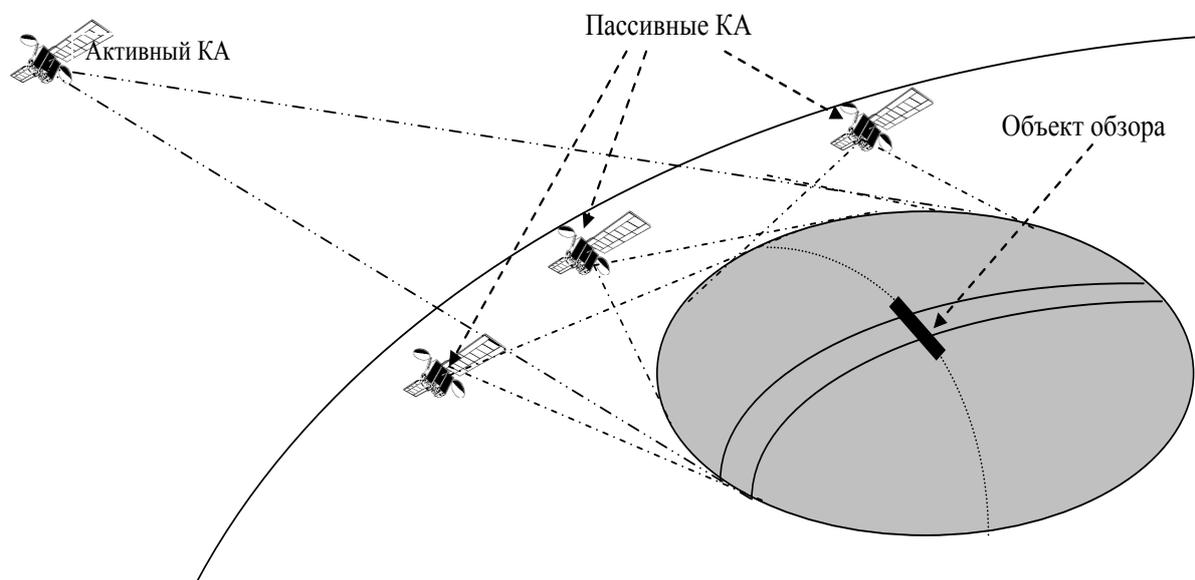
<sup>1</sup>АО «ВПК «НПО машиностроения», 143966, г. Реутов, МО, ул. Гагарина, д.33, e-mail: [zaisergei@mail.ru](mailto:zaisergei@mail.ru)

<sup>2</sup>ЗАО «Аэрокон», 140187, г. Жуковский, МО, ул. Гагарина, 1, e-mail: [titovmp@mail.ru](mailto:titovmp@mail.ru)

*В докладе рассмотрены варианты использования бистатического синтезирования апертуры антенны при геостационарном расположении активной позиции. Предложены варианты взаимной синхронизации радиолокаторов. Сделаны выводы о возможности реализации такого типа синтезирования при современном состоянии технологического уровня.*

*This article examined options for using bistatic antenna aperture synthesis with the geostationary location active position. The options for radar synchronizing are proposed. The conclusions on the feasibility of this type of synthesis with up-to-date technological level are done.*

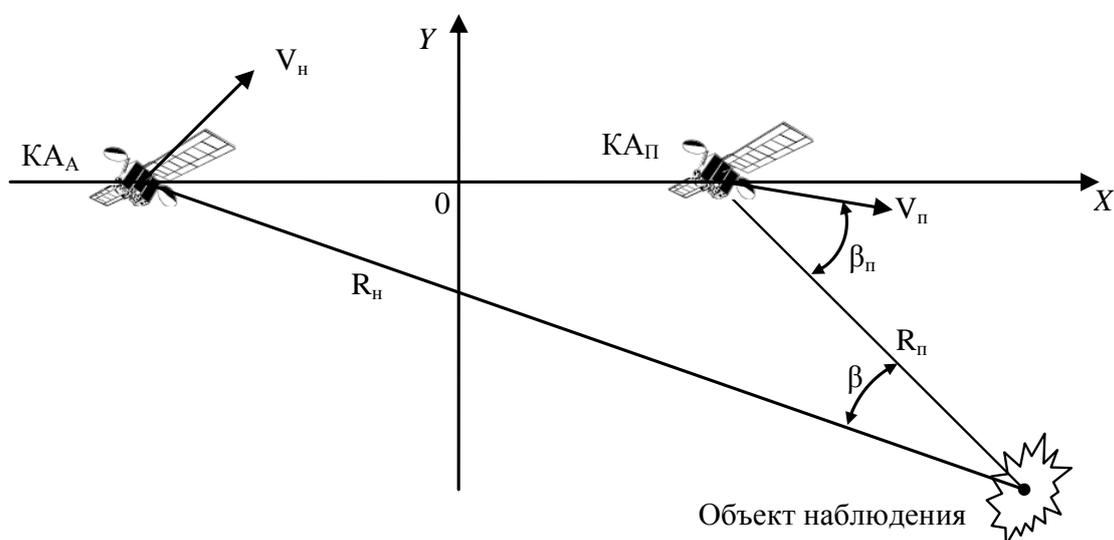
Несмотря на известные [1,2] положительные качества радиолокаторов с цифровым синтезированием апертуры антенны (ЦРСА), эти радиолокаторы имеют ряд недостатков, которых лишены многопозиционные ЦРСА [3,4]. Особенностью многопозиционных РСА является то, что передающая и приемная части (позиции) РСА разнесены в пространстве, т.е. находятся на разных носителях. На рис. 1 приведен пример конфигурации такой системы, в которой имеются так называемый активный космический аппарат (КА), несущий передатчик (ПРД), и пассивные КА, несущие приемники (ПРМ).



**Рис. 1. Конфигурация многопозиционной РЛ системы.**

Активный КА производит 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 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).



**Рис.2. Бистатическая РСА (БиРСА) как частный случай многопозиционной системы.**

Угол  $\beta$  называется бистатическим углом. Угол  $\beta_P$  – 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).

По отношению к межсамолётной БиРСА размещение активной позиции РСА на геостационарной орбите (ГеоРСА) имеет много особенностей. А именно:

- КА летают по заранее известным траекториям;
- положения о скрытности и помехоустойчивости для РСА гражданского применения не являются принципиально важными;
- большое значение имеет минимизация раскорреляции РЛИ на пассивной и активной позициях.

Для использования комплексных РЛИ очень важным фактором становится корреляция полученных РЛИ на борту активного и пассивного КА. Это принципиально важно для получения фазовых портретов обзереваемой местности, поскольку они нужны для получения таких характеристик подстилающей поверхности как оценка относительных высот участка местности, относительных сдвигов участков местности и т.д. Важным фактором при этом становится время получения результата. Для бистатического варианта это практически реальное время.

Ввиду того, что координаты обоих КА (и, следовательно, РСА) заранее известны с определенной точностью, наиболее сложная с точки зрения реализуемости синхронизация периодов зондирования в данном варианте решается достаточно просто. Проблема сводится к формированию в нужный момент времени строба открытия приемника (строба ПРМ) пассивного РСА. Приняв излученный сигнал активного РСА и зная ее координаты, нетрудно засинхронизировать временные диаграммы обеих РСА на время накопления сигнала. Один из примененных на практике вариантов взаимной синхронизации описан в работе [5]. Там был применен взаимный обмен радиосигналами с целью засинхронизировать два задающих генератора. Очевидно, что для проведения этого потребуются введение в бортовой радиолокационной станции (БРЛС) специального режима. Так, например, в работе [5] предлагается использование канала связи для обеспечения временной синхронизации. На обеих платформах устанавливаются передатчики и приемники. Синхронизатор БРЛС на каждом носителе одновременно запускает местный счетчик интервалов времени и передатчик линии связи. Принятый на другой стороне сигнал останавливает там счетчик временных интервалов. Разность временных интервалов

$$T_1 - T_2 \approx 0,5(\Delta T_1 - \Delta T_2),$$

где  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$  – измеренная разность интервалов на активном и пассивном носителях.

Затем производится обмен между обоими РСА полученными величинами для вычисления требуемых корректировок. При этом СКО измерений составляет 0,5 нс. Полученная разность периодов хода часов на обоих носителях компенсируется в бортовых часах точного времени (например, в задающем генераторе) с шагом, не превышающим требования по точности. Так происходит компенсация разности периодов следования импульсов зондирования на обоих бортах. Одновременно с этим производится и измерение дальности между носителями, т.к. в процессе синхронизации в качестве эталонной задержки используется задержка прохождения радиоимпульса между носителями. В заключение, если совместить моменты излучений зондирующего и синхронизирующего импульсов на активной стороне, на приемной стороне с высокой точностью будет не только засинхронизирован ход часов, но и определен момент излучения зондирующего сигнала

$$T_{pac} = T_{a-n} - T_n,$$

где  $T_{pac}$  – интервал рассогласования формирования импульсов зондирования на активной (ИЗа) и пассивной (ИЗп) позициях,

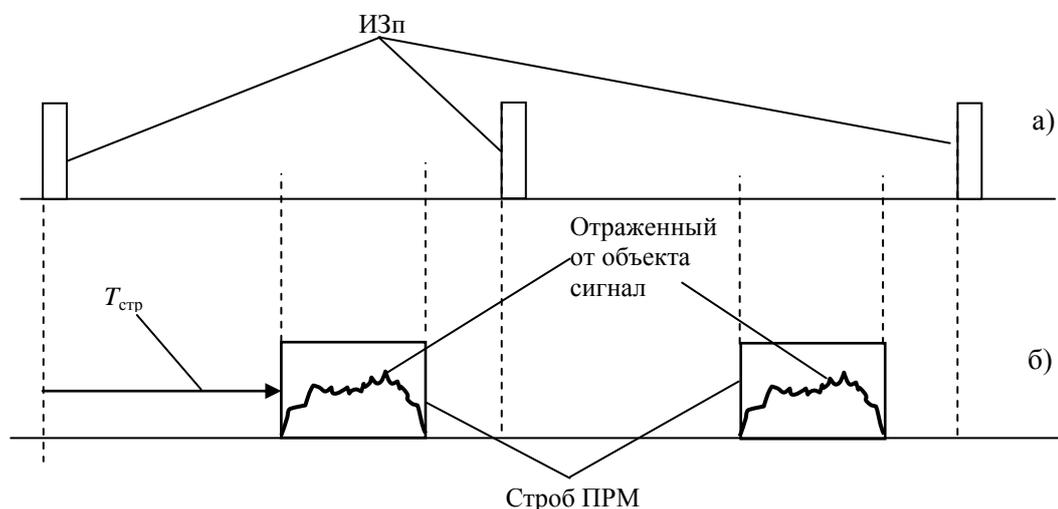
$T_{a-n}$  – измеренный интервал времени в процессе синхронизации, равный  $r_b/C$  ( $r_b$  – путь сигнала синхронизации;

$C$  – скорость света),

$T_n$  – интервал времени между принятым на пассивной стороне сигналом синхронизации и собственным ИЗп.

Для правильного определения момента открытия приемника остается лишь отсчитать интервал времени  $T_{стр}$ , соответствующий времени прохождения радиоволн по пути «ПРД – объект – ПРМ», т.е.  $(R_n + R_n)$  (рис. 2), и пересчитать его относительно «своих» ИЗп (рис. 3). Остается лишь передать на пассивный носитель информацию о дальности ПРД – объект, которая известна с достаточно высокой точностью.

Предложенный выше вариант построения системы временной синхронизации с двусторонним каналом связи обеспечивает решение проблемы временной синхронизации и позволяет при современном состоянии технологии создавать бистатические системы. Периодичность проведения сеансов (режимов) синхронизации зависит от характеристик опорных генераторов и для каждого конкретного случая рассчитывается отдельно.



**Рис. 3. Вариант построения системы временной синхронизации с двусторонним каналом связи.**

Такая система является практически автономной, слабо зависящей от внешних дополнительных датчиков. К недостаткам такого построения можно отнести, прежде всего, необходимость наличия двусторонней связи, т.е. необходимость наличия излучения пассивной стороной. При этом ухудшаются такие качества БиРСА как скрытность и помехозащищенность. Однако для задач мирного времени и/или гражданского назначения это не является существенным, и такой способ может быть широко использован.

Так в космическом комплексе TanDEM и TerraSAR для определения относительного взаимного расположения КА использовался специальный лазерный дальномер. Т.о. вопрос синхронизации временных диаграмм обеих РСА может быть решен в настоящее время без использования экзотических приборов. Частота проведения таких синхронизаций зависит от долговременной относительной нестабильности ЗГ и определяется в зависимости от геометрической разрешающей способности [6].

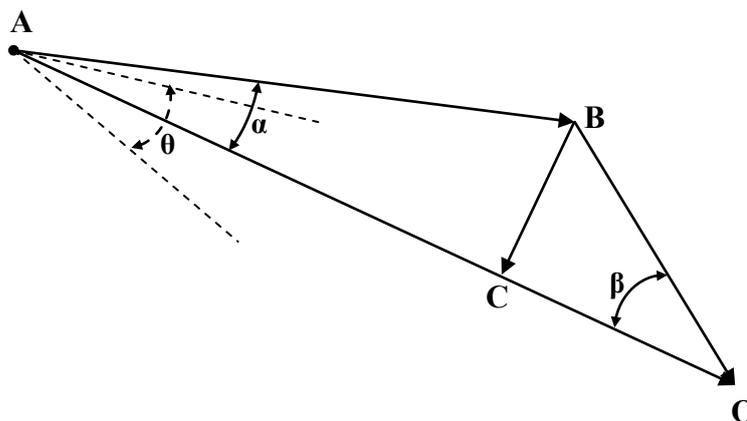
Весьма интересным с точки зрения применения бистатического режима становится использование в качестве носителя пассивной РСА низколетящего КА (или нескольких КА). В таком варианте активная составляющая БиРСА осуществляет лишь «подсвет» земной поверхности, а синтезирование происходит за счет движения пассивной составляющей. Для этого варианта более простым (с точки зрения минимизации аппаратных затрат) вариантом синхронизации без организации линии связи может быть прием и последующая обработка прямого зондирующего импульса от активной БРЛС. Прием может быть осуществлен как излученного по основному, так по боковым лепесткам ДН антенны. На рис. 4 показана геометрия такого варианта. На рисунке точкой А обозначено местоположение активного КА, В – пассивного, а О – объект наблюдения, угол  $\theta$  – показывает ширину ДН, угол  $\beta$  – бистатический угол. Наилучшее функционирование такого варианта возможно при пересечении пассивной РСА прямой, соединяющей РСА активной РЛС с центром Земли. На пассивной стороне фиксируется

момент приема зондирующего импульса, и от этого момента начинается отсчет времени для строга открытия приемника, исходя из дальности ПРМ – объект (рисунок 2), которая на приемной стороне известна. Если КА находятся на одной линии ( $\beta=0$ ), то очевидно, что время формирования строга ПРМ будет рассчитано без погрешностей:

$$AO + BO = (AB + BO) + BO ,$$

т.к. при  $\beta=0$   $AB = AC$  и  $BO = CO$ .

В противном случае возникает ошибка определения времени открытия приемника на величину  $\sigma = (AB + BO) - AO$ , причем чем больше бистатический угол, тем больше величина ошибки открытия приемника.



**Рис. 4. Вариант временной синхронизации по излученному импульсу.**

Такой вариант обладает следующими положительными свойствами по отношению к варианту расположению БиРСА на двух геосинхронных КА:

- от передающей позиции требуется меньшая энергетика зондирующих импульсов ввиду того, что общая дальность распространения радиоволн уменьшается почти вдвое;
- зона обзора такой РЛС может быть глобальной;
- ДН активной РСА должна обеспечивать «подсвет» всей видимой части земного шара (эллипсоида) – около 8 градусов, следовательно размеры антенной системы активной РСА должны быть относительно небольшими;
- достаточно простая синхронизация обеих частей БиРСА.

Предложенный вариант интересен еще и тем, что в качестве пассивных носителей РСА могут использоваться и авиационные средства (как самолеты, так и БПЛА). Пассивные РСА достаточно дешевы и могут выпускаться серийно, поэтому могут найти широкое применение.

#### **Предложения по алгоритмам когерентной обработки сигналов**

В работах [1,2] подробно рассмотрены алгоритмы обработки сигналов в БиРСА. В настоящее время способы формирования РЛИ можно условно разделить на традиционные, основанные на реализации интеграла свертки, и способы обработки, построенные на основе теории фильтрации случайных процессов – адаптивные алгоритмы формирования РЛИ.

Традиционные способы обработки (прямая свертка – ПС, быстрая свертка – БС и гармонический анализ – ГА) предполагают формирование радиолокационного

изображения (РЛИ), посредством процедуры обработки принимаемого сигнала РСА во временной или частотной областях в соответствии со следующим выражением:

$$J_i(\eta) = \left| \dot{J}(\eta) \right| = \left| \int_{-T/2}^{T/2} \dot{\xi}_i(t+\eta) \cdot \dot{h}(t, \vec{\Lambda}^*) dt \right|.$$

Здесь  $J_i(\eta)$  – сигнал соответствующий РЛИ,  $\dot{J}(\eta)$  – комплексный сигнал на выходе линейной части системы обработки;  $\dot{h}(t, \vec{\Lambda}^*)$  – опорная функция, которая представляет собой взвешенную функцию, с точностью до начальной фазы комплексно сопряженную с сигналом, отраженным от одиночной точечной цели;  $\vec{\Lambda}^*$  – вектор оцениваемых (с использованием аппаратных средств или ПО) параметров, которые определяют фазовые характеристики сигнала. Протяженность опорной функции по временной и пространственной координатам соответствует интервалу синтеза апертуры антенны, а действительная и мнимая составляющая представляют комплексную огибающую сигнала.

В общем случае амплитудно-фазовые характеристики принятого сигнала зависят от:

- параметров траектории фазового центра передающей (приемной) антенны (ФЦА);
- характеристики подстилающей поверхности;
- характеристик приемо-передающего тракта и собственно сигнала.

При бистатическом режиме на выбор способа обработки определяющее влияние оказывают параметры траектории передающей и приемной ФЦА. Так для формирования РЛИ на приемной позиции необходимо иметь параметры траектории ФЦА передающей позиции, определяющие изменение спектра отраженного сигнала в пределах одной полосы дальности. При параболической модели траектории носителей такими параметрами являются радиальная скорость и радиальное ускорение ФЦА относительно центра зоны обзора. Это, безусловно, существенно усложняет аппаратную реализацию бистатического режима и влияет на конечную эффективность функционирования системы, т.к. наличие дополнительного канала влияет на показатели надежности комплекса. При использовании традиционных способов обработки этого можно избежать применением адаптивных алгоритмов оценки параметров траектории. Однако предварительный анализ такого варианта показывает, что вычислительные затраты при этом выше, чем это следует из требований по производительности к вычислительной системе при реализации адаптивных алгоритмов формирования РЛИ. Следовательно, при отказе от дополнительного регулярного канала между позициями предпочтение следует отдать именно этому способу формирования РЛИ, т.е. формированию РЛИ с использованием адаптивных алгоритмов.

Приведенные выше варианты работы БиРСА теоретически рассмотрены и могут с той или иной эффективностью (с ограничениями или без таковых) обеспечить функционирование системы. Однако все сказанное нуждается в практической проверке, т.е. в проведении натурного эксперимента с записью голограмм для последующего анализа в наземных условиях. Ввиду отсутствия специального самолета-лаборатории в эксперименте могут принять участие лишь существующие многоцелевые самолеты, например МИГ-29 с экспериментальными РСА «Жук-МЭ» или СУ-30МКИ с РСА "Барс".

Эти БРЛС в большей части соответствуют предъявленным требованиям, но, естественно, не имеют специального канала синхронизации (как впрочем, и любые

другие РСА такого класса). Это вынуждает использовать в эксперименте один из двух (или оба вместе) последних предложенных выше вариантов временной синхронизации и получения РЛИ. Такой эксперимент был проведен в 2004 году на двух серийных самолетах МИГ-29 с серийными БРЛС «Жук-МЭ». На рис. 5 приведены РЛИ, полученные на борту самолетов: а – на активном, б – на пассивном [7]. Эксперимент показал, что все выше изложенные теоретические проработки (включая алгоритмы) справедливы.

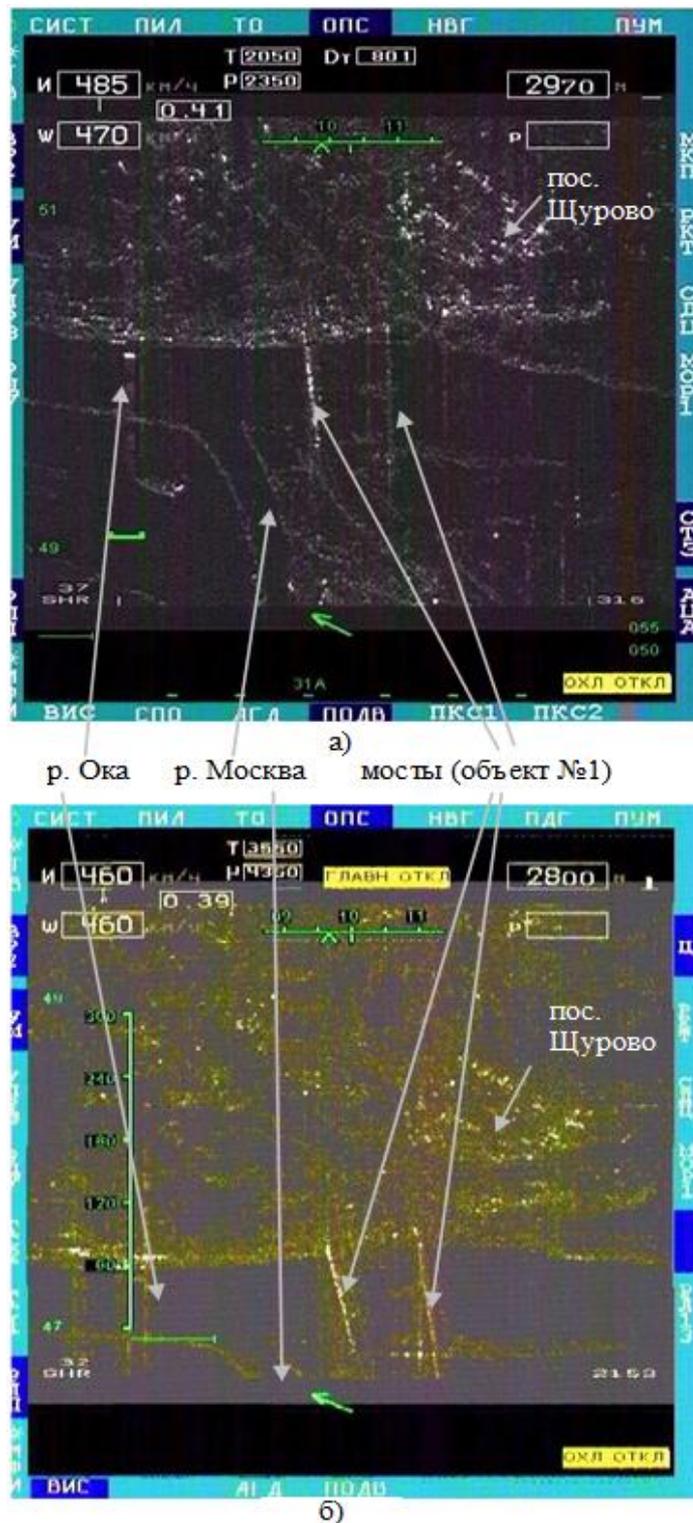


Рис. 5. Вид РЛИ на “активном” (а) и на “пассивном” (б) летательном аппарате.

Таким образом, при современном развитии технологии возможна реализация бистатического режима в современных и перспективных РСА с линейным разрешением порядка 5...10 метров с применением адаптивных алгоритмов обработки сигналов. Необходимо отметить, что особую роль в разработке данного режима должна сыграть экспериментальная проверка теоретических проработок в летном эксперименте.

Все вышеизложенное позволяет сделать следующие выводы:

- современное состояние технологии позволяет реализовать режим бистатического синтезирования апертуры антенны в РСА космического базирования;
- в процессе организации бистатического режима РСА необходимо решить четыре задачи синхронизации обеих частей РСА: пространственную, временную, фазовую и временных диаграмм;
- наибольшую сложность в технической реализации представляет собой синхронизация временных диаграмм;
- применительно к ГеоРСА большой интерес вызывает организация бистатического режима в составе геосинхронного КА и КА на низковысотной орбите;
- 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, №5, 1987.
4. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993.
5. Wei M. Time and Frequency Synchronization Aspects for Bistatic SAR Systems // FGAN-FHR/EL, Neuenahrer Stra.е 20, D- 53343 Wachtberg, Germany.
6. Титов М.П. Синхронизация периодов зондирования при регистрации сигналов в бистатических РСА // Цифровая обработка сигналов в РСА / Под ред. Е.Ф. Толстова. – Смоленск: Изд-во ВА ВПВО РФ, 2005.
7. 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.