

## **Обеспечение синхронизации в бистатических авиационно-космических радиолокационных комплексах землеобзора**

М.П. Титов<sup>1</sup>, Е.Ф. Толстов<sup>1</sup>, В.В. Костров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «Аэрокон», 140187 г. Жуковский, Московская обл., ул. Жуковского, 1.

E-mail: [titovmp@mail.ru](mailto:titovmp@mail.ru)

<sup>2</sup> Муромский институт Владимирского государственного университета, 602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23.

E-mail: [vyk@mit.ru](mailto:vyk@mit.ru)

*Рассмотрены вопросы построения бистатических систем радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), активная часть которых расположена на космических аппаратах, а пассивная – на авиационных носителях. Показана важность всех видов взаимной синхронизации активной и пассивной станций: пространственной, временной, фазовой синхронизаций и синхронизации временных диаграмм. Приводятся синтезированные изображения, полученные в различных летных экспериментах.*

*Ключевые слова: радиолокатор с синтезированием апертуры (РСА), бистатический режим, синхронизация, радиолокационное изображение, сдвиг изображения.*

## **Ensuring synchronization in bistatic aerospace radar complexes of the Earth survey**

M.P. Titov<sup>1</sup>, E.F. Tolstov<sup>2</sup>, V.V. Kostrov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> AEROCON Company, Zhukovsky.

<sup>2</sup> Murom Institute of Vladimir State University, Murom.

*The issues of constructing bistatic systems of synthetic aperture radars (SAR), the active part of which is located on spacecraft, and the passive part is located on aircraft carriers, are considered. The importance of all types of mutual synchronization of active and passive stations is shown: spatial, temporal, phase synchronization and synchronization of time diagrams. Synthesized images obtained in various flight experiments are presented.*

*Keywords: synthetic aperture radar (SAR), bistatic mode, synchronization, radar image, image shift.*

### **Введение**

К настоящему времени всеобщее признание и широкое распространение в авиации и космосе получили радиолокационные станции (РЛС) землеобзора с цифровым синтезированием апертуры антенны (РСА) [1,2]. Практически все современные и разрабатываемые бортовые РЛС, как отечественные, так и зарубежные, имеют режимы синтезирования апертуры. Это связано с тем, что РСА 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 космического аппарата (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.

Для РСА космического базирования существует еще один недостаток: большое время между повторными наблюдениями объектов, исчисляемое несколькими сутками, что особенно важно для получения фазовых портретов. Поэтому весьма привлекательным был бы постоянный подсвет заданного участка местности и прием отраженных сигналов. Для этого в средствах связи используют КА на геостационарной орбите. Но известно [3], что на таких орбитах недоступными для съемки являются широты более 70...75 градусов. Поэтому для решения задач обзора земной поверхности предлагается использовать квазисинхронные орбиты. По данным [3] запаса топлива на таких КА должно хватать до 10 лет. Прием сигналов и формирование радиоголограмм предлагается производить на авиационном носителе.

Целью данного доклада является рассмотрение проблемы синхронизации пассивной и активной части в комбинированной бистатической РСА (БиРСА) космического и авиационного базирования.

### Энергетическая обеспеченность РСА

Остановимся на основных требованиях, которые предъявляются к РСА такого класса. Известно [3], что квазисинхронные орбиты расположены довольно далеко от земной поверхности и имеют высоту порядка 36000 км. Отсюда возникают проблемы энергетической обеспеченности работы РСА.

Действительно, мощность принимаемого отклика радиосигнала [4] задаётся уравнением:

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

где  $P_r$  – мощность сигнала в приёмной антенны;  $P_t$  – мощность радиопередатчика;  $G_t$  – коэффициент усиления передающей антенны;  $A_r$  – эффективная площадь (апертура) приемной антенны,  $A_r = G_r \cdot \lambda^2 / 4\pi$ ,  $G_r$  – 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

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

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

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

Для такого случая мощность передатчика пропорциональна четвертой степени от дальности, что потребует мощных источников питания и принятия серьезных мер для охлаждения элементов КА. Это особенно актуально в связи с тем, что режим «подсвета» должен быть непрерывным. Для облегчения указанных проблем предлагается использовать бистатическое размещение РСА, причем приемную часть размещать на низко летающих объектах: КА на низких орбитах, самолетах (в том числе и рейсовых), беспилотных аппаратах и т.п. (рис.1). Такой подход дает двух ярусное построение комплекса дистанционного зондирования Земли: на верхнем ярусе располагаются активные космические аппараты; на нижнем ярусе – пассивная часть

РСА (приемники). В этом случае требуемая мощность передатчика (при прочих равных условиях) за счет существенного уменьшения  $R_r = r_{0,ЛА}$  может быть в соответствии с (1) многократно снижена.

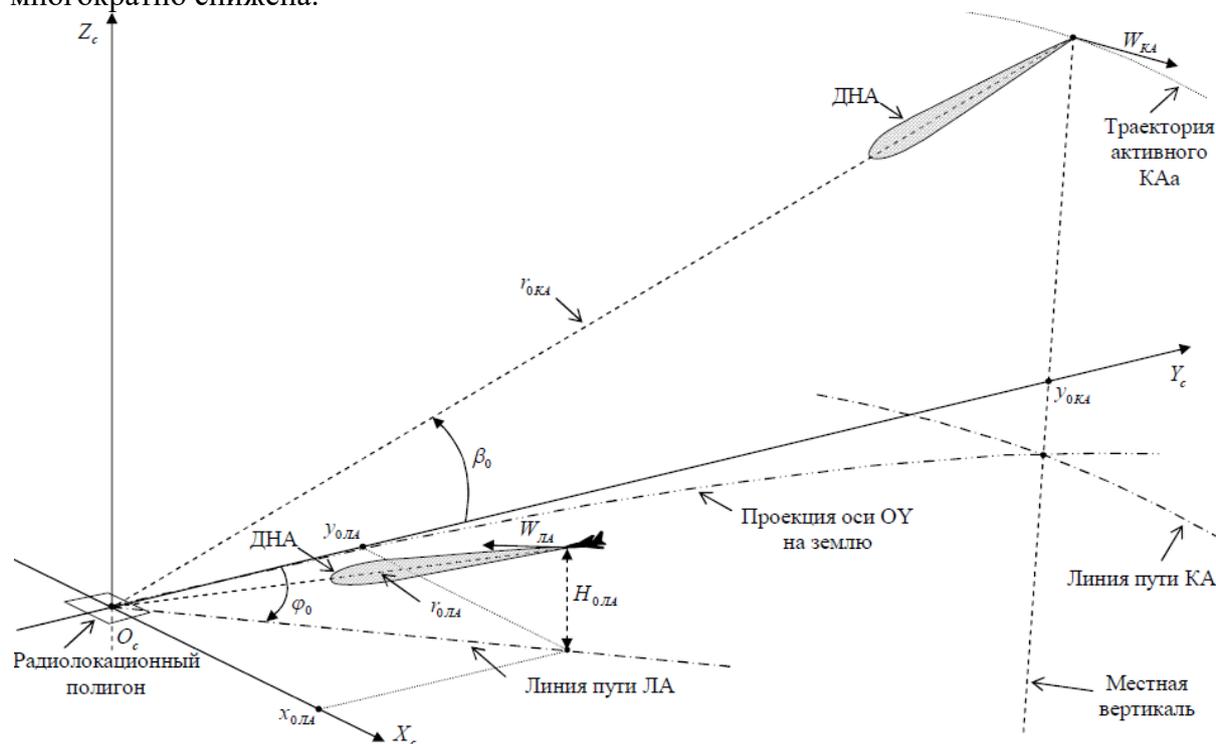


Рис. 1. Геометрические соотношения двух ярусной БиРСА

Таким образом, известные преимущества БиРСА перед моностатическими обусловлены специфической конфигурацией РСА – разнесением в пространстве приемной и передающей систем. При этом приемная (пассивная) часть РСА располагается не рядом с передающей (что имеет место в моностатических РСА), а в другой точке (или в других точках) пространства [5-8].

### Синхронизация в РСА космического и авиационного базирования

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 бортовых РЛС 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).

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. Рассмотрим основные особенности синхронизации и пути ее обеспечения.

#### *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:

- детерминированный характер траектории полета активного КА,
- жестко заданные параметры РСА.

Таким образом, на носителе, работающем в пассивном режиме, имеются данные о положении зоны обзора и характеристиках зондирующего сигнала активной позиции. Эти вопросы обычно решаются с помощью организационных мероприятий.

#### *Временная синхронизация*

Под временной синхронизацией будем понимать одновременность работы обеих частей БиРСА: и передающей и приемной. Этот вопрос решается достаточно несложно, особенно при условии постоянной подсветки активной стороной.

#### *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 долю рабочей длины волны [9].

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

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

где  $\sigma_{\psi_{МП}}^2$  – дисперсия фазы, обусловленная некогерентностью генератора в бистатическом режиме;  $\sigma_{\psi_{оп1, (2)}}^2$  – дисперсия фазы, обусловленная некогерентностью генератора на каждой из позиций.

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

$$\sigma_{\psi_{МП}} = \sqrt{2}\sigma_x,$$

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

Повышение требований к характеристикам ЗГ является объективной потребностью современных радиолокационных комплексов. Поэтому, сформулированные выше требования можно считать оправданными при определении характеристик перспективных РЛПК. Так в [8] предъявляются требования к относительной нестабильности генераторов  $2,5 \cdot 10^{-11}$  при времени накопления 1 секунда, рабочей частоте  $f_0 = 10$  ГГц и допустимом фазовом набеге  $90^\circ$ , которые близки к результатам

приведенных выше расчетов. Из приведенных в работе [8] условий видно, что полученные цифры относятся к требованиям по кратковременной нестабильности. Там также отмечается, что указанная характеристика может быть достигнута с помощью применения термостабилизированного кварцевого генератора. Это, по-видимому, соответствует действительности, т.к. характеристики задающих синхронизаторов большинства современных бортовых РЛС 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*

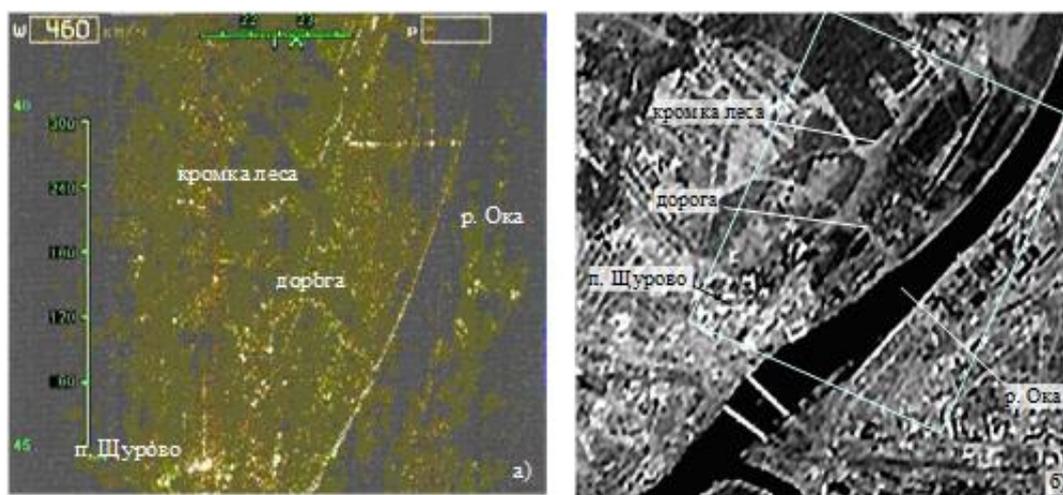
Как уже отмечалось выше, этот вид синхронизации является наиболее сложным по реализации. В работе [9] подробно изложен вопрос такого вида синхронизации. Приведем лишь результат этого рассмотрения. Для азимутального разрешения 1 м и допустимом сдвиге РЛИ на 10 элементов разрешения будем иметь

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

где  $\Delta f$  – относительная нестабильность задающего генератора;  $\delta_x$  – разрешение по азимутальной координате;  $C$  – 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 двухрусной БиРСА вопрос синхронизации временных диаграмм решается достаточно несложно. Основная причина необходимости синхронизации временных диаграмм заключается в сдвиге по дальности относительно заданного участка и других линейных искажениях получаемого РЛИ (рис.2а и 2б). На рис.2а приведено РЛИ, полученное в летном эксперименте двух самолетов-истребителей, синхронизация в которых отсутствовала. В этом же эксперименте было показано, что зондирующие импульсы передатчика легко обнаруживаются (рис. 3).



**Рис.2. Результаты лётного эксперимента: а) бистатического; б) моностатического**

Использование передающей части БиРСА на геостационарном космическом аппарате (КАа) и приемной части на летательных аппаратах (ЛА) дает возможность приемнику РСА быть в зоне видимости передающей части, что обеспечивает прием зондирующего импульса и синхронизацию относительно него, т.е. с высокой

точностью обеспечивается определение расстояния до объекта съемки и, соответственно, временного положения начала строба открытия приемника.

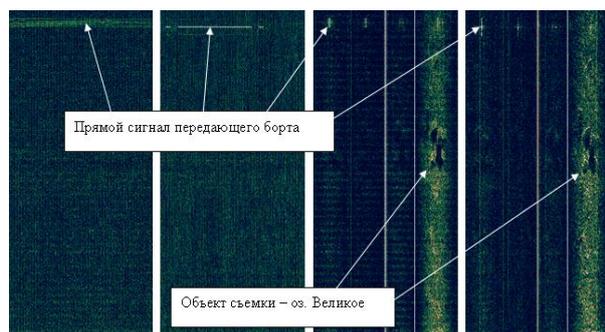


Рис. 3. Фрагменты голограмм пассивного РСА

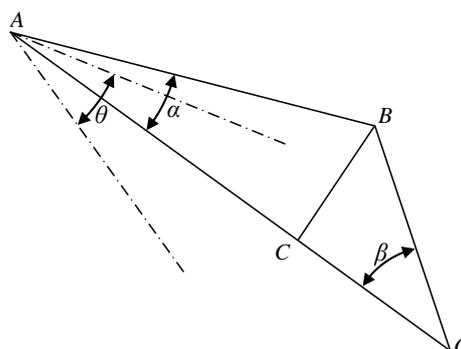


Рис. 4. Вариант временной синхронизации по излученному импульсу

В этом случае весьма интересным является применение бистатического режима, где в качестве носителя пассивной РСА используется один или несколько ЛА. 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 РСА. Прием излученного сигнала может быть осуществлен как по основному, так по боковым лепесткам ДНА. На рис. 4 показана геометрия такого варианта. На рис. 4 точкой  $A$  обозначено местоположение активного КА,  $B$  – пассивного ЛА, а  $O$  – объект наблюдения, угол  $\theta$  показывает ширину ДНА, угол  $\beta$  – бистатический угол.

На пассивной стороне фиксируется момент приема зондирующего импульса, и от этого момента начинается отсчет времени для строба открытия приемника (ПРМ), исходя из дальности  $r_{0,ЛА}$  (ЛА – объект) (рис. 1), которая на приемной стороне известна. Если КА и ЛА находятся на одной линии ( $\alpha = 0$ ), то очевидно, что время формирования строба ПРМ будет рассчитано без погрешностей:

$$AO + BO = (AB + BO) + BO, \text{ т.к. при } \alpha = \beta = 0 \text{ } AB = AC \text{ и } BO = CO.$$

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. При дальности от пассивной РСА до объекта порядка 100 км (типичное расстояние для ЛА) ошибка достигает 140 м. Эта величина легко определяется для каждого конкретного случая и может быть использована для точного определения дальности и коррекции строба приемника. Для дальностей до 40 км (например, при использовании дистанционно пилотируемых ЛА) эта ошибка не превышает 10 м.

Такой вариант обладает следующими положительными свойствами по отношению к варианту моностатической БиРСА:

- от передающей позиции требуется меньшая энергетика зондирующих импульсов ввиду того, что общая дальность распространения радиоволн значительно, уменьшается;
- зона обзора такой РЛС может быть глобальной;
- достаточно простая синхронизация обеих частей БиРСА;
- отсутствует периодичность обзора земной поверхности;

– ДНА активной РСА может обеспечивать «подсвет» всей видимой части земного шара (эллипсоида) – около 8 градусов, следовательно, размеры антенной системы активной РСА могут быть относительно небольшими.

Такой вариант дает возможность применять дешевые пассивные РСА, установленные на любых ЛА (даже на рейсовых самолетах). Пассивные РСА достаточно дешевы и могут выпускаться серийно, поэтому могут найти широкое применение. За рубежом проводили эксперименты по получению РЛИ авиационно-космических БиРСА. Правда, для этого использовались низкоорбитальные КА. На рис. 5 показана схема эксперимента с КА TerraSAR-X и авиационного РСА PAMIR.



**Рис. 5. Схема проведения бистатического эксперимента TerraSAR-X – PAMIR**

На рис. 6 приведено РЛИ, полученное в указанном эксперименте. На рис. 7 для примера показаны РЛИ авиационных РСА, полученные ранее в России.



**Рис. 6. Изображение с бистатического РСА (скользящий прожекторный режим)**



**Рис. 7. РЛИ бистатической РСА авиационного базирования**

## **Заключение**

Современное состояние технологии позволяет реализовать режим бистатического синтезирования апертуры антенны в РСА космического и авиационного базирования. В процессе организации бистатического режима РСА необходимо решить четыре задачи синхронизации обеих частей РСА: пространственную, временную, фазовую и временных диаграмм. Результаты экспериментов с бистатическими РСА показывают хорошее качество синтезируемых радиолокационных изображений.

Применительно к РСА, активная часть которого базируется на КА с геосинхронной орбитой, большой интерес вызывает организация бистатического режима в составе геостационарного КА и ЛА. Охват большой площади и возможность повторения съемки делает данную конфигурацию системы весьма перспективной. Большую помощь в определении технических характеристик и изучении особенностей синтеза радиолокационных изображений в таких геосинхронных 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 и др.; под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радио и связь, 1983. – 272 с.
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. – 304 с.
3. Аболищ А.И. Системы спутниковой связи. Основы структурно-параметрической теории и эффективность. – М.: ИТИС, 2004. – 426 с.
4. Радиолокационные системы: учебн. пособие / Ахияров В.В., Нефедов С.И., Николаев А.И. и др.; под ред. А.И. Николаева. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2018. – 351 с.
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. – 416 с.
7. Отчёт по НИР «Кабирия»-02. НПОЛ, 2002.
8. Wei M. Time and Frequency Synchronisation Aspects for Bistatic SAR Systems // FGAN-FHR/EL, Neuenahrer Stra.е 20, D-53343 Wachtberg, Germany.
9. 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. С.199-206.
10. 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. С.215-221.