

УДК 621.396.962: 528.837

## Временная синхронизация при бистатическом синтезировании апертуры антенны в космических РСА

**Титов Михаил Петрович**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заместитель начальника отдела ЗАО «АЭРОКОН».

E-mail: titovmp@mail.ru.

**Савостьянов Владимир Юрьевич**

кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер ЗАО «АЭРОКОН».

E-mail: v-savostyanov@yandex.ru.

Адрес: 140180, г. Жуковский, Московская область, ул. Жуковского, д.1.

*Аннотация:* В работе рассматривается бистатический режим работы радиолокаторов с синтезированием апертуры (БИ РСА) обзора земной поверхности авиационного и космического базирования, который является частным случаем многопозиционной конфигурации. Показаны основные положительные качества таких радиолокационных станций (РЛС). Основное внимание уделяется вопросам временной синхронизации и синхронизации временных диаграмм. Приведены результаты практической реализации (экспериментов) метода временной синхронизации по зондирующему сигналу для бистатического синтезирования апертуры при обзоре земной поверхности земли с помощью БИ РСА воздушного базирования. Используемые в экспериментах самолётные штатные РЛС служили для отработки предложенной технологии временной синхронизации. Проведён расчёт требований по фазовой стабильности центральных генераторов радиоаппаратуры подвижных объектов, а также периодичности синхронизации для обеспечения высокого разрешения РСА по азимутальной координате. Предложен вариант временной синхронизации в БИ РСА космического базирования, который предлагается использовать для обработки принимаемых радиолокационных космического комплекса «Кондор-ФКА».

*Ключевые слова:* радиолокатор с синтезированием апертуры антенны, бистатический режим, синхронизация, радиолокационное изображение, космический аппарат.

Радиолокационным станциям (РЛС) с синтезированием апертуры антенны (РСА) посвящено много работ [1–7]. В настоящее время такие РЛС применяются во всех комплексах обзора земной поверхности [1–12]. Бистатическое синтезирование (БИ) апертуры антенны имеет довольно много преимуществ перед моностатическим синтезированием [9–12]. Однако такой режим работы РЛС накладывает и определённые сложности в его реализации [9]. Это связано, прежде всего, с тем, что в моностатических РЛС приёмник и передатчик находятся в одном месте, и это обеспечивает возможность функционирования всех частей РЛС от единого синхронизатора. Бистатический режим нашёл применение в наземных РЛС ввиду более простой реализации взаимной синхронизации обеих частей РЛС. Более сложным представляется обеспечение синхронизации при размещении обеих частей РЛС на подвижных платформах. В космических бистатических РЛС приёмник и передатчик располагаются на

различных космических аппаратах (КА). В дальнейшем будем называть КА с передающей частью РСА активным, а с приёмной частью – пассивным. Особый интерес бистатический режим вызывает для когерентных РЛС обзора земной поверхности. Бистатическому режиму посвящено довольно много работ [9–22]. В [14] говорится о необходимости выполнения трёх основных типов синхронизации: пространственной, фазовой и временной. Последний вид можно разделить на два подвида:

1. Обеспечение одновременной работы обеих частей БИ РЛС.

2. Обеспечение единой временной диаграммы РЛС.

В России в 2005 году был проведён лётный эксперимент по бистатическому синтезированию на двух серийных самолётах МИГ-29 со штатными бортовыми РЛС землеобзора Жук-МЭ [9, 13, 22–24]. Наиболее сложной проблемой в практической реализации оказалось

обеспечение единой временной диаграммы РЛС, а именно – синхронизации периодов зондирования. Это связано, прежде всего, с отсутствием на борту самолётов каких-либо специальных аппаратных средств, позволяющих решить эту задачу. Для реализации данного эксперимента изменения были возможны лишь в программном обеспечении РСА. Поэтому был предложен вариант синхронизации пассивной РЛС по излучённому импульсу передатчика активной. Пассивный самолёт должен был лететь сзади активного в пределах визуальной видимости на дистанции 300...500 м, обеспечивающей безопасность полёта. В начале бистатического режима пассивная РЛС принимала излучённые импульсы активной (по заднему лепестку), время задержки которого анализировалось бортовым процессором сигналов пассивной и учитывалось во временной диаграмме РЛС. Так как самолёты летели рядом, дальности до объекта наблюдения практически не отличались, и на бортовом индикаторе пассивной РЛС должно было наблюдаться РЛИ нужного объекта. На рис. 1 приведена схема работы в данном режиме, причём рис. 1а демонстрирует взаимное положение самолётов и объекта в начале эксперимента, а рис. 1б – в конце. Вначале оба самолёта, двигаясь в непосредственной близости друг к другу, включали штатные режимы телескопического обзора и находили на бортовых индикаторах заранее запланированные объекты. Затем по команде включали бистатический режим. В конце экспериментального полёта условия были изменены. Пассивный самолёт делал разворот в сторону цели и производил картографирование

при полете прямо на объект (г. Коломну), а активный – продолжал прямолинейный полет, подсвечивая объект. Очевидно, что описанная выше методика синхронизация временных интервалов в этом варианте прекращала работать, поэтому на пассивной стороне просто поддерживалась последняя временная диаграмма с учётом счисления пути по штатной навигационной системе. Целью этого захода была попытка получить РЛИ при полете прямо на объект.

Эксперимент был достаточно успешным. На рис. 2а и рис. 2б приведены радиолокационные изображения, полученные на бортах активного и пассивного самолетов соответственно. Оба РЛИ получены непосредственно на борту с помощью штатных процессоров сигналов. Одновременно этот эксперимент прояснил то, что наиболее сложным в реализации БИ РСА является именно выполнение единой временной диаграммы обеих частей РЛС. Этой проблеме посвящена работа [21].

Успех выполнения эксперимента даёт основания для оптимизма при реализации бистатического режима в космосе. Так при условии полёта двух КА по одной орбите на относительно небольшом расстоянии друг от друга можно практически в точности повторить условия проведённого эксперимента, изображённого на рис. 1а. Синхронизация обеих РСА в таком случае может производиться по аналогии с таковой в проведённом эксперименте.

Все остальные виды синхронизаций, упомянутые выше, могут быть достаточно несложно выполнены. Так, согласование зоны обзора и времени этого обзора можно произвести организационными методами или непо-

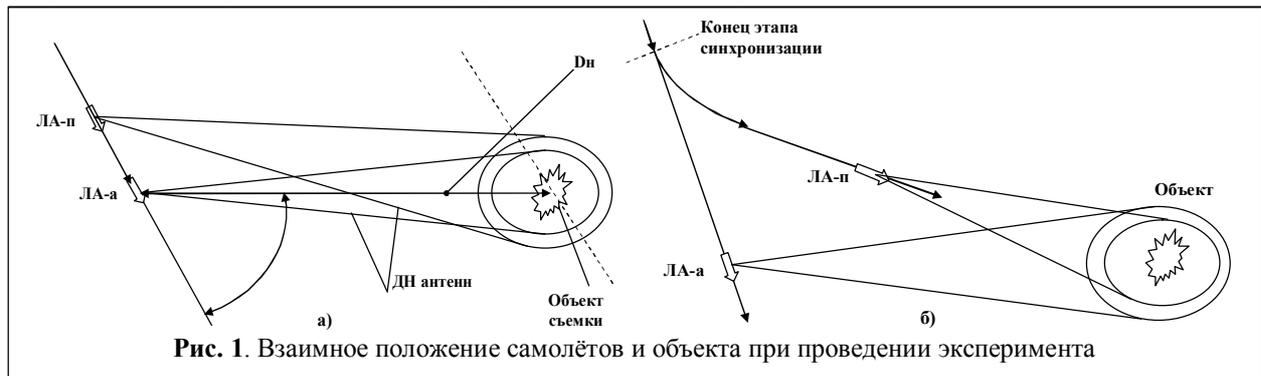


Рис. 1. Взаимное положение самолётов и объекта при проведении эксперимента

средственно по радиосвязи (для пилотируемых КА). Требования к фазовой синхронизации рассмотрены в [22]. Эти требования весьма высоки и составляют  $\sigma_{\psi_{\text{млн}}} = \sqrt{2}\sigma_x$ , откуда

$$\sigma_{\psi} = \frac{\sigma_{\psi_{\text{оп}}}}{\sqrt{2}}, \text{ т.е. требования к стабильности фазы в } \sqrt{2} \text{ раз выше, чем для моностатической РСА и составляют } 2,55 \dots 25,5 \text{ градусов. Но эти требования относятся к кратковременной когерентности, что выполняется для современных РЛС. В работе [6] отмечается, что указанная характеристика легко достигается с помощью применения термостабилизированного кварцевого генератора. Следует подчеркнуть, что приведённые выше требования сформулированы без учёта возможности использования адаптивных алгоритмов автофокусировки при формировании РЛИ. Использование адаптации позволит снизить требования по кратковременной стабильности частоты.}$$

Особое место занимает обеспечение единой временной диаграммы РЛС. Этой проблеме посвящено несколько работ [14–24]. Ниже приведены рассуждения, касающиеся возможности получения РЛИ при смещении его не более, чем на половину элемента разрешения. С этой точки зрения требования к долговременной относительной нестабильности опорных генераторов зависят от требований к линейному разрешению (по дальности) и времени когерентного накопления

$$\Delta f = \frac{\delta}{2CT_c}, \quad (1)$$

где  $\delta$  – требования к линейной разрешающей способности;  $T_c$  – время синтезирования;  $C$  – скорость света.

Наиболее надёжным решением этой проблемы является применение на обоих бортах эталонов точного времени с долговременной относительной нестабильностью  $10^{-12} \dots 10^{-14}$ . Однако создание таких генераторов представляет большую проблему для современного технического уровня. Другим вариантом взаимной синхронизации является синхронизация

по внешнему источнику. Таким источником может быть система единого времени спутниковой навигации. В соответствии с [25] точность такой синхронизации может достигать 150 нс, что составляет 22...23 м по дальности.

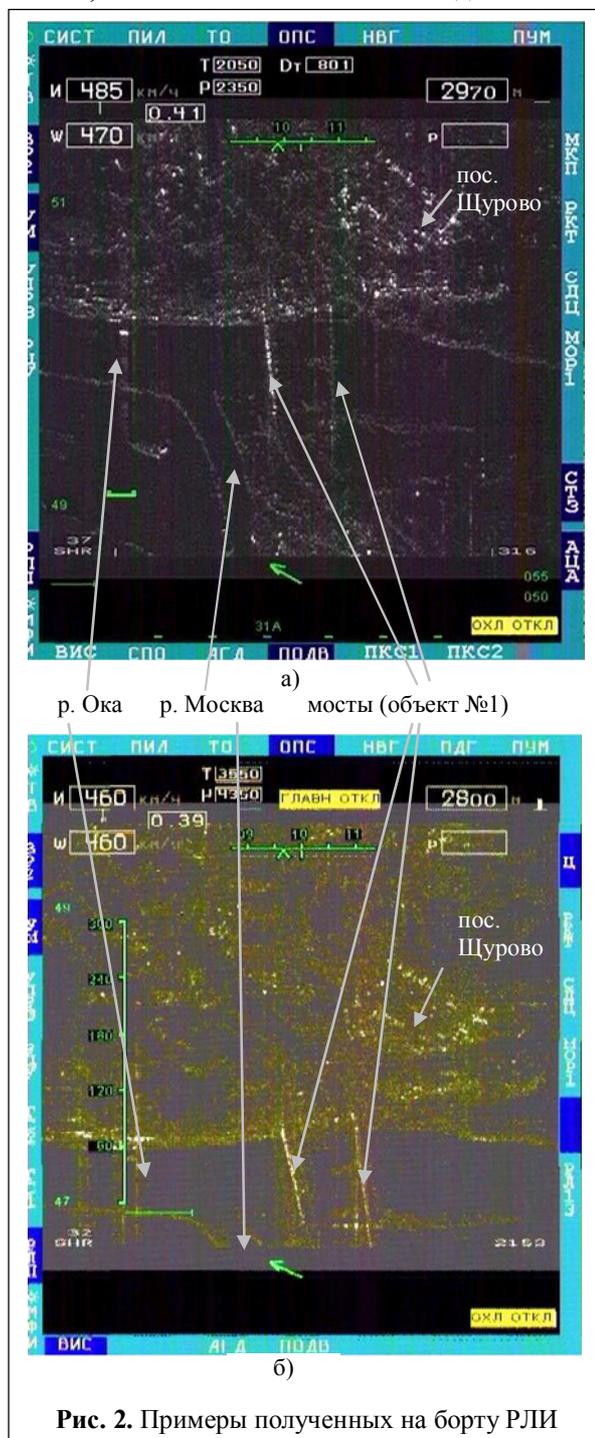


Рис. 2. Примеры полученных на борту РЛИ

При наличии определённых сложностей с использованием высокоточных опорных генераторов можно предложить другой, более про-

стой вариант, который и был использован при проведении вышеописанного лётного эксперимента. Синхронизация временной диаграммы пассивного локатора может выполняться по излучению зондирующего импульса активного КА. В ближайшей перспективе такой метод обеспечения синхронизации может быть успешно использован, например, в космической системе «Кондор ФКА» [26]. По плану предполагается запуск двух КА с одинаковыми РСА на борту [27]. Это даёт принципиальную возможность обеспечения синхронизации обеих РСА по применённому в самолётном эксперименте варианту и, тем самым, обеспечить работу РСА в бистатическом режиме. Обработка принятых с обеих РСА голограмм предполагается на наземном пункте. Похожий метод был успешно применён при построении орбитальной группировки TerraSAR-X и TanDEM-X [28, 29].

Применительно к КА, как носителям РСА, синхронизация такого рода может выполняться исходя из наличия прямой видимости одного КА другим (рис. 3). Вопрос в этом случае лишь в энергетической возможности такой связи. Чисто геометрически обеспечить синхронизацию таким способом возможно от нескольких сотен метров до 5...5,5 тыс. км (рис. 3) для высот орбиты  $H_{КА} = 500...800$  км. Пассивный КА (В) принимает зондирующий импульс по боковому излучению активного КА (А), при этом совсем не обязательна аппаратная синхронизация. Синхронизация может быть обеспечена виртуальным путём, т.е. путём программного учёта расхождений синхронизаторов на обоих КА. В зависимости от требований к точности синхронизации и разрешающей способности БИ РСА необходимая частота проведения сеансов синхронизации может изменяться в широких пределах. В таблице 1 приведена зависимость требуемого периода проведения синхронизации  $T_n$  от величины относительной нестабильности  $\Delta f$  для  $\delta \approx 1$  м.

Таблица 1.

$\Delta f$	$T_n$	Ед. изм.
1,0000E-05	0,0002	сек
1,0000E-06	0,0017	сек
1,0000E-07	0,0167	сек
1,0000E-08	0,167	сек
1,0000E-09	1,67	сек
1,0000E-10	16,67	сек
1,0000E-11	2,78	мин
1,0000E-12	27,78	мин
1,0000E-13	4,63	час
1,0000E-14	46,3	час

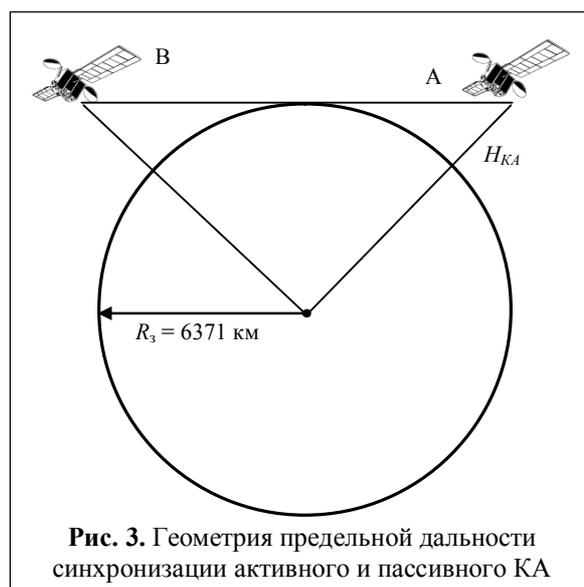
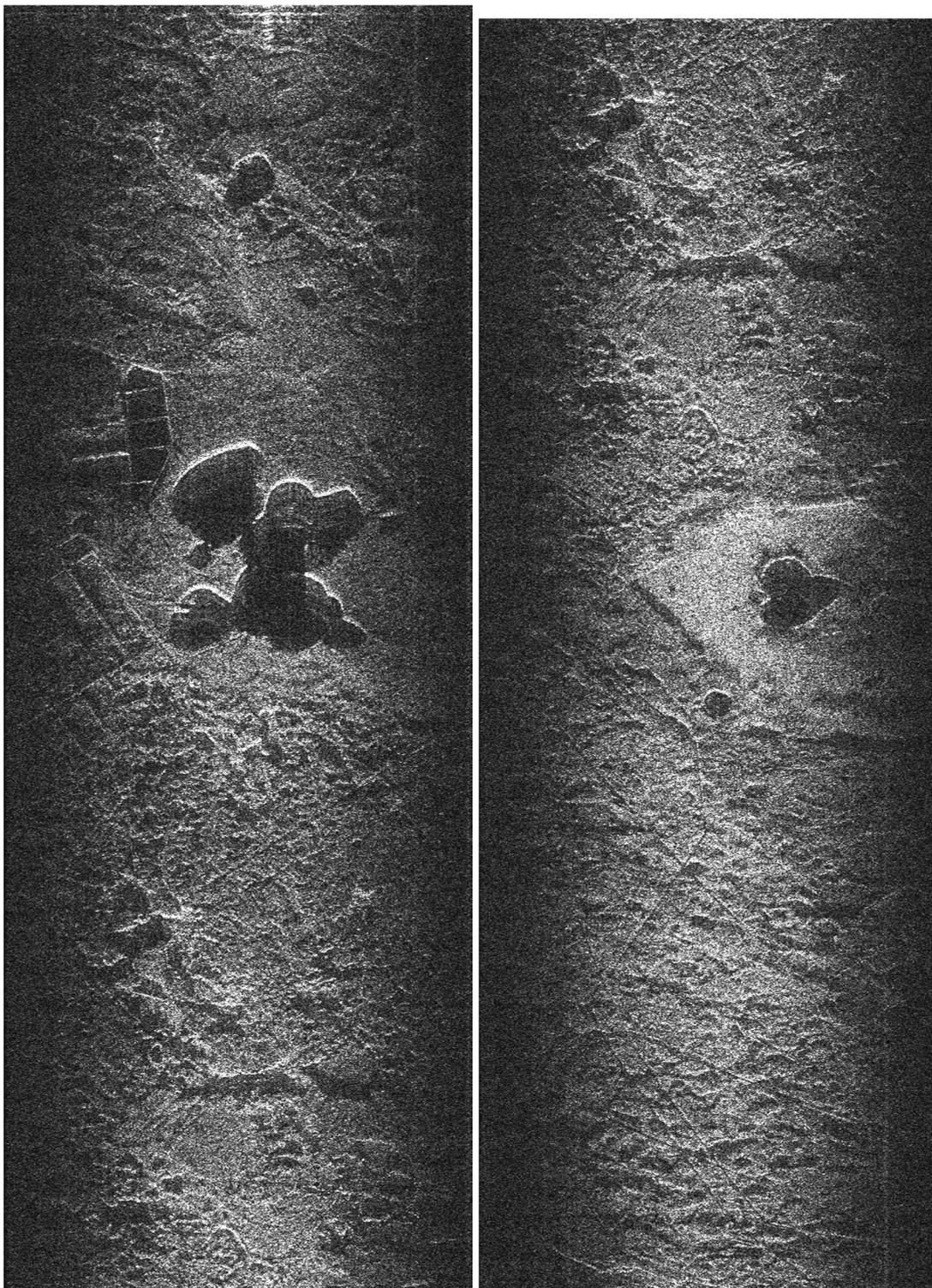


Рис. 3. Геометрия предельной дальности синхронизации активного и пассивного КА

Наиболее подходящим вариантом периодичности проведения синхронизации является её проведение один раз перед интервалом накопления. Имея в виду, что наибольшее время обычно имеем в режиме телескопического обзора ( $\approx 7..15$  с), требование к долговременной нестабильности может быть  $10^{-10}$  для разрешения порядка 1 м на местности. Указанные выше параметры или уже реализованы в РСА КА [8] или могут быть реализованы в ближайшей перспективе.

В упомянутом выше лётном эксперименте задача синхронизации (для получения РЛИ) производилась ещё более простым (с точки зрения упрощения реализации) способом. На пассивной стороне приёмное устройство в режиме БИ РСА не стробировалось, т.е. все время было открыто.



**Рис. 4.** Синтезированное в наземных условиях РЛИ района оз. Великое

Принимаемый сигнал записывался на специальный регистратор, обработка сигнала (радиоголограммы) для получения РЛИ производилась после прилёта на наземном вычислительном комплексе. На рис. 4 приведены РЛИ

района озера Великое, полученное таким способом. Для космической техники этот вариант, по-видимому, весьма затруднителен ввиду очень больших требований к объёму памяти

записывающего устройства. Однако этот вариант весьма эффективен и проверен.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что уже при настоящем уровне развития технологии в России возможно построение бистатической системы, состоящей из двух КА с РСА на борту. Ближайшим вариантом такой системы в России может быть система из двух КА «Кондор ФКА» с проведением минимальных доработок в программном обеспечении.

### 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. – 272 с.
2. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
3. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / Под ред. В.Т. Горяинова. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.
4. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений / Под ред. Л.А. Школьного. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. – 531 с.
5. Боевое применение и эффективность авиационных комплексов / Ярлыков М.С., Богачев А.С., Миронов М.А.; Под ред. М.С. Ярлыкова. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1990.
6. Канащенко А.И., Меркулов В.И., Самарин О.Ф. Облик перспективных бортовых радиолокационных систем. Возможности и ограничения. – М.: ИПРЖР, 2002. – 176 с.
7. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Теоретические основы построения радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2009. – 360 с.
8. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Зайцев С.Э., Карпов О.А., Костров В.В., Неронский Л.Б., Савосин Г.В., Титов М.П., Толстов Е.Ф., Турук В.Э., Цветков О.Е. Итоги и уроки лётных испытаний РСА малого космического аппарата «Кондор-Э» // VI Всероссийские Армандовские чтения: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред: VII Всероссийская научная конференция (31.05–2.06. 2016 г., Муром). – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2016. – С.16-36.
9. Титов М.П. Результаты летного эксперимента по бистатическому синтезированию апертуры антенны // Радиотехника. 2009. №8. С.32-43.
10. Корнеев А.В., Ярушкин М.М. Особенности построения двухпозиционной РСА типа "ИСЗ-ЛА" // НММ по цифровой обработке сигналов. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1995. – С.224-234.
11. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
12. Черняк В.С., Заславский Л.П., Осипов Л.В. Многопозиционные радиолокационные станции и системы // Зарубежная радиоэлектроника. 1987. № 5. С.9-70.
13. 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.
14. 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. – С.199-206.
15. Hsu Y.S., Lorti D.C. Spaceborne bistatic radar – an overview // IEE Proc.-F (Communications, Radar and Signal Processing). 1986. Vol. 133. No.7. Pp. 642-648.
16. Wendler M., et al. Results of a Bistatic Airborne SAR Experiment // Proc. of IRS 2003, Dresden, Germany. Pp.247-253.
17. Willis N.J. Bistatic Radar. – SciTech Publishing Inc., 2005. – 345 p.
18. Yates G., et al. Bistatic SAR image formation // Proc. of EUSAR 2004 Conf., Ulm, Germany. May, 2004. Pp.581-584.
19. Krieger G., et al. Impact of Oscillator Noise in Bistatic and Multistatic SAR // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2006. Vol.3, July. No.3. Pp.424-428.
20. Sanz-Marcos J., Lopez-Dekker P., Mallorqui J.J., Aguasca A., Prats P. SABRINA: a SAR bistatic receiver for interferometric applications // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2007. Vol.4. April, No.2. Pp. 307-311.
21. Weiß M. Time and Frequency Synchronisation Aspects for Bistatic SAR Systems // Proc. of EUSAR 2004 Conf., Ulm, Germany. May, 2004. Pp.395-398.
22. Карпов О.А., Леонов В.М., Титов М.А., Чересов Ю.И. Определение требований к синхронизации работы элементов космической многопозиционной радиолокационной системы с синтезированной апертурой // Космонавтика и ракетостроение. 2013. Вып. 4 (73). С.114-119.
23. 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. – С.206-208.
24. Антонович О.В., Гуськов Ю.Н., Диордица Н.Ф., Карпов О.А., Малёв В.И., Титов М.П., Тол-

стов Е.Ф., Четверик В.Н., Яковлев А.М. Анализ радиолограмм, зарегистрированных в полете при бистатическом синтезировании апертуры антенны / Под ред. Е.Ф.Толстова. – Смоленск: Изд-во ВА ВПВО ВС РФ, 2005. С.209-215.

25. Пушкарев О. Беспроводная система синхронизации времени на основе сигналов навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS // Беспроводные технологии. 2010. Т.19. №2. С.40-43.

26. <http://picxxx.info/pml.php?action=GETCONTENT&md5=b57ff26fbfc57955f7fca2fbfd82ae4d>

27. <http://picxxx.info/pml.php?action=GETCONTENT&md5=1bf70cfa4839866c01cc0205c52c9c6a>

28. Behner F., Reuter S., Nies H., Loffeld O. Synchronization and Preprocessing of Hybrid Bistatic SAR Data in the HITCHHIKER Experiment // Proc. EUROSAR 2014 Conf., Aachen, Germany. 3–5 June 2014. Pp.268-271.

29. Rodriguez-Cassola M., Prats-Iraola P., López-Dekker P., Reigber A., Krieger G., Moreira A. Autonomous time and phase calibration of spaceborne bistatic SAR systems // Proc. EUROSAR 2014 Conf., Aachen, Germany. 3–5 June 2014. Pp.264-267.

Поступила 24 июля 2017 г.

English

### Time synchronization with bistatic synthetic antenna aperture in spaceborne SAR

**Mikhail Petrovich Titov** – Candidate of Technical Sciences, Senior Research Associate, Department Head Deputy, CJSC AEROKON.

*E-mail:* titovmp@mail.ru.

**Vladimir Yuryevich Savostyanov** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Engineer, CJSC AEROKON.

*E-mail:* v-savostyanov@yandex.ru.

*Address:* 140180, Zhukovsky, Moscow Region, Zhukovsky st., 1.

**Abstract:** The work examines the bistatic operation mode of synthetic aperture radars (BI SAR) for the airborne and spaceborne Earth surface viewing which is the particular case of the multiposition configuration. The main pros of such radars (RS) are indicated. The main problems are described which arise during BI SAR operation and synthesizing radar images: space, time and phase synchronization, and also time diagrams synchronization of BI SAR both parts. The article puts the main emphasis on the problems of time synchronization and synchronization of time diagrams. The results are presented in regard to the practical implementation (experiment) of time synchronization procedure according to the sounding signal for bistatic synthetic aperture in case of the Earth surface viewing via the airborne BI SAR. The airborne standard radars used in experiments were applied for elaborating the suggested time synchronization technique. The calculation of phase stability requirements for radio equipment central generators of the mobile units, as well as for the synchronization periodic sequence to ensure SAR high resolution in the azimuth coordinate was performed. The calculations results demonstrate that the short-term instability has a significant effect on the synchronization accuracy and, therefore, on the synthesized radar image quality. It is worth using the dedicated communications system with the view to increasing the efficiency of the Earth remote sensing spaceborne systems for radar surveillance. The time synchronization option in the spaceborne BI SAR is proposed, which is suggested to use for processing the received radio frequency holograms of the spaceborne facility "Condor-FKA".

**Key words:** synthetic aperture radar, bistatic mode, synchronization, radar image, space vehicle.

### References

1. Earth viewing radars. G.S. Kondratenkov, V.A. Potekhin, A.P. Reutov, Yu.A. Feoktistov; Ed. by G.S. Kondratenkov. - M.: Radio i svyaz, 1983. - 272 p.
2. Kondratenkov G.S., Frolov A.Yu. Radio vision. Radar systems for Earth remote sensing. The textbook for higher education institutions. Ed. by G.S. Kondratenkov. - M.: Radiotekhnika, 2005. – 368 p.
3. Digital synthetic aperture radars. Ed. by V.T. Goryainov. - M.: Radio i svyaz, 1988. - 304 p.
4. Air reconnaissance radar systems, radar image interpretation. Ed. by L.A. Shkolny. - M.: VVIA publ.h. named after N.E. Zhukovsky, 2008. - 531 p.
5. Employment and efficiency of the aircraft systems. Yarlykov M.S., Bogachyov A.S., Mironov M.A.; Ed. by M.S. Yarlykov. - M.: Publ.H. VVIA named after N.E. Zhukovsky, 1990.
6. Kanashchenkov A.I., Merkulov V.I., Samarin O.F. The concept of upcoming on-board radar systems. Capabilities and limitations. - M: IPRZHR, 2002. - 176 p.
7. Kondratenkov G.S., Frolov A.Yu. Fundamental theory of radar systems development for the Earth remote sensing. - M.: Publ.H. VVIA named after prof. N.E. Zhukovsky, 2009. - 360 p.

8. Babokin M.I., Yefimov A.V., Zaytsev S.E., Karpov O.A., Kostrov V.V., Neromskiy L.B., Savosin G.V., Titov M.P., Tolstov E.F., Turuk V.E., Tsvetkov O.E. Flight test results and lessons of SAR small-size Condor-E space vehicle. VI All-Russian Armand readings: Radio physical methods in media remote sensing: VII All-Russian scientific conference (31.05-2.06. 2016, Murom). - Murom: Izdatelsko-poligrafichesky tsentr MI VIGU, 2016. – P. 16-36.
9. Titov M.P. Flight test results of bistatic synthetic antenna aperture. Radiotekhnika. 2009. No. 8. P. 32-43.
10. Korneev A.V., Yarushkin M. M. Peculiarities of constructing two-position SAR type "ISZ-LA" RSA. NMM on digital signal processing. - M.: Publ.H. VVIA named after prof. N.E.Zhukovsky, 1995. – P. 224-234.
11. Chernyak V.S. Multiposition radar detection. - M.: Radio I svyaz, 1993. - 416 p.
12. Chernyak V.S., Zaslavsky L.P., Osipov L.V. Multiposition radars and radar systems. Zarubezhnaya radioelektronika. 1987. No. 5. P. 9-70.
13. Guskov Yu.N., Karpov O.A., Malyov V.I., Titov M.P., Tolstov E.F. Bistatic SAR image formation in test flight and on ground. SAR digital signal processing. Ed. by E.F. Tolstov. - Smolensk: Publ.H. VAVPVO AF RF, 2005. P. 215-221.
14. Titov M.P. Synchronization of sensing periods upon signal recording in bistatic SAR. Ed. by E.F.Tolstov. - Smolensk: Publ. H. VAVPVO AF RF, 2005. - P.199-206.
15. Hsu Y.S., Lortz D.C. Spaceborne bistatic radar - an overview. - IEE Proc. - F (Communications, Radar and Signal Processing). 1986. Vol. 133. No. 7. Pp. 642-648.
16. Wendler M., et al. Results of a Bistatic Airborne SAR Experiment. - Proc. of IRS 2003, Dresden, Germany. Pp.247-253.
17. Willis N.J. Bistatic Radar. - SciTech Publishing Inc., 2005. - 345 p.
18. Yates G., et al. Bistatic SAR image formation. - Proc. of EUSAR 2004 Conf., Ulm, Germany. May, 2004. Pp.581-584.
19. Krieger G., et al. Impact of Oscillator Noise in Bistatic and Multistatic SAR. - IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2006. Vol.3, July. No. 3. Pp.424-428.
20. Sanz-Marcos J., Lopez-Dekker P., Mallorqui J.J., Aguiar A., Prats P. SABRINA: SAR bistatic receiver for interferometric applications. -IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2007. Vol.4. April, No. 2. Pp. 307-311.
21. Weiß M. Time and Frequency Synchronisation Aspects for Bistatic SAR Systems. - Proc. of EUSAR 2004 Conf., Ulm, Germany. May, 2004. Pp.395-398.
22. Karpov O.A., Leonov V.M, Titov M.A., Cheresov Yu.I. Definition of requirements to synchronization of components' operation of spaceborne multiposition radar system with synthetic aperture. Kosmonavtika i raketostroyeniye. 2013. Iss. 4 (73). P. 114-119.
23. Anokhin I.G., Zhivetyev G.A., Ovchinnikov A.A., Orlov M.S., Titov M.P. Experimental evaluation of time and frequency instability of multifunction radar in the mode of bistatic synthetic antenna aperture. Ed. by E.F.Tolstova. - Smolensk: Publ.H. VA VPVO AF RF, 2005. P. 206-208.
24. Antonovich O.V., Guskov Yu.N., Diorditsa N.F., Karpov O.A., Malyov V.I., Titov M.P., Tolstov E.F., Chetverik V.N., Yakovlev A.M. The analysis of the radio frequency holograms recorded during the flight with bistatic synthetic antenna. Ed. by E.F. Tolstova. - Smolensk: Publ.H. VA VPVO AF RF, 2005. P. 209-215.
25. Pushkarev O. Time synchronization wireless system using GLONASS and GPS navigational satellite signals. Besprovodnye tekhnologii. 2010. T.19. No. 2. P. 40-43.
26. <<http://picxxx.info/pml.php?action=GETCONTENT&md5=b57ff26fbfc57955f7fca2fbfd82ae4d>>
27. <<http://picxxx.info/pml.php?action=GETCONTENT&md5=1bf70cfa4839866c01cc0205c52c9c6a>>
28. Behner F., Reuter S., Nies H., Loffeld O. Synchronization and Preprocessing of Hybrid Bistatic SAR Data in the HITCHHIKER Experiment. - Proc. EUROSAR 2014 Conf., Aachen, Germany. 3-5 June 2014. Pp.268-271.
29. Rodriguez-Cassola M., Prats-Iraola P., López-Dekker P., Reigber A., Krieger G., Moreira A. Autonomous time and phase calibration of spaceborne bistatic SAR systems. - Proc. EUROSAR 2014 Conf., Aachen, Germany. 3-5 June 2014. Pp.264-267.