

Вопросы стабильности частоты в бистатических авиационных и космических РСА

С.Э. Зайцев¹, М.П. Титов², О.Е. Цветков²

¹АО «ВПК «НПО Машиностроения», 143966, г. Реутов, Московская обл., ул. Гагарина, 33, e-mail: Npoodka@mail.ru

²ЗАО «Аэрокон», 140187, г. Жуковский, Московская обл., ул. Жуковского, 1, e-mail: titovmp@mail.ru

В докладе рассмотрены вопросы организации бистатического синтезирования апертуры антенны в радиолокаторах, установленных на авиационных или космических носителях. Рассмотрены основные преимущества такого режима и сложности в его организации. Основное внимание уделено проблеме синхронизации временных диаграмм. Приведены результаты летного эксперимента, подтверждающие важность решения данной проблемы. Даны рекомендации по частоте проведения данного вида синхронизации для различных режимов работы. Сделан вывод о технологической готовности реализовывать радиолокаторы с бистатическим синтезированием апертуры антенны (БиРСА).

Some questions of bistatic SAR installed on aircraft or spacecraft carriers are discussed. The main advantage of such a regime and complexity in his organization are examined. The focus is on the issue of time diagrams synchronization. The results of the flight experiment are conducted, which confirm the importance of solving the problem. Some recommendations for the delay of this type of synchronization related for different modes of operation are given. Concluded the technological readiness to implement BiSAR.

Несмотря на известные [1,2] положительные качества радиолокаторов с синтезированием апертуры антенны (РСА), они имеют ряд существенных недостатков, самый основной из которых – невозможность получения радиолокационного изображения (РЛИ) с высоким разрешением непосредственно по направлению вектора скорости. Этому недостатка лишены многопозиционные РСА [3,4]. Их особенностью является то, что передающая и приемная части (позиции) РСА разнесены в пространстве, т.е. находятся на разных носителях. На рис.1 приведена конфигурация такой системы, в которой имеются так называемые активные летательные (ЛА) или космические (КА) аппараты, несущие передатчики, и пассивные, несущие приемники.

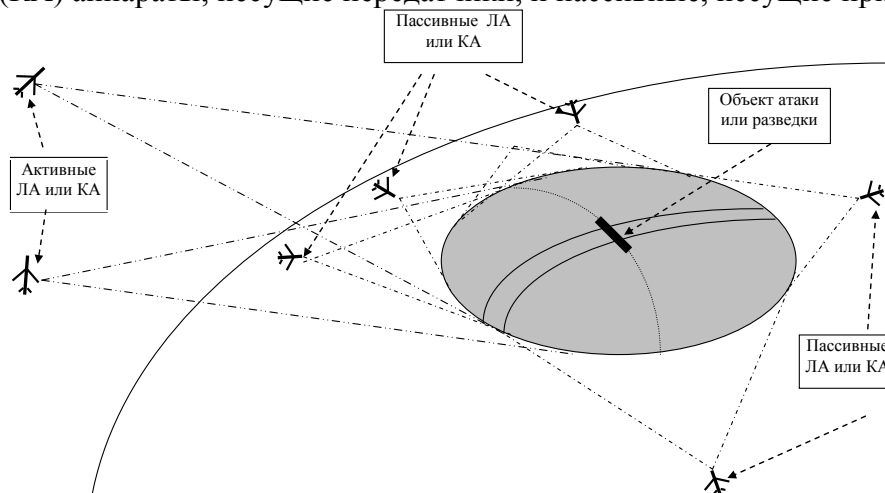


Рис. 1. Конфигурация многопозиционной РЛ системы.

Активные аппараты производят 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 в этом 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. Основные преимущества БиРСА перед моностатическими РСА:

- возможность получения высококачественного РЛИ прямо по направлению полета;
- повышение скрытности работы;
- повышение помехозащищенности, так как обычно помехи ставятся в направлении приема излучения, а в БиРСА прием происходит в другом направлении;
- 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).

Основные проблемы, возникающие при бистатическом синтезировании

Известные преимущества БиРСА перед моностатическими обусловлены специфической конфигурацией РСА – разнесением в пространстве приемной и передающей систем. Однако разнесение передающей и приемной частей РСА на разные носители приводит и к новым проблемам, отсутствовавшим в моностатических РСА – это вопросы синхронизации взаимодействия активной и пассивной сторон. В однопозиционных (ОП) бортовых РСА 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 [5]:

- 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).

Пространственная синхронизация

Под пространственной синхронизацией обычно понимают 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 выбора 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 характеристиках зондирующего сигнала активной позиции. Эти вопросы обычно решаются с помощью организационных мероприятий и заранее (за несколько дней) закладываются в бортовую ЦВМ РСА.

Временная синхронизация

Такой вид синхронизации несложно обеспечивается организационными мероприятиями как для авиационной, так и для космической БиРСА .

Фазовая синхронизация

При обосновании требований к фазовой синхронизации следует исходить из требования к когерентности начальной фазы зондирующих импульсов на интервалах времени сопоставимых с длительностью ИС.

В бистатистическом режиме при использовании независимых задающих генераторов (ЗГ) их фазовые флюктуации не коррелированы. В [5] показано, что для БиРСА

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

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

При допустимом квадратичном фазовом набеге $\varphi_{кв} = \pi/4$, несущей частоте $f_0 = 10$ ГГц и времени синтезирования $T_c = 20$ с, получим, что относительная нестабильность частоты δ_f должна быть не хуже $\approx 10^{-12}$.

Сформулированные выше требования можно считать оправданными при определении характеристик перспективных радиолокационных комплексов. Так в [6] 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° , которые близки к результатам приведенных выше расчетов.

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

Отметим, что все требования по взаимодействию частей РСА равнозначны с точки зрения их необходимости, но существенно различаются по степени возможности их технической реализации. В настоящее время технической наиболее сложной задачей для реализации БиРСА, является синхронизация временных диаграмм. В дальнейшем уделим внимание именно этому виду синхронизации.

Синхронизация временных диаграмм

Стабильность частоты автогенератора является одной из важнейших его характеристик, которая в значительной степени определяет точность работы радиолокационных станций. Нестабильность частоты определяется возможным относительным изменением частоты $\delta_f = \Delta f / f_0$, где f_0 – установленная частота генератора, Δf – ее возможное изменение. В различных случаях требования к стабильности частоты оказываются существенно разными. Так, если в связных радиостанциях допустимой нередко считается нестабильность частоты порядка 10^{-4} ,

то при приеме слабых сигналов с далеких космических кораблей она не должна быть большей $10^{-10} \dots 10^{-11}$ [7].

Вопросом построения высокостабильных опорных генераторов занималось много авторов и научных коллективов [8–10]. Такие генераторы сильно различаются средней частотой, уровнями сигналов и относительной нестабильности частоты, которая может изменяться от 10^{-3} до 10^{-15} [11].

Данный вид синхронизации сводится, прежде всего, к синхронизации периодов зондирования обеих частей БиРСА. Попробуем сформулировать требования к относительной нестабильности задающих генераторов-синхронизаторов активной и пассивной РСА по временной синхронизации, а именно: требования к стабильности периода повторения импульсов зондирования так как именно импульсами запуска передатчика (ИЗ) синхронизируется вся работа РСА, т.е. на основе их формируются все временные интервалы. Отклонения частоты задающего 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 РСА, то в БиРСА в связи с наличием двух независимых генераторов (для активной и для пассивной частей) временные диаграммы начинают расходиться. Это приводит к неопределенности в положении строба открытия приемника на пассивной стороне (т.е. и в определении дальности до объекта обзора).

Долговременная нестабильность вызывает практически постоянную расстройку частот генераторов на интервале накопления сигнала и, следовательно, постоянную рассогласованность длительностей периодов повторения импульсов запуска передатчика и строба приемника.

Рассмотрим временную диаграмму работы БиРСА (рис. 2). На рисунке символами «а» обозначены величины, относящиеся к активной РСА, а символами «п» – к пассивной.

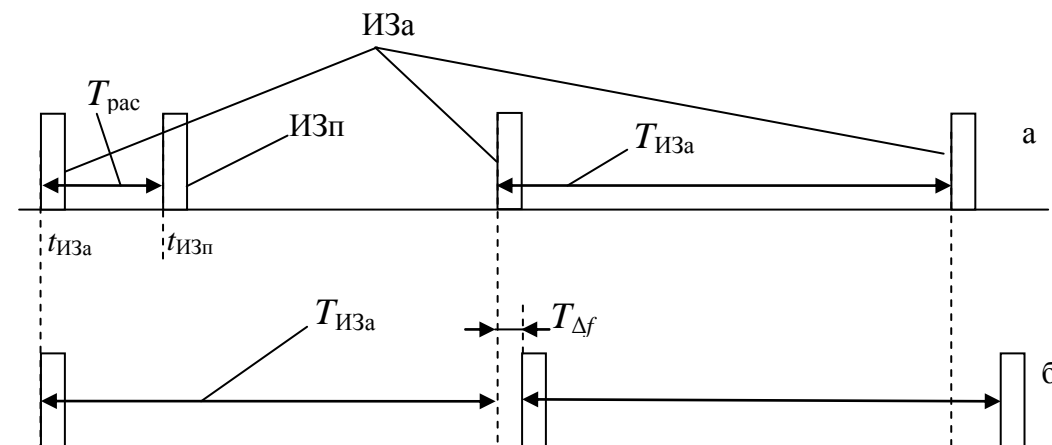


Рис. 2. Временные соотношения ИЗ активной и пассивной частей БиРСА.

Следует подчеркнуть, что на пассивной стороне не излучаются зондирующие импульсы, а ИЗ, используемые для синхронизации открытия приемника РСА, берутся из внутреннего синхронизатора. В традиционных моностатических режимах работы строб открытия приёмника устанавливается с определённой задержкой по отношению к собственному ИЗ передатчика. Если носители летят рядом и ИЗ передатчиков активной и пассивной РСА совпадают, задержка для стробов открытия приёмников близка по положению и длительности, что можно было бы использовать в дальнейшем полёте. Однако в реальных условиях перед началом процесса накопления сигнала мы имеем рассогласование моментов формирования ИЗа (ИЗ активной) и ИЗп (ИЗ пассивной)

$$T_{pac} = t_{ИЗп} - t_{ИЗа},$$

где $t_{ИЗа}$ и $t_{ИЗп}$ – моменты формирования ИЗ активной и пассивной РСА.

Если время рассогласования удастся вычислить на приемной стороне до начала накопления сигнала, то ситуация будет близка к желательной.

От долговременной нестабильности опорных генераторов зависит не только начальное рассогласование ИЗ обоих РСА, но также и рассогласование в длительностях генерируемых временных интервалов (в том числе и $T_{ИЗ}$).

В процессе накопления сигнала из-за наличия разницы в периодах импульсы ИЗп будут смещаться относительно импульсов ИЗа на величину $T_{\Delta f}$ (рис. 2б). Величина смещения практически неизменна на всем интервале накопления, так как причиной ее является долговременная нестабильность генератора. Учитывая, что генераторов два (на активной и на пассивной сторонах), максимально возможный сдвиг ИЗа и ИЗп составит $2T_{\Delta f}$ на каждый импульс при условии их одинаковых характеристик нестабильности. Это приведет к неучтенному сдвигу строка приемника относительно эталонного значения, т.е. строб приемника будет «плыть» в процессе накопления сигнала. Так, для типовых значений долговременной относительной нестабильности генераторов серийных РСА сдвиг может достигать единиц и даже десятков километров за несколько секунд, что приведет к нарушению работоспособности бортовой РСА в бистатическом режиме. В 2005 году в России был проведен экспериментальный полет двух истребителей МИГ-29 с серийными бортовыми радиолокаторами по бистатическому синтезированию [12]. Он показал важность указанной характеристики для БиРСА. На рис. 3 приведены два изображения, полученные одновременно на бортах активного (рис.3а) и пассивного (рис.3б) самолетов. Временные диаграммы обеих РСА не были засинхронизованы. В результате видно, что хотя и получено РЛИ одного и того же участка местности и в одинаковом качестве, но на борту пассивного самолета оно сдвинуто по отношению к РЛИ активного самолета. Тем самым подтверждены выводы о важности данного вопроса.

Требования к долговременной относительной нестабильности генераторов зависят от требований к допустимому сдвигу полосок дальности радиоголограммы на интервале синтезирования. Примем допустимый сдвиг строка приемника по полоскам дальности равным половине элемента разрешения δx . Тогда

$$\delta x / 2 = \Delta f * T_c * C,$$

где T_c – интервал когерентного накопления,

C – скорость света.

Откуда

$$\Delta f = \frac{\delta x}{2CT_c}.$$

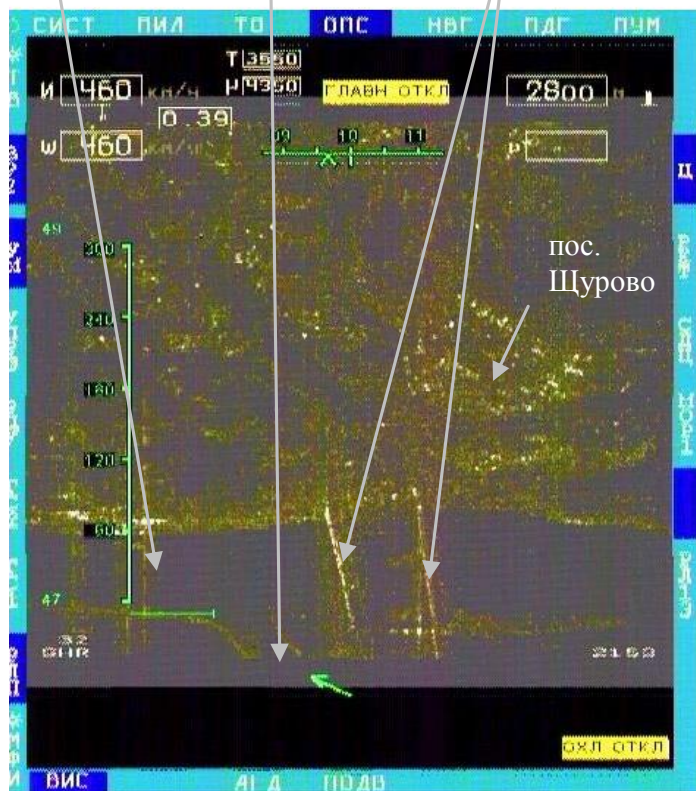
Таким образом, требования к долговременной нестабильности зависят от времени накопления и линейной разрешающей способности.

Частота проведения коррекции зависит от времени взаимной корреляции относительных нестабильностей опорных генераторов и должна рассчитываться для каждого случая отдельно. В таблице приведены соотношения между величиной относительной нестабильности и периодом проведения синхронизации.



а)

р. Ока р. Москва мосты (объект №1)



б)

Рис. 3. Примеры полученных на борту РЛИ.

Таблица. Период проведения синхронизации.

Δf	Т накопления			
	Для ударных ЛА ($\delta x=10\text{м}$)	Для развевательных ЛА ($\delta x=0.2\text{м}$)	Для кадровых режимов КА ($\delta x=0,5\text{м}$)	Для маршрутных режимов КА ($\delta x=15\text{м}$)
1,0000E-04	0,0002 сек	0,000002сек	0,000005 сек	0,00015 сек
1,0000E-05	0,0017 сек	0,00002 сек	0,00005сек	0,0015 сек
1,0000E-06	0,0167 сек	0,0002 сек	0,0005 сек	0,015 сек
1,0000E-07	0,1667 сек	0,002 сек	0,005 сек	0,15 сек
1,0000E-08	1,6667 сек	0,02 сек	0,05 сек	1,5 сек
1,0000E-09	16,6667 сек	0,2сек	0,5 сек	15 сек
1,0000E-10	2,7778 мин	2 сек	5 сек	2,5 мин
1,0000E-11	27,7778 мин	0,334 мин	0,835 мин	25,05 мин
1,0000E-12	4,6296 час	3,334 мин	8,335 мин	4,17 час
1,0000E-13	46,2963 час	33,36 мин	1,39 час	41,7 час

Таблица составлена для ситуации, когда синхронизируется лишь момент взаимного смещения ИЗ и не производится измерение разности периодов этих импульсов на активной и пассивной частях (т.е. не измеряется скорость смещения ИЗ передатчика и строга приемника относительно друг друга). Жирным шрифтом выделены возможные периодичности проведения синхронизаций для разных режимов.

Если задача по синхронизации периода повторения ИЗ сформулирована более жестко – генераторы синхронизируются один раз и далее работают автономно в течение всего полета, то требования к нестабильности соответственно вырастут. В [13] заявлено, что временная синхронизация часов спутников достигает 10 нс (3 м по дальности), что вполне достаточно для организации режима БиРСА.

Таким образом, долговременная нестабильность генератора опорных частот существенно влияет на нормальное функционирование БиРСА и требует ее тщательного учета.

Решение задачи определения момента излучения зондирующего импульса в лоб может быть достигнуто путем использования на обоих бортах высокостабильных генераторов с относительной нестабильностью порядка $10^{-12} \dots 10^{-13}$ (см. таблицу), что обеспечивает требуемую точность синхронизации в течение всего полета современных истребителей (~2 часов) или одного витка низкоорбитальных КА. В таком варианте для ЛА оба РСА (точнее их опорные генераторы) синхронизируются перед вылетом на земле, и в процессе полета дополнительная синхронизация не требуется, а для КА синхронизация проводится один раз за виток. Вариант такой синхронизации с помощью спутниковой навигации был рассмотрен в [14]. Там отмечено, что радионавигационный сигнал, такой как у GPS, естественно создан как временной сигнал, поэтому довольно просто использовать GPS как "атомные часы в небе". При отсутствии SA (Selective Availability), ошибки синхронизации были бы в лучшем случае равна приблизительно 10 наносекунд, а ошибка частоты – почти 10^{-10} . При условии хорошего обзора неба многоканальный GPS-приемник может усреднять ошибки от SA по семи или восьми спутникам, уменьшая эффект SA почти в три раза. При

использовании методики VLBI (Very Long Base line Interferometry), разработанной JPL для базы до 800 км, можно ожидать точность до одной наносекунды [15].

В качестве вывода можно сказать:

1. Задача синхронизации временных диаграмм БиРСА очень важна для ее уверенной работы.

2. Эта проблема может быть решена уже в настоящее время даже в прямой постановке путем установки высокостабильных опорных генераторов.

3. Необходимость периодической синхронизации бортовых генераторов должна определяться для конкретных условий применения и конкретных режимов.

4. Бистатический режим РСА может быть реализован уже в настоящее время.

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. 1987. №5. С.9-70.
4. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993.
5. Титов М.П. Бистатические РСА // Радиолокационное исследование природных сред / Материалы XXIX Всероссийского симпозиума (Санкт-Петербург, апрель 2011).
6. Wei M. Time and Frequency Synchronisation Aspects for Bistatic SAR Systems, FGAN-FHR/EL, Neuenahrer Stra.е 20, D- 53343 Wachtberg, Germany.
7. Андреев В. С. Теория нелинейных электрических цепей: Учебное пособие для вузов. — М.: Радио и связь, 1982. — 280 с.
8. Колпаков Ф.Ф., Борзяк Н.Г., Кортунов В.И. Микроэлектромеханические устройства в радиотехнике и системах телекоммуникаций. – Харків: ХАІ, 2006.
9. Моделювання термокомпенсованого DDS в середовищі Matlab / Підченко С.К., Марков С.В., Лаба О.А., Акулінічев А.А.//Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2010.
10. Symmetricom // Datasheet Quantum SA.45s CSAC Chip Scale Atomic Clock – Режим доступа: <http://www.symmetricom.com/resources/download-library/documents/datasheets/quantum-sa45s-csac>
11. Поликаровских А.И. Современные опорные генераторы для систем синтезочастот и сигналов. –Режим доступа: <http://elar.khnu.km.ua/jspui/bitstream/123456789/1914/1/45773904.pdf>
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 // Цифровая обработка сигналов в РСА / Под ред. Е.Ф. Толстова. – Смоленск: Изд-во ВА ВПВО РФ, 2005.
13. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. – М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2006.
14. Евсеев И.А. Временная и частотная синхронизация в двухпозиционных радиолокационных системах с синтезированием апертуры антенны. – Режим доступа: <https://www.khai.edu/csp/nauchportal/Arhiv/REKS/2005/REKS105/pdf/Evseev.pdf>
15. MacDoran P.F. Satellite emission radio interferometric earth surveying // SERIES – GPS geodetic system. – Bull. Géodésique, 1979.