

Вопросы практической реализации бистатических режимов съёмки земной поверхности

С.Б. Алексеев¹, А.В. Ефимов², Т.А. Лепёхина¹, В.И. Николаев¹, М.П. Титов²

¹АО «Концерн «Вега», 121170 Москва Кутузовский проспект, 34, e-mail:tatonika@inbox.ru

²ЗАО «АЭРОКООН», г. Жуковский, ул. Гагарина, 1, e-mail: titovmp@mail.ru

Предложены варианты построения бистатических систем радиолокаторов с синтезированной апертурой. Рассмотрены проблемные вопросы практической реализации бистатических режимов съёмки. Разработана экспериментальная наземная радиолокационная станция для участия в бистатических экспериментах, которая также может быть установлена на самолёт. Предложены методы программной коррекции искажений радиоголограмм, обусловленных отсутствием взаимной синхронизации активной и пассивной станций.

Some options for the design of bistatic synthetic aperture radar systems are discussed. The issues of practical implementation of bistatic regimes are written. The experimental ground radar station is developed, which can participate in a bistatic experiment. It can also be installed on aircraft. The methods of software radiogologram correction arising from lack of mutual synchronization of active and passive stations are offered.

Радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) обладают такими уникальными качествами, как высокая разрешающая способность, оперативность формирования радиолокационного изображения (РЛИ), гибкость цифровой обработки сигналов, которая обеспечивает большое разнообразие и быструю смену режимов работы, повышенная помехозащищенность, легкость модернизации за счет обновления программного обеспечения [1, 2]. Однако эти положительные качества РСА не всегда могут быть использованы в полной мере. Так, в традиционном РСА затруднено формирование РЛИ с высоким разрешением непосредственно по направлению полета, что является важным при посадке в сложных метеоусловиях на неподготовленную полосу, а также для контроля выполнения полученных заданий [3 – 5].

Съёмка в направлении полёта может быть реализована в многопозиционных РСА [6], где передающая (активная) и приемная (пассивная) станции находятся на разных носителях. Любую многопозиционную систему можно представить набором бистатических РЛС. Структура бистатической системы представлена на рис. 1.

В общем случае синтезирование апертуры выполняется за счёт движения обоих носителей. При этом учитывается закон изменения задержки и фазы при распространении радиолокационного сигнала, излучаемого активной станцией, отраженного от снимаемого участка земной поверхности и принимаемого пассивной станцией.

На обеих станциях должна быть система единого времени, к которому привязываются навигационные данные и циклограмма передачи-приёма радиолокационных сигналов.

На приёмной станции, где выполняется синтез изображения:

1) должны быть известны навигационные данные обоих носителей;

2) должно выполняться преобразование координат на местности i -го элемента фоно-целевой обстановки (X_i, Y_i) в системы, связанные с активным носителем (X_{ia}, Y_{ia}) и пассивным (X_{in}, Y_{in}) , и расчёт зависимости длины линии распространения сигнала между фазовыми центрами активной и пассивной антенн при его отражении от i -го элемента от времени $p_i(t) = p_{ai}(t) + p_{ni}(t)$ в соответствии с законом движения носителя.

Качество изображения и сама возможность его синтеза зависит от точности привязки данных к единому времени.

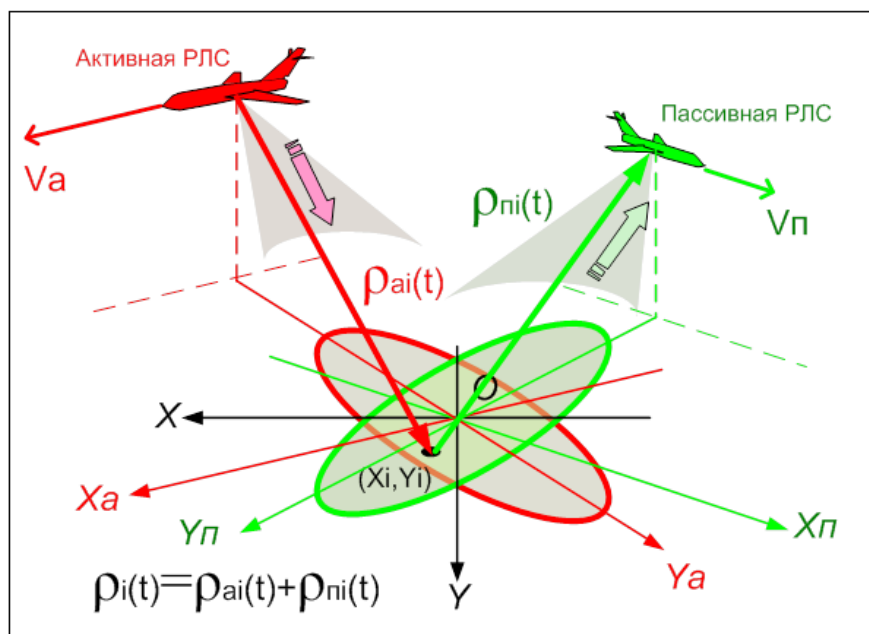


Рис. 1. Структура бистатической системы РСА

Бистатическая конфигурация РСА обеспечивает следующие преимущества перед моностатическими [1, 6]:

1. Возможность получения высококачественного РЛИ прямо по направлению полета.
2. Повышение скрытности работы, а, следовательно, и помехозащищенности.
3. Повышение помехозащищенности приемной станции, так как постановщики активных помех направляют помеховые излучения, как правило, в направлении прихода зондирующих сигналов, т.е. в направлении активного самолета. При достаточно больших углах между пассивным и активным самолетом пассивный самолет принимает помеху по боковым лепесткам, т.е. сильно ослабленной.
4. Повышение вероятности обнаружения объектов, изготовленных по технологии «Стелс», так как эта технология рассчитана на минимизацию переизлучения радиоволн в сторону облучающей станции, и, следовательно, имеет повышенные переотражения в других направлениях, в том числе в направлении пассивной станции.

Ввиду перспективности бистатических РСА, проблеме их исследования посвящено много работ [7–13]. Достоинства бистатических РСА обусловлены специфической пространственной конфигурацией, что, однако, усложняет процесс синтезирования апертуры антенны и обработки полученных радиоголограмм. Для успешного поведения бистатического эксперимента необходимы следующие условия:

1. Пространственная когерентность – одновременность облучения участка местности и приёма сигнала, отражённого этим же участком местности.
2. Временная когерентность – синхронизация передачи и приёма во времени сигнала РСА, в том числе так, чтобы строб приёма с учётом общей временной задержки выделял сигнал, отражённый от надлежащего участка местности.
3. Фазовая когерентность – когерентность сквозного тракта, обеспечивающая возможность обработки радиоголограмм, созданных двумя радиолокаторами.

В данном докладе рассматриваются вопросы, связанные с временной когерентностью, так как остальные проблемы могут быть решены относительно несложно.

Следует отметить, что способы достижения условий обеспечения когерентности зависят от вида обзора и состава аппаратуры. В настоящее время положение дел таково, что ряд вопросов обеспечения когерентности либо не решён, либо решение не вполне надёжно. В связи с вышеизложенным, любой успешный лётный эксперимент по бистатическому синтезированию будет заметным событием в мире радиолокации и принесёт несомненную научную и практическую пользу.

Целью данной работы является рассмотрение вариантов построения и проблемных вопросов практической реализации бистатических режимов, а также преимуществ применения этих режимов для широкого круга задач.

В России и за рубежом проведен ряд экспериментальных исследований [6, 7, 14], убедительно подтверждающих возможность реализации бистатических режимов РСА для различных конфигураций геометрического расположения приемной и передающей систем. Первый успешный эксперимент по бистатическому синтезированию с применением серийных самолетных РСА был осуществлен российскими специалистами в 2005 году. Необходимая доработка БРЛС была осуществлена почти полностью за счет коррекции программного обеспечения с минимальными временными и финансовыми затратами.

Бистатическая радиолокационная съемка земной поверхности может осуществляться с участием РСА авиационного, космического и наземного базирования. Перспективным направлением являются режимы с участием космического РСА в качестве активной станции, при этом в качестве пассивной составляющей могут использоваться РСА, расположенные на самолетах, беспилотных летательных аппаратах, дирижаблях, а также наземные станции.

Для практической отработки бистатических режимов съёмки была выбрана конфигурация с участием РСА космического аппарата (КА) «Кондор-Э» и наземной станции. Так как космический РСА к тому времени мог работать только в качестве пассивной составляющей, рассчитывался вариант, в котором в качестве активной выступает наземная станция, структурная схема которой представлена на рис. 2.

Наземная станция содержит устройство имитации и регистрации сигналов (УИРС), комплект рупорных антенн и внешнюю радиочастотную аппаратуру (усилитель мощности и малошумящий усилитель). УИРС выполняет функции генерации зондирующего сигнала и пилот-сигнала, а также приема и обработки отраженного сигнала от облучаемого участка местности. В состав приемной части УИРС входят понижающий конвертор, демодулятор и аналого-цифровой преобразователь, а в состав передающей части – цифро-аналоговый преобразователь, модулятор и повышающий конвертор. Зондирующий сигнал излучается в направлении спутника (пилот-сигнал) через направленный ответвитель -20дБ и рупорную антенну с широкой диаграммой направленности $\pm 35^\circ$, а в направлении облучаемого участка местности – через усилитель мощности 16 Вт и рупорную антенну П6-32. Приемо-передающая аппаратура активной станции и две антенны, направленные на облучаемый участок местности, размещаются в помещении здания, а рупорная антенна, предназначенная для излучения сигналов на спутник, – на крыше. Структурная схема бистатического эксперимента для работы с космическим РСА «Кондор-Э» представлена на рис. 3.

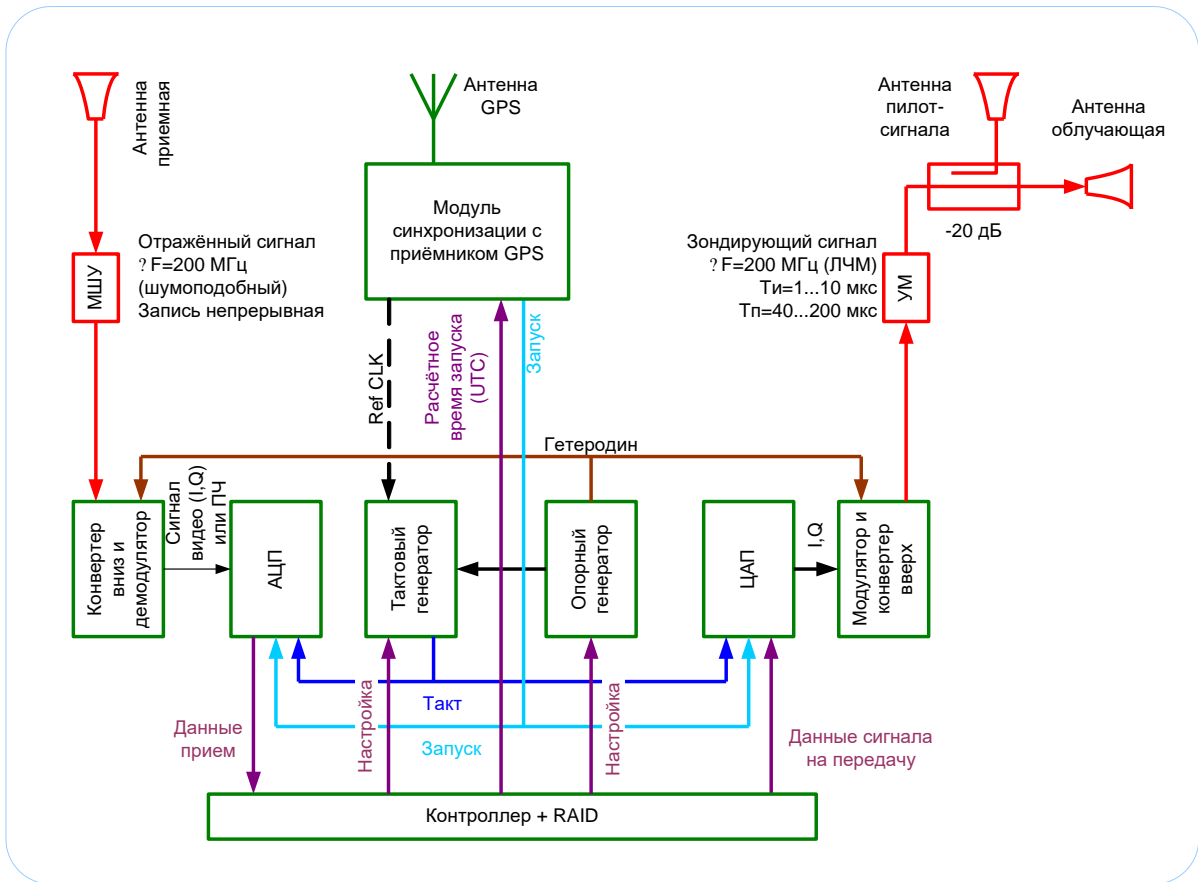


Рис. 2. Структурная схема наземной активной станции

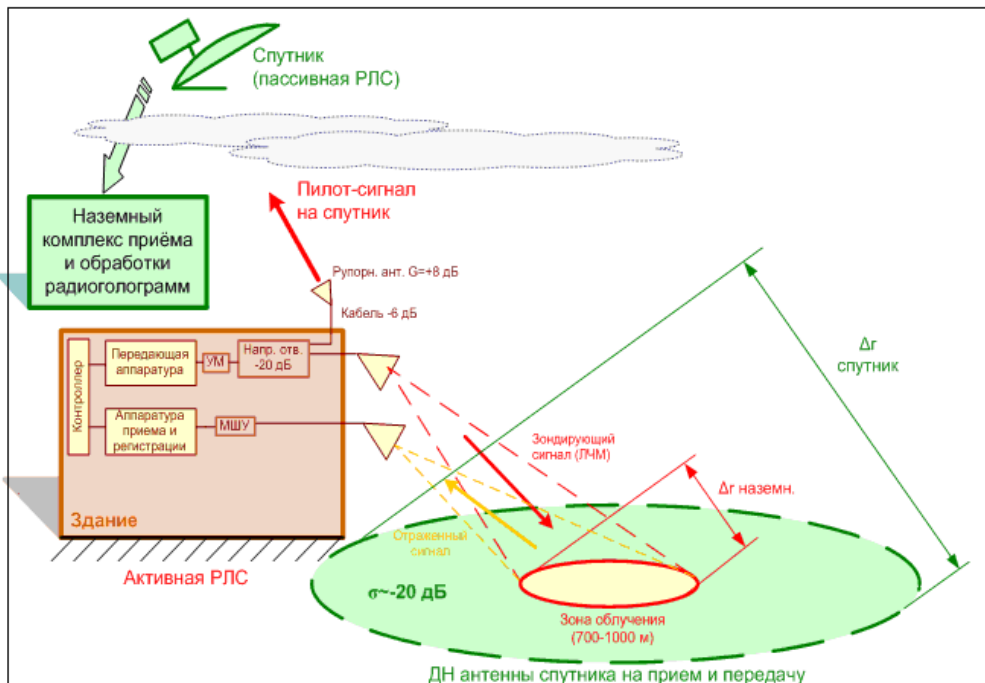


Рис. 3. Структурная схема бистатического эксперимента при активной наземной станции

Для наведения на спутник антенны, излучающей пилот-сигнал, и синхронизации запуска сеанса съемки необходимо знать точную дату и время пролета спутника, над облучаемым участком местности с точностью до секунды. Требования по точности

наведения на спутник РСА антенны для излучения пилот-сигнала определяются требованиями по стабильности эквивалентной изотропно излучаемой мощности (ЭИИМ) пилот-сигнала в направлении спутника и шириной диаграммы направленности (ДН) излучающей антенны. Для излучения пилот-сигнала выбрана рупорная антенна с шириной ДН $\pm 35^\circ$ и коэффициентом усиления +8 дБ. Согласно расчёту, попадания спутника в конус ДН антенны в начале сеанса съёмки было бы достаточно для проведения нескольких сеансов съёмки в течение более 40 секунд без перенацеливания антенны.

При условии, что съёмку предполагается проводить в режиме бокового обзора и с участка, где спутник имеет максимальное возвышение над горизонтом, можно не учитывать отклонение векторов горизонтальной и вертикальной поляризации излучения на спутник от горизонта и местной вертикали. Ориентация антенны по поляризации выбирается в соответствии с выбранной поляризацией приёма для спутника.

При организации бистатической съёмки с участием космического РСА необходимо учитывать импульсный режим работы последнего: приёмник выключается в начале периода зондирования на время излучения. При отсутствии цикловой синхронизации между космической и наземной станциями возможны потери радиолокационной информации в случае прихода отражённого сигнала в течение паузы приёма.

Организовать бистатическую съёмку при наземном размещении активной станции без необратимых потерь информации можно, учитывая следующие особенности. При размещении излучающей антенны активной станции в здании высотой 30...60 м и облучении земной поверхности под углами места 20...50 градусов размер по дальности зоны облучения, ограниченной уровнем плотности потока мощности зондирующего сигнала минус 3 дБ от максимального, составит не более 500 м. Для ограничения по уровню минус 20 дБ, характеризующему размер зоны однозначности по дальности, он составит не более 1000 м, что соответствует длительности отражённого импульса вместе с пилот-сигналом не более 20 мкс при длительности зондирующего импульса до 10 мкс. Таким образом, помехи неоднозначности по дальности не должны возникнуть, если период излучения зондирующего сигнала наземной станцией будет уменьшен до 50 мкс, что позволит за время одного цикла зондирования спутникового РСА, равного 200 мкс, излучить 4 импульса, как показано на циклограмме (рис. 4). Учитывая, что аппаратура спутникового РСА предназначена для приёма шумоподобных сигналов, принятыми окажутся все отражённые сигналы и их фрагменты за исключением фрагментов, попавших в паузу приёма. Если теперь ввести циклическую нумерацию излучаемых импульсов по порядку 1...4 и разделить последовательность принятых (как без искажений, так и с потерями) импульсов на 4 подпоследовательности, то каждая такая подпоследовательность может быть обработана как отдельная радиоголограмма. Как видно из рис. 4, радиоголограммы, составленные из принятых импульсов 2...4, не подвержены потерям информации.

Одной из существенных проблем радиолокационной съёмки в бистатическом режиме с участием космического РСА и наземной станции является отсутствие обмена спутника с наземной станцией какими-либо сигналами, позволяющими осуществить цикловую и фазовую синхронизацию между аппаратурой. Отсутствие взаимной синхронизации приемника и передатчика приводит к рассинхронизации строк в записанной радиоголограмме, не позволяющей выполнить её сжатие по азимуту. Другим эффектом, затрудняющим обработку радиоголограмм, является случайная задержка начала первого принятого импульса относительно момента запуска приёмника (первого записанного отсчёта сигнала), что неизбежно при отсутствии

общего сигнала запуска. Пример цифровой радиоголограммы (ЦРГ) с искажениями приведен на рис. 5.

Для устранения искажений, обусловленных отсутствием синхронизации, предложена и отработана методика программной коррекции радиоголограмм. Для её реализации необходимо, чтобы в схеме передающей аппаратуры была предусмотрена возможность передачи ответвлённого зондирующего сигнала в направлении приёмной станции по линии прямой видимости (пилот-сигнала). Пилот-сигнал поступает на вход приёмника и записывается в строку радиоголограммы несколько раньше, чем начало суперпозиции отражений зондирующего сигнала от снимаемой местности.

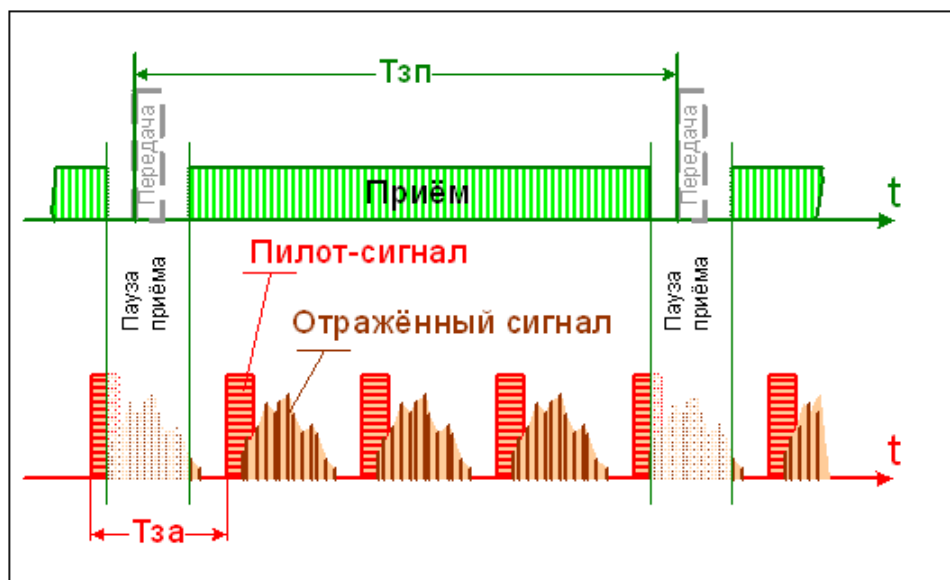


Рис. 1. Циклограммы приема и передачи сигналов при пассивном режиме космической станции

Коррекция радиоголограммы с использованием пилот-сигнала выполняется по следующему алгоритму.

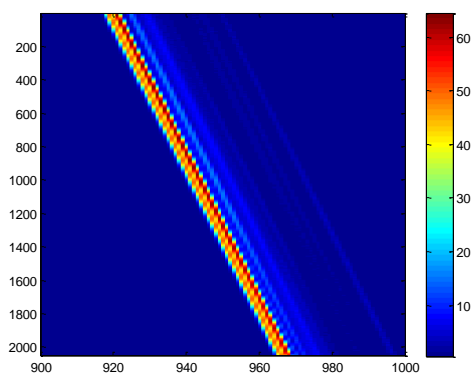
1. Выполняется сжатие радиоголограммы по дальности с использованием расчётной опорной функции или ансамбля опорных функций. При правильной синхронизации отклики располагаются в одном столбце матрицы и имеют одинаковую фазу, а при её нарушении разброс позиций отклика в строке достигает нескольких отсчётов по дальности.

2. Определяется уточнённая позиция максимума отклика от пилот-сигнала в каждой строке. Для этого: 1) определяется положение максимума амплитуды отклика грубо (до дикрета по дальности); 2) выполняется интерполяция фрагмента строки радиоголограммы в окрестности грубо найденного максимума; 3) выполняется уточнённый поиск позиции максимума по дискриминационной характеристике главного лепестка функции отклика.

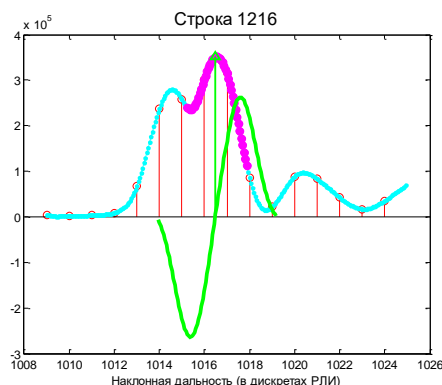
3. По интерполированной комплексной огибающей главного лепестка определяется фаза отклика в максимуме.

4. Выполняется смещение строки сжатой радиоголограммы на уточнённую позицию максимума в обратном направлении с переходом в частотную область, умножением спектра на вектор сдвигающих коэффициентов и обратным преобразованием Фурье.

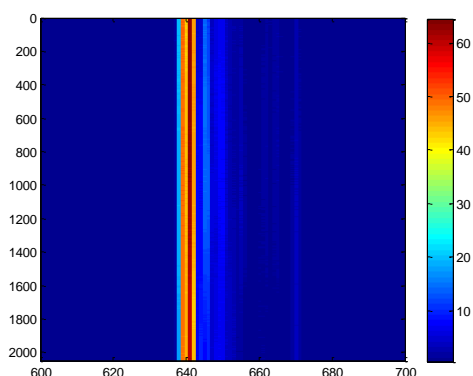
5. Выполняется поворот фазы всех комплексных отсчётов сдвинутой строки на противоположное значение найденной фазы максимума отклика пилот-сигнала.



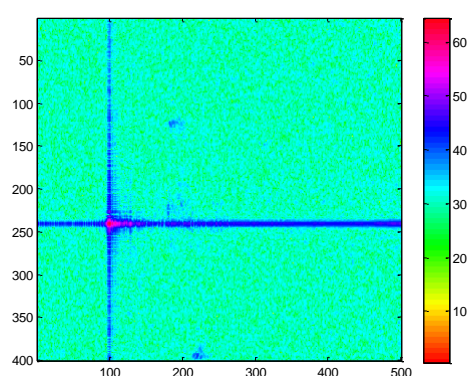
Сжатие по дальности некорректированной ЦРГ с пилот-сигналом



Оценка задержки строк ЦРГ корреляционным методом



Сжатие по дальности ЦРГ с коррекцией задержки строк



Функция отклика по пилот-сигналу после коррекции ЦРГ

Рис. 5. Коррекция искажений радиоголограммы

Таким образом, при наличии пилот-сигнала можно обеспечить привязку полученного изображения по дальности к условному нулевому значению, определяемому положением антенны пилот-сигнала.

Научный и практический интерес представляет проведение аналогичного эксперимента с участием описанной выше наземной станции и любого космического РСА L, P, S или X диапазона с круговой полярной орбитой взамен выведенного из эксплуатации «Кондора-Э», с тем отличием, что активной должна быть космическая станция.

Для использования наземной станции в качестве пассивной её аппаратура переконфигурируется следующим образом (рис. 6).

1) Основная антенна А2 через прямой канал направленного ответвителя НО1 подключается к приёмному каналу станции.

2) Антенна пилот-сигнала А3 подключается к приёмному каналу станции через ослабляющий канал направленного ответвителя НО1, к прямому каналу которого подключена приёмная антенна А2. Если имеются аппаратные средства для дополнения наземной станции вторым приёмным каналом, то пилот-сигнал от антенны подаётся на его вход через дополнительный направленный ответвитель НО2. Кроме этого, если имеется возможность доукомплектования аппаратуры третьим приёмным каналом, к его входу может быть подключена антенна А1, установленная на кросс-поляризацию. Перед проведением сеанса антенна пилот-сигнала А3 должна быть наведена в направлении расчётного местонахождения спутника таким же образом, как и при работе наземной станции на передачу.

3) Передающий канал наземной станции, работающей в пассивном режиме, не используется.

При проведении сеанса съёмки через основной приёмный канал наземной станции будет записываться вначале импульс зондирующего сигнала от спутниковой РЛС, поступающий по линии прямой видимости через антенну пилот-сигнала, а затем, с некоторыми задержками, суперпозиция его отражений от объектов на снимаемом участке местности, охваченном диаграммой направленности антенны А2. Из-за незначительных расстояний от наземной станции до местных объектов неизбежно перекрытие зондирующего импульса и задержанных отражённых сигналов, что не влияет на различимость откликов после сжатия по дальности в случае известного вида модуляции зондирующего сигнала. В случаях, когда закон модуляции каждого импульса зондирующего сигнала априорно не известен, например, при использовании фазокодовой модуляции с чередованием последовательностей по случайному закону [15], информация для построения опорной функции может быть получена из записи зондирующего сигнала, не смешанного с отражённым, через второй приёмный канал.

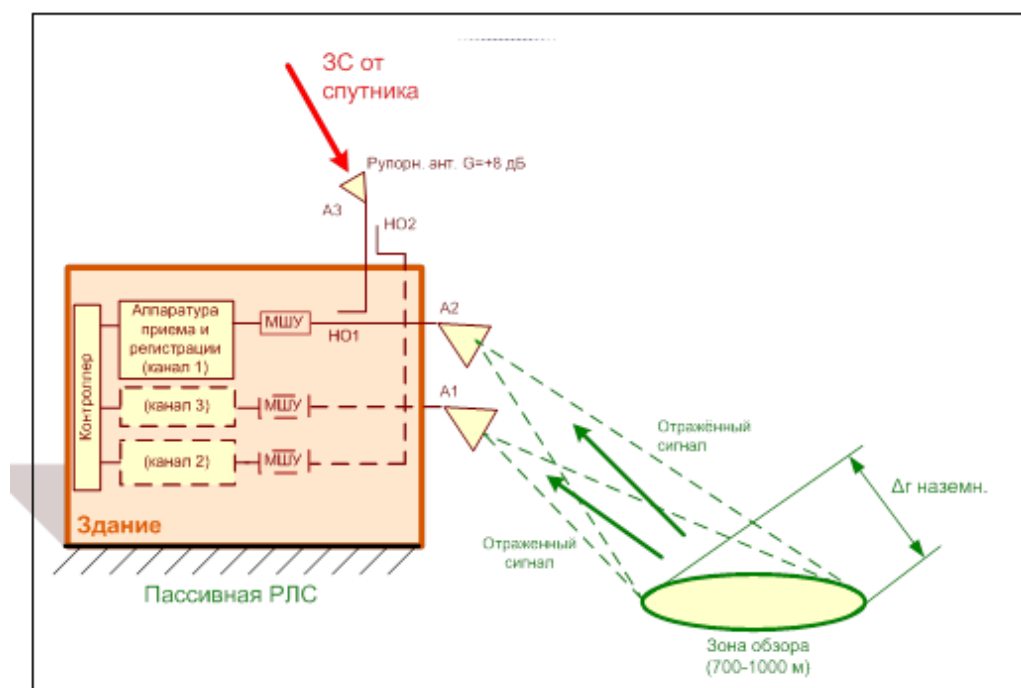


Рис. 6. Структурная схема бистатического эксперимента при использовании наземной станции в пассивном режиме

Несмотря на то, что планируемый эксперимент не был полностью осуществлён, при подготовке к нему была разработана наземная станция, которая может функционировать как в пассивном, так и в активном режиме, и отработаны проблемные вопросы синхронизации двух независимых станций. Предложены способы программной коррекции искажений радиоголограмм, возникающих из-за временной и фазовой рассинхронизации.

Отсутствие в настоящее время возможности работы с космическим РСА высокого разрешения не оправдывает отказ от работ по бистатическому синтезированию. Имеющаяся наземная станция может работать с самолетными радиолокаторами. Поскольку на наземной станции применён термостатированный опорный генератор ОГ с параметрами не хуже, чем используемые в самолетных РСА, это позволяет провести бистатические эксперименты с целью выработки требований к аппаратуре РСА и

системам микронавигации самолётов для работы в бистатических режимах. Вариант «активный самолётный РСА – пассивная наземная станция» является наименее затратным, и имеются все необходимые средства для его реализации.

Следующим шагом может быть бистатический эксперимент с использованием двух самолётов с целью выработки требований к параметрам аппаратуры, программно-алгоритмическому обеспечению и практической отработки методов реализации пространственной, временной и фазовой синхронизации.

Важной задачей бистатических экспериментов является определение путей дальнейшего развития самолётных РСА с тем, чтобы любые два самолётных радиолокатора при необходимости могли быть объединены в бистатическую систему.

Следует отметить, что предлагаемая для участия в бистатической съёмке наземная станция может работать в широком диапазоне частот, при этом она установлена в амортизированный контейнер и имеет преобразователь питания для подключения к бортовой сети, что позволяет использовать её в составе экспериментальной самолётной РСА.

Доказательством готовности к практическому внедрению режимов бистатического синтезирования может быть только успешный лётный эксперимент как свидетельство обоснованности принятых теоретических и технических решений.

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. 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. 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. – 416 с.
5. Коростелев А.А. Пространственно-временная теория радиосистем. – М.: Радио и связь, 1987. – 320 с.
6. 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.
7. Nies H., Behner F., Reuter S., Loffeld O., Wang R. SAR Experiments in a Bistatic Hybrid Configuration for Generating PolInSAR Data with TerraSAR-X Illumination // Proc. of 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar “EUSAR 2010” (Aachen, Germany, June 2010). 2010. – Pp.994-997.
8. Willis N.J. Bistatic Radar. – SciTech Publishing Inc., 2005. – 337 p.
9. Wendler M., et al. Results of a Bistatic Airborne SAR Experiment // Proceedings of IRS 2003, Dresden, Germany. – DGON, 2003. – Pp.247-253.
10. Yates G., et al. Bistatic SAR image formation // Proceedings of EUSAR 2004, Ulm, Germany. May, 2004. – Pp.581-584.
11. Krieger G., et al. Impact of Oscillator Noise in Bistatic and Multistatic SAR // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2006. – Vol. 3. – No. 3, July. – Pp.424-428.
12. Sanz-Marcos J., Lopez-Dekker P., Mallorqui J.J., Aguasca A. and Prats P. SABRINA: a SAR bistatic receiver for interferometric applications // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2007. – Vol. 4. – No. 2, April. – Pp.307-311.

13. Time and Frequency Synchronisation Aspects for Bistatic SAR Systems Matthias Wei., FGAN-FHR/EL, Neuenahrer Stra.е 20, D- 53343 Wachtberg, Germany.
14. Broquetas A., Lopez-Dekker P., Mallorqui J.J., Agasca A., Fortes M., Merlano J.C., Duque S. SABRINA-X: Bistatic SAR Receiver for TerraSAR-X SAR // Proc. of 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar “EUSAR 2010” (Aachen, Germany, June 2010). 2010. – Pp.748-750.
15. Тарасенко А.М. Исследование влияния способов формирования зондирующего сигнала космического РСА на качество радиолокационного изображения // Успехи современной радиоэлектроники. – 2015. – №5. – С.13-19.