

Программный комплекс формирования радиолокационных изображений космических аппаратов в системах с инверсным синтезированием

В. С. Бахолдин, К. В. Галайчук, Д. А. Леконцев
Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского
vka@mil.ru

Аннотация. В работе представлен программный комплекс формирования радиолокационных изображений космических объектов наземными средствами радиовидения, разработанный как исследовательский и учебный инструмент для специалистов в области визуализации и обработки радиолокационной информации на языке программирования Python. Целью создания комплекса является исследование возможностей получения высокоинформативных радиолокационных изображений объектов, находящихся на низких, средних и высоких околоземных орбитах и отработки методов и алгоритмов их синтеза. Комплекс позволяет моделировать радиолокационные сигналы, отраженные от различных объектов наблюдения, таких как космические аппараты, ракеты, разгонные блоки, воздушно-космические самолеты, и формировать их дальностные портреты с высоким разрешением, а также радиолокационные изображения с использованием технологии инверсного синтеза. Приведены результаты формирования радиолокационных изображений космических аппаратов с использованием зондирующих сигналов с различными значениями эквивалентной ширины спектра.

Ключевые слова: радиолокационное изображение, обратное (инверсное) синтезирование апертуры антенны, локальный центр рассеяния

I. ВВЕДЕНИЕ

Радиолокационные системы, позволяющие получить некоординатную информацию о цели, называют высокоинформативными или высокопотенциальными [1, 4]. Наземные системы радиовидения (СРВ) по зарубежной классификации относятся к радиолокационным системам с высокой разрешающей способностью (High Range Resolution (HRR) radar). Наряду с оптико-электронными системами, они являются важным инструментом научных исследований, так как позволяют формировать технико-экономические обоснования для создания и развития перспективных средств контроля космического пространства с использованием сверхширокополосных (СШП) сигналов. Технология формирования СШП сигналов сочетает достаточно большую энергию длинного импульса с высоким разрешением короткого импульса. Внутримпульсная модуляция по частоте или фазе обеспечивает разрешение, когда временные отклики от целей могут иметь перекрывающиеся интервалы.

Разрешающая способность по азимуту (поперечной дальности) при прямолинейной траектории движения

для радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) бокового обзора определяется выражением $\Delta l = R\lambda/2L$, где R – наклонная дальность до цели, λ – длина волны, L – расстояние, пройденное передатчиком/приемником и определяющее размер синтезированной апертуры.

Взаимосвязь показателя разрешающей способности по азимуту для ДЗЗ и СРВ представлена на рис. 1.

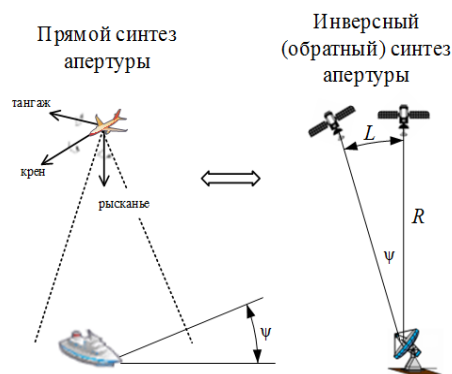


Рис. 1. Взаимосвязь синтеза апертуры и определения разрешающей способности по азимуту

Поскольку $L \rightarrow R\Delta\psi$, то $\Delta l = R(\lambda/2R\Delta\psi)$ (прямой синтез апертуры SAR), следовательно, для СРВ разрешающая способность по азимуту будет определяться выражением $\Delta l = \lambda/2\Delta\psi$ (инверсный синтез апертуры ISAR).

Разрешающая способность поперек линии пути не зависит от дальности и определяется изменением ракурса цели.

Влияние ориентации объекта на ортогональность к линии визирования зависит в основном от двух из трех углов ориентации. Для инверсного синтеза апертуры любое поступательное движение цели не является основным фактором, вносящим вклад в формирование изображения из-за его физической природы, и может быть скомпенсировано. Только изменение положения по углу тангажа и крена влияет на синтез изображения с высоким разрешением. В противном случае алгоритм обработки сигнала в СРВ отбросит траекторию движения объекта как недоверенную.

В радиолокаторах СРВ широко используются линейные частотно-модулированные (ЛЧМ) сигналы для

обеспечения широкополосных характеристик и обеспечения высокого разрешения по дальности. Сигналы ЛЧМ имеют низкое отношение пиковой мощности к средней, что позволяет эффективно формировать радиолокационное изображение на больших расстояниях при ограниченной пиковой мощностью излучения. Это достигается с помощью согласованного фильтра сжатия сигнала, который максимизирует отношение сигнал/шум. Линейная частотная модуляция может быть как возрастающая (up-chirp), так и убывающая (down-chirp) по частоте, в то время как нелинейная частотная модуляция включает экспоненциальные или гиперболические законы изменения. В радиолокаторах с псевдошумовыми сигналами вместо классических, часто сложных, детерминированных радиолокационных сигналов излучаются случайные формы волн. По сравнению с детерминированными сигналами недетерминированная природа шумоподобных передаваемых сигналов может обеспечить преимущества при радиолокационной визуализации. Псевдошумовые сигналы и свойства их широкого спектра могут уменьшить взаимные помехи с другими радиолокаторами и системами связи, работающими в том же частотном спектре. Благодаря их низким значениям взаимной корреляции и квазиортогональности можно одновременно задействовать несколько передатчиков, используя различные псевдошумовые сигналы. Другим известным преимуществом является низкая вероятность перехвата шумоподобных сигналов, что снижает их заметность для средств радиоэлектронной борьбы. Они более устойчивы к помехам таким как подавление и подмена сигнала. Как и в случае с детерминированными сигналами, достижимое разрешение по дальности зависит не от характеристики сигнала во временной области, а определяется полосой пропускания сигнала, т. е. спектральной формой шумового сигнала [2]. На базе немецкого аэрокосмического центра (DLR) в Вайльхайме (Верхняя Бавария) создан и эксплуатируется экспериментальный наземный радиолокатор спутниковой визуализации под названием IoSiS (Imaging of Satellites in Space), способный формировать широкополосные сигналы [3]. IoSiS содержит импульсный радиолокатор, работающий в X диапазоне с мгновенной полосой пропускания до 4,4 ГГц. В передатчике для генерации высокой излучаемой импульсной мощности используется усилитель на лампе бегущей волны. Из-за ограниченной выходной пиковой мощности усилителей импульсный излучаемый сигнал должен обеспечивать низкое отношение пиковой к средней мощности. Это обеспечивает максимально достижимую среднюю мощность, что в конечном итоге приводит к требуемому значению отношения сигнал/шум в радиолокационном изображении [5]. Это особенно актуально в области космических радиолокаторов наблюдения, сопровождения или визуализации, где необходимо отслеживать и отображать небольшие цели или объекты с малой эффективной площадью рассеяния, и эффективное использование доступной мощности имеет решающее значение. Следовательно, использование простого гауссовского сигнала с высоким значением скважности в качестве передаваемого сигнала приводит к потере отношения сигнал/шум. Требуется разработка специальных псевдошумовых сигналов, которые бы имели сигнальные характеристики шумового сигнала вместе с малым значением скважности, как у сигнала с

линейной частотной модуляцией [6]. Кроме того, должны быть сохранены свойства низкой вероятности перехвата и его устойчивость к помехам и «состязательным атакам», а также низкие значения взаимной корреляции.

В этой связи представляют интерес подходы, базирующиеся на строгих теоретических положениях, например, использующие аппарат теории сигналов.

Синтез радиолокационного изображения (РЛИ) объекта может осуществляться как в однопозиционном, так и в бистатистическом режимах, когда передатчик и приемник находятся в различных точках пространства и перемещаются друг относительно друга [7].

II. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ФОРМИРОВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ С ИНВЕРСНЫМ СИНТЕЗИРОВАНИЕМ

Комплекс предназначен для проведения лабораторных работ по исследованию алгоритмов формирования РЛИ космических объектов, получаемых в наземных радиолокационных системах с инверсным синтезированием антенны. Он позволяет оценить быстрдействие и трудоемкость используемых алгоритмов формирования РЛИ, в том числе разработать и апробировать собственный алгоритм. Рассчитать тактико-технические характеристики перспективных средств контроля космического пространства по оценке разрешающей способности РЛИ и степень их соответствия тактико-техническим заданиям на разработку.

Новизна программного комплекса заключается в возможности исследования алгоритмов обработки радиоголограмм, характеристик вновь разрабатываемых и модернизируемых радиолокационных систем контроля космического пространства и создания каталога РЛИ до запуска космических аппаратов (КА). Предварительная программная обработка радиоголограмм в условиях, приближенных к реальным, позволит также отработать технологии прожекторного режима формирования высокодетальных изображений, получаемых КА ДЗЗ, а также повысить уровень компетентности обучаемых по радиотехническим специальностям подготовки.

Программный комплекс позволяет изучить основные особенности функционирования РЛС с инверсной синтезированной апертурой:

- 1) зависимости азимутальной разрешающей способности от углового размера инверсной синтезированной апертуры и длины волны несущей частоты сигналов РСА;
- 2) влияния дальности и скорости до исследуемого объекта на параметры формируемого РЛИ;
- 3) зависимости искажений РЛИ от величины и характера фазовых ошибок, возникающих при обработке принимаемого сигнала;
- 4) оценку применимости различных алгоритмов построения РЛИ: дальномерно-доплеровской обработки и обработку в полярном формате [2].

Разработанный комплекс основан на использовании математической модели инверсного синтеза, которая реализована в виде программы «IRSA – 1» на языке Python.

В программном комплексе моделируется прямолинейное движение исследуемого объекта относительно СРВ, представляющего из себя локальные центры рассеивания различных видов КА, вдоль траектории движения на расстоянии 1,2 м и 0,2 м друг от друга в районе точки траверза (рис. 2).

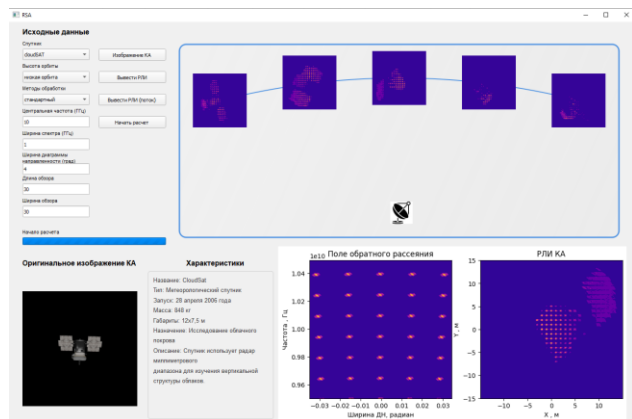


Рис. 2. Общий вид главного окна программного комплекса формирования радиолокационных изображений

Сигналы, отраженные от исследуемого объекта, принимаются СРВ, накапливаются и совместно обрабатываются для получения двумерного РЛИ объекта.

Максимально возможное время когерентного интегрирования зависит от способности антенной системы отслеживать движение цели. В режиме построения изображения, как и в режиме обнаружения, оно ограничено временем прохождения объектом наблюдения области, освещаемой диаграммой направленности радиолокатора. Следовательно, режим построения изображения возможен для объектов, параметры траектории движения которых известны или могут быть получены из результатов траекторных измерений с заданной точностью.

Знание траекторий движения объекта наблюдения имеет решающее значение для получения траекторной информации, необходимой для обработки в СРВ. В настоящее время прогноз необходимых орбит предварительно выполняется с использованием общедоступных данных Two-Line Element (TLE), которые позволяют экстраполировать значения только в пределах ограниченной точности. Для создания перспективных СРВ необходимо в состав включать контур автосопровождения космического объекта. Кроме того, небольшая часть остаточной погрешности дальности может быть вызвана недостаточной компенсацией атмосферной задержки дальности, которую необходимо дополнительно устранять.

Следует учитывать все возможные источники ошибок, такие как атмосферные искажения или некомпенсированная частотная характеристика приемника радиолокационной системы и антенно-фидерных устройств.

На рис. 3 приведены результаты формирования РЛИ метеорологического КА CloudSat с использованием зондирующих сигналов с различными значениями эквивалентной ширины спектра 100 МГц, 500 МГц, 1 ГГц, 2 ГГц.

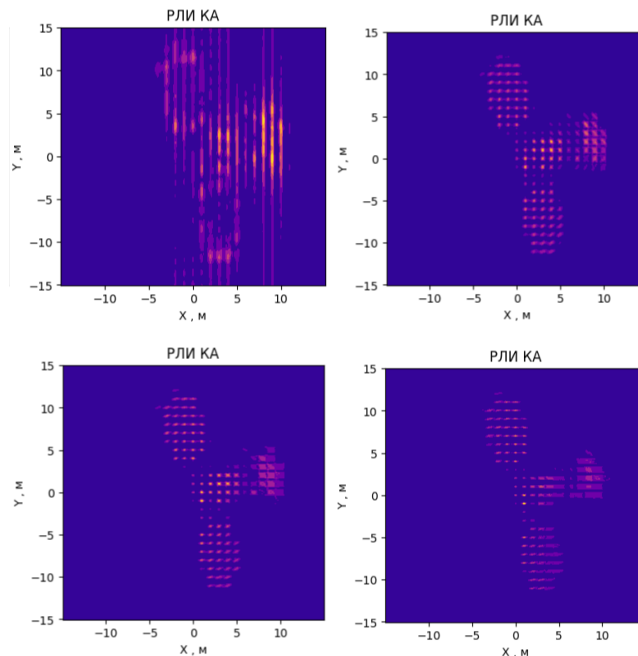


Рис. 3. Результаты формирования РЛИ с различными значениями эквивалентной ширины спектра 100 МГц, 500 МГц, 1 ГГц, 2 ГГц

Ошибки, возникающие в процессе формирования изображения СРВ, обычно приводят к расфокусировке и геометрическим искажениям радиоизображения. Ошибки преобразования СРВ включают:

- 1) неизвестная траектория движения цели или приемной антенны: несмоделированное движение приведет к расфокусировке изображения цели и его расположению в неправильном месте. Эта ошибка контролируется подходящей механической конструкцией или использованием методов автофокусировки и может быть оценена методом измерения фазы аналитического сигнала;

- 2) интегрированный отражаемый боковой лепесток: качество РЛИ ухудшается из-за боковых лепестков сжатия по дальности и азимуту. Боковые лепестки возникают из-за «усечения» данных и могут быть уменьшены путем применения соответствующих весовых «оконных» функций. Боковые лепестки могут вызывать значительное ухудшение изображения. Во-первых, пики более сильных боковых лепестков могут привести к появлению ряда слабых целей по обе стороны от главного экстремума функции определяющего расположение цели. Во-вторых, объединенная мощность всех боковых лепестков имеет свойство подавлять или размывать детали в областях с низкой ЭПР. Интегрированный уровень боковых лепестков может в плохих условиях достигать уровня на 10 дБ ниже пикового отраженного сигнала цели;

- 3) ошибка выборки частоты повторения импульсов и ракурса: неправильно выбранные значения частоты или ракурса приведут к искаженным изображениям, создавая ложные цели;

- 4) многолучевое распространение: многократные отражения могут привести к появлению «артефактов».

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный программный комплекс формирования РЛИ космических объектов наземными СРВ позволяет получать детальные изображения объектов наблюдения и раскрыть потенциал их использования при построении полноценной РЛС с высоким пространственным разрешением. В зависимости от выполняемой задачи и стратегии применения РЛИ следует использовать различные методы, обеспечивающие максимизацию требуемого результата. Важным вопросом при построении СРВ выступает разработка СШП сигналов в соответствии с имеющейся элементной базой, обеспечивающих высокую разрешающую способность по дальности и минимизацию боковых лепестков на РЛИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ключев Н.Ф., Безгузиков В.П., Алексеев А.И. Вопросы систем радиовидения // СПб: ВИКИ им. А.Ф. Можайского. 1992. 61 с.
- [2] Anger S., Jirousek M., Dill S., Peichl M. Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging of Space Targets Using Wideband Pseudo-Noise Signals with Low Peak-to-Average Power Ratio. *Remote Sens.* 2024, 16, 1809. <https://doi.org/10.3390/rs16101809>.
- [3] Anger S., et al.: High resolution inverse synthetic aperture radar imaging of satellites in space. *IET Radar Sonar Navig.* 1–20 (2023).
- [4] Арсенов С.М., Пасмуров А.Я. Алгоритмы обработки сигналов в системах формирования радиолокационных изображений летательных аппаратов // *Зарубежная радиоэлектроника.* 1991. №1. С. 71–83.
- [5] Бахолдин В.С., Гаврилов Д.А., Иванов В.Ф., Леконцев Д.А. Метод повышения разрешающей способности многопозиционных радиолокационных систем с синтезированной апертурой на основе расщепления спектра сигнала с линейной частотной модуляцией // *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского.* 2019. №670. С. 27–31.
- [6] Бахолдин В.С., Гаврилов Д.А., Шалдаев А.В. Алгоритмы формирования радиолокационных изображений земной поверхности при использовании сигналов ГЛОНАСС // *Известия высших учебных заведений Приборостроение.* 2012. Т. 55. №9. С. 24–29.
- [7] Бахолдин В.С., Леконцев Д.А., Галайчук К.В. Программная модель исследования алгоритма инверсного синтеза радиолокационных изображений // *Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио.* 2024. № 1 (79). С. 69–72.