

Программная модель исследования алгоритма инверсного синтезирования радиолокационных изображений

В. С. Бахолдин, Д. А. Леконцев, К. В. Галайчук

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

vka@mil.ru

Аннотация. В работе рассмотрен алгоритм синтеза радиолокационных изображений. Приведены результаты их формирования при различных значениях разрешающей способности. Ключевым изменяемым параметром выступает эквивалентная ширина спектра обрабатываемого сигнала. Рассмотрены методы обработки траекторного сигнала для учета миграции локальных центров рассеяния цели по дальности. Сделан вывод о применимости различных методов обработки траекторного сигнала в заданных временных ограничениях.

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

I. ВВЕДЕНИЕ

Радиолокационные изображения (РЛИ) высокого разрешения могут быть получены с использованием методов «прямого» SAR (Synthetic Aperture Radar) или обратного (инверсного) ISAR (Inverse Synthetic Aperture Radar) синтезирования апертуры антенны. Можно показать, что SAR и ISAR имеют одинаковую базовую теорию, но различную геометрию обзора и физический смысл наблюдения. «Прямое» синтезирование используется в системах дистанционного зондирования Земли (обзора земной поверхности) с подвижным носителем, на борту которого расположен радиолокатор, в то время как под обратным синтезированием понимается неподвижная радиолокационная система (РЛС), в которой синтез апертуры происходит за счет параметров движения (колебаний) объекта наблюдения и соответствующего им изменения ракурса наблюдения антенны РЛС [1]. С точки зрения обработки траекторного сигнала формирование РЛИ представляет собой задачу синтеза в двумерном пространстве, то есть, чтобы сформировать РЛИ, должно быть определено разрешение в двух координатных плоскостях. Двумерное разрешение реализуется путем сжатия сигнала в направлении наклонной дальности и синтезирования апертуры в поперечном направлении дальности. В первом приближении отраженная от объекта наблюдения электромагнитная волна – это всего лишь одномерный временной ряд интенсивности рассеянного от цели траекторного сигнала, который можно преобразовать к двумерной плоскости, т. е. РЛИ можно назвать изображениями, вызванными движением. Следовательно, в SAR и ISAR точный учет движения является основной проблемой, требующей решения. В ISAR компенсация движения является более сложной задачей, поскольку отсутствуют априорные знания об

объекте и параметрах его движения [2]. В некоторых случаях такой объект как корабль или самолет, может совершать сложные маневры и перемещения, что ведет к неэффективности линейной компенсации движения в течение некоторого времени перемещения. Таким образом, необходимо знать и учитывать полную информацию о местоположении объекта наблюдения. ISAR, в узком смысле, использует только движение цели для синтеза апертуры и получения разрешения по азимуту. Изменение скорости и положения цели (крен, тангаж и рыскание) также влияют на угловой интервал, в течение которого РЛС получает данные о цели [3]. Поскольку для формирования РЛИ важно только относительное (взаимное) движение, обычно сбор и обработку данных ISAR моделируют, рассматривая их как эквивалентную маневрирующую SAR, освещающую неподвижную цель. Таким образом, ISAR очень похожа на SAR в режиме прожекторного режима наблюдения. Обработка РЛИ ISAR обычно используется для идентификации и классификации объектов наблюдения. Важнейшим требованием к РЛИ, является достижение высокого разрешения, позволяющего различать объект с заданной вероятностью (точностью). Классическое 2D-изображение ISAR формируется путем обработки рассеянного поля для различных углов обзора и доплеровского смещения частоты. Хотя обработка ISAR аналогична обработке SAR, процедура формирования (визуализации) ISAR имеет некоторые концептуальные отличия по сравнению с РЛИ SAR.

II. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ТРАЕКТОРНОГО СИГНАЛА ДЛЯ УЧЕТА МИГРАЦИИ ЛОКАЛЬНЫХ ЦЕНТРОВ РАССЕЯНИЯ ЦЕЛИ ПО ДАЛЬНОСТИ

Метод ISAR основывается на корреляционной обработке опорного сигнала, учитывающего движение цели.

Основным оцениваемым параметром является эффективная площадь рассеяния (ЭПР) объекта наблюдения, которая является мерой интенсивности отраженного от цели радиосигнала.

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{P_1}{P_2},$$

где R – наклонная дальность от РСА до КА; P_2 – плотность потока мощности, падающая на цель; P_1 – плотность потока мощности, рассеиваемая целью.

Значение ЭПР влияет на радиолокационную заметность объекта, поэтому для обеспечения скрытности цели значения данного параметра уменьшают.

Для успешного формирования изображения движение цели должно содержать некоторую степень вращательной составляющей относительно диаграммы направленности РЛС. Учитывать вращение объекта позволяет диаграмма обратного рассеяния, которая показывает зависимость рассеянного поля от положения рассеивателя при совмещенной приемной и передающей части радиолокатора с синтезированной апертурой антенны (РСА).

При исследовании двумерного изображения, необходимо рассматривать формирование дальностных портретов (ДП): профиля дальности и профиля поперечного сечения. ДП при дальнейшей обработке позволяют рассматривать цель как совокупность «блестящих точек» – локальных центров рассеяния (ЛЦР). Исходя из этого, профиль дальности представляет распределение энергии ЛЦР по дальности (по траектории зондирования).

Под ЛЦР цели на РЛИ принято понимать объекты наблюдения, отражающие сигналы, которых обладают энергией, достаточной для их обнаружения. Если эти центры рассеяния расположены на разных дальностях от радиолокатора, то сигналы будут возвращаться в разные моменты времени к приемнику РСА и их можно будет различить в соответствующем профиле дальности. Исходными данными для формирования профиля дальности является поле обратного рассеяния [4]:

$$E^s(f) \cong \sum_{i=1}^N A_i \cdot e^{-j2kx_i},$$

где A_i – интенсивность отраженного сигнала, $k = 2\pi f/c$ – волновое число, f – несущая частота, c – скорость света, x_i – координата ЛЦР.

Между волновым вектором k и координатой x_i существует связь, определяемая преобразованием Фурье, использование которой позволяет выполнить переход из области пространственных частот в декартову систему координат. Аналогично проводится расчет профиля поперечного сечения в области угла обзора цели.

Профиль поперечного сечения:

$$E^s(\psi) = \sum_{i=1}^p A_i \cdot e^{-j2k(x_i \cdot \cos(\psi) + y_i \cdot \sin(\psi))},$$

где A_i – интенсивность отраженного сигнала, k – волновое число, x_i, y_i – координаты ЛЦР, ψ – угол обзора цели (ракурс).

Учитывая, что разрешение по продольной дальности обратно пропорционально ширине угла обзора, ISAR-изображения целей с высоким разрешением невозможны при использовании узких диаграмм направленности. Для увеличения разрешающей способности по продольной дальности необходимо наблюдать цель с большим угловым разрешением в различных ракурсах с разных точек зрения, в зависимости от меняющегося расстояния при движении. В свою очередь синтез обратного рассеяния в большой полосе частот улучшит разрешение по всему диапазону поперечной дальности.

$$\Delta x = \frac{c}{2B}; \Delta y = \frac{\lambda}{2\Omega},$$

где c – скорость света, B – ширина полосы обрабатываемых частот, λ – длина волны, Ω – угол обзора.

Однако, при использовании широкополосных сигналов и больших углов обзора возникает миграция ЛЦР по элементам разрешения. Эта ошибка вызвана остаточными погрешностями прогнозирования орбиты и может составлять несколько сотен метров при ограниченной компенсации атмосферных искажений дальности. Все это приводит к тому, что РЛИ «смазывается» [5]. Чтобы сохранить высокую разрешающую способность необходимо использовать методы, позволяющие избежать появления «смаза» на изображении, т. е. расфокусировки. К таким методам относят:

- полярное переформатирование;
- численное интегрирование.

На рис. 1а представлена моделируемая цель, состоящая из трех разнесенных ЛЦР углового отражателя размерами $1 \text{ м} \times 1 \text{ м}$ с разными интенсивностями отражения.

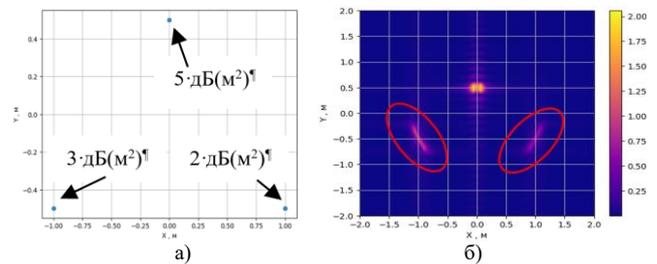


Рис. 1. Моделируемая цель из трех ЛЦР (а), РЛИ без использования методов компенсации миграции дальности (б)

При проведении моделирования использовались следующие исходные данные: центральная частота – 10 ГГц, ширина спектра – 1 ГГц, 2 ГГц, интенсивность точек – 2, 3, 5 дБ (м^2). На рис. 2 представлены результаты профилей дальности в зависимости от ширины спектра сигнала.

Полученные результаты приводят к закономерному выводу о том, что, увеличивая эквивалентную ширину спектра можно постоянно повышать разрешающую способность по дальности. Однако при построении двумерного изображения нужно учитывать ряд факторов.

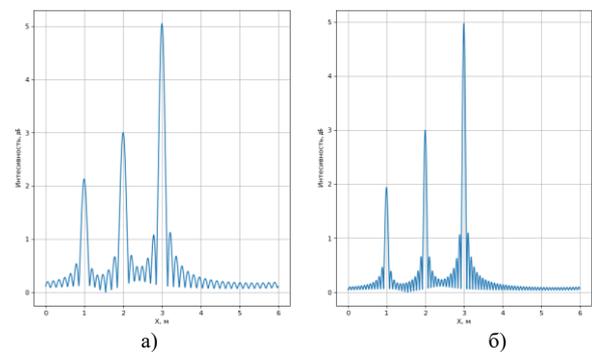


Рис. 2. Профили дальности ЛЦР при ширине спектра 1 ГГц (а), при ширине спектра 2 ГГц (б)

В процессе движения объекта по заданной траектории производится зондирование области, в которой находится цель и, соответственно, формирование двумерного РЛИ происходит за счет отображения профиля дальности по одной оси и профиля поперечного сечения по другой оси.

Если ДП формируются в конечных пределах полосы частот и угла обзора, то двумерные данные занимают неоднородную сетку (матрицу) в пространстве, вследствие флуктуации волнового фронта. Однако если и полоса частот и угол обзора достаточно малы, сетка данных в пространстве приближается к линейной сетке с равными интервалами, т. к. при малых значениях угла обзора $\cos(\psi) = 1$, а $\sin(\psi) = \psi$. В этом случае используют быстрое обратное преобразование Фурье (ОБПФ) без учета искривления волнового фронта.

Рассмотрим формирование РЛИ без методов компенсации искривления волнового фронта. На рис. 3 изображено поле обратного рассеяния от исследуемой цели. При этом, на рис. 3а из-за небольшой апертуры угла раскрытия не наблюдаются искажения волнового фронта в отличие от рис. 3б. Данный эффект имеет место при использовании антенны с большой угловой апертурой.

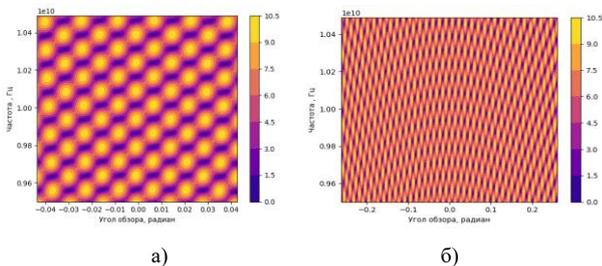


Рис. 3. Поле обратного рассеяния в частотно-ориентированной области для угла обзора 0,08 рад (а), поля обратного рассеяния при угле обзора 0,5 рад (б)

На рис. 1б получено РЛИ без использования методов компенсации миграции дальности. При этом возникает неоднозначность определения исходных координат ЛЦР, что приводит к некачественному РЛИ, так как значения начинают «мигрировать». Точка с интенсивностью 5 м² испытывает меньшую миграцию по дальности, поскольку не имеет продольной составляющей смещения ($x = 0$).

Рассмотрим полярное переформатирование методом ближайшего соседа.

Суть метода заключается в трансформации поля обратного рассеяния из частотно-углового пространства в пространство частот. Так как поле обратного рассеяния собрано в полярных координатах то возникает проблема при трансформации (рис. 5):

$$E^s(k, \psi) \rightarrow E^s(k_x, k_y)$$

Трансформацию можно проводить с помощью различных алгоритмов интерполяции, в том числе с использованным в данной работе линейным способом интерполяции ближайших соседей (рис. 4).

Так как ЛЦР не расположены в прямоугольных координатах, то большинство их не будет совпадать с точками координат в спектральной области. Тогда для ЛЦР берут 4 ближайших соседних точки, которые

образуют ячейку разрешения, на которую будет распределена энергия с ЛЦР. Это позволит уменьшить расфокусировку, но не избавиться от нее полностью.

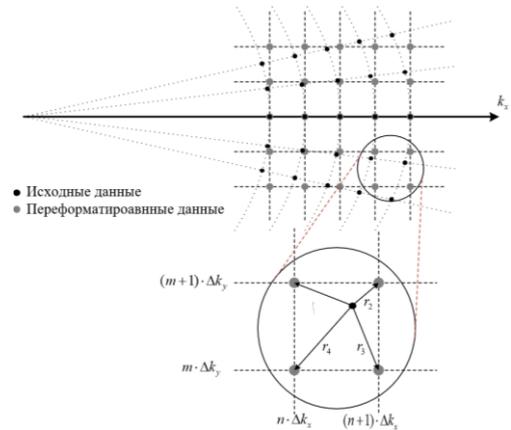


Рис. 4. Трансформация исходных данных при полярном переформатировании

При малой апертуре не возникает миграции ЛЦР, но ухудшается разрешение РЛИ. Полярное переформатирование позволяет исключить искривление волнового фронта при использовании широкополосного сигнала, что показано на рис. 5, фронт волны становится плоским.

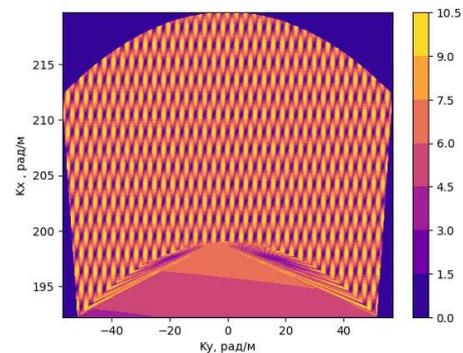


Рис. 5. Поле обратного рассеяния в частотно-ориентированной области при использовании метода полярного переформатирования

На рис. 6а представлен результат компенсации волнового фронта методом полярного переформатирования.

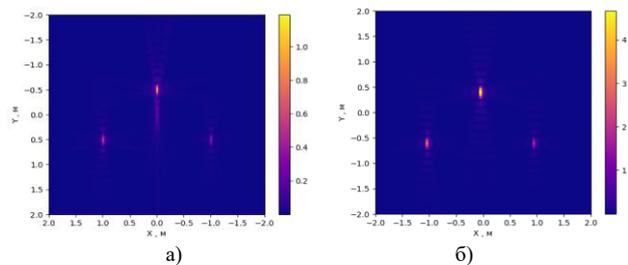


Рис. 6. РЛИ при использовании метода полярного переформатирования (а) РЛИ при использовании метода численного интегрирования (б)

По мере удаления ЛЦР от центра координат, начинает ослабляться их интенсивность.

Методы численного интегрирования позволяют максимально избавиться от негативного эффекта. В

работе реализован метод Симпсона, основанный на аппроксимации подынтегральной функции квадратичной функцией. В ходе реализации для каждого элемента разрешения вычисляется ОБПФ [4]:

$$\text{ISAR}(x, y) = \sum_{i=1}^M A_i \cdot \int_{\psi_2}^{\psi_1} \int_{k_2}^{k_1} e^{-j2k(\cos(\psi)(x-x_i) + \sin(\psi)(y-y_i))} d(k) d(\psi).$$

РЛИ представляет из себя набор изображений множества элементов разрешения. При таком методе «расфокусировки» не возникает и формируется четкое изображение. Рассмотренный метод требует очень много времени на обработку, что является его существенным недостатком при необходимости оперативного формирования РЛИ.

На рис. 6б представлен результат компенсации методом численного интегрирования.

Преимуществом является то, что в процессе синтеза можно выбирать элементы разрешения РЛИ. Необходимо отметить, что интенсивность точек не будет затухать по сравнению с методом полярного переформатирования.

При использовании метода интегрирования, для каждого элемента разрешения вычисляется интеграл и формируется полное РЛИ цели. Такой метод компенсации очень требователен по времени построения изображения, но лучше всего компенсирует миграцию дальности ЛЦР. Так, например, при тестовой цели, изображенной на рис. 1а и использовании метода полярного переформатирования необходимо 2 сек., а для метода численного интегрирования – 16 мин. на обработку всего РЛИ.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные методы обработки траекторного сигнала позволяют 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. При необходимости быстро классифицировать цель следует применять быстродействующие алгоритмы, а при наличии возможности постобработки с целью получения качественного изображения следует применить методы, обеспечивающие идентификацию и определение технического состояния цели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Клюев Н.Ф., Безгузиков В.П., Алексеев А.И. Вопросы систем радиовидения // СПб: ВИКИ им. А.Ф. Можайского. 1992. 61 с.
- [2] Ксендзук А.В., Герасимов П.А. Инверсный синтез апертуры в неизлучающих РЛС // Радиопромышленность. 2016. № 1. С. 33–37.
- [3] Теоретические и физические основы радиолокации и специального мониторинга: учебник / А.Н. Фомин, В.Н. Тяпкин, Д.Д. Дмитриев [и др.]; под общ. ред. И.Н. Ищука. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. 292 с.
- [4] Caner Özdemir, Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging with MATLAB Algorithms. Second Edition / PhdMersin UniversityMersin, Turkey // Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2021, 634 p.
- [5] Anger S., et al.: High-resolution inverse synthetic aperture radar imaging of satellites in space. IET Radar Sonar Navig. 1–20 (2023).