

УДК 004.021

**АНАЛИЗ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ФОКУСИРОВКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ****Т.Н. ДРОВОСЕКОВА***(Представлено: канд. техн. наук, доц. Р.П. Богуш)*

*Получение высокого разрешения по азимуту в космических радарх с синтезированной апертурой антенны (РСА) связано с проблемой устранения миграции дальности при синтезе радиолокационного изображения (РЛИ). В статье рассмотрены методы компенсации миграции дальности, применяемые в современных алгоритмах фокусировки изображений. Проведен сравнительный анализ алгоритмов с точки зрения их преимуществ и ограничений при использовании.*

Процесс формирования РЛИ называется фокусировкой радиолограммы (РГГ) и выполняется на этапе первичной обработки радиолокационных данных. Он включает в себя облучение земной поверхности зондирующим сигналом, прием и обработку отраженных от точек земной поверхности эхо-сигналов (откликов) и собственно формирование РЛИ [1].

В настоящее время для получения высокого пространственного разрешения получаемых РЛИ применяют радиолокаторы РСА. При движении по орбите антенна РСА излучает короткие частотно- или фазо-модулированные импульсы с заданной частотой повторения. Синтез апертуры является результатом последовательного во времени приема откликов зондирующих сигналов антенной при различном её положении относительно источника этих откликов. При каждом излучении зондирующего сигнала регистрируется одна строка РГГ. Количество строк РГГ зависит от частоты следования зондирующих сигналов и времени полета радиолокатора.

Сжатие РГГ по дальности во всех современных алгоритмах фокусировки производится как умножение спектра сигнала по дальности на согласованный фильтр (опорную функцию). При значительных углах отклонения от строго бокового обзора появляется дополнительная побочная модуляция отраженных импульсов, величина которой зависит от доплеровской частоты и наклонной дальности. В некоторых алгоритмах фокусировки эту паразитную модуляцию просто игнорируют, в других – устраняют при вторичном сжатии по дальности, которое можно выполнить различными методами: на средней наклонной (целевой) дальности при средней доплеровской частоте (доплеровском центреиде); на средней наклонной дальности с учетом изменения доплеровской частоты; с учетом изменения доплеровской частоты и наклонной дальности.

В большинстве существующих алгоритмах фокусировки при вторичном сжатии по дальности принимается во внимание зависимость дополнительной модуляции только от доплеровской частоты и игнорируется зависимость от наклонной дальности, что приводит к компромиссу между точностью алгоритма и его вычислительной сложностью.

Сжатие РГГ по азимуту в основном производится согласованной фильтрацией в частотной области по азимуту. При этом сжатие РГГ по азимуту может производиться, как во временной, так и в частотной области. Данный способ обеспечивает высокую точность и одинаковую частоту дискретизации результирующего сигнала по азимуту во всех столбцах. Недостатком такого метода является необходимость обработки всей РГГ.

Для компенсации миграции дальности используют следующие методы:

- сдвиг и sinc-интерполяция в области дальность/доплеровская частота;
- ЛЧМ-масштабирование по дальности;
- преобразование Столта.

Отличительной особенностью устранения миграции дальности методом сдвига и sinc-интерполяции в области дальность/доплеровская частота является то, что все отклики на точечные цели, имеющие одинаковую наклонную дальность, но обозреваемые РСА в различные промежутки азимутального времени, группируются в один общий отклик. Это позволяет устранить миграцию дальности путем сдвига и передискретизации сигнала в строках РГГ. Передискретизация производится с помощью sinc-интерполяции с наименьшими фазовыми ошибками. Основное преимущество данного метода – возможность учесть зависимость всех параметров, определяющих миграцию дальности в зависимости от наклонной дальности. Увеличивая длину ядра sinc-интерполяции, можно повысить точность. Недостатком метода является большая (в несколько раз) вычислительная сложность по сравнению с другими методами.

ЛЧМ-масштабирование по дальности позволяет произвести фиксированный сдвиг строки РГГ посредством умножения ее спектра в частотной области на фазовую функцию, определяющую величину сдвига. Первоначально устраняют различия в миграции на разных наклонных дальностях, а затем устраняют среднюю миграцию. Достоинство данного метода – низкая вычислительная сложность, недостаток – трудность учета зависимости эквивалентной линейной скорости РСА от дальности при ЛЧМ-масштабировании и коррекции фазы.

Еще один метод компенсации миграции дальности – преобразование Столта – был получен с использованием подхода волновых уравнений. Интерполяция Столта выполняет дифференциальную компенсацию миграции, дифференциальное вторичное сжатие по дальности и дифференциальное азимутальное сжатие. Интерполяция реализует оригинальное отображение, которое можно рассматривать как изменение переменных в частотной области. Ось частот пересчитывается или сопоставляется с новой осью, так что в двумерном спектре остается только линейная фаза. Достоинство метода – возможность одновременного устранения миграции, сжатия по дальности и азимуту. Недостатком метода является то, что он опирается на постоянную эквивалентную линейную скорость. Для РСА спутника скорость меняется в зависимости от дальности, поэтому результирующие ошибки должны анализироваться в каждом конкретном случае, особенно когда требуется высокое разрешение изображения.

На рассмотренных выше методах сжатия по дальности, коррекции миграции дальности, сжатия по азимуту основаны современные алгоритмы фокусировки, предназначенные для первичной обработки данных РСА: алгоритм со сжатием по дальности RD (англ. Range Doppler) и его модификация – алгоритм с вторичным сжатием по дальности RDA (англ. Range Doppler Algorithm); алгоритм ЛЧМ-масштабирования CSA (англ. Chirp Scaling algorithm) и его модификация – алгоритм расширенного ЛЧМ-масштабирования ECS (англ. Extended Chirp Scaling; алгоритм миграции дальности RMA (англ. Range Migration algorithm) или  $\omega$ -К алгоритм.

Суть алгоритмов RD и RDA заключается в использовании метода быстрого преобразования Фурье (БПФ), с помощью которого получают спектр входного сигнала. Полученный спектр умножают на спектр опорной функции (сжатие по дальности) и выполняют операцию обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ) [2].

RD алгоритм формирования РЛИ представляет собой алгоритм быстрой свертки с компенсацией миграции дальности методом sinc-интерполяции, который позволяет получить сфокусированное комплексное изображение. Для сжатия по азимуту используется согласованная фильтрация в частотной области по азимуту. Изменение доплеровской частоты зависит от дальности, поэтому для каждого столбца РГГ применяется отдельный фильтр. Для компенсации миграции дальности массив сжатых по дальности данных преобразуют в координаты дальность/доплеровская частота и складывают каждый столбец массива данных с соответствующим смещением частоты и выполняют коррекцию миграции ячеек диапазона RCMC (англ. Range Cell Migration Correction). Алгоритм RDA представляет собой модифицированный RD алгоритм, в котором для получения возможности обработки широкоапертурных РГГ или при значительных углах отклонения от строго бокового обзора выполняют специальную операцию – вторичное сжатие по дальности в двумерной частотной области [3]. При небольших углах отклонения от строго бокового обзора целесообразно применять алгоритм RD, в противном случае эффективен алгоритм RDA со вторичным сжатием по дальности.

Алгоритмы CSA и ECS разработаны на основе выравнивания кривизны (миграции дальности) в двумерной частотной области таким образом, чтобы иметь конгруэнтные траектории миграции диапазона. Это достигается последовательным применением БПФ по азимуту, умножением полученного спектра на ЛЧМ-опору (ЛЧМ-масштабирование), БПФ по дальности, умножением на фазовую функцию (коррекция средней миграции дальности) и последующими ОБПФ по дальности с коррекцией фазы, искаженной при ЛЧМ-масштабировании, и ОБПФ по азимуту [4,5]. Алгоритм CSA заменяет интерполятор миграции дальности в RDA более точным фазовым умножением. Первая фазовая функция – требуемый коэффициент масштабирования ЛЧМ:

$$\Phi_1(\tau, f; r_{\text{ref}}) = \exp\{-j\pi K_s(f; r_{\text{ref}}) C_s(f) [\tau - \tau_{\text{ref}}(f)]^2\}, \quad (1)$$

где  $\tau$  – длительность зондирующего импульса;  
 $f$  – частота следования зондирующих импульсов;  
 $r_{\text{ref}}$  – опорная дальность;  
 $K_s(f; r_{\text{ref}})$  – эффективный коэффициент ЧМ импульсного сигнала;  
 $C_s(f)$  – коэффициент кривизны;  
 $\tau_{\text{ref}}(f)$  – временной интервал для опорной дальности.

Эффективный коэффициент ЧМ импульсного сигнала:

$$K_s(f; r) = \frac{K}{1 + Kr \frac{2\lambda \left(\frac{\lambda f}{2V(r)}\right)^2}{c^2 \left[1 - \left(\frac{\lambda f}{2V(r)}\right)^2\right]^{3/2}}}, \quad (2)$$

где  $K$  – коэффициент линейной частотной модуляции;  
 $r$  – дальность;

$\lambda$  – длина волны радиолокатора;  
 $c$  – скорость света;  
 $V(r)$  – параметр пропорциональности относительной скорости между отражателем (целью) и радаром, масштабированный для учета искривленной орбиты, а также кривизны и вращения Земли.

Коэффициент кривизны:

$$C_s(f) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f}{2V(r)}\right)^2}} - 1. \quad (3)$$

Временной интервал для опорной дальности:

$$\tau_{\text{ref}}(f) = \frac{2}{c} r_{\text{ref}} [C_s(f)]. \quad (4)$$

CSA реализует вторичное сжатие по дальности с фазовым умножением в двумерной частотной области:

$$\Phi_2(f_r, f; r_{\text{ref}}) = \exp\left\{-j\pi \frac{f_r^2}{K_s(f; r_{\text{ref}})[1+C_s(f)]}\right\} \cdot \exp\left\{j \frac{4\pi}{c} f_r r_{\text{ref}} C_s(f)\right\}. \quad (5)$$

Первый множитель  $\exp\left\{-j\pi \frac{f_r^2}{K_s(f; r_{\text{ref}})[1+C_s(f)]}\right\}$  – это фокусировка по дальности, включая вторичное сжатие по дальности. Смещение частоты RCMC (англ. Range Cell Migration Correction) выполняется вторым множителем  $\exp\left\{j \frac{4\pi}{c} f_r r_{\text{ref}} C_s(f)\right\}$  и корректирует доминирующие эффекты кривизны дальности в геометрии спутникового SAR, так называемое «объемное» RCMC.

Алгоритм ECS расширенного ЛЧМ-масштабирования разработан для обработки бортовых данных с сильными ошибками движения и с переменным доплеровским центроидом по дальности и/или азимуту [5].

Алгоритм RMA предполагает первоначальное преобразование данных сигнала в двумерную частотную область. Вторым этапом фокусировки является умножение на опорную функцию, рассчитанную для выбранной дальности. Если уравнение дальности предполагает гиперболическую форму, то результирующая фаза от точечной цели равна:

$$\Theta(f_r, f_\eta) = -\frac{4\pi r_{\text{ref}}}{c} \sqrt{(f_0 + f_r)^2 - \frac{c^2 f_\eta^2}{4V_r^2}} + \frac{\pi f_r^2}{K_r}, \quad (6)$$

где  $f_r, f_\eta$  – частота по дальности и азимуту соответственно;

$f_0$  – центральная частота радара;

$V_r$  – эффективная скорость радара;

$K_r$  – частота ЧМ линейного ЛЧМ-сигнала.

Данную операцию можно рассматривать как «объемное сжатие». Третьим этапом фокусировки является интерполяция (преобразование) Столта, которая завершает фокусировку целей вне контрольного диапазона дальности. Для достижения идеального сжатия по дальности интерполяция Столта преобразует исходную переменную частоты дальности  $f_r$  в новую переменную  $f_r'$ :

$$\sqrt{(f_0 + f_r)^2 - \frac{c^2 f_\eta^2}{4V_r^2}} = f_0 + f_r'. \quad (7)$$

Наконец, выполняется двумерный ОБПФ для преобразования данных обратно во временную область, то есть в область изображений [6].

Таким образом, несмотря на разнообразие алгоритмов фокусировки РГГ и их модификаций, каждый из них имеет ряд ограничений при использовании. Алгоритмы RD и RDA получили большее распространение, благодаря простоте реализации; наибольшей гибкости и возможности получать высококачественные РЛИ даже при достаточно больших отклонениях от строго бокового обзора.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Верба, В.С. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В.С. Верба [и др.]; под ред. В.С. Верба. – М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.: ил.
2. Ушенкин, В.А. Анализ алгоритмов фокусировки радиоголограмм от космического радиолокатора с синтезированной апертурой антенны // Информатика и прикладная математика: межвузовский сборник научных трудов. – 2014 г. – № 20. – с. 95-100.

3. Po-Chih Chen, Jean-Fu Kiang. An Improved Range-Doppler Algorithm for SAR Imaging at High Squint Angles. Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 53, p. 41–52, 2017.
4. R. K. Raney, H. Runge, R. Bamler, I. G. Cumming, F. H. Wong. Precision SAR Processing Using Chirp Scaling. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 32(4):786-799, July 1994.
5. Y. Yuan, S. Chen, S. Zhang, H. Zhao. A chirp scaling algorithm for forward-looking linear-array SAR with constant acceleration. IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 2018, 15, p. 88–91.
6. I. G. Cumming, Y. L. Neo, F. H. Wong. Interpretations of the Omega-K Algorithm and Comparisons with other Algorithms. In Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'03, Toulouse, July 21–25, 2003.