

УДК 004.021

**СРАВНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЛОЖНОСТИ АЛГОРИТМОВ ФОКУСИРОВКИ  
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ****Т.Н. ДРОВОСЕКОВА***(Представлено: канд. техн. наук, доц. Р.П. Бозуш)*

*Современные системы дистанционного зондирования Земли предполагают возможность построения радиолокационного изображения на борту космического аппарата с использованием специальных алгоритмов фокусировки, которые обладают различными качественными характеристиками. В данной статье представлен сравнительный анализ вычислительной сложности наиболее известных и применяемых алгоритмов фокусировки.*

Среди известных методов дистанционного зондирования Земли, современные системы на основе радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны (РСА) позволяют получать радиолокационные изображения (РЛИ) местности с высоким качеством в любых метеоусловиях и в любое время суток [1]. При этом первичная обработка сигналов реализуется на устройствах, которые установлены на космических аппаратах. Поэтому одним из важных требований к алгоритмам первичной обработки сигналов является удовлетворительное быстродействие. Процесс формирования РЛИ называется фокусировкой радиоголограммы и выполняется на этапе первичной обработки радиолокационных данных и состоит из трех основных шагов: сжатие по дальности, компенсация миграции дальности и сжатие по азимуту [1, 2]. При сравнении алгоритмов фокусировки РЛИ по вычислительной сложности объем входных данных должен быть одинаков для каждого алгоритма и иметь размер  $Na \times Nr$ , где  $Na$  – размер полученной радиоголограммы (РГГ) по азимуту,  $Nr$  – размер РГГ по дальности. В результате фокусировки получаемое РЛИ также должно иметь соразмерные характеристики.

Важным параметром при оценке эффективности работы алгоритмов является быстродействие, поэтому оценку вычислительной сложности алгоритмов фокусировки РЛИ будем выполнять с точки зрения количества операций с плавающей запятой (FLOP). Каждый FLOP может быть либо реальным умножением, либо реальным сложением. Комплексное умножение чисел с плавающей запятой требует  $6NrNa$  операций. При выполнении быстрого преобразования Фурье (БПФ) или обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ) необходимо выполнить  $5NrNa \log_2 Nr/a$  операций (в зависимости от преобразования по дальности или азимуту). Интерполяции различного типа (sinc-, Лагранжа, Столта) имеют сложность  $2(Mken - 1)NaNr$ , где  $Mken$  – длина ядра интерполяции [2].

Для первичной обработки данных РСА применяют алгоритмы: алгоритм со сжатием по дальности RD (англ. Range Doppler), алгоритм ЛЧМ-масштабирования CSA (англ. Chirp Scaling algorithm), алгоритм миграции дальности RMA (англ. Range Migration algorithm), а также их модификации: алгоритм с вторичным сжатием по дальности RDA (англ. Range Doppler Algorithm), алгоритм расширенного ЛЧМ-масштабирования ECS (англ. Extended Chirp Scaling).

Суть RD алгоритма [3] заключается в следующем: с использованием метода БПФ получают спектр входного сигнала, полученный спектр умножают на спектр опорной функции (сжатие по дальности) и выполняют ОБПФ. Для компенсации миграции дальности массив сжатых по дальности данных преобразуют в координаты дальность/доплеровская частота методом sinc-интерполяции и складывают каждый столбец массива данных с соответствующим смещением частоты (RCMC – Range Cell Migration Correction). Для сжатия РГГ по азимуту используется согласованная фильтрация в частотной области. Для этого выполняют БПФ по азимуту, затем путем перемножения спектров сигнала и фильтра выполняют согласованную фильтрацию в частотной области по азимуту и вновь выполняют ОБПФ. Изменение доплеровской частоты зависит от дальности, поэтому для каждого столбца РГГ применяется отдельный фильтр.

Вычислительная сложность БПФ и ОБПФ по дальности составляет  $5NaNr \log_2 Nr$  операций соответственно, аналогично вычислительная сложность БПФ и ОБПФ по азимуту составляет  $5NaNr \log_2 Na$  операций соответственно, при сжатии по дальности и по азимуту необходимо выполнить  $6NaNr$  операций на каждую итерацию, при коррекции миграции дальности выполняется  $18NaNr + 2(Mken_L - 1)NaNr$  операций, где  $Mken_L$  – длина ядра интерполяции Лагранжа.

Алгоритм RDA [4] представляет собой модифицированный RD алгоритм, в котором для получения возможности обработки широкоапертурных РГГ или при значительных углах отклонения от строго бокового обзора выполняют дополнительную операцию вторичного сжатия по дальности в двумерной частотной области. Вследствие этого вычислительная сложность алгоритма RDA увеличивается на  $6NaNr$  операций. Применение алгоритма RDA для системы COSMO-SkyMed показано в работе [5]. При небольших углах отклонения от строго бокового обзора целесообразно применять алгоритм RD, в противном случае эффективен алгоритм RDA со вторичным сжатием по дальности.

Алгоритм CSA [4] разработан на основе выравнивания кривизны (миграции дальности) в двумерной частотной области таким образом, чтобы иметь конгруэнтные траектории миграции дальности диапазона.

Это достигается последовательным применением БПФ по азимуту, умножением полученного спектра на ЛЧМ-опору (ЛЧМ-масштабирование) для устранения миграции дальности, БПФ по дальности, сжатием по дальности, вторичным сжатием 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.

Вычислительную сложность алгоритма CSA можно оценить как сумму операций при БПФ и ОБПФ по дальности –  $5N_a N_r \log_2 N_r$  операций соответственно, при БПФ и ОБПФ по азимуту – также  $5N_a N_r \log_2 N_a$  операций соответственно. При сжатии по дальности, вторичном сжатии с коррекцией средней миграции дальности выполняется  $6N_a N_r$  операций, при сжатии по азимуту с коррекцией фазы –  $6N_a N_r$  операций.

Алгоритм ECS, как модификация алгоритма CSA, устраняет различия в скорости изменения доплеровской частоты, что приводит к улучшению качества обработки РЛИ, однако при этом его вычислительная сложность увеличивается на  $6N_a N_r$  операций.

Алгоритм RMA предполагает первоначальное преобразование данных сигнала в двумерную частотную область. Вторым шагом фокусировки является умножение на опорную функцию, рассчитанную для выбранной дальности и «объемное сжатие» – среднее сжатие по азимуту, сжатие по дальности и коррекция средней миграции. Третьим этапом фокусировки является интерполяция (преобразование) Столта, которая завершает фокусировку целей вне контрольного диапазона дальности. Далее выполняется двумерный ОБПФ для преобразования данных обратно во временную область, то есть в область изображений [3].

Вычислительная сложность алгоритма RMA составляет по  $5N_a N_r \log_2 N_a$  при выполнении двумерного БПФ и  $5N_a N_r \log_2 N_r$  операций при выполнении двумерного ОБПФ, при «объемном сжатии» выполняется  $24N_a N_r + 2(M_{ken\_L} - 1)N_a N_r$  операций, при интерполяции Столта –  $2(M_{ken\_S} - 1)N_a N_r$  операций, где  $M_{ken\_S}$  – длина ядра интерполяции Столта.

Итоговые результаты оценки вычислительной сложности рассмотренных алгоритмов представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Оценка вычислительной сложности алгоритмов фокусировки

Алгоритм	Вычислительная сложность, FLOP
RD	$10N_a N_r \log_2 N_a + 10N_a N_r \log_2 N_r + 30N_a N_r + 2(M_{ken\_L} - 1)N_a N_r$
RDA	$10N_a N_r \log_2 N_a + 10N_a N_r \log_2 N_r + 36N_a N_r + 2(M_{ken\_L} - 1)N_a N_r$
CSA	$10N_a N_r \log_2 N_a + 10N_a N_r \log_2 N_r + 18N_a N_r$
ECS	$10N_a N_r \log_2 N_a + 10N_a N_r \log_2 N_r + 24N_a N_r$
RMA	$10N_a N_r \log_2 N_a + 10N_a N_r \log_2 N_r + 24N_a N_r + 2(M_{ken\_L} - 1)N_a N_r + 2(M_{ken\_S} - 1)N_a N_r$

Как видно из таблицы наименьшей вычислительной сложностью обладает алгоритм CSA, при этом он обеспечивает высокое качество первичной обработки данных РСА в условиях, когда отклонения от строго бокового обзора (при котором доплеровский центроид равен нулю) невелики. Если данные условия не выполняются, то возникают отклонения закона изменения доплеровской частоты от линейного и зависимость доплеровского центроида от дальности. Так как в алгоритмах CSA и ECS эти факты не учитываются, то это может привести к снижению качества синтезируемых РЛИ.

Алгоритмы RD и RDA обладают наибольшей гибкостью и позволяют получать высококачественные РЛИ даже при достаточно больших отклонениях от строго бокового обзора. Однако требуют большего количества операций с плавающей точкой, чем алгоритмы CSA и ECS.

Алгоритм RMA является точным, даже если апертура очень широка или имеется значительное отклонение радара от строго бокового обзора, однако интерполяция Столта требует значительного количества математических операций.

## 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. Моделирование алгоритма формирования радиолокационного изображения на основе представленных в формате SEOS необработанных данных дистанционного зондирования Земли / Р.П. Богущ, С.А. Игнатьева, Н.М. Наумович, С.П. Урбанович // Вестник Полоцкого государственного университета, серия С. Фундаментальные науки. – 2016 г. – №12. – с. 13-21.
3. 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.
4. Ушенкин, В.А. Анализ алгоритмов фокусировки радиолограмм от космического радиолокатора с синтезированной апертурой антенны // Информатика и прикладная математика: межвузовский сборник научных трудов. – 2014 г. № 20. – с. 95-100.
5. Адамовский, Е.Р. Фокусировка радиолокационных данных системы COSMO-SkyMed и формирование продукта уровня 1А с представлением в HDF5// Е.Р. Адамовский, Р.П. Богущ, Н.М. Наумович/ Информатика и космос. – 2021 г. – № 2. – с.76-87.