

УДК 004.932

ОЦЕНИВАНИЕ ДОПЛЕРОВСКОГО ЦЕНТРОИДА ПРИ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКЕ КОСМИЧЕСКИХ РАДИОГОЛОГРАММ МАРШРУТНОГО РЕЖИМА СЪЕМКИ ПУТЕМ АМПЛИТУДНОГО АНАЛИЗА

Ушенкин В.А., в.н.с. НИИ «Фотон» РГРТУ, к.т.н., foton@rsreu.ru

DOPPLER CENTROID ESTIMATION IN PRIMARY PROCESSING OF SPACEBORNE STRIPMAP SAR RAW DATA BY AMPLITUDE ANALYSIS

Ushenkin V.A.

The paper proposes a new algorithm for high-precision Doppler centroid estimation from spaceborne StripMap synthetic aperture radar (SAR) data, based on amplitude analysis of images, obtained from raw data, divided into two non-overlapping subapertures (two looks). The estimation includes two aspects, which are the baseband Doppler centroid evaluation (within the pulse repeat rate) and the Doppler ambiguity evaluation. High accuracy of the baseband Doppler centroid estimates is achieved by analyzing the amplitude azimuthal spectrum not of the raw data, but of the images obtained from it, in which the impulse responses cease to be spatially widespread and become compact. The amplitude azimuthal spectrum analysis is performed independently in a set of non-overlapping small fragments that form one large fragment of the image, with subsequent weighted averaging of the obtained estimates within the large fragment. Higher accuracy of the Doppler ambiguity estimates is achieved due to a more precise mathematical model for recalculating range mismatch of the images obtained from two looks into Doppler corrections, which takes into account previously found corrections to the baseband Doppler centroid and the azimuthal SAR antenna pattern. The paper presents the results of the proposed algorithm obtained by processing the COSMO-SkyMed satellite data. It is shown that due to the higher accuracy of the proposed algorithm in most cases it is possible to reduce the number of iterations of raw data processing and evaluation of its parameters by 1–2 to obtain accurate estimates of the Doppler centroid. In addition, unlike the known amplitude algorithms, the proposed algorithm stably allows estimating the Doppler centroid when the baseband Doppler centroid error is close to the half of the pulse repeat rate.

Key words: Doppler centroid, Doppler ambiguity, synthetic aperture radar (SAR), raw SAR data, satellite, primary processing.

Ключевые слова: доплеровский центроид, доплеровская неопределенность, радиолокатор с синтезированной апертурой антенны, радиоголограмма, космический аппарат, первичная обработка.

Введение

При первичной обработке информации от РСА космического базирования выполняется синтез радиолокационного изображения из траекторного сигнала РСА – радиоголограммы [1–3]. Одним из параметров синтеза является доплеровский центроид – значение доплеровского сдвига частоты эхо-сигналов, соответствующее центру диаграммы направленности антенны РСА. Для расчета значения доплеровского центроида требуется знание угловой ориентации космического аппарата и углов установки антенны РСА на космический аппарат. Угловая ориентация космического аппарата [4] обычно измеряется с помощью блоков определения координат звезд (БОКЗ). Один БОКЗ обеспечивает высокую точность измерения направления своей оптической оси и более низкую точность измерения поворота вокруг этой оси. Поэтому для получения высокой точности всех углов Эйлера необходима работа нескольких БОКЗ, установленных на КА под углом друг к другу [5]. В ходе эксплуатации кос-

Предлагается новый алгоритм высокоточного оценивания доплеровского центроида по данным, полученным радиолокаторами с синтезированной апертурой антенны (РСА) космического базирования в маршрутном режиме съемки, на основе амплитудного анализа изображений, синтезированных из радиоголограммы по двум неперекрывающимся субапертурам. Оценивание включает два аспекта: оценивание относительного значения доплеровского центроида (в пределах частоты повторения зондирующих импульсов) и оценивание доплеровской неопределенности (неоднозначности). Высокая точность оценок относительного значения доплеровского центроида достигается за счет анализа амплитудного азимутального спектра сигнала не радиоголограммы, а синтезированных из нее изображений, на которых импульсные отклики перестают быть пространственно протяженными и становятся компактными. Анализ амплитудного азимутального спектра при этом выполняется независимо во множестве непересекающихся малых фрагментов, образующих один большой фрагмент изображения, с последующим усреднением полученных оценок в пределах большого фрагмента. Более высокая точность оценок доплеровской неопределенности достигается за счет более строгой математической модели пересчета геометрических рассогласований изображений, синтезированных по двум неперекрывающимся субапертурам, в доплеровские поправки, учитывающей найденные ранее поправки к относительному значению доплеровского центроида и азимутальную диаграмму направленности антенны РСА. В работе приводятся результаты предложенного алгоритма, полученные при обработке данных от зарубежного радиолокационного космического аппарата «COSMO-SkyMed». Показано, что за счет более высокой точности предложенного алгоритма в большинстве случаев удается на 1–2 сократить число итераций синтеза изображения и оценивания его параметров для получения точных оценок доплеровского центроида. Кроме того, в отличие от известных амплитудных алгоритмов, предложенный алгоритм стабильно позволяет выполнить оценивание доплеровского центроида, когда ошибка знания его относительного значения близка к половине частоты повторения зондирующих импульсов.

мического аппарата отдельные БОКЗ могут выходить из строя, из-за чего точность измерений угловой ориентации, а соответственно и точность расчетов доплеровского центроида будет снижаться, оказывая негативный эффект на качество изображений, синтезируемых из радиоголограмм. Кроме того, космический аппарат в ходе вывода на орбиту подвергается существенным деформациям, из-за чего изменяются углы установки антенны РСА, измеренные в наземных условиях. Наконец, в ходе дальнейшей эксплуатации могут проявляться деформации, связанные с температурной нестабильностью. Все это негативно отражается на точности расчетов доплеровского центроида. Таким образом, помимо аналитического расчета на основе измерений угловой ориентации и установочных углов, необходимо иметь альтернативные способы оценивания доплеровского центроида, которые должны применяться при недостаточной точности измерений БОКЗ или при уточнении установочных углов в ходе геометрической калибровки космического аппарата [6].

Таким альтернативным способом является оценивание доплеровского центроида путем анализа сигнала радиоголограммы. При этом абсолютное значение доплеровского центроида $f_{\text{дц}}$ декомпозируется на относительное значение и доплеровскую неопределенность:

$$f_{\text{дц}} = f_{\text{дц отн}} + M_{\text{дц}} f_{\text{имп}},$$

где $f_{\text{дц отн}} \in [-f_{\text{имп}}/2, f_{\text{имп}}/2]$ – относительное значение, $f_{\text{имп}}$ – частота повторения зондирующих импульсов, $M_{\text{дц}} \in Z$ – доплеровская неопределенность, Z – множество целых чисел.

Относительное значение доплеровского центроида и доплеровская неопределенность оцениваются отдельно с помощью различных алгоритмов.

Известно несколько алгоритмов оценки относительного значения доплеровского центроида по сигналу радиоголограммы. В амплитудном алгоритме [7, 8] выполняется анализ усредненного амплитудного азимутального спектра фрагмента радиоголограммы и находится точка его максимума. В фазовом алгоритме [8, 9] оценивается средний набег фазы комплексного сигнала вдоль столбца в пределах фрагмента радиоголограммы. Основным недостатком обоих алгоритмов является снижение точности получаемых оценок, когда в анализированный фрагмент входит только часть импульсного отклика на сверхъяркий объект. Из-за пространственной протяженности импульсных откликов на радиоголограмме (в пределах нескольких тысяч пикселей по каждому измерению) такие случаи встречаются часто, а выявление их затруднено.

Для устранения негативного влияния пространственно протяженных импульсных откликов оценка относительного значения доплеровского центроида может выполняться по сигналу не радиоголограммы, а синтезированного из нее изображения, на котором импульсные отклики становятся компактными. При этом могут применяться те же самые алгоритмы, что и для радиоголограммы [10].

В задаче оценивания доплеровской неопределенности

по сигналу радиоголограммы также известно несколько различных алгоритмов. Фазовые алгоритмы [8, 11, 12] используют зависимость абсолютного значения доплеровского центроида от несущей частоты зондирующих импульсов. Для этого широкополосный эхо-сигнал разделяется на несколько узкополосных, из каждого из которых получается своя радиоголограмма со смещенной несущей частотой. Для каждой радиоголограммы с помощью фазового подхода оценивается относительное значение доплеровского центроида, а вариация значений оценок, полученных для различных смещенных по несущей частоте радиоголограмм, пересчитывается в доплеровскую неопределенность. Недостаток фазовых алгоритмов – погрешности оценивания относительных значений доплеровского центроида, вызванные протяженностью импульсных откликов, приводят к искажению получаемых оценок доплеровской неопределенности.

Известен также амплитудный алгоритм оценивания доплеровской неопределенности [8, 13]. В нем полная апертура (полоса доплеровских частот) разбивается на две неперекрывающиеся субапертуры, по каждой из которых синтезируется радиолокационное изображение со сниженным азимутальным пространственным разрешением. В основу определения доплеровской неопределенности положена зависимость величины миграции сигнала по каналам дальности от доплеровского сдвига. Если при синтезе изображений использовалось правильное значение доплеровского центроида, то в обеих субапертурах миграция дальности полностью устраняется, а геометрические рассогласования между двумя изображениями отсутствуют. Если же при синтезе изображений использовалось неправильное значение доплеровской неопределенности, то в одной из субапертур миграция дальности устраивается недостаточно, а в другой – избыточно. Из-за этого возникает горизонтальное смещение двух изображений, тем большее, чем больше ошибка в доплеровской неопределенности. Путем корреляционно-экстремального совмещения изображений это смещение может быть найдено и пересчитано в поправку к доплеровской неопределенности. Основное достоинство данного алгоритма – в отсутствие изначальной ошибки в значении доплеровского центроида изображения, синтезированные по субапертурам, получаются качественными, достаточно легко коррелируются друг с другом в случае радиометрически неоднородного сюжета и позволяют правильно получить оклонулевые поправки. При большой изначальной ошибке из-за деградации качества синтезированных изображений точность получаемых поправок снижается, но имеется возможность итерационного уточнения доплеровской неопределенности, позволяющая после выполнения нескольких итераций прийти к достаточно точным значениям. Недостатком алгоритма является достаточно грубая математическая модель пересчета геометрических рассогласований изображений в поправку к доплеровской неопределенности, из-за которой для получения точных значений требуется выполнить значительное количество итераций алгоритма, а в отдельных редких случаях оценивание доплеровской неопределенности становится невозможным.

Цель работы – добиться высокой точности оценивания обеих составляющих доплеровского центроида при умеренном объеме вычислений. Для этого предлагается выполнять оценку относительного значения доплеровского центроида одновременно с оценкой доплеровской неопределенности, анализируя сигнал двух изображений, синтезированных из радиоголограммы по субапертурам, а также уточнить математическую модель пересчета геометрических рассогласований изображений, синтезированных по субапертурам, в поправку к доплеровской неопределенности с целью сокращения количества итераций оценивания и сокращения числа случаев, когда оценивание выполнить не удается.

Оценивание относительного значения доплеровского центроида

Для сокращения объема вычислений оценивание относительного значения доплеровского центроида можно выполнить по тем же данным, что и оценивание доплеровской неопределенности: по паре комплексных радиолокационных изображений, синтезированных из радиоголограммы по двум неперекрывающимся субапертурам, каждая из которых составляет половину доплеровского спектра. При этом в процессе синтеза изображений не должна выполняться аподизация азимутального спектра. За счет линейности дискретного преобразования Фурье сумма комплексных сигналов этих двух изображений эквивалентна сигналу комплексного изображения, синтезированного по полной апертуре. Центральная частота сигнала вдоль столбца изображения дает оценку относительного значения доплеровского центроида.

Для нахождения азимутального спектра с высоким отношением сигнал-шум суммируются сигналы во всех столбцах фрагмента суммарного комплексного изображения, а затем применяется дискретное преобразование Фурье.

Для нахождения центральной частоты в [8] предлагается свернуть амплитудный спектр с производной треугольной функции с шириной основания, соответствующей полосе доплеровских частот, и найти точку, в которой результат свертки обращается в ноль с отрицательным наклоном. Вместо производной треугольной функции может также использоваться производная квадрата азимутальной диаграммы направленности антенны (ДНА) РСА.

Однако для нахождения центральной частоты можно применить и более быстрый алгоритм, который обеспечит эквивалентный результат в случае симметричного спектра. Для этого необходимо перейти в полярную систему координат и представить каждый отсчет амплитудного спектра в виде вектора, длина которого определяется интенсивностью отсчета, а направление – доплеровской частотой. Направление суммы таких векторов даст центральную частоту. Наиболее удобно описанные вычисления реализуются с помощью аппарата комплексных чисел:

$$f_{\text{дц отн}} = \frac{f_{\text{имп}}}{2\pi} \arg \sum_i A(f_i) \exp\left(j \cdot 2\pi \frac{f_i}{f_{\text{имп}}}\right),$$

где $A(f)$ – амплитудный азимутальный спектр, j – мнимая единица, $f_i \in [-f_{\text{имп}}/2, f_{\text{имп}}/2]$ – частоты отсчетов азимутального спектра.

В алгоритмах оценки относительного значения доплеровского центроида, работающих по радиоголограмме, одна оценка получается в результате анализа суммарного амплитудного азимутального спектра достаточно большого квадратного фрагмента с размером стороны квадрата в несколько сотен пикселей. Однако проведенные экспериментальные исследования показали, что за счет компактности импульсных откликов на синтезированном изображении, относительно точные оценки можно получать при размерах стороны фрагмента в несколько десятков пикселей. Более того, выяснилось, что если большой фрагмент изображения разделить на не пересекающиеся малые фрагменты, в каждом из них выполнить анализ амплитудного азимутального спектра, а затем полученные оценки $f_{\text{дц отн}}$ усреднить с весами, пропорциональными сумме отсчетов амплитудного спектра малого фрагмента, то результат такого усреднения получается в среднем более точным, чем оценка $f_{\text{дц отн}}$, полученная по спектру всего большого фрагмента. Так при размере стороны большого фрагмента, составляющем 1024 пикселя, среднеквадратичное отклонение оценок $f_{\text{дц отн}}$ от полинома малой степени, аппроксимирующего их вариации по полю изображения от космического аппарата «COSMO-SkyMed», составило 0,58 % от величины $f_{\text{имп}}$. Если же каждый большой фрагмент разделить на малые фрагменты размером 32x32 пикселя, то среднеквадратичное отклонение снижается до 0,29 % от величины $f_{\text{имп}}$.

Таким образом, наиболее точная оценка относительного значения доплеровского центроида получается как

$$\begin{aligned} f_{\text{дц отн}} &= \frac{f_{\text{имп}}}{2\pi} \arg \sum_k \sum_i A_k(f_i) \exp\left(j \cdot 2\pi \frac{f_i}{f_{\text{имп}}}\right) = \\ &= \frac{f_{\text{имп}}}{2\pi} \arg \sum_i \exp\left(j \cdot 2\pi \frac{f_i}{f_{\text{имп}}}\right) \sum_k A_k(f_i), \end{aligned} \quad (1)$$

где $A_k(f)$ – амплитудный азимутальный спектр k -го малого фрагмента.

Из (1) видно, что такое оценивание эквивалентно анализу суммы азимутальных амплитудных спектров, построенных по малым фрагментам, на которые разделен большой фрагмент изображения. Суммирование амплитудных спектров можно считать неким аналогом некогерентного накопления, позволяющим снизить влияние шумов.

Точности оценок $f_{\text{дц отн}}$ порядка 0,3 % от величины $f_{\text{имп}}$ достаточно как для качественного синтеза изображения из радиоголограммы, так и для геометрической калибровки космического аппарата. Однако такая точность достигается лишь при следующих условиях:

- 1) наблюдаемые объекты в пределах анализируемого фрагмента изображения должны быть неподвижны относительно земной поверхности;
- 2) на фрагменте изображения должно быть высокое

отношение сигнал-шум;

3) изображение должно быть качественно синтезировано из радиоголограммы.

Для выполнения первых двух условий необходимо исключать из оценки водную поверхность, радиотени, пески и прочие темные малоконтрастные объекты. Последнее условие выполняется по окончании итерационной схемы последовательного уточнения значений доплеровского центроида.

Оценивание доплеровской неопределенности

В основу оценивания доплеровской неопределенности положен амплитудный алгоритм, анализирующий смещение по наклонной дальности изображений, синтезированных из радиоголограммы по двум субапертурам [8, 13]. В классическом амплитудном алгоритме [8, 13] предполагается, что смещение по дальности лишь линейно зависит от ошибки знания доплеровской неопределенности. Однако, как показывает практика, это спрашивливо лишь тогда, когда отсутствует ошибка знания относительного значения доплеровского центроида. Поэтому в случае существенных ошибок знания $f_{\text{дц отн}}$ получаются искаженные оценки доплеровской неопределенности, что увеличивает число итераций последовательного уточнения доплеровских параметров, а иногда в принципе не позволяет оценить доплеровскую неопределенность. Рассмотрим более подробно, что происходит с изображениями, синтезированными по двум неперекрывающимся апертурам, в обоих случаях.

Зависимость миграции по каналам дальности от доплеровской частоты f может быть приближенно записана в виде:

$$\Delta R(f) \approx \frac{c^2 R_\perp f^2}{8 f_0^2 V_{\text{лз}}^2}, \quad (2)$$

где R_\perp – дальность на траверзе, f – рабочая частота РСА, c – скорость света в вакууме, $V_{\text{лз}}$ – линейная эквивалентная скорость (параметр аппроксимации реального движения РСА относительно наблюдаемых объектов прямолинейным равномерным движением) [2, 8].

Аппроксимация (2) обладает высокой точностью при малых доплеровских сдвигах, но с увеличением доплеровской частоты точность (2) снижается. Тем не менее, даже при сдвигах частоты в несколько десятков килогерц относительная погрешность аппроксимации (2) составляет лишь единицы процентов, чего достаточно для оценки доплеровской неопределенности.

Пусть ошибка знания $f_{\text{дц отн}}$ нулевая, но имеется ошибка $\Delta M_{\text{дц}}$ знания доплеровской неопределенности. В этом случае полная апертура корректно разбивается на две субапертуры относительно $f_{\text{дц отн}}$. При симметричной диаграмме направленности антенны средневзвешенные доплеровские частоты двух синтезированных изображений смешены на одинаковую величину $Kf_{\text{имп}}$ относительно как имеющейся оценки абсолютного значения доплеровского центроида $\tilde{f}_{\text{дц}}$, так и истинного значения $f_{\text{дц}}$. Таким образом, дальности одного и

того же объекта на двух синтезированных изображениях будут равняться:

$$R_1 = R_\perp + \Delta R(f_{\text{дц}} - Kf_{\text{имп}}) - \Delta R(\tilde{f}_{\text{дц}} - Kf_{\text{имп}}) = \\ = R_\perp + \Delta R(\tilde{f}_{\text{дц}} + \Delta M_{\text{дц}} f_{\text{имп}} - Kf_{\text{имп}}) - \Delta R(\tilde{f}_{\text{дц}} - Kf_{\text{имп}}), \quad (3)$$

$$R_2 = R_\perp + \Delta R(f_{\text{дц}} + Kf_{\text{имп}}) - \Delta R(\tilde{f}_{\text{дц}} + Kf_{\text{имп}}) = \\ = R_\perp + \Delta R(\tilde{f}_{\text{дц}} + \Delta M_{\text{дц}} f_{\text{имп}} + Kf_{\text{имп}}) - \Delta R(\tilde{f}_{\text{дц}} + Kf_{\text{имп}}). \quad (4)$$

Прибавление ΔR в (3) и (4) соответствует истинной миграции дальности, а вычитание ΔR – ее устраниению в процессе синтеза изображения.

Вычтя (3) из (4) и подставив (2), получим линейную зависимость, применяемую в классическом амплитудном алгоритме [8, 13]:

$$R_2 - R_1 = \frac{Kf_{\text{имп}} c^2 R_\perp}{2 f_0^2 V_{\text{лз}}^2} \Delta M_{\text{дц}}.$$

Можно перейти от разницы наклонных дальностей к смещению двух изображений в пикселях Δx :

$$R_2 - R_1 = \frac{c}{2 f_{\text{дискр}}} \Delta x,$$

где $f_{\text{дискр}}$ – частота дискретизации сигнала в строке изображения.

Тогда поправка к доплеровской неопределенности выражается как

$$\Delta M_{\text{дц}} = \left[\frac{f_0^2 V_{\text{лз}}^2 \Delta x}{K f_{\text{имп}} c R_\perp f_{\text{дискр}}} \right],$$

где $[x]$ – операция округления до ближайшего целого.

В качестве коэффициента K в [8] предлагается брать значение 0,25, не учитывая взвешивание сигналов, смещенных по доплеровской частоте, квадратом ДНА. Однако, как показывает практика, из-за этого возникает относительная погрешность оценки $\Delta M_{\text{дц}}$ порядка 30 %, что при $\Delta M_{\text{дц}} \geq 2$ приводит к некорректной оценке и необходимости в еще как минимум одной итерации по ее уточнению.

В то же время, если азимутальная ДНА $W(f - f_{\text{дц}})$ известна, то коэффициент K может быть найден как

$$K = \frac{\int_0^{f_{\text{имп}}/2} f W^2(f) df}{\int_{f_{\text{имп}}/2}^0 W^2(f) df}. \quad (5)$$

Если азимутальная ДНА неизвестна, то в качестве аппроксимации ее квадрата может быть взята одна из стандартных оконных функций, например, обобщенное окно Хэмминга.

Расчет K с помощью (5) позволяет корректно оценивать даже большие значения $\Delta M_{\text{дц}}$, если получена точная оценка смещения изображений по дальности.

Теперь рассмотрим случай, когда при синтезе изображений имелась ненулевая ошибка $\Delta f_{\text{дц отн}} = (f_{\text{дц отн}} - \tilde{f}_{\text{дц отн}}) \bmod f_{\text{имп}}$, где $\Delta f_{\text{дц отн}} \in [-f_{\text{имп}}/2, f_{\text{имп}}/2]$,

$\tilde{f}_{\text{дц отн}}$ – значение, использованное при синтезе изображений. В этом случае разделение на субапертуры выполняется некорректно. Частоты в пределах одной из субапертур интерпретируются при синтезе в пределах одной зоны неоднозначности, а в другой субапертуре часть частот попадает в ту же зону неоднозначности, а часть – переносится в соседнюю зону. Это приводит к раздвоению сюжета на одном из изображений. Вертикальное смещение между двумя копиями сюжета, попавшими в разные зоны неоднозначности, определяется временем, за которое доплеровский сдвиг частоты изменяется на величину $f_{\text{имп}}$:

$$\Delta y = \frac{f_{\text{имп}}^2}{K_d},$$

где K_d – скорость изменения доплеровского сдвига частоты (доплеровская скорость).

Оценка значения $\Delta f_{\text{дц отн}}$ может быть получена в соответствии с алгоритмом, описанным в предыдущей части настоящей работы. Зная $\Delta f_{\text{дц отн}}$, можно оценить, какая из двух копий сюжета имеет большую интенсивность. Если $|\Delta f_{\text{дц отн}}| < Kf_{\text{имп}}$, то большей интенсивностью обладает копия сюжета, соответствующая той же зоне неоднозначности, что и у изображения другой субапертуры. В противном случае большей интенсивностью обладает копия сюжета, соответствующая соседней зоне неоднозначности.

В первом случае для нахождения Δx требуется корреляционно-экстремальное совмещение фрагментов двух изображений, одинаково расположенных по вертикали. Во втором случае коррелируемый фрагмент одного изображения должен быть смешен по вертикали на Δy относительно фрагмента другого изображения. Если же указанный выбор не сделать, то корреляционно-экстремальное совмещение будет выполняться с копией сюжета, обладающей слабой интенсивностью и плохо различимой на фоне другой копии. В пределе, когда $|\Delta f_{\text{дц отн}}| \rightarrow 0,5f_{\text{имп}}$, интенсивность текущей копии сюжета падает практически до ноля, делая практически невозможным совмещение с ней, а следовательно, и оценивание доплеровской неопределенности. В то же время выбор другой копии для совмещения существенно его упрощает.

В каждом из указанных двух случаев имеются свои нюансы в зависимости от знака $\Delta f_{\text{дц отн}}$. Таким образом, возможны четыре варианта, рассматриваемые ниже.

Первый вариант: $-Kf_{\text{имп}} < \Delta f_{\text{дц отн}} < 0$. Двоение сюжета наблюдается на изображении, синтезированном из второй субапертуры. Большой интенсивностью обладает копия сюжета, соответствующая той же зоне неоднозначности, что и для первого изображения. Дальности одного и того же объекта на двух изображениях будут равняться:

$$R_1 = R_\perp + \Delta R(\tilde{f}_{\text{дц}} + \Delta M_{\text{дц}} f_{\text{имп}} - K_1 f_{\text{имп}}) - \Delta R(\tilde{f}_{\text{дц}} - K_1 f_{\text{имп}});$$

$$R_2 = R_\perp + \Delta R(\tilde{f}_{\text{дц}} + \Delta M_{\text{дц}} f_{\text{имп}} + K_2 f_{\text{имп}}) - \Delta R(\tilde{f}_{\text{дц}} + K_2 f_{\text{имп}}), \quad (6)$$

где K_1 и K_2 – коэффициенты смещения средневзвешенного доплеровского сдвига на изображениях относительно $\tilde{f}_{\text{дц}}$.

Поправка к доплеровской неопределенности будет вычисляться как

$$\Delta M_{\text{дц}} = \left[\frac{2f_0^2 V_{\text{дз}}^2 \Delta x}{(K_1 + K_2) f_{\text{имп}}^2 c R_\perp f_{\text{дискр}}} \right]. \quad (7)$$

Коэффициент K_1 находится из расчета, что все частоты первой субапертуры попали в одну зону неоднозначности, но при этом их верхняя граница сместилась относительно $f_{\text{дц}}$ на минус $\Delta f_{\text{дц отн}}$:

$$K_1 = -\frac{\int_{-f_{\text{имп}}/2 - \Delta f_{\text{дц отн}}}^{-\Delta f_{\text{дц отн}}} f W^2(f) df}{\int_{-f_{\text{имп}}/2 - \Delta f_{\text{дц отн}}}^{f_{\text{имп}}/2} W^2(f) df} - \frac{\Delta f_{\text{дц отн}}}{f_{\text{имп}}}. \quad (8)$$

Коэффициент K_2 находится из расчета, что в пределах второй субапертуры в ту же зону неоднозначности попала лишь полоса частот шириной $f_{\text{имп}}/2 + \Delta f_{\text{дц отн}}$:

$$K_2 = \frac{\int_{-\Delta f_{\text{дц отн}}}^{f_{\text{имп}}/2} f W^2(f) df}{\int_{-\Delta f_{\text{дц отн}}}^{f_{\text{имп}}/2} W^2(f) df} + \frac{\Delta f_{\text{дц отн}}}{f_{\text{имп}}}.$$

Поскольку значения коэффициентов K_1 и K_2 зависят от $\Delta f_{\text{дц отн}}$, то зависимость горизонтального сдвига Δx между изображениями от ошибки знания доплеровского центроида $\Delta f_{\text{дц}}$, включающей $\Delta f_{\text{дц отн}}$ и $\Delta M_{\text{дц}}$, перестает носить линейный характер, как это предполагалось в исходном алгоритме оценки доплеровской неопределенности.

Второй вариант: $0 \leq \Delta f_{\text{дц отн}} < Kf_{\text{имп}}$. Двоение сюжета наблюдается на изображении, синтезированном из первой субапертуры. Большой интенсивностью обладает копия сюжета, соответствующая той же зоне неоднозначности, что и для второго изображения. Выражения для дальностей и поправки к доплеровской неопределенности будут в этом варианте эквивалентны (6) и (7), но используемые в них коэффициенты K_1 и K_2 будут находиться по-другому.

Коэффициент K_1 находится из расчета, что в пределах первой субапертуры в нужную зону неоднозначности попала лишь полоса частот шириной $f_{\text{имп}}/2 - \Delta f_{\text{дц отн}}$:

$$K_1 = -\frac{\int_{-f_{\text{имп}}/2}^{-\Delta f_{\text{дц отн}}} f W^2(f) df}{\int_{-f_{\text{имп}}/2}^{f_{\text{имп}}/2} W^2(f) df} - \frac{\Delta f_{\text{дц отн}}}{f_{\text{имп}}}.$$

Коэффициент K_2 находится из расчета, что все ча-

стоты второй субапертуры попали в одну зону неоднозначности, но при этом их нижняя граница сместилась относительно $f_{\text{дц}}$ на минус $\Delta f_{\text{дц отн}}$:

$$K_2 = \frac{\int_{f_{\text{имп}}/2 - \Delta f_{\text{дц отн}}}^{f_{\text{имп}}/2 + \Delta f_{\text{дц отн}}} fW^2(f) df}{\int_{f_{\text{имп}}}^{f_{\text{имп}}/2 - \Delta f_{\text{дц отн}}} W^2(f) df} + \frac{\Delta f_{\text{дц отн}}}{f_{\text{имп}}}. \quad (9)$$

Третий вариант: $\Delta f_{\text{дц отн}} \leq -Kf_{\text{имп}}$. Двоение сюжета наблюдается на изображении, синтезированном из второй субапертуры. Большой интенсивностью обладает копия сюжета, соответствующая соседней зоне неоднозначности по отношению к первому изображению. Дальности одного и того же объекта на двух изображениях будут равняться:

$$\begin{aligned} R_1 &= R_{\perp} + \Delta R(\tilde{f}_{\text{дц}} + \Delta M_{\text{дц}} f_{\text{имп}} - K_1 f_{\text{имп}}) - \\ &- \Delta R(\tilde{f}_{\text{дц}} - K_1 f_{\text{имп}}); \\ R_2 &= R_{\perp} + \Delta R(\tilde{f}_{\text{дц}} + \Delta M_{\text{дц}} f_{\text{имп}} + \\ &+ (K_2 - 1)f_{\text{имп}}) - \Delta R(\tilde{f}_{\text{дц}} + K_2 f_{\text{имп}}). \end{aligned}$$

Поправка к доплеровской неопределенности будет вычисляться как

$$\begin{aligned} \Delta M_{\text{дц}} &= \left[\frac{2f_0^2 V_{\text{лз}}^2 \Delta x}{(K_1 + K_2 - 1)f_{\text{имп}}^2 c R_{\perp} f_{\text{дискр}}} + \right. \\ &\left. + \frac{\tilde{f}_{\text{дц}} - (0,5 - K_2)f_{\text{имп}}}{(K_1 + K_2 - 1)f_{\text{имп}}} \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

Коэффициент K_1 находится аналогично первому варианту в соответствии с (8).

Коэффициент K_2 находится из расчета, что в пределах второй субапертуры в соседнюю зону неоднозначности попала полоса частот шириной минус $\Delta f_{\text{дц отн}}$:

$$K_2 = \frac{\int_{-f_{\text{имп}}/2}^{-f_{\text{имп}}/2 - \Delta f_{\text{дц отн}}} fW^2(f) df}{\int_{-f_{\text{имп}}/2}^{-f_{\text{имп}}/2 + \Delta f_{\text{дц отн}}} W^2(f) df} + \frac{\Delta f_{\text{дц отн}}}{f_{\text{имп}}} + 1.$$

Как видно из (10), в данном варианте для нахождения поправки $\Delta M_{\text{дц}}$ требуется также ошибочное значение доплеровского центроида $\tilde{f}_{\text{дц}}$, использованное при синтезе изображений.

Четвертый вариант: $\Delta f_{\text{дц отн}} \geq Kf_{\text{имп}}$. Двоение сюжета наблюдается на изображении, синтезированном из первой субапертуры. Большой интенсивностью обладает копия сюжета, соответствующая соседней зоне неоднозначности по отношению ко второму изображению. Дальности одного и того же объекта на двух изображениях будут равняться:

$$\begin{aligned} R_1 &= R_{\perp} + \Delta R(\tilde{f}_{\text{дц}} + \Delta M_{\text{дц}} f_{\text{имп}} - \\ &- (K_1 - 1)f_{\text{имп}}) - \Delta R(\tilde{f}_{\text{дц}} - K_1 f_{\text{имп}}); \end{aligned}$$

$$R_2 = R_{\perp} + \Delta R(\tilde{f}_{\text{дц}} + \Delta M_{\text{дц}} f_{\text{имп}} + K_2 f_{\text{имп}}) - \\ \Delta R(\tilde{f}_{\text{дц}} + K_2 f_{\text{имп}}).$$

Поправка к доплеровской неопределенности будет вычисляться как

$$\begin{aligned} \Delta M_{\text{дц}} &= \left[\frac{2f_0^2 V_{\text{лз}}^2 \Delta x}{(K_1 + K_2 - 1)f_{\text{имп}}^2 c R_{\perp} f_{\text{дискр}}} + \right. \\ &\left. + \frac{\tilde{f}_{\text{дц}} + (0,5 - K_1)f_{\text{имп}}}{(K_1 + K_2 - 1)f_{\text{имп}}} \right]. \end{aligned}$$

Коэффициент K_1 находится из расчета, что в пределах первой субапертуры в соседнюю зону неоднозначности попала полоса частот шириной $\Delta f_{\text{дц отн}}$:

$$K_1 = -\frac{\int_{f_{\text{имп}}/2 - \Delta f_{\text{дц отн}}}^{f_{\text{имп}}/2} fW^2(f) df}{\int_{f_{\text{имп}}}^{f_{\text{имп}}/2} W^2(f) df} - \frac{\Delta f_{\text{дц отн}}}{f_{\text{имп}}} + 1.$$

Коэффициент K_2 находится аналогично второму варианту в соответствии с (9).

Оценивание абсолютного значения доплеровского центроида

Предлагаемый алгоритм оценивания абсолютного значения доплеровского центроида по фрагменту двух изображений, синтезированных из радиоголограммы по непересекающимся субапертурам, включает следующие шаги.

Шаг 1. Комплексные сигналы двух изображений в пределах анализируемого фрагмента суммируются, и в соответствии с (1) вычисляется оценка $f_{\text{дц отн}}$.

Шаг 2. Вычисляется

$$\Delta f_{\text{дц отн}} = (f_{\text{дц отн}} - \tilde{f}_{\text{дц отн}}) \bmod f_{\text{имп}}.$$

Шаг 3. В соответствии со значением $\Delta f_{\text{дц отн}}$ выбираются положения фрагментов изображений для корреляционно-экстремального совмещения. Если $|\Delta f_{\text{дц отн}}| < Kf_{\text{имп}}$, положения фрагментов остаются неизменными по отношению к шагу 1. Если $\Delta f_{\text{дц отн}} \leq -Kf_{\text{имп}}$, фрагмент второго изображения смещается на Δy вниз (в сторону увеличения азимутального времени). Если $\Delta f_{\text{дц отн}} \geq Kf_{\text{имп}}$, фрагмент первого изображения смещается на Δy вверх (в сторону уменьшения азимутального времени).

Шаг 4. Путем корреляционно-экстремального совмещения фрагментов изображений находится их горизонтальное смещение Δx .

Шаг 5. Если максимальное значение корреляционной функции оказывается меньше выбранного порога, считается, что анализируемый фрагмент не пригоден для оценки доплеровского центроида (содержит лишь мало-контрастные объекты). В противном случае вычисления продолжаются.

Шаг 6. В зависимости от значения $\Delta f_{\text{дд отн}}$ по одному из возможных четырех вариантов, рассмотренных в предыдущей части настоящей работы, горизонтальное смещение Δx пересчитывается в поправку $\Delta M_{\text{дд}}$.

Шаг 7. Вычисляется оценка значения доплеровского центроида как $f_{\text{дд отн}} + (\tilde{M}_{\text{дд}} + \Delta M_{\text{дд}})f_{\text{имп}}$, где $\tilde{M}_{\text{дд}}$ – значение доплеровской неопределенности, использованное при синтезе анализируемых изображений из радиоголограммы.

Оценивание вариаций доплеровского центроида по полю изображения

Для оценивания вариаций доплеровского центроида по полю изображения описанный выше алгоритм применяется к различным фрагментам изображений, центры которых располагаются на некоторой квадратной сетке. Если размеры изображения не уменьшены по сравнению с радиоголограммой, граничные узлы сетки располагаются с отступом от краев изображения на половину горизонтального или вертикального размера неожиданного импульсного отклика РСА во избежание влияния краевых эффектов.

Из-за возможных ошибок корреляционно-экстремального совмещения и погрешностей оценивания требуется дополнительная фильтрация полученных оценок. Она выполняется в два этапа.

На первом этапе на основе оценок доплеровского центроида, полученных по фрагментам, расположенным в одном горизонтальном ряду, строится строгая геометрическая модель радиолокационной съемки в фиксированный момент времени. Для этого рассчитываются координаты точек на земной поверхности, имеющих наклонную дальность до фазового центра антенны РСА, соответствующую центру фрагмента, и доплеровский сдвиг частоты, соответствующий полученной оценке. Поскольку все эти точки должны наблюдаться РСА в один момент времени, через них, а также положение РСА, соответствующее центральной строке фрагментов, по методу наименьших квадратов итерационно проводится плоскость – вертикальная плоскость антенны РСА. На каждой итерации из построения плоскости исключаются точки, наиболее сильно отклоняющиеся от нее на предыдущей итерации. Итерационный процесс заканчивается, либо когда становятся достаточно малы невязки, либо когда остается мало точек. Если удалось провести плоскость с малыми невязками через достаточное количество точек, то для всех фрагментов горизонтального ряда корректируются оценки доплеровского центроида, чтобы они строго соответствовали проведенной плоскости.

На втором этапе на основе оценок доплеровского центроида, полученных по всему полю изображения и скорректированных на предыдущем этапе, итерационно строится двумерный полином малой степени, аппроксимирующий пространственные вариации поправки к значению доплеровского центроида, использованному ранее для синтеза изображения. В качестве такого полинома, например, может быть взят многочлен вида

$P_M(x, y) = \sum_{0 \leq i+j \leq M} p_{ij} y^i x^j$, где $M = 2$. Построение также выполняется по методу наименьших квадратов с постепенным отбрасыванием наиболее отклоняющихся от полинома поправок к доплеровскому центроиду. Если неотбракованных оценок остается мало или они начинают группироваться лишь в малой части площади изображения, степень полинома M понижается вплоть до ноля, чтобы избежать существенного возрастания ошибок оценивания к краям изображения. Итерационное построение полинома заканчивается, либо когда становятся достаточно малы невязки, либо когда остается мало оценок для его построения.

После получения полинома поправки к доплеровскому центроиду может быть рассчитано максимальное значение поправки по полю изображения. Если оно достаточно мало, процесс оценивания завершается. Если же оно велико, требуется повторная обработка радиоголограммы с уточненным значением доплеровского центроида и повторное оценивание доплеровского центроида по двум изображениям субапертур, синтезированным из радиоголограммы.

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования выполнены с использованием радиоголограммы, сформированной радиолокационным космическим аппаратом «COSMO-SkyMed» в режиме «HIMAGE» – режиме маршрутной радиолокационной съемки с пространственным разрешением около 3 м. Изображение, синтезированное из радиоголограммы по полной апертуре с корректным значением доплеровского центроида, приведено на рис. 1. Сюжет изображения (остров Гавайи) включает водную поверхность, скалистую и горную местность (в том числе кратеры вулкана Килауэа), лесной массив, поля и деревенскую застройку.

Поскольку для космического аппарата «COSMO-SkyMed» доступны высокоточные измерения угловой ориентации, ошибка знания доплеровского центроида в экспериментальных исследованиях вносилась искусственно. Для различных значений внесенной ошибки выполнялось итерационное оценивание доплеровского центроида предложенным алгоритмом и менее точными известными амплитудными алгоритмами [7, 8, 13]. Ошибки вносились так, чтобы погрешность знания относительного значения доплеровского центроида составляла 0, 0,1, 0,2, минус 0,3 и минус 0,5 от частоты повторения импульсов, а погрешность знания доплеровской неопределенности варьировалась от 0 до 11. При этом анализировались число итераций, необходимых для точной оценки, и возможность корреляционно-экстремального совмещения фрагментов изображений, синтезированных по субапертуре. Критерием завершения итераций являлось непревышение максимальным значением поправки к доплеровскому центроиду порога в 0,01 от частоты повторения импульсов. Результаты анализа приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что предложенный алгоритм, как правило, требует на 1-2 итерации меньше для полу-

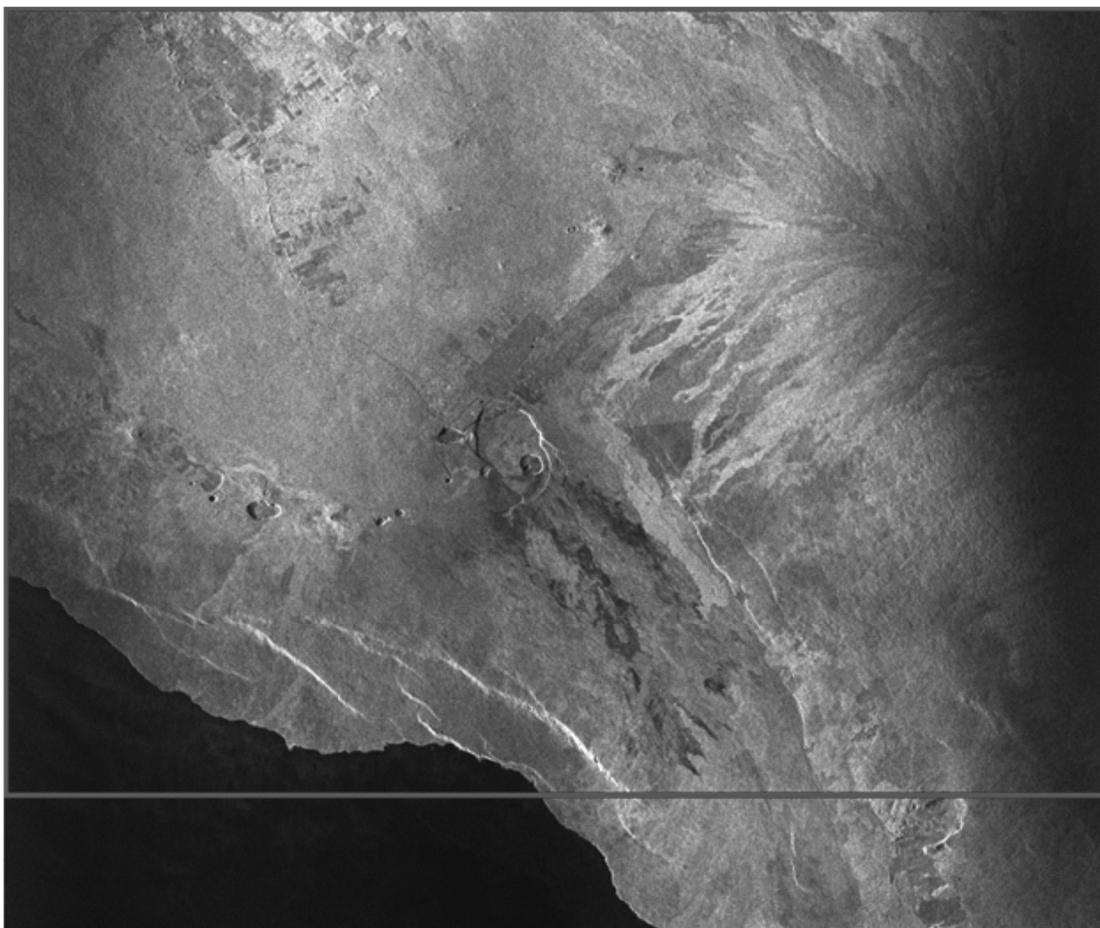
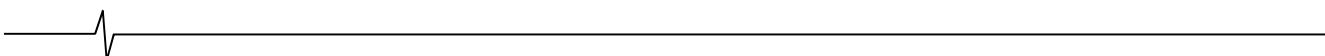


Рис. 1. Изображение, синтезированное из радиоголограммы
(без радиометрической коррекции), и выделенная его часть

ния точной оценки, чем известные амплитудные алгоритмы [7, 8, 13]. При этом в случаях, когда ошибка относительного значения доплеровского центроида составляет половину частоты повторения импульсов, известные алгоритмы [7, 8, 13] всё же позволяют в конце концов получить точный результат, несмотря на то, что в теории они должны перестать работать. Это объясняется наличием боковых лепестков в азимутальной диаграмме направленности антенны, за счет которых в зоне неоднозначности, не содержащей сигнал от основного лепестка из-за некорректного разделения на субапертуры, всё же присутствует очень слабый сигнал. Этот сигнал различим лишь на фоне водной поверхности. Поэтому все фрагменты, по которым известному амплитудному алгоритму удается в этом случае оценить доплеровскую неопределенность, локализованы в левом нижнем углу изображения. Оценки доплеровской неопределенности при этом получаются, как правило, ошибочные, из-за чего погрешность знания абсолютного значения доплеровского центроида после первой итерации может даже возрасти. Однако за счет уточнения относительного значения после первой итерации процесс оценивания в дальнейшем сходится к точному решению. Число необходимых итераций при этом зависит от того, насколько сильно увеличилась погрешность на первой итерации. В то же время предложенный алгоритм в этих случаях работает стабильно и уже с первой

итерации приводит к существенному уменьшению погрешности знания доплеровского центроида.

Чтобы продемонстрировать, что известные алгоритмы [7, 8, 13] в редких случаях при $|\Delta f_{\text{дц отн}}| \approx 0,5 f_{\text{имп}}$ могут в принципе не позволить оценить доплеровский центройд, исключим из оценивания нижнюю часть изображения, содержащую водную поверхность. Результаты оценивания доплеровского центроида по части изображения, выделенной на рис. 1, приведены в табл. 2. При малых ошибках знания доплеровской неопределенности в рамках известного алгоритма [8, 13] не находится ни одного фрагмента, который не был бы отбракован из-за недостаточно высокого значения максимума корреляционной функции, что делает оценку доплеровского центроида известным алгоритмом невозможной. При увеличении ошибки знания доплеровской неопределенности изображения синтезируются существенно более размытыми, из-за чего они становятся более похожими друг на друга. Поэтому для нескольких фрагментов максимум корреляционной функции начинает превышать пороговое значение. Положение максимума при этом не соответствует истинному смещению изображений, но итерационный процесс оценивания всё же выходит из проблемной точки и в конце концов сходится к точному значению. В то же время предложенный алгоритм ведет себя стабильно, обеспечивая возможность оценивания доплеровского центроида для всех рассмотренных значений начальной ошибки за 3-4 итерации.

Таблица 1. Результаты оценивания доплеровского центроида по полному изображению

$\frac{\tilde{f}_{\text{дц}} - f_{\text{дц}}}{f_{\text{имп}}}$	Число итераций предложенного алгоритма	Число итераций известных амплитудных алгоритмов
0	1	1
1	3	3
2; 3	3	4
4; 5; 6; 7; 8; 9; 10	3	5
11	4	5
0,1; 1,1	3	3
2,1; 3,1; 4,1	3	4
5,1; 6,1	3	5
7,1; 8,1; 9,1; 10,1	4	5
11,1	4	6
0,2; 1,2	3	3
2,2; 3,2	3	5
4,2	4	4
5,2	4	5
6,2; 7,2	3	5
8,2	4	5
9,2	3	5
10,2; 11,2	3	6
-0,3; 0,7	3	4
1,7	3	5
2,7; 3,7; 4,7; 5,7	3	4
6,7	4	4
7,7	4	6
8,7	4	5
9,7	4	3
10,7	4	5
-0,5; 0,5	4	4
1,5	3	6
2,5; 3,5; 4,5	4	6
5,5	4	7
6,5	4	6
7,5	4	5
8,5; 9,5; 10,5	4	6
Среднее число итераций	3,38	4,72
Среднеквадратичное отклонение числа итераций	0,58	1,05

Заключение

Более высокая точность предложенного алгоритма позволяет сократить число итераций синтеза изображения и оценивания его параметров для получения точных оценок доплеровского центроида. Среднее значение числа необходимых итераций оказывается на 1,34 меньше, чем для известных амплитудных алгоритмов [7, 8, 13], а его случайные вариации уменьшаются в 1,8 раза. Кроме того, в отличие от известных амплитудных алгоритмов, предложенный алгоритм стабильно позволяет выполнить оценивание доплеровского центроида в случае, когда ошибка знания его относительного значе-

ния близка к половине частоты повторения зондирующих импульсов.

Таблица 2. Результаты оценивания доплеровского центроида по части изображения

$\frac{\tilde{f}_{\text{дц}} - f_{\text{дц}}}{f_{\text{имп}}}$	Число итераций предложенного алгоритма	Число итераций известных амплитудных алгоритмов
-0,5; 0,5; 2,5	3	не удалось совместить фрагменты изображений при оценивании доплеровской неопределенности на первой итерации
1,5	3	8
3,5	3	7
4,5	3	4
5,5; 6,5	4	6
7,5	4	5
8,5	4	8
9,5; 10,5	4	6

Литература

1. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / под ред. В.С. Вербы. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
2. Егошин Н.А., Еремеев В.В., Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Обработка информации от современных космических систем радиолокационного наблюдения Земли. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019. 320 с.
3. Еремеев В.В., Егошин Н.А., Макаренков А.А., Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Проблемные вопросы обработки данных от космических систем гиперспектральной и радиолокационной съемки Земли. Вестник РГРТУ. 2017. № 60. С. 54-64. DOI: 10.21667/1995-4565-2017-60-2-54-64. EDN: YSRVDV.
4. Пощехонов В.И., Кузнецов А.Е., Егин М.М. Оценка точности аппроксимации строгой модели космической съемки рациональными полиномами. Вестник РГРТУ. 2023. № 83. С. 95-101. DOI: 10.21667/1995-4565-2023-83-95-101. EDN: HHESHN.
5. Кузнецов А.Е., Пощехонов В.И. Структурно-параметрический синтез компонентов малого космического аппарата картографического назначения. Вестник РГРТУ. 2019. № 69. С. 185-192. DOI: 10.21667/1995-4565-2019-69-185-192. EDN: THYZZQ.
6. Кузнецов А.Е., Пощехонов В.И. Методика геометрической калибровки комплекса многозональной сканерной съемки КА «Метеор-М». Вестник РГРТУ. 2010. № 33. С. 12-18. EDN: MUIMFH.
7. Bamler R. Doppler frequency estimation and the Cramer-Rao bound. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1991, vol. 29 (3), pp. 385-390.
8. Cumming I.G., Wong F.H. Digital processing of synthetic aperture radar data: algorithms and implementation. Norwood, MA: Artech house, 2005. 628 p.
9. Madsen S.N. Estimating the Doppler centroid of SAR data. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1989, vol. 25(2), pp. 134-140.
10. Dragošević M. On accuracy of attitude estimation and Doppler tracking. Proceedings of the CEOS SAR Workshop, Toulouse, 26-29 October 1999. ESA-SP. 2000, vol. 450, pp. 127-130.
11. Bamler R., Runge H. PRF-ambiguity resolving by wavelength diversity. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1991, vol. 29 (6), pp. 997-1003.
12. Wong F.H., Cumming I.G. A combined SAR Doppler centroid estimation scheme based upon signal phase. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1996, vol. 34 (3), pp. 696-707.
13. Cumming I.G., Kavanagh P.F., Ito M.R. Resolving the Doppler ambiguity for spaceborne synthetic aperture radar. Proceedings of the IGARSS'86. 1986, pp. 1639-1643.