

Обработка траекторного сигнала РСА в условиях скошенного режима и миграции по дальности

В.В. Костров, А.А. Сидоров

Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» 602264, Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23, E-mail: yvk@mit.ru

Приведены результаты исследований различных алгоритмов цифровой обработки траекторного сигнала при скошенном боковом обзоре в импульсном радиолокаторе с синтезированием апертуры (РСА). Предложен метод построения модели миграций для формирования опорного сигнала. Особое внимание уделено достижению высокой точности определения местоположения цели за счет использования двумерной обработки и построению процессора цифровой обработки сигналов (ЦОС).

The results of studies of various digital trajectory signal processing algorithms in squinted stripmap pulsed synthetic aperture radar (SAR) are presented. A method of migration model constructing for generating a reference signal is offered. Particular attention is paid to achieve high positioning accuracy targets through the use of two-dimensional processing and the construction of a digital signal processor (DSP).

Введение

Для получения радиолокационного изображения (РЛИ) поверхности Земли из космоса с использованием РСА наиболее часто используется нормальный боковой обзор, при котором космический аппарат (КА) ориентирует максимум диаграммы направленности антенны (ДНА) строго по траверзу [1–4]. Такой режим съемки имеет ряд достоинств, обусловленных центральной симметрией наблюдения объектов съемки и, следовательно, траекторного сигнала до и после прохождения траверза по объекту. Отсюда вытекает естественным стремление разработчиков КА, РСА и алгоритмического обеспечения максимально использовать возможности нормального бокового обзора. Примером может служить сканирующий режим синтеза апертуры (ScanSAR), в основу которого положен нормальный боковой обзор [3,4]. Основные совершенствования алгоритмов обработки направлены в основном на коррекцию или расширение алгоритмов обработки траекторного сигнала при нормальном боковом обзоре [4,5]. Вместе с тем некоторые виды обзора, например, переднебоковой (заднебоковой) обзор, прожекторный (телескопический) обзор [2,3], а также разновидности секторного обзора [2] требуют в процессе наблюдения разворота максимума ДНА относительно траверза, т.е. возникает случай скошенного обзора.

При скошенном режиме съемки (переднебоковой или заднебоковой – в зависимости от угла между траверзом и направлением максимума ДНА) в спектре траекторного сигнала возникает отличная от нуля регулярная доплеровская составляющая, определяемая скоростью КА, рабочей длиной волны и углом скоса. Случай обработки траекторного сигнала, получаемого с помощью РСА КА при скошенном режиме, рассматривался в [6,7], где получены приближенные выражения для организации обработки. Однако задача обработки траекторного сигнала в современных РСА усложняется тем, что стремление к получению высокодетальных радиолокационных изображений (РЛИ) требует точного учета всех факторов и параметров съемки. Одним из последствий использования высокого разрешения РСА является миграция траекторного сигнала по каналам дальности [2–5,8]. Отметим также, что эффект миграции сигналов свойственен и системам с нормальным боковым обзором с высоким пространственным разрешением [8].

Таким образом, проблема цифровой обработки траекторного сигнала с миграциями является общей для всех РСА с высоким разрешением. Для решения данной проблемы к настоящему моменту времени предложены различные методы и алгоритмы. К наиболее известным относятся:

- алгоритм коррекции миграции дальности (RMA);
- алгоритм коррекции «дальность-Доплер»;
- алгоритм ЛЧМ масштабирования;
- алгоритм разделимой двумерной свертки;
- алгоритм неразделимой двумерной свертки.

Чем выше разрешение, достигаемое РСА, тем больше степень необходимости учета всех факторов, влияющих на качество когерентной обработки. Целью доклада является исследование особенностей и эффективности алгоритмов обработки траекторных сигналов РСА с учетом миграции сигнала по дальности, а также оценка степени реализуемости подобных алгоритмов в бортовых вычислительных системах.

Постановка задачи. Модель эквивалентной траектории

Рассмотрим основные геометрические соотношения, определяющие параметры съемки и, в конечном итоге, траекторный сигнал. На рис. 1 представлено взаимное расположение КА и объекта съемки на поверхности Земли в плоскости, проходящей через КА, объект и линию пути. Для упрощения анализа будем считать, что движение КА осуществляется с равномерной орбитальной скоростью V_p ; скорость перемещения следа луча антенны по поверхности Земли V_0 считаем также постоянной. На поверхности Земли находится точечная цель P_t , размеры которой существенно меньше размера элемента разрешения. Максимум ДНА повернут относительно траверзного направления на угол скоса β_{sq} , положительный для переднебокового обзора и отрицательный – для заднебокового. Расстояние от КА по траверзу до линии, вычерчиваемой максимумом ДНА на поверхности Земли, обозначено через R_{trz} , а для момента прохождения максимумом ДНА цели – R_0 . Для числовых расчетов принята модель низкоорбитального КА с высотой орбиты 600 км, углом визирования в траверзной плоскости 30° . При этом $R_{trz} = 704059,2$ м, $V_p = 7561,7$ м/с, $V_0 = 6900,3$ м/с.

К основным эффектам, возникающим в скошенном режиме и отличающим этот режим от нормального бокового обзора, относятся:

- нарушение симметрии огибающей пачки импульсов принимаемого сигнала;
- смещение спектра доплеровских частот;
- появление нелинейности в зависимости доплеровской частоты траекторного сигнала;
- нарушение симметрии закона миграции траекторного сигнала по каналам дальности.

Рассмотрим кратко эти отличия. Нарушение симметрии огибающей пачки импульсов эхо-сигнала обусловлено различием времени облучения цели до момента прохождения точки P_t максимумом ДНА T_{tag}^+ и после его прохождения T_{tag}^- . В качестве точек отсчета времени облучения возьмем, как это принято в радиолокационных системах, ширину ДНА θ_a по уровню половинной мощности. Тогда

$$\Delta T_{tag} = T_{tag}^+ - T_{tag}^- = \frac{R_{trz}}{V_0} \cdot [\text{tg}(\beta_{sq} + 0,5 \cdot \theta_a) + \text{tg}(\beta_{sq} - 0,5 \cdot \theta_a) - 2 \cdot \text{tg}(0,5 \cdot \theta_a)]. \quad (1)$$

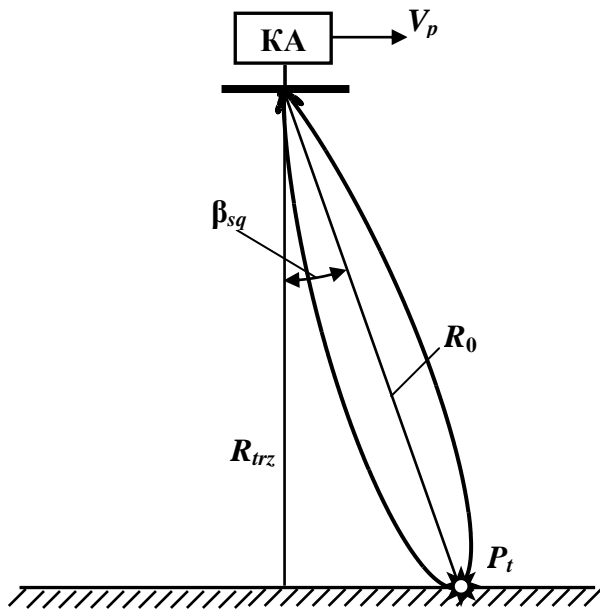


Рис. 1.

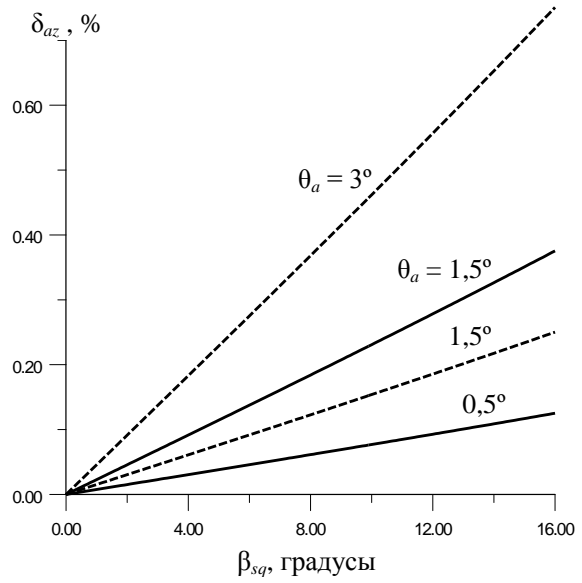


Рис. 2.

На рис. 2. представлены зависимости относительного времени $\delta_{az} = \Delta T_{tag} / (T_{tag}^+ + T_{tag}^-)$ от угла скоса при различной ширине ДНА. В общем случае даже при малых углах скоса β_{sq} зависимости являются нелинейными, а в абсолютном времени перекося во времени может достигать значительных величин, до десятков миллисекунд, что соизмеримо со временем синтеза.

Наличие угла скоса приводит к появлению регулярной доплеровской составляющей в принимаемом траекторном сигнале, равной

$$F_{Dsq} = \frac{2 \cdot V_p \cdot \sin \beta_{sq}}{\lambda}, \quad (2)$$

где λ – рабочая длина волны.

При этом в дополнение к линейному закону изменения частоты траекторного сигнала появляется нелинейный компонент, приводящий к асимметричному поведению.

Нарушение линейности ЛЧМ траекторного сигнала оценим по 3-м значениям частоты Доплера: в центре пачки эхо-сигнала и по краям, соответствующим ширине ДНА, причем за степень отклонения примем разность частот между расчетным значением в центре пачки, полученным с помощью линейной аппроксимацией по двум крайним точкам, и истинным значением в центре пачки. На рис. 3. приведено семейство нормированного смещения частоты, характеризующее отклонение доплеровской частоты от закона ЛЧМ.

Использование скошенного режима вызывает также нарушение симметрии закона миграции траекторного сигнала по каналам дальности. На рис. 4. представлено семейство функций зависимости $\Delta R_{tag} = R_t - R_0$, где R_t – текущее значение наклонной дальности до объекта, от азимутальной координаты X_{az} . Как и следовало ожидать, при нормальном боковом обзоре ($\beta_{sq} = 0$) закон миграций является симметричным квадратичным [1–3].

В случае скошенного обзора ($|\beta_{sq}| > 0$) закон миграций остается квадратичным, однако относительно цели ($X_{az} = 0$) он становится несимметричным. Характерной особенностью закона миграций для этого режима становится появление отрицательной

миграции, что не позволяет получить оптимальный результат использованием в качестве опорного колебания вырезки из опорного колебания при нормальном боковом обзоре.

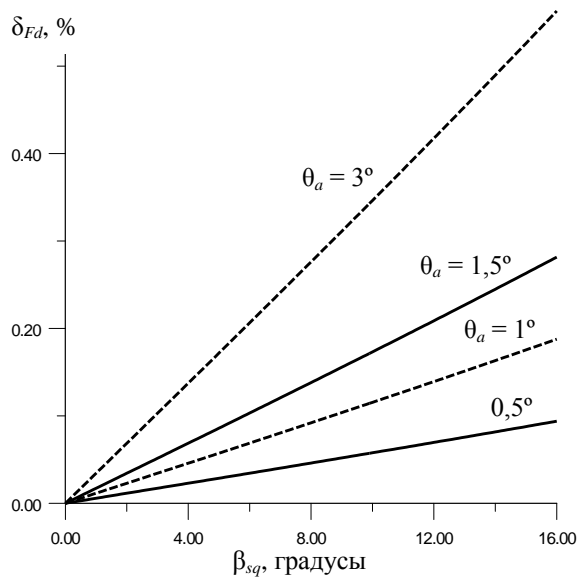


Рис. 3.

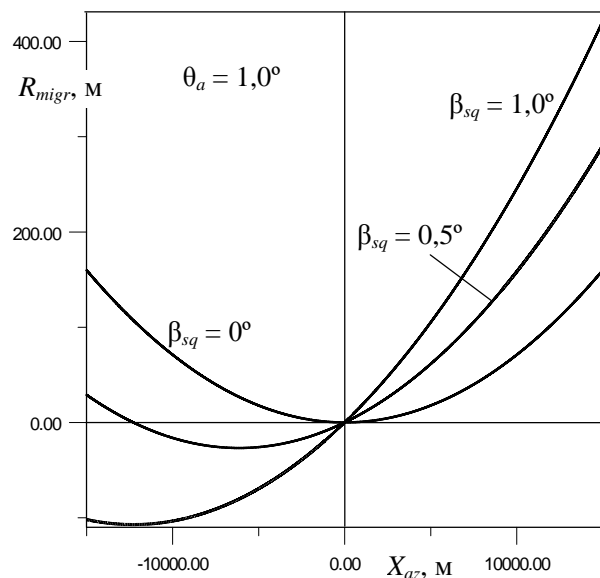


Рис. 4.

Степень и полнота учета подобных факторов оказывает существенное влияние на качество формируемого РЛИ.

Оптимизация двумерной обработки траекторного сигнала РСА космического базирования

1. Алгоритм двумерной обработки

Основной операцией при обработке траекторного сигнала с миграциями по каналам дальности является вычисление двумерной дискретной свертки

$$S(n, m) = \sum_{l=0}^{N_{azim}-1} \sum_{k=0}^{N_{range}-1} x(k, l)h(k-n, l-m), \quad (3)$$

где $x(k, l)$ – комплексный сигнал на входе устройства ЦОС траекторного сигнала;

$h(k, l)$ – опорная функция;

N_{azim} , N_{range} – число отсчетов сигнала, используемое для синтезирования по азимутальной и угломестной координате.

При записи алгоритма (1) предполагалось, что обработка траекторного сигнала осуществляется устройством ЦОС, у которого отсутствует отрицательная индексация. Это по существу означает, что миграция сигнала по дальности должна иметь только положительный знак. Данное требование без ущерба для вычисления дискретной свертки удовлетворяется смещением индексации в опорной функции на $N_{azim}/2$ по азимутальной координате и на максимальное число мигрирующих каналов с отрицательным смещением N_{range}^- . В результате вычислений по (3) получается один дискрет на РЛИ, т.е. один пиксель изображения.

При большом времени синтезирования (большой величине $N = N_{azim} \cdot N_{range}$) объем вычислений свертки прямым методом является значительным. К более эффективным методам относится метод быстрой свертки, основанный на быстрых алгоритмах вычисления коэффициентов дискретного преобразования Фурье (ДПФ).

Отметим, что применение быстрого преобразования Фурье, как правило, предполагает приведение значений N_{azim} и N_{range} к степени двух, что достигается дополнением нулей в соответствующих массивах.

В общем случае маршрутного нормального бокового или скошенного режима необходимо провести 2-мерное ДПФ над массивом отсчетов траекторного сигнала. Обобщенный алгоритм преобразований имеет вид

$$S(n, m) = F_{azim}^{-1} \left\{ F_{range}^{-1} \left[\left(F_{azim} \left[W_a F_{range} \{ W_r h \} \right] * \left(F_{azim} \left[F_{range} \{ x \} \right] \right) \right) \right] \right\}, \quad (4)$$

где $F\{\cdot\}$, $F^{-1}\{\cdot\}$ – прямое и обратное БПФ,

$\{\cdot\} * \{\cdot\}$ – поэлементное произведение массивов,

W_a , W_r - весовые (оконные) функции по азимуту и дальности.

2. Разделимая двумерная обработка

Для сокращения вычислительных затрат может быть использована разделимая двумерная обработка, заключающаяся в следующем [2]. Проведем дискретизацию азимутальной координаты $l = X_{az} / (V_p T_p)$, где V_p – путевая скорость луча на поверхности Земли, T_p – период следования зондирующих импульсов. Такая дискретизация возникает естественным путем за счет непрерывного движения КА и импульсной работы РСА. Далее аппроксимируем непрерывную функцию миграции ступенчатой функцией

$$R_{migr}(i, l) = \langle R_{migr}(X_{az}) / dR \rangle, \quad (5)$$

где dR – разрешающая способность по наклонной дальности,

$\langle \cdot \rangle$ – целая часть числа.

Максимальное число мигрирующих каналов в рассматриваемом примере достигает 1000, а число отсчетов изменяется от 7 до 200. Представление (5) позволяет использовать свойство ДПФ для сдвинутой последовательности, в соответствии с которым для сдвига сигнала во временной области на i позиций k -ю гармонику надо повернуть по фазе на величину $\Delta\phi_{ik} = -2\pi ik / N_{azim}$. Такое преобразование в спектральной области позволяет приближенно компенсировать миграции сигналов по каналам дальности, разделить обработку по азимуту и дальности, а двумерную опорную функцию свести к двум одномерным. При этом естественно, снижается вычислительная сложность цифровой обработки траекторных сигналов.

На рис. 5. представлен отклик от точечной цели, полученный на РЛИ при разделимой двумерной обработке. Горизонтальная ось на рисунке соответствует угломестной (дальностной) координате, вертикальная – азимутальной координате. Из рисунка видно, что в результате сжатия траекторного сигнала на РЛИ остаются заметные артефакты. Наблюдаются протяженные боковые лепестки, как по дальности, так и по азимуту, т.е. отклик от точечной цели дает четырёхлучевую звезду, что является характерным признаком использования ЛЧМ сигнала. Азимутальные боковые лепестки с увеличением расстояния от цели несколько рассеиваются и занимают достаточно большую площадь на РЛИ. Смещение цели внутри элемента разрешения приводит к еще большему расширению области, занимаемой лепестками (рис. 6.). Как следствие, снижается уровень отклика от цели (в рассматриваемом случае наблюдалось снижение на 0,7 дБ).

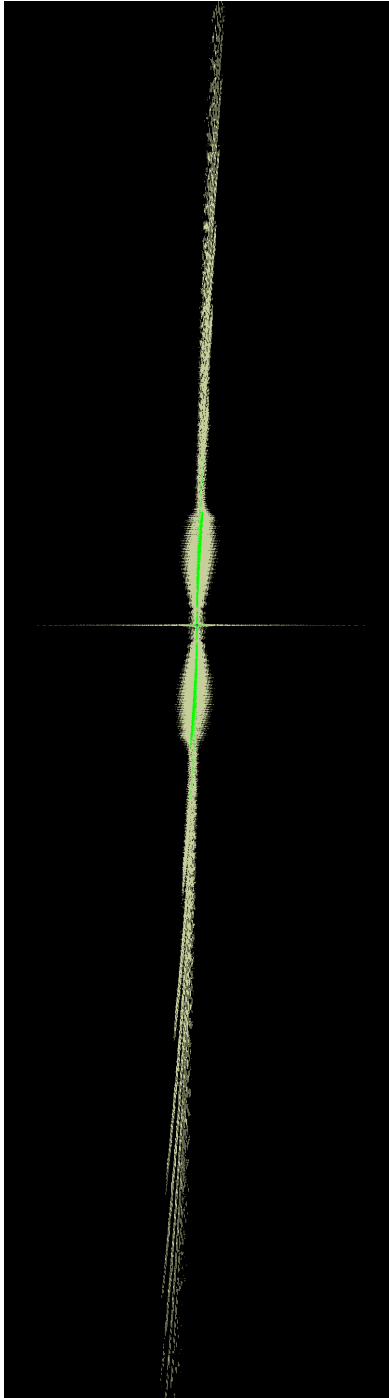


Рис. 5.

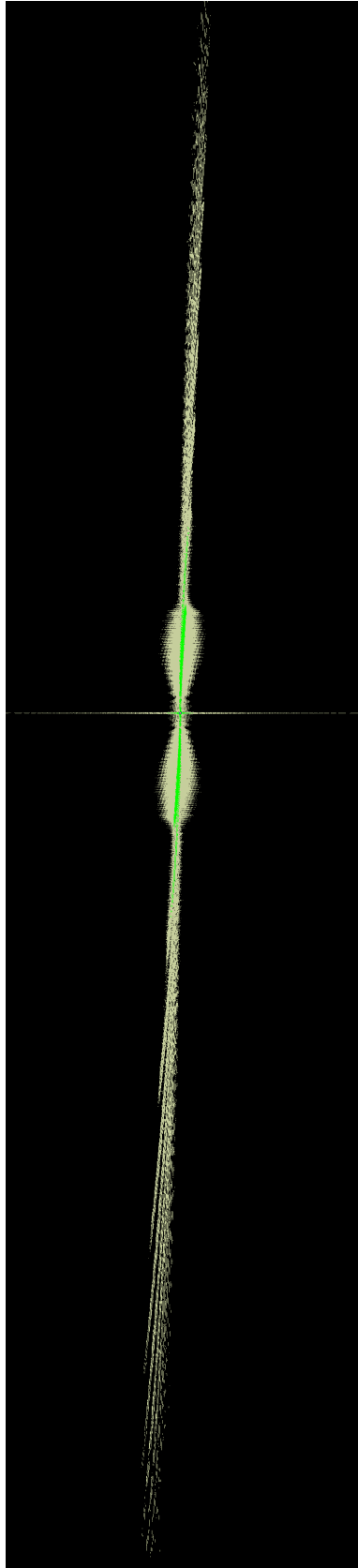


Рис. 6.

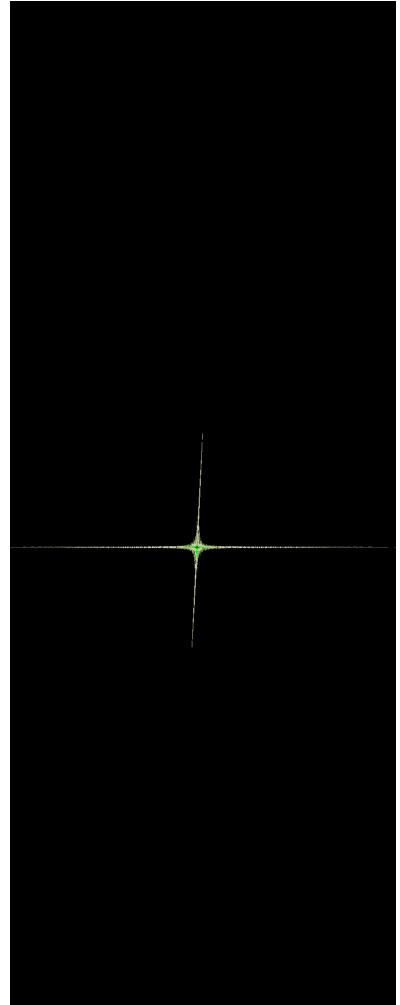


Рис. 7.

3. Оптимальная двумерная обработка

Как отмечалось в [2], отдельная двумерная обработка не является корректной. Более точный учет миграций сигнала по каналам дальности, искажений закона огибающей и изменения доплеровской частоты приводит к тому, что опорная функция не факторизуется, т.е. не разделяется на последовательную обработку по азимутальной и угломестной координатам.

На рис. 7 приведен отклик от точечной цели, полученный на РЛИ при неразделимой двумерной обработке. Как и следовало ожидать, оптимальная обработка дает более качественные результаты: расположение боковых лепестков по азимутальной координате стало компактным, отсутствует их рассеяние по изображению. Уровень отклика по сравнению с предыдущими случаями возрос на 4,1 дБ и 3,4 дБ соответственно.

Заключение

В докладе дан анализ особенностей формирования траекторного сигнала в РСА космического базирования и его цифровой обработки при скошенном маршрутном режиме съемки. Учет миграции траекторного сигнала по дальности, несимметричности огибающей импульсов из-за перекоса ДНА и нелинейности закона частотной модуляции по азимутальной координате позволил получить более четкое РЛИ и обеспечил высокую точность определения координат объектов. Вместе с тем неразделимая двумерная обработка имеет ограниченную область фокусировки, вне которой отклик от цели начинает расплываться по азимутальной оси. Для устранения этого недостатка может быть использована секционированная двумерная свертка или коррекция азимутального спектра в процессе формирования РЛИ.

Литература

1. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
2. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений / Под ред. Л.А. Школьного. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. – 531 с.
3. 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.
4. *Moreira A., Mittermayer J., Scheiber R.* Extended Chirp Scaling Algorithm for Air- and Spaceborne SAR Data Processing in Stripmap and ScanSAR Imaging Modes // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 34, No. 5, September 1996. P.1123-1136.
5. *Raney R.K., Runge H., Bamler R., Cumming I.G., Wong F.H.* Precision SAR Processing Using Chirp Scaling // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, Vol.32, No.4, P.786-799.
6. *Zhai Q., Wang W., Hu J., Zhang J.* Azimuth Nonlinear Chirp Scaling Integrated with Range Chirp Scaling Algorithm for Highly Squinted SAR Imaging // Progress in Electromagnetics Research, 2013, Vol. 143, P.165-185.
7. *An D.-X., Zhou Z.-M., Huang X.-T., Jin T.* A Novel Imaging Approach for High Resolution Squinted Spotlight SAR Based on the Deramping-Based Technique And Azimuth NLCS Principle // Progress in Electromagnetics Research, 2012. Vol. 123. P.485-508.
8. *Сидоров А.А., Костров В.В.* Исследование характеристик алгоритмов устранения эффекта миграции сигнала в каналах дальности для РСА бокового обзора / Радиопромышленность. – 2012. – Вып. 2. – С.97-104.