

Обработка траекторного сигнала РСА при обеспечении предельной пространственной разрешающей способности

В.В. Костров, Н.Д. Комиссарова, В.В. Шутова

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

Рассматриваются алгоритмы цифровой обработки траекторного сигнала в радиолокаторе с синтезированной апертурой (РСА), который предназначен для получения радиолокационных изображений (РЛИ) с высоким пространственным разрешением. Дан анализ различных причин, препятствующих получению высокого разрешения и малых погрешностей определения местоположения, а также методы их учета. Проведен анализ влияния тропосферных искажений на формирование РЛИ.

The algorithms of the tracking signal digital processing are considered in synthetic aperture radar (SAR), which is intended for formation of the radar scenes with high spatial resolution. It is given analysis of the various reasons, preventing reception of the high resolution and small inaccuracy of the target location determination, as well as methods of their account. Also it is done the analysis of the influence of the tropospheric distortion on radar scene formation.

Постоянное совершенствование аппаратной части РСА космического базирования привело к тому, что в настоящее время потенциальная пространственная разрешающая способность системы в X-диапазоне приближается к 25 см (по наклонной дальности) [1–2]. Однако реализация такого разрешения требует тщательной настройки алгоритмов обработки траекторного сигнала, поскольку на процессы сжатия сигнала и фокусировку изображений начинают оказывать существенное влияние факторы, которые при разрешении в несколько метров можно было не учитывать. В первую очередь это относится к эффекту миграции траекторного сигнала по каналам дальности при цифровой обработке. При некачественном учете миграций эквивалентная база сигнала уменьшается, как следствие, снижается отношение сигнал-шум, возрастает уровень боковых лепестков, ухудшается разрешающая способность. Можно констатировать, что проблеме миграции в научной печати уделяется много внимания [1–4], разработаны различные алгоритмы коррекции миграции дальности. Другие факторы, вызывающие деградацию РЛИ, практически не исследованы и требуют детального рассмотрения. К таким факторам можно отнести нарушение симметрии огибающей пачки импульсов принимаемого сигнала; смещение спектра доплеровских частот в процессе зондирования и приема сигналов; появление нелинейности в зависимости доплеровской частоты траекторного сигнала; нарушение симметрии закона миграции траекторного сигнала по каналам дальности; искривление траектории радиоволн при прохождении луча через тропосферу.

Цель доклада – исследование особенностей траекторного сигнала и эффектов, ухудшающих сформированное РЛИ, учет их в алгоритмах обработки радиоголограмм, а также оценка влияния тропосферных искажений на параметры траекторных сигналов.

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. Алгоритм обработки настраивается на случай, когда на поверхности Земли наблюдается точечная цель, размеры которой меньше размера элемента разрешения. Для числовых расчетов принята модель низкоорбитального КА, параметры орбиты и другие геометрические

параметры режима съемки приведены в таблице 1. Рассматривается наиболее общий случай маршрутного режима съемки, в том числе и его вариации в виде скошенных режимов с углом скоса β_{sq} .

Таблица 1. Основные геометрические параметры съемки и характеристики КА

Параметр	Значение
Высота орбиты КА	600,0 км
Орбитальная скорость космического аппарата	7561,7 м/с
Скорость перемещения подспутниковой точки	7046,1 м/с
Скорость перемещения следа луча антенны V_0	6900,3 м/с
Критический угол	68,1°
Угол визирования в траверзной плоскости	25°...55°
Наклонная дальность в траверзной плоскости R_{trz}	704059,2 м
Разрешающая способность по наклонной дальности	0,25...0,3 м

Нарушение симметрии огибающей пачки импульсов эхо-сигнала обусловлено различием времени облучения цели до момента прохождения точечной цели 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

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

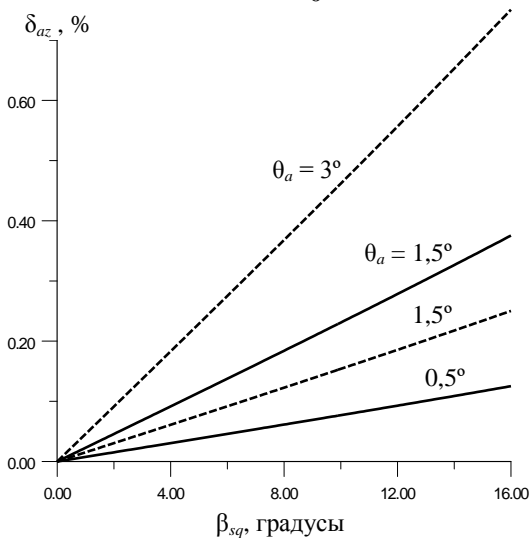


Рис. 1.

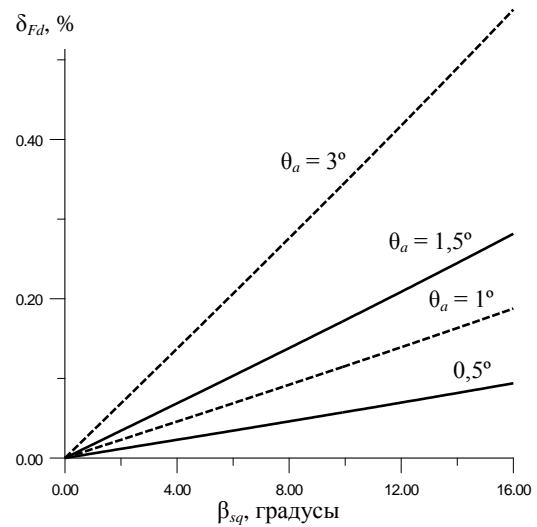


Рис. 2.

На рис. 1. представлены зависимости относительного времени прохождения цели $\delta_{az} = \Delta T_{tag} / (T_{tag}^+ + T_{tag}^-)$ 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 $F_{Ds q} = 2 \cdot V_p \cdot \sin \beta_{sq} / \lambda$, где λ – рабочая длина волны, и нелинейного компонента, приводящего к асимметричному поведению частоты Доплера. 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. 2 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. 3 представлено семейство функций зависимости $\Delta R_{tag} = R_t - R_0$, где R_t – текущее значение наклонной дальности до объекта, R_0 – расстояние до цели в момент прохождения максимума ДНА, от азимутальной координаты X_{az} . Как и следовало ожидать, при нормальном боковом обзоре ($\beta_{sq} = 0$) закон миграций является симметричным квадратичным [1, 2].

В случае скошенного обзора ($|\beta_{sq}| > 0$) закон миграций остается приближенно 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.

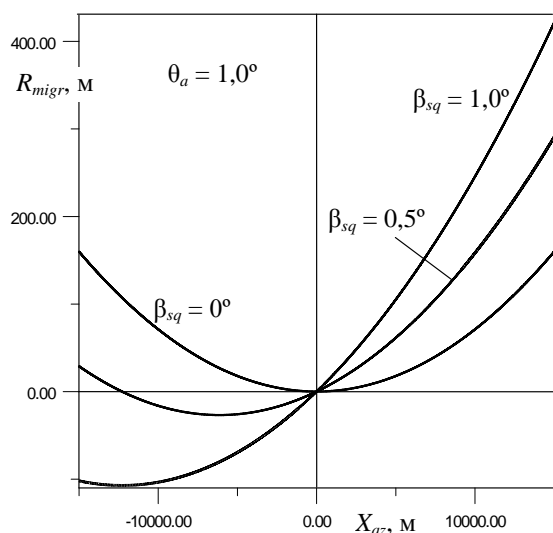


Рис. 3.

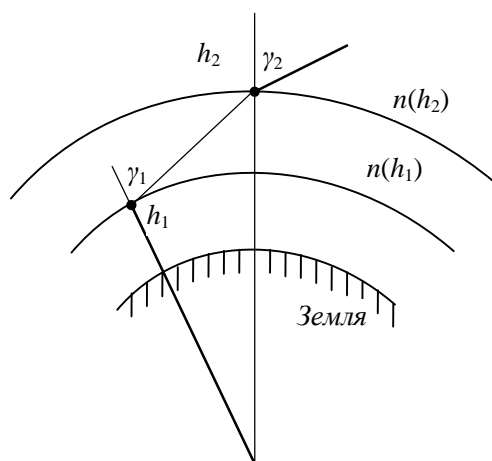


Рис. 4.

Особое внимание уделялось оценке влияния нижних слоев атмосферы на формирование РЛИ. Установлено [5, 6], что при прохождении сигнала от КА до объекта наблюдения или Земли, он претерпевает отклонение от прямолинейного пути распространения, т.е. траектория сигнала искривлена. Это обусловлено различными значениями коэффициента преломления в атмосфере, который, в свою очередь, зависит от высоты. При расчетах атмосфера рассматривалась как слоистая структура, и при прохождении каждого из слоев волна преломляется (см. рис. 4, где обозначено: $h_i, n(h_i), \gamma_i$ – высота расположения слоя, коэффициент преломления и угол вхождения волны в слой соответственно). Наибольший интерес для исследования представляет прохождение радиоволны через тропосферу, так как в ней содержатся гидрометеоры в жидком и твердом состоянии – капельки воды и снежинки. В тропосфере

сосредоточена основная часть водяного пара. Коэффициент преломления ее зависит от давления, температуры и влажности.

Для однородной безоблачной атмосферы на частотах X-диапазона, которые существенно ниже дискретных линий поглощения водяного пара и кислорода, принимается частотно-независимая модель вещественной части коэффициента поглощения [6]

$$n = 1 + \frac{77.8}{T} \left(P + \frac{4810e}{T} \right) \cdot 10^{-6},$$

где T – температура в градусах Кельвина;

P – атмосферное давление;

e – парциальное давление водяных паров в миллибарах.

В тропосфере давление и влажность в среднем убывают с высотой h по экспоненциальному, а температура по линейному закону, поэтому средний высотный профиль приведенного коэффициента преломления можно аппроксимировать экспоненциальной зависимостью [6]

$$n(h) = 1 + n_0 \exp(-b_1 h),$$

где n_0 – приповерхностное значение приведенного коэффициента преломления.

Величины n_0 и b_1 зависят от сезона. Так в средних широтах зимой приведенный коэффициент n_0 в среднем равен $3,06 \cdot 10^{-4}$, а летом эта величина близка к $3,3 \cdot 10^{-4}$. Параметр b_1 в среднем равен $0,13 \text{ км}^{-1}$ и подвержен изменениям в пределах от $0,12 \text{ км}^{-1}$ до $0,14 \text{ км}^{-1}$. На рис. 5 приведена зависимость приведенного коэффициента преломления $n_1 = n(h) - 1$ от высоты в разные времена года. На низких высотах сезонные расхождения составляют порядка 10%, но с увеличением высоты эти различия стираются.

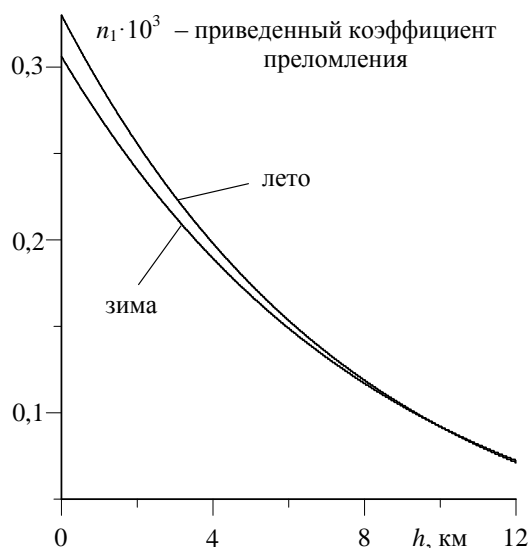


Рис. 5.

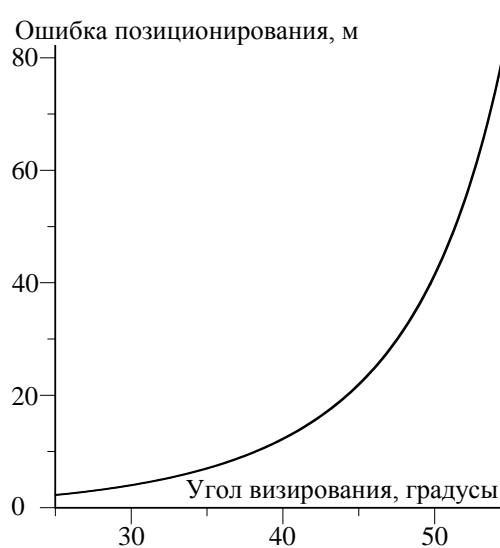


Рис. 6.

Был разработан алгоритм оценки влияния тропосферы на распространение траекторных сигналов в тропосферной радиолинии и формирование РЛИ. Анализ результатов исследований показал, что при угле визирования 30° систематическая ошибка измерения местоположения объекта летом составляет 4,04 м, а зимой – 3,95 м, т.е. различие в разносезонных РЛИ составляет 9 см. При предельной разрешающей

способности это составляет 36%, поэтому такие межсезонные вариации нужно учитывать. Выявлена существенная зависимость систематической ошибки от угла визирования. На рис. 6 представлена зависимость систематической погрешности от угла визирования в типовом для РСА диапазоне. Графики показывают, что смещение может достигать 86...87 м, причем различия РЛИ разных сезонов возрастают и могут достигать 1 м (на рис.6 эти различия стираются из-за конечной толщины линий). Для решения высокоточных задач геодезии такие различия можно признать существенными.

Анализ влияния тропосферы также показал, что полученный кадр РЛИ претерпевает дополнительные геометрические искажения, которые не учитываются в стандартных пакетах программного обеспечения. Степень искажения зависит от ширины ДНА в угломестной плоскости. Так при ширине ДНА $\theta_a = 1^\circ$ цели, расположенные на дальнем от КА крае кадра, за счет рефракции удаляются на 48 см по сравнению с ближними объектами, а при $\theta_a = 3^\circ$ отклонения составляют 1,59...1,61 м. Это в 1,5...5 раз превышает дискрет дальности, поэтому можно говорить о том, что атмосфера вызывает дополнительную миграцию сигналов целей по дальности.

Степень и полнота учета подобных факторов в алгоритмах обработки радиолограммы оказывает существенное влияние на качество формируемого РЛИ. Апробация новой технологии учета выявленных фактов деградации РЛИ при обработке радиолограммы РСА метрового разрешения дала положительные результаты.

Таким образом, в докладе проведен анализ особенностей формирования траекторного сигнала в РСА космического базирования и его цифровой обработки при маршрутном режиме съемки, включая востребованные практикой скошенные режимы. Учет миграции траекторного сигнала по дальности, несимметричности огибающей импульсов из-за перекоса ДНА, нелинейности закона частотной модуляции по азимутальной координате и влияния тропосферных искажений на распространение сложных сигналов в тропосферной радиолинии позволил получить более четкое РЛИ и обеспечил высокую точность определения координат объектов.

Литература

1. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений / Под ред. Л.А. Школьного. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. – 531 с.
2. 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.
3. 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.
4. Breit H., Fritz T., Balss U., etc. TerraSAR-X: SAR processing and products // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2010. Vol. 48. No. 2. Pp. 727-740.
5. Горячкин О.В. Влияние атмосферы земли на деградацию характеристик изображений космических радиолокационных станций с синтезированной апертурой // Компьютерная оптика. 2002. Вып. 24. С.177-182.
6. Колосов М.А., Арманд Н.А., Яковлев О.И. Распространение радиоволн при космической связи. – М.: Связь, 1969. – 156 с.