

Гармонический анализ и нестационарная свертка в РСА

В.В. Костров¹, Е.Ф. Толстов², О.Е. Цветков²

¹МИ ВлГУ, 602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23, e-mail: vyk@mit.ru

²ЗАО «АЭРОКОН», 140180, г. Жуковский, МО, ул. Жуковского, 1, e-mail: e_tolstov@mail.ru; al.vetckov@yandex.ru

В докладе рассмотрены способы обработки траекторного сигнала радиолокатора с синтезированием апертуры антенны (РСА) в режиме прожекторного обзора: метод гармонического анализа, двумерная расширенная свертка. Показано, что в отличие от методов гармонического анализа предлагаемая нестационарная свертка обеспечивает фокусировку радиолокационного изображения всего кадра.

The ways of trajectory signal processing in synthetic aperture radar (SAR) in spotlight mode are considered in report: method of the harmonic analysis, two-dimensional extended convolution. It is shown that unlike methods of the harmonic analysis proposed no-stationary convolution provides the focusing of the radar image of the whole frame.

Современные РЛС с синтезированием апертуры антенны (РСА) обеспечивают формирование радиолокационных изображений (РЛИ) земной поверхности с высоким пространственным разрешением: до десятков – единиц сантиметров. Совершенствуются технологии генерирования, излучения и приема широкополосных сигналов (шириной спектра до единиц гигагерц). Разработаны эффективные методы компенсации траекторных нестабильностей за длительный интервал когерентного накопления сигнала (до десятков секунд). Развиваются и способы цифровой обработки сигналов [1,2].

В статье предложен новый метод обработки в прожекторном режиме обзора при высоком азимутальном разрешении получаемого изображения – кадра поверхности. Традиционный эффективный способ фокусировки (азимутального сжатия) – гармонический анализ (ГА) обеспечивает получение РЛИ с заданным высоким разрешением по азимуту в области центра кадра. Основные операции, используемые при синтезе РЛИ, – демодуляция и вычисление цифрового спектра процедурой быстрого преобразования Фурье (БПФ). При этом демоделирующая функция определяется радиальной скоростью и ускорением в центре интервала синтезирования для центральной точки кадра. Для элементов разрешения, смещенных по азимуту, как показывает аналитическое разложение [1,2], радиальное ускорение изменяется. В результате может наблюдаться расфокусировка на краях кадра. Кроме того, метод ГА предполагает формирование РЛИ в первичных координатах “дальность – доплеровская частота” (“дальность – азимут”). В результате могут наблюдаться и геометрические искажения РЛИ.

В режиме телескопического обзора траекторный сигнал РСА полосы дальности представляет собой сумму сигналов отражателей, расположенных на разных азимутальных «позициях» β_i (представлено на рис. 1) в пределах ширины кадра:

$$\dot{s}(t) = \sum \dot{A}_i \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} \cdot r_i(t, \beta_i)\right),$$

где \dot{A}_i – комплексные амплитуды отражателей,

$r_i(t, \beta_i)$ – закон изменения дальности до точечного отражателя за время когерентного накопления,

t – путевое время.

Полное описание процесса когерентного накопления сигнала за интервал синтезирования (ИС) T_c требует отдельного математического рассмотрения функции $r_i(t, \beta_i)$. В классической теории РЛС с синтезированием апертуры антенны принята и практически опробована аналитическая форма представления закона изменения дальности до точечного отражателя за ИС T_c : $r_i(t) = r_0 + \alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3 + \dots$, $|t| \leq T_c/2$. Уточнение коэффициентов с учетом реальной геометрии обзора имеет вид:

$$r_i(t, \beta_i) \approx r_0 - Vt \sin \beta_i + \frac{V^2 t^2 \cos^2 \beta_i}{2r_0}. \quad (1)$$

Здесь r_0 – дальность до точки в центре ИС, V – путевая скорость носителя, β_i – «азимутальный» угол наблюдения относительно нормали к вектору скорости (режим бокового обзора, рис. 1), L_c – пространственный интервал синтезирования.

Таким образом, сигнал каждого точечного отражателя при такой аппроксимации характеризуется своим доплеровским сдвигом f_{di} (определяющим угловое положение отражателя) и крутизной линейной частотной модуляции k_i :

$$\dot{s}_i(t) = \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} r(t)\right) = \exp\left(j2\pi f_{di} t - j \frac{k_i}{2} t^2 + \varphi_{0i}\right).$$

РЛИ в угловых координатах описывается, в общем случае, как результат нестационарной свертки:

$$\dot{I}(\beta_i) = \int_{T_c} \dot{s}(t) \cdot \dot{h}(t, \beta_i) dt,$$

где опорная функция $\dot{h}(t, \beta_i)$ определяется «геометрией» каждого отражателя (1).

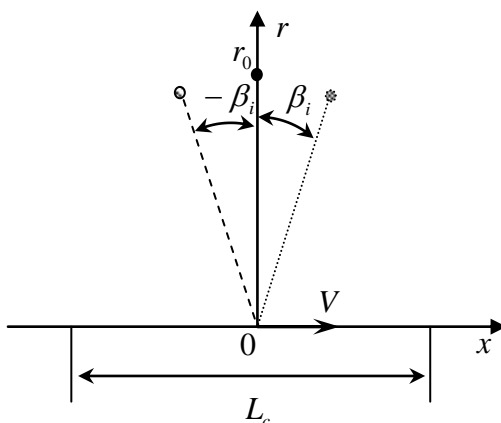


Рис. 1. Боковой обзор.

При небольших угловых размерах кадра изображения крутизну ЛЧМ можно считать одинаковой (фазовые различия в квадратичных законах незначительны). Тогда сигналы отличаются только доплеровской частотой, характеризующей угловое положение цели. Такой подход привел к классической схеме алгоритма формирования РЛИ – гармоническому анализу. Основные шаги этого способа фокусировки следующие:

– умножение строки голограммы на квадратичный фазовый множитель «центральной точки кадра» $\exp\left(j\frac{k_0}{2}t^2\right)$;

– вычисление дискретного спектра от результата умножения алгоритмом БПФ, вычисление модуля.

Основное преимущество такого способа обработки – достаточная простота. Этот алгоритм позволяет сформировать изображение кадра местности в пределах ширины следа ДНА.

При высоком пространственном разрешении и широких кадрах РЛИ проявляются основные недостатки такого алгоритма (представлено на рис. 2) [3]:

- расфокусировка при «удалении» от центра кадра (изменяется крутизна k_i);
- масштабные искажения, обусловленные представлением изображения в координатах «дальность – азимутальный угол».

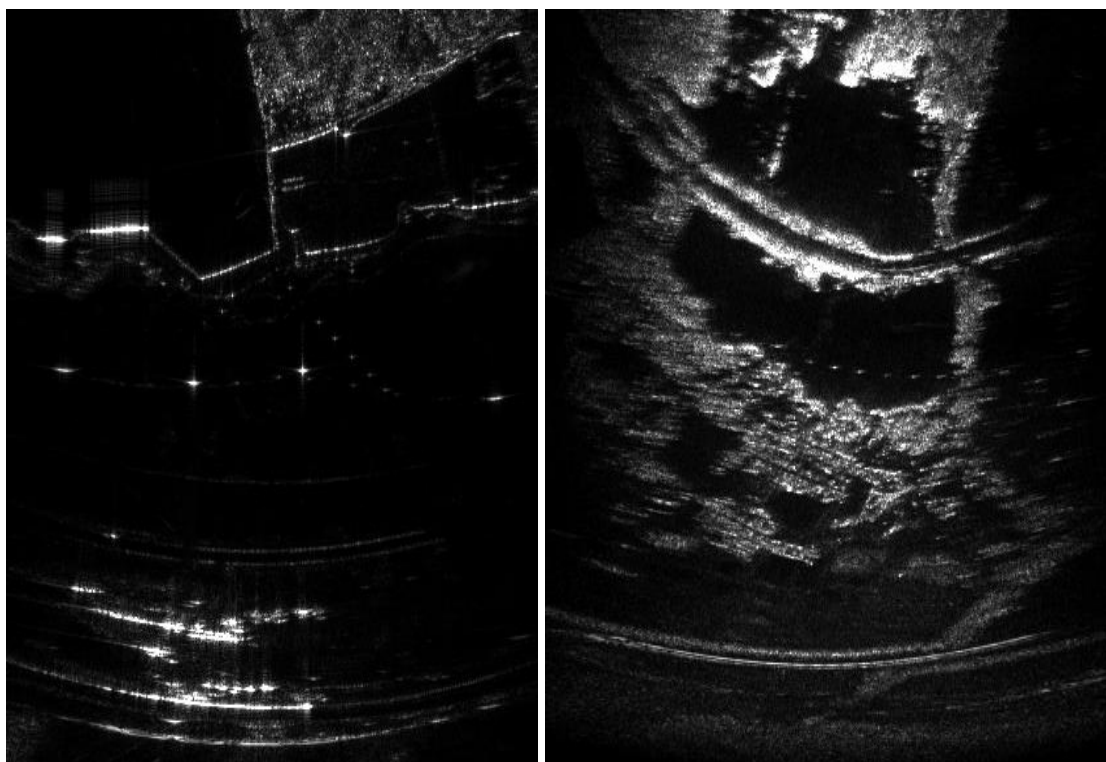


Рис. 2. Радиолокационное изображение, полученное методом гармонического анализа в РСА БАНС-Р.

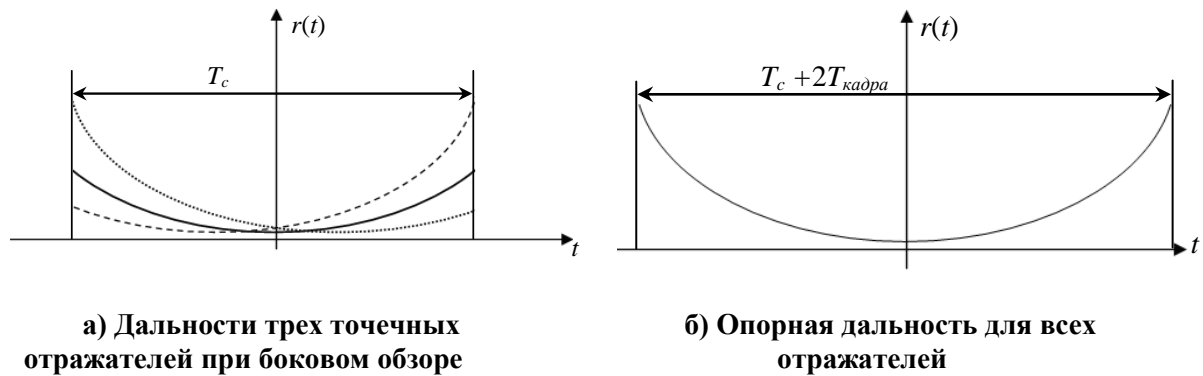
В действительности описание закона изменения фазы точечных отражателей разными функциями при прямолинейном равномерном полете – результат устоявшейся классической аппроксимации, традиционной в теории РЛС, когда сигнал цели описывают в координатах «дальность – доплер» (азимутальный угол). На самом деле законы изменения дальности до каждой точки на поверхности – интервалы одной функции изменения дальности. Можно «математически» сказать, что функции $r_i(t)$ для отражателей на одной и той же траверсной дальности r_0 практически **одинаковы**. Отличия заключаются только в смещениях по азимутальному времени – см. рис. 3,а. Тогда следует рассматривать функцию дальности, зависящую от путевого смещения относительно центра $r_i(t, t_i)$, $t_i = \Delta x_i / V$. Процесс фокусировки можно описать свёрткой сигнала РСА с «расширенной» опорной функцией

$$\dot{I}(t_i) = \int_{T_c} \dot{s}(t) \cdot \dot{h}_0(t_i - t) dt .$$

Получается, что если в качестве опорного сигнала использовать сигнал точечного отражателя за ИС T_c плюс удвоенная ширина «азимутальная ширина» кадра $T_{кадра}$, то простой сверткой сигнала голограммы и расширенного опорного сигнала можно обеспечить фокусировку всего кадра изображения. Хотя речь идет об обычной свертке, процесс азимутального сжатия можно рассматривать как нестационарный, поскольку в соответствующие интервалы времени «пересекаются» коррелированные составляющие сигнала и опорной функции. Понятно, что длительность опорной функции будет, в данном случае, больше длительности наблюдаемого сигнала, что отражает рис.3,б. В широкополосных (в пространственно-временном смысле) РСА требуется еще и учет миграции сигнала по каналам дальности. Следовательно, потребуется двумерная свертка – аналог маршрутного режима РСА [4].

Кроме того, учет траекторных нестабильностей потребует компенсации флуктуации задержки дальности (если нужно) и компенсации фазовых флуктуаций относительно расчётной (опорной) траектории.

Пример РЛИ, сформированного двумерной сверткой, представлен на рис. 4. Расфокусировка, масштабные искажения, в отличие от РЛИ рис. 2, отсутствуют.



а) Дальности трех точечных отражателей при боковом обзоре

б) Опорная дальность для всех отражателей

Рис. 3. Дальности точечных отражателей.

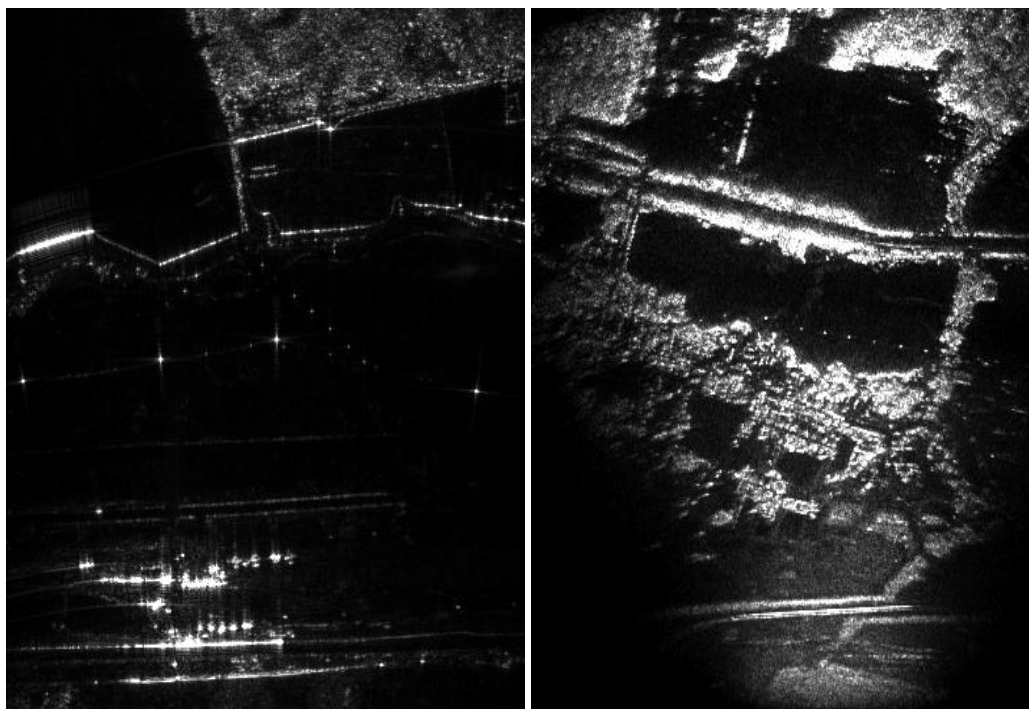


Рис. 4. Радиолокационное изображение, сформированное нестационарной свёрткой.

Возвращаясь к описанию способов обработки сигналов РСА в [2], можно сказать, что они дополняются новым способом обработки. Такой способ обработки достаточно корректно было бы называть быстрой нестационарной свёрткой. Однако, следуя мнемонике названий в [2], этот способ можно было бы назвать и быстрой обратной свёрткой (БОС). И, конечно, независимо от названий, такая обработка позволяет использовать способ быстрой свёртки (БС) [2] для обработки сигналов РСА при телескопическом (прожекторном) обзоре, избегая искажений, появляющихся при способе гармонического анализа (ГА).

Литература

1. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений / Под ред. Л.А. Школьного. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2008. – 531 с.
2. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В.Н. Антипов, В.Т. Горяинов, А.Н. Кулин, Е.Ф. Толстов и др.; Под ред. В.Т. Горяинова. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.
3. Васильев О.В., Детков А.Н., Зинченко О.Н., Криштопов А.В., Цветков О.Е. Малогабаритная радиолокационная система Р-диапазона беспилотных летательных аппаратов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2016. Т.14. № 2. С.44-54.
4. Костров В.В., Толстов Е.Ф. Проблемы дистанционного зондирования Земли с использованием космических РСА высокого разрешения // Проблемы дистанционного зондирования, распространения и дифракции радиоволн: Конспекты лекций / VII Всероссийские Армандовские чтения: молод. школа. – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2017. – С.76-113.