

Разностный метод оценки доплеровского центроида, применимый при высоких требованиях к пространственному разрешению

Е. В. Духопельникова

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, Харьков, 61002, Украина
E-mail: jane@rian.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 18 июня 2008 г.

Предложен и исследован простой в применении высокоточный метод оценки доплеровского центроида для каждой точки изображения радиолокатора с синтезированной апертурой. Приведены теоретическое обоснование метода, алгоритм применения, анализ точности оценки центроида, показан результат использования метода к данным реального радиолокатора.

1. Введение

Доплеровский центроид, или центральная доплеровская частота, является одной из важнейших характеристик сигнала радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА). Ряд перспективных направлений увеличения функциональности РСА, например, задача восстановления рельефа поверхности в системах с одной антенной [1], требует оценки значения доплеровского центроида с повышенной точностью и высоким пространственным разрешением. Однако существующие методы оценки доплеровского центроида (см. например [2-5]) ориентированы преимущественно на повышение качества РСА-изображения и не могут быть использованы для решения указанной задачи. Большинство этих методов основаны на анализе частотного спектра сигнала и не могут реализовать задачу оценки центроида с высокой точностью и хорошим пространственным разрешением одновременно. Целью настоящей работы была разработка метода оценки доплеровского центроида с точностью и пространственным разрешением, необходимыми для восстановления рельефа поверхности в одноантенном РСА переднебокового обзора. В работе представлен метод оценки, основанный на сравнении фаз

в каждой точке двух или более комплексных РСА-изображений, полученных с использованием различных исходных значений доплеровского центроида.

2. Принципы работы алгоритма

Исходной посылкой для разработки послужила идея использовать методы, применяемые в интерферометрических РСА для определения доплеровского центроида [6]. Эти методы основаны на анализе разности фаз двух РСА-изображений. Выяснилось, что существует четкая корреляция между искомыми вариациями доплеровского центроида и разностью фаз изображений, построенных с разными исходными значениями центроида. В результате дальнейших исследований были выяснены причины этого эффекта и разработана методика его применения для определения значений доплеровского центроида в каждой точке РСА-изображения.

Основной вклад в значение фазы на комплексном изображении вносят фазы при максимальных значениях амплитуд отклика точечных отражателей. Однако, поскольку в реальных РСА изображение строится только в дискрет-

ные моменты времени, максимумы, наблюдаемые на нем, на самом деле являются значениями в окрестностях действительных максимумов. Так как изменение значения центроида, заданного при синтезировании, приводит к смещению действительного максимума изображения, и, следовательно, изменению расстояния между ним и наблюдаемым максимумом, то, варьируя этот параметр, возможно изучить поведение фазы в окрестности действительного максимума. Как выяснилось, это позволяет оценить действительное значение доплеровского центроида в каждой точке изображения. Далее приводится аналитическое изложение этого подхода.

Как известно (см., например, [5]), комплексный синтезированный сигнал РСА-изображения в каждом строке дальности может быть записан в следующей форме:

$$I(t) = \int_{-T_s/2}^{T_s/2} s(\tau + t)h(\tau)d\tau,$$

где $s(t)$ – принятый РСА-сигнал, $h(t)$ – опорная функция РСА, а T_s – время синтезирования.

Запишем сигнал от единичного точечного отражателя в виде

$$s(t) = w(t) \exp \left(2\pi i \left(F_{dc}t + F_{dr} \frac{t^2}{2} \right) \right),$$

где F_{dc} – доплеровский центроид цели, F_{dr} – коэффициент линейно-частотной модуляции принятого сигнала, а $w(t)$ описывает изменение амплитуды сигнала за счет прохождения целью диаграммы направленности антенны.

Предположим, синтез проводится с центроидом, который отличается от действительного на величину ΔF_{dc} . Ввиду того что опорная функция зависит от значения доплеровского центроида, мы можем записать ее как функцию времени и отклонения ΔF_{dc} :

$$h(t, \Delta F_{dc}) = \exp \left(-2\pi i \left((F_{dc} + \Delta F_{dc})t + F_{dr} \frac{t^2}{2} \right) \right).$$

Тогда результат синтеза сигнала от точечной цели будет иметь вид:

$$I(t; \Delta F_{dc}) = \exp(2\pi i f(t)) \times \int_{-T_s/2}^{T_s/2} w(t + \tau) \exp \left(2\pi i \left(F_{dr} \tau \left(t - \frac{\Delta F_{dc}}{F_{dr}} \right) \right) \right) d\tau, \quad (1)$$

где $f(t) = \left(F_{dc}t + F_{dr} \frac{t^2}{2} \right)$ – функция, не зависящая от ΔF_{dc} .

Как видно из формулы (1), синтезирование с неправильно заданным центроидом приводит к сдвигу максимума амплитуды синтезированного сигнала из нуля в точку

$$t_{\max} = \frac{\Delta F_{dc}}{F_{dr}}.$$

Предположим также, что интервал синтезирования совпадает с раскрытием луча реальной антенны и будем использовать функцию изменения амплитуды сигнала при прохождении диаграммы направленности антенны вида

$$w(t) = \begin{cases} 1, & t \leq T_s/2, \\ 0, & t > T_s/2. \end{cases}$$

Такие предположения упрощают теоретические построения и в то же время не ведут к потере общности.

Преобразуя выражение (1) в соответствии с вышеизложенным, получим сигнал в точке реального максимума в виде:

$$I(t_{\max}; \Delta F_{dc}) = \exp \left(2\pi i \frac{\Delta F_{dc}}{F_{dr}} \left(F_{dc} + \frac{\Delta F_{dc}}{2} \right) \right) = \exp(2\pi i f(t_{\max})).$$

Фаза сигнала в этой точке

$$\theta(\Delta F_{dc}) \equiv 2\pi f(t_{\max}) = 2\pi \frac{\Delta F_{dc}}{F_{dr}} \left(F_{dc} + \frac{\Delta F_{dc}}{2} \right)$$

Как было указано выше, анализ изображения проводится в фиксированные моменты времени. Предположим, что они являются равноотстоящими с интервалом Δt . Тогда максимум отклика будет наблюдаться в момент времени

$$T_{\max} = \Delta t \left\lfloor \frac{\Delta F_{dc}}{F_{dr} \Delta t} \right\rfloor,$$

где квадратными скобками обозначено взятие целой части выражения.

На рис. 1 схематически представлены амплитуды синтезированного сигнала, отраженного от точечной цели, при разных значениях ΔF_{dc} и отмечены точки наблюдаемого и действительного максимумов.

Как видно из рисунка, точка A , соответствующая наблюдаемому максимуму, будет определяться как положением действительного максимума B , так и его сдвигом относительно ближайшего отсчета дискретизации.

Обозначим $\delta = T_{\max} - t_{\max}$ временной сдвиг максимума амплитуды синтезированного сигнала в рамках одного элемента дискретизации.

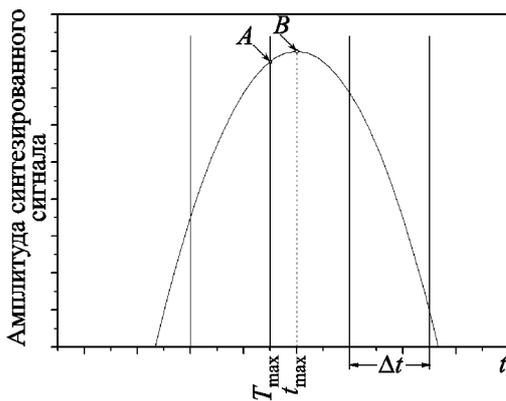


Рис. 1. Точки наблюдаемого (A) и действительного (B) максимумов амплитуды сигнала от точечной цели. Вертикальными линиями обозначены отсчеты дискретизации

Тогда выражение для сигнала в точке наблюдаемого максимума принимает вид:

$$I(T_{\max}, \Delta F_{dc}) = \exp \left(2\pi i f(T_{\max}) + F_{dr} \delta \frac{T_{\max}}{2} \right) \times \int_{-T_s/2+T_{\max}/2}^{T_s/2-T_{\max}/2} \exp(2\pi i F_{dr} \tau \delta) d\tau.$$

Поскольку интеграл принимает реальное значение, фаза синтезированного сигнала в точке наблюдаемого максимума имеет вид

$$\begin{aligned} \phi(\Delta F_{dc}) &= \arg(I(T_{\max}, \Delta F_{dc})) = \\ &= 2\pi \left(f(T_{\max}) + F_{dr} \delta \frac{T_{\max}}{2} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Первое слагаемое в (2) описывает изменение фазы при переходе из одного элемента дискретизации в другой, а второе – изменение фазы за счет сдвига наблюдаемого максимума относительно положения действительного максимума.

На рис. 2 представлены зависимости фаз от разности между действительным значением центроида и значением, заданным при синтезе. Сплошная линия соответствует фазе в точке наблюдаемого максимума $\Theta(\Delta F_{dc})$, а пунктирная линия – фазе в точке действительного максимума $\Phi(\Delta F_{dc})$.

Гладкие участки кривой представляют собой изменение фазы изображения в рамках одного элемента дискретизации. Скачок между ними вызван переходом максимума в другой элемент дискретизации. Положение центральной точки каждого элемента разрешения ($t_{\max} = T_{\max}$, $\delta = 0$) совпадает со значением фазы действительного максимума сигнала, а наклон кривой в рамках элемента дискретизации обусловлен членом $\delta T_{\max}/2$ в выражении (2).

Во избежание декорреляции изображений, измерения проводятся на участке, где вариация сдвига максимума амплитуды синтезированного сигнала по времени $\Delta \delta \ll \Delta t$. Тогда, замеряя производную фазы изображения, мы

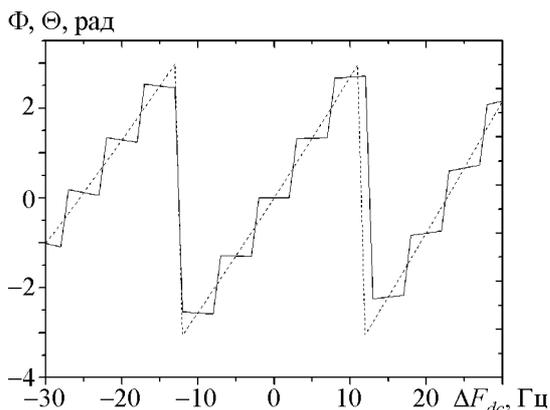


Рис. 2. Фаза при максимальном значении амплитуды синтезированного сигнала в зависимости от разности между действительным и наблюдаемым при синтезировании значениями центроида: сплошная линия – $\Theta(\Delta F_{dc})$; пунктирная – $\Phi(\Delta F_{dc})$

получаем возможность рассчитать время T_{max} , т. е. сдвиг по времени изображения цели относительно ее реального положения.

После дифференцирования (2) находим, что отклонение заданного при синтезе доплеровского центроида от его действительного значения может быть выражено следующим образом:

$$\Delta F_{dc} \approx T_{max} F_{dr} = \frac{d}{d\delta} \phi(\Delta F_{dc}) / \pi = \frac{d\phi(\Delta F_{dc})}{d(\Delta F_{dc})} \frac{F_{dr}}{\pi} \quad (3)$$

Нестрогое равенство обусловлено тем фактом, что найденное время T_{max} известно с точностью до нескольких периодов дискретизации.

Полученные результаты позволили предложить следующую методику определения доплеровского центроида. Сначала каким-либо из известных методов оценивается значение центроида, которое выбирается в качестве стартового. Затем вблизи стартового значения строятся два РСА-изображения с различными, но близкими центроидами: $F_{dc_1} = F_{dc_0} - \Delta F/2$ и $F_{dc_2} = F_{dc_0} + \Delta F/2$, где F_{dc_0} – выбранное стартовое значение. Далее, по полученным изображениям вычисляется интерферометрическая фаза в каждой точке изображения по формуле

$$\psi(R, t) = \arg(I_1(R, t) \cdot I_2^*(R, t)),$$

где $I_1(R, t)$ и $I_2(R, t)$ – комплексные значения синтезированного сигнала в каждой точке двух изображений, а звездочкой обозначена операция комплексного сопряжения. Аппроксимируя производную фазы из формулы (3), получаем значение для сдвига исходного центроида относительно действительного:

$$\Delta F_{dc} \approx \frac{\psi(R, t)}{\Delta F} F_{dr} / \pi. \quad (4)$$

3. Преимущества предлагаемого метода

На рис. 3 представлен результат оценки отклонения доплеровского центроида от нулевого значения согласно формуле (4) для модельного сигнала от двух целей, расположенных на таком расстоянии, чтобы оказаться в соседних элементах разрешения РСА-изображения, с учетом геометрического искажения за счет разницы в доплеровских центроидах. Для демонстрации разрешения пунктирной

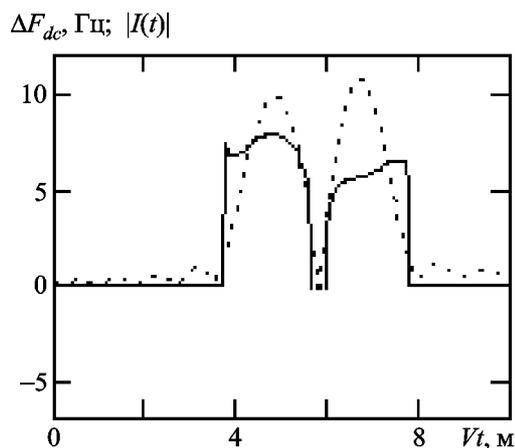


Рис. 3. Результат оценки отклонения доплеровского центроида от нуля для двух близко расположенных целей в одном стробе дальности (—) и общий вид амплитуды синтезированного сигнала (- - - -)

линией показан общий вид амплитуды синтезированного сигнала для данной конфигурации отражателей. Для моделирования выбирались следующие параметры системы: дальность – 3000 м, скорость носителя (V) – 50 м/с, длина волны излучения РЛС – 2 см, время синтеза – 0.7 с. Для удобства восприятия изображения на рисунке не показаны значения сдвига центроида для сигнала с амплитудой менее –10 дБ.

Из рисунка хорошо видно, что разностный метод позволяет верно оценить доплеровский центроид для целей, находящихся на изображении крайне близко. Разрешение разностного метода определяется шириной диаграммы направленности синтезированной антенны.

В свою очередь, большинство существующих сейчас методов оценки доплеровского центроида по сигналу РЛС (см. например [2-5]) основываются либо на фурье-методе, либо на методе АССС (Antenna Cross Correlation Coefficient) [7]. Для обоих методов требуется существенное изменение амплитуды сигнала на элементе пространственного разрешения, и, таким образом, достижимое разрешение для них определяется шириной диаграммы направленности реальной антенны. К примеру, ни один из них не позволяет пространственно разрешить доплеровский центроид для такого взаимного расположения целей, которое использовалось для построения рис. 3. Отметим также, что увеличение ширины луча реальной антенны РЛС, и, соответственно, числа отсчетов, используемых для оценки, как для этих методов, так и для разностного приводит к увеличению точности определения центроида. Однако в случае фурье- и АССС методов пространственное разрешение при этом снижается, а для разностного метода – улучшается.

Еще одним методом оценки доплеровского центроида является многовзглядовый алгоритм, предложенный в [8] и подробно описанный в [1]. Он также позволяет получить лучшее разрешение, чем упомянутые выше методы, что делает его применимым к задаче определения рельефа в радиолокаторах с одной антенной. Однако этот метод уступает разностному в достижимом разрешении как минимум на порядок.

Таким образом, разностный метод позволяет достичь наиболее высокого пространственного разрешения среди всех известных методов оценки доплеровского центроида. Это связано с тем, что он использует фазу синтезированного сигнала. Пространственное разрешение предлагаемого метода соответствует разрешению РСА-изображения, как это показано на рис. 3.

Вторым важным параметром является точность определения доплеровского центроида. В этом плане разумным представляется сравнение с методом, обеспечивающим сопоставимое пространственное разрешение, а именно упомянутым выше многовзглядовым алгоритмом.

Запишем выражение для среднеквадратичного отклонения ошибки доплеровского центроида для разностного метода. Вывод этого выражения приведен в Приложении.

$$\delta_{dc} \approx \frac{\delta_n}{\sqrt{3N}} T_s F_{dr} \sqrt{1 + 3 \left(\frac{\Delta F_{dc}}{F_{dr} T_s} \right)^2}, \quad (5)$$

где δ_n – среднеквадратичное отклонение для шума сигнала от точечного отражателя, принимаемого радиолокатором, нормированное на величину сигнала, а N – число отсчетов принятого сигнала.

Среднеквадратичное отклонение ошибки оценки центроида для многовзглядового алгоритма в принятых нами обозначениях записывается как

$$\delta_L = F_{dr} T_s \frac{1}{A_0} \frac{\delta_n}{\sqrt{L} \sqrt{K}} \times \sqrt{3 \frac{L+1}{L-1} \left(1 + 60 \left(\frac{\Delta F_{dc}}{F_{dr} T_s} \right)^2 \frac{(L+1)^2}{L^2 - 4} \right)}, \quad (6)$$

где $\delta_n \approx 5.6$ дБ – среднеквадратичное отклонение логарифмически преобразованного нормированного спекл-шума на РСА-изображении, L – количество взглядов изображения, K –

количество точек в усредняющем окне, а A_0 – коэффициент описывающий ширину луча антенны. Заметим, что в выражения (5) и (6) входят разные параметры, описывающие шум. В первом случае это шум, связанный с аппаратными погрешностями (δ_n), а во втором – не зависящий от системы спекл-шум (δ_η).

Отметим, что многовзглядовый метод снижает разрешение изображения в LK раз и, следовательно, для сравнения методов при одном и том же разрешении необходимо усреднить LK отсчетов изображения, полученного первым методом, что приведет к снижению дисперсии шума оценки центроида в \sqrt{LK} раз.

Таким образом, при одинаковом разрешении отношение шумов оценки центроида указанными методами имеет вид:

$$\frac{\delta_{dc}}{\delta_L} \approx \frac{\delta_n A_0 \sqrt{\left(1 + 3 \left(\frac{\Delta F_{dc}}{F_{dr} T_s}\right)^2\right)}}{\delta_\eta \sqrt{3N} \sqrt{3 \frac{L+1}{L-1} \left(1 + 60 \left(\frac{\Delta F_{dc}}{F_{dr} T_s}\right)^2 \frac{(L+1)^2}{L^2 - 4}\right)}} \quad (7)$$

Подставляя в (7) параметры модельной РЛС (см. выше), использованные для построения рис. 3, и предполагая, что соотношение сигнал/шум в РЛС равно в среднем 10 дБ, а частота повторения импульсов в системе составляет 15 кГц, получаем, что δ_{dc}/δ_L при малых отклонениях доплеровского центроида равно приблизительно 0.1.

Из приведенной формулы видно, что разностный метод менее чувствителен к величине ΔF_{dc} ввиду существенно меньшего коэффициента, с которым данная величина входит в выражение для шума оценки центроида в этом методе.

Обратим внимание также на тот факт, что параметры, описывающие шум оценки центроида для многовзглядового метода, не зависят от характеристик радиолокатора, за исключением параметра A_0 , в свою очередь, связанного с разрешением. Таким образом, улучшение точности оценки шума возможно

только при снижении пространственного разрешения системы. В свою очередь, предлагаемый нами метод позволяет улучшать оценку при увеличении частоты повторения импульсов РЛС и снижении шумов приемного тракта.

4. Экспериментальные результаты

Предлагаемый метод был протестирован на данных, полученных с помощью самолетного РСА [9]. На рис. 4, а представлено РСА-изображение местности. Рис. 4, б показывает вариации доплеровского центроида относительно значений, найденных геометрическим методом для плоской поверхности, т. е. вариации, вызванные рельефом местности.

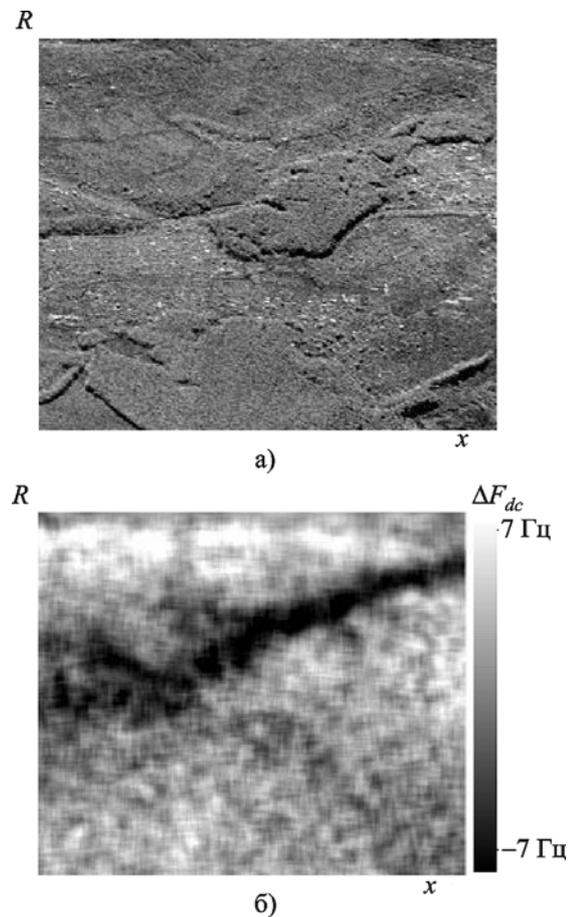


Рис. 4. РСА-изображение сцены с разрешением 3×3 м (а) и вариации доплеровского центроида, вызванные рельефом местности, (б)

Из рисунка видно, что разностный метод позволяет оценить доплеровский центроид с разрешением, достаточным для определения трехмерного рельефа местности в реальном РСА.

5. Выводы

В работе показана принципиальная возможность определения доплеровского центроида в каждой точке РСА-изображения путем анализа фазы двух изображений, полученных с использованием разных стартовых значений центроида, и разработана соответствующая методика оценки центроида. Сопоставление с другими методами и экспериментальные результаты демонстрируют высокую эффективность предложенного подхода.

Приложение. Расчет среднеквадратичного отклонения для шума оценки центроида разностным методом

Рассмотрим единичный синтезированный сигнал

$$I_n(T_{\max}, dF) = \sum_{k=-N/2}^{N/2} (s(T_{\max} + k\Delta t) + \eta(T_{\max} + k\Delta t)) \times \exp \left[2\pi i \left((F_{dc} + \Delta F_{dc} + dF)t + F_{dr} \frac{t^2}{2} \right) \right],$$

где $s(T)$ нормированный сигнал от точечной цели, т. е.

$$\left| \sum_{k=-N/2}^{N/2} s(T_{\max} + k\Delta t) \times \exp \left[2\pi i \left((F_{dc} + \Delta F_{dc})t + F_{dr} \frac{t^2}{2} \right) \right] \right| = 1;$$

$\eta(t) = \eta_{re}(t) + i\eta_{im}(t)$ – комплексный шум, действительная и мнимая компоненты которого

распределены нормально с математическим ожиданием, равным 0, и среднеквадратичным отклонением, равным δ_n/N .

Введем обозначения:

$$I(T_{\max}, dF) = \sum_{k=-N/2}^{N/2} s(T_{\max} + k\Delta t) \times \exp \left[2\pi i \left((F_{dc} + \Delta F_{dc} + dF)t + F_{dr} \frac{t^2}{2} \right) \right]$$

и

$$N(T_{\max}, dF) = \sum_{k=-N/2}^{N/2} \eta(T_{\max} + k\Delta t) \times \exp \left[2\pi i \left((F_{dc} + \Delta F_{dc} + dF)t + F_{dr} \frac{t^2}{2} \right) \right].$$

Тогда, согласно (3) отклонение для доплеровского центроида

$$\Delta F_{dc} \approx \frac{d}{dF} \arg(I(T_{\max}, dF)) \cdot F_{dr} / \pi.$$

Оцениваемое отклонение доплеровского центроида имеет вид

$$\Delta F_{dc}^n = \frac{d}{dF} \arg(I_n(T_{\max}, dF)) \cdot F_{dr} / \pi.$$

Фаза зашумленного синтезированного сигнала может быть аппроксимирована как

$$\begin{aligned} \varphi_n(T_{\max}, dF) &= \arg(I_n(T_{\max}, dF)) = \\ &= \arg(I(T_{\max}, dF)) + \\ &+ \operatorname{Re}(I(T_{\max}, dF)) \operatorname{Im}(N(T_{\max}, dF)) - \\ &- \operatorname{Im}(I(T_{\max}, dF)) \operatorname{Re}(N(T_{\max}, dF)), \end{aligned}$$

ее производная равна

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_n}{dF} &= \frac{d\varphi(T_{\max})}{dF} + \\ &+ \frac{d}{dF} (\operatorname{Re}(I(T_{\max}, dF)) \operatorname{Im}(N(T_{\max}, dF)) - \\ &- \operatorname{Im}(I(T_{\max}, dF)) \operatorname{Re}(N(T_{\max}, dF))) \equiv \\ &\equiv \Delta F_{dc} \pi / F_{dr} + \frac{d\psi(T_{\max}, dF)}{dF}. \end{aligned}$$

Для простоты вычислений второго слагаемого предположим, что

$$\arg(I(T_{\max}, 0)) = 0$$

(другие случаи сводятся к данному простым добавлением константы в фазу опорной функции суммы, что не меняет производной фазы результирующей функции).

Тогда

$$\begin{aligned} \frac{d\psi(T_{\max}, dF)}{dF} &\approx \\ &\approx \frac{d \operatorname{Im}(N(T_{\max}, dF))}{dF} - \frac{\Delta F_{dc} \pi}{F_{dr}} \operatorname{Re}(N(T_{\max}, 0)). \end{aligned}$$

Обратим внимание на то, что исходя из свойств преобразования Бокса–Мюллера можно записать

$$N(T_{\max}, dF) = \sum_{k=-N/2}^{N/2} \dot{\eta}(T_{\max} + k\Delta t) \exp(2\pi i dF t),$$

где $\dot{\eta}(t) = \dot{\eta}_{re}(t) + i\dot{\eta}_{im}(t)$ – комплексный шум, обладающий теми же статистическими свойствами, что и η .

Тогда

$$\begin{aligned} \frac{d\psi(T_{\max}, dF)}{dF} &\approx \\ &\approx \sum_{k=-N/2}^{N/2} \left(2\pi k \Delta t - \frac{\Delta F_{dc} \pi}{F_{dr}} \right) [\dot{\eta}_{re}(T_{\max} + k\Delta t)]. \end{aligned}$$

С учетом предыдущих предположений оценка отклонения доплеровского центроида может быть записана как

$$\begin{aligned} \Delta F_{dc}^n &\approx \Delta F_{dc} + \\ &+ \frac{F_{dr}}{\pi} \sum_{k=-N/2}^{N/2} \left(2\pi k \Delta t - \frac{\Delta F_{dc} \pi}{F_{dr}} \right) [\dot{\eta}_{re}(T_{\max} + k\Delta t)]. \end{aligned}$$

Воспользовавшись независимостью шумов сигнала в каждом отсчете, мы можем получить математическое ожидание оценки отклонения доплеровского центроида:

$$M(\Delta F_{dc}^n) = \Delta F_{dc}.$$

Таким образом, оценка отклонения центроида является несмещенной.

Дисперсия оценки отклонения центроида, в свою очередь, записывается как

$$D(\Delta F_{dc}^n) = \frac{\delta_n^2}{3N} T_s^2 F_{dr}^2 \left[1 + 3 \left(\frac{\Delta F_{dc}}{F_{dr} T_s} \right)^2 \right],$$

и искомое значение среднеквадратичного отклонения шума оценки отклонения центроида

$$\delta_{dc} = \frac{\delta_n}{\sqrt{3N}} T_s F_{dr} \sqrt{1 + 3 \left(\frac{\Delta F_{dc}}{F_{dr} T_s} \right)^2}.$$

Литература

1. Bezvesilnyy O. O., Dukhopelnykova I. V., Vynogradov V. V., and Vavriv D. M. Retrieving 3-D Topography by Using a Single-Antenna Squint-Mode Airborne SAR // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. – 2007. – Vol. 45, No. 11. – P. 3574-3581.
2. Li F.-K., Held D. N., Curlander J. C., and Wu C. Doppler parameter estimation for spaceborne synthetic-

- aperture radars // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. – 1985. – Vol. 23, No. 1. – P. 47-56.
3. Madsen S. N. Estimating the Doppler centroid of SAR data // IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst. – 1989. – Vol. 25, No. 2. – P. 134-140.
 4. Cumming I. G. A spatially selective approach to Doppler estimation for frame-based satellite SAR processing // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. – 2004. – Vol. 42, No. 6. – P. 1135-1148.
 5. O. O. Bezvesilnyi, V. V. Vynogradov, and D. M. Vavriv. Estimating Doppler centroid and autofocus for airborne SAR // Proc. of the International Radar Symp. (IRS2005). – Berlin (Germany). – 2005. – P. 59-63.
 6. Rosen P. A., Hensley S., Joughin I. R., Li F. K., Madsen S. N., Rodrigues E., Goldstein R. M. Synthetic Aperture Radar Interferometry // Proc. IEEE – 2000. – Vol. 88, No. 3.
 7. Cumming I. G., Wong F. H. Digital Processing of Synthetic Aperture Data: Algorithms and Implementation. – Artech House, 2005.
 8. Moreira A. Real-time synthetic aperture radar (SAR) processing with a new subaperture approach // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. – 1992. – Vol. 30, No. 4. – P. 714-722.
 9. Vavriv D. M., Vynogradov V. V., Volkov V. A., Kozhyn R. V., Bezvesilnyi O. O., Alekseenkov S. V., Shevchenko A. V., and Vasilevskiy M. P. Cost-effective Ku-band airborne SAR with Doppler centroid estimation, autofocus and indication of moving targets // Proc. of the 2nd European Radar Conf. 2005 (EuRAD2005). – Paris (France) – 2005. – P. 21-24.

**Різницевий метод оцінки
доплерівського центроїда,
що може бути застосований за високих
вимог до просторового розрізнення**

Є. В. Духопельникова

Запропоновано та досліджено простий у використанні високоточний метод оцінки доплерівського центроїда для кожної точки зображення радіолокатора з синтезованою апертурою. Наведено теоретичне обґрунтування методу, алгоритм застосування, аналіз точності оцінки центроїда, показано результат використання методу на даних реального радіолокатора.

**Difference Doppler Centroid Estimation
Method with High Spatial Resolution**

Ie. V. Dukhopelnykova

An easy and high-precision technique is proposed for Doppler centroid estimating in any SAR image point. Theoretical justification and using rules are presented, as well as precision analysis and result of using with real radar data are shown.