

Алгоритм оценки тангенциальной скорости объекта для РСА космического базирования

К.К. Храмов¹, Е.Ф. Толстов², В.В. Костров¹

¹Муромский институт Владимирского государственного университета
602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23

E-mail: vvk@mit.ru

²ЗАО «АЭРОКОН»

140180, г. Жуковский, МО, ул. Жуковского, 1

E-mail: e_tolstov@mail.ru

В докладе рассмотрен алгоритм оценки тангенциальной скорости движущегося объекта для системы селекции движущихся целей, основанной на использовании двух апертур, смещенных по траектории движения носителя. Выполнено моделирование и приведены особенности работы этого алгоритма. Определены погрешности оценки тангенциальной скорости цели при использовании различных оконных функций.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированием апертуры (РСА), селекция движущихся целей (СДЦ), тангенциальная скорость, апертура, оценка скорости

The tangential velocity estimation algorithms for space-borne SAR

К.К. Khramov¹, Е.Ф. Tolstov², V.V. Kostrov¹

¹Murom Institute of Vladimir State University

²AEROCON Company, Zhukovsky

The report describes an algorithm for estimating the tangential velocity of moving targets for the moving target indication system based on the use two apertures displaced along trajectory of the spacecraft. Simulation has been performed and the features of the operation of this algorithm are presented. The errors in estimating the tangential velocity of the target are determined.

Keywords: synthetic aperture radar (SAR), moving target indication (MTI), tangential velocity, aperture, velocity estimation

Введение

Последние десятилетия характеризуются интенсивным развитием систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), в частности радиолокационных систем с синтезированной апертурой антенны, которые характеризуются высоким разрешением и обладают широкими возможностями [1-3]. Основными сферами их применения являются: мониторинг природных ресурсов, чрезвычайных ситуаций, экологический мониторинг, картографирование и т.д.

Важная особенность радиолокаторов с синтезированием апертуры (РСА) – это возможность работы в режиме селекции движущихся целей (СДЦ), основными задачами которого являются обнаружение движущихся целей, измерение их координат и параметров движения [3-11]. Принцип обработки траекторных сигналов в системах СДЦ основан на оценке дополнительного доплеровского набега частоты (фазы) отраженных сигналов, получаемого за счет движения объектов [3-4, 11].

В работе предлагается и исследуется алгоритм оценки тангенциальной скорости движущегося объекта для системы селекции движущихся целей, основанной на использовании двух апертур, смещенных по траектории движения носителя. Проводится моделирование алгоритма на примере точечной движущейся цели и анализ полученных характеристик.

Постановка задачи

Рассмотрим алгоритм селекции движущихся целей по тангенциальной скорости, основанный на использовании двух апертур, смещенных по траектории друг относительно друга на расстояние d по ходу движения носителя радиолокатора с синтезированием апертуры (РСА), для случая нормального бокового обзора, когда угол наблюдения $\theta_n = 90^\circ$. Величина смещения d определяет характеристики и возможности системы СДЦ.

Пусть точечная цель движется с постоянной тангенциальной скоростью V_t (рис. 1). Выражение для траекторного сигнала, отраженного от цели в одном элементе разрешения по дальности, для каждой апертуры запишется в виде [1-3, 10]

$$s_i(t) = A_{oi} \exp \left[j \frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{V_0^2 + 2V_0V_t + V_t^2}{2R_0} t^2 \right) + j\varphi_{oi} \right],$$

где A_{oi} , φ_{oi} – амплитуда и начальная фаза отраженного сигнала i -й апертуры ($i=1, 2$);

V_0 – орбитальная скорость носителя РСА;

R_0 – расстояние между носителем РСА и центром кадра при $t=0$;

λ – длина волны зондирующего сигнала.

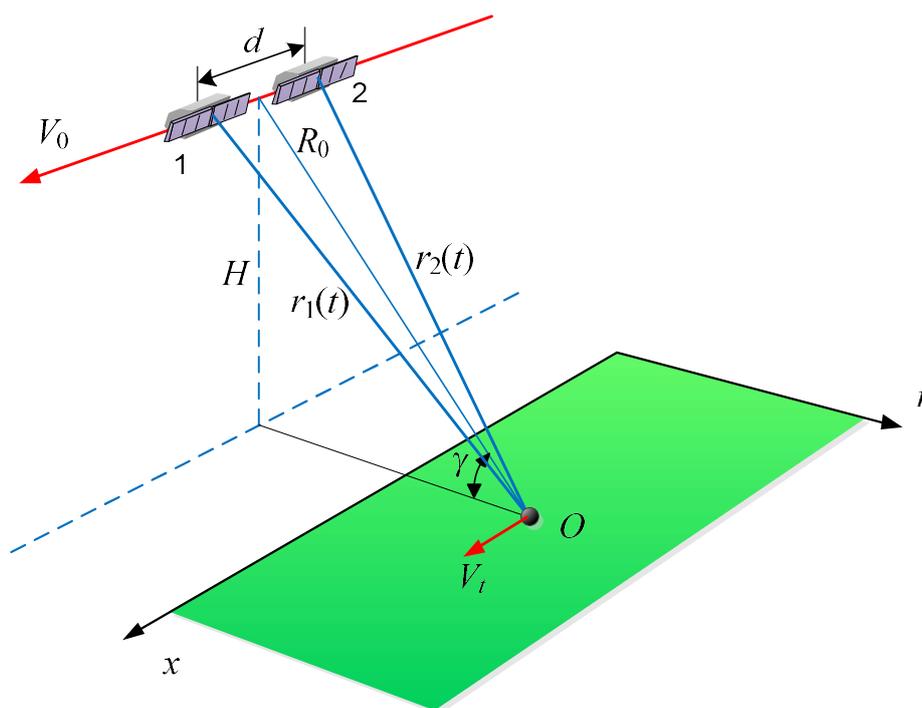


Рис. 1. Геометрические построения при использовании синтезированных апертур, смещенных по траектории

После компенсации квадратичного фазового набегга, обусловленного движением носителя, за счет умножения на опорную функцию $\hat{h}_x(t)$, комплексная амплитуда $\hat{\rho}_i$ на выходе системы обработки, согласованной на интервале синтезирования $[-T_{ca}/2; T_{ca}/2]$ с сигналом неподвижного объекта, с учетом малости слагаемого $V_t^2 t^2 / (2R_0)$, запишется в виде

$$\dot{\rho}_i = A_{0i} \exp(j\varphi_{0i}) \int_{-T_{ca}/2}^{T_{ca}/2} \exp\left[j \frac{4\pi}{\lambda} \frac{V_0 V_t}{R_0} t^2\right] dt. \quad (1)$$

Как следует из выражения (1) информация о тангенциальной скорости цели может быть извлечена при анализе фазовой характеристики разностного комплексного сигнала. Комплексную амплитуду $\dot{\rho}_i$ в каждом канале можно представить в показательной форме

$$\dot{\rho}_i = |\dot{\rho}_i| \exp(j\varphi_i),$$

где $|\dot{\rho}_i|$ – амплитуда радиолокационного изображения (РЛИ); φ_i – фаза сигнала.

Алгоритм селекции движущихся целей по их тангенциальным скоростям при использовании апертур, смещенных по траектории, можно представить в виде модели системы СДЦ (рис. 2), где $\Delta\varphi$ – разность фаз сигналов обнаруженных целей; $|\cdot|$ и $\arg(\cdot)$ – блоки вычисления модуля и фазы сигнала, соответственно [2].

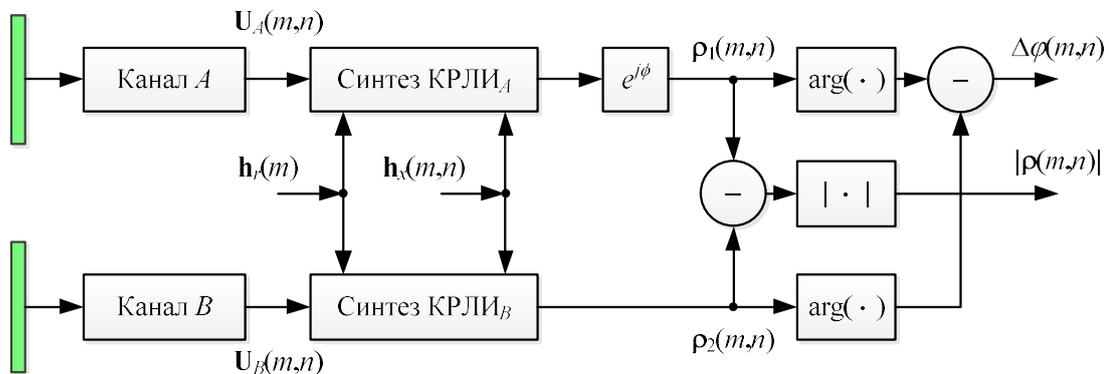


Рис. 2. Модель системы СДЦ по тангенциальной скорости

При моделировании полученной системы СДЦ, выполненном в [10] для РСА S-диапазона, $V_0 = 7,61$ км/с, $\gamma = 40,2^\circ$ и пространственным разрешением 2,7 м, были получены следующие отклики от цели (рис. 3) и разность фаз системы СДЦ (рис. 4).

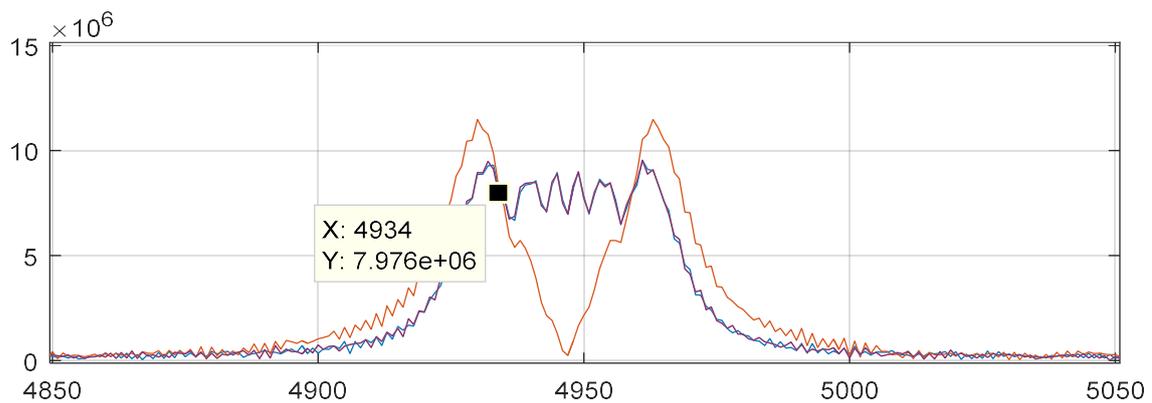


Рис. 3. Отклики от цели на РЛИ ($|\rho_1|$ и $|\rho_2|$) и отклик $|\rho|$ системы СДЦ при $V_t = 20$ м/с и $d = 450$ м

Как показало моделирование рассмотренного алгоритма СДЦ, при тангенциальном движении точечной цели ее отклик на радиолокационном изображении размывается

(расширяется) по азимутальной координате и смещается на величину Δx в сторону движения цели. Эти эффекты проявляются интенсивнее при увеличении V_t и разрешающей способности РСА [10]. При этом центр отклика не совпадает с азимутальным положением неподвижного объекта (на рис. 3 и 4 показано маркером).

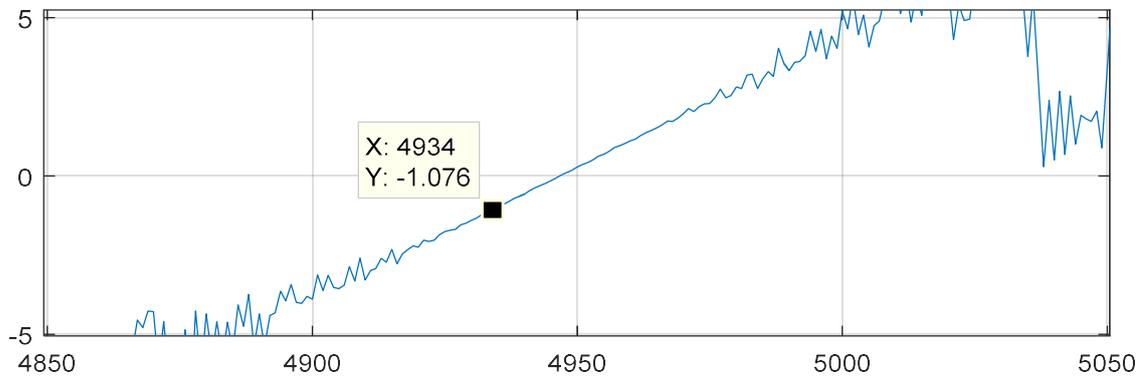


Рис. 4. Разность фаз $\Delta\varphi$ в канале дальности с обнаруженной целью при $V_t=20$ м/с и $d=450$ м

Отклик системы СДЦ имеет глубокий провал в центре, указывающий на совпадение (синфазность) комплексных сигналов $\dot{\rho}_1$ и $\dot{\rho}_2$ в этой точке. Разность фаз в текущем канале дальности (рис. 4) имеет линейный характер. При этом фаза азимутальной координаты, соответствующей исходному положению цели, отстает или опережает (в зависимости от направления движения цели) фазу центра отклика.

Амплитудные и фазовые характеристики системы СДЦ представлены на рис. 5-6. Из анализа рис. 5 следует, что при увеличении V_t возрастает амплитуда отклика системы СДЦ. При этом с ростом базы d амплитуда отклика растет с большей крутизной, однако при этом сужается диапазон однозначно определяемых тангенциальных скоростей цели. Разность фаз $\Delta\varphi$ является пропорциональной как скорости V_t , так и расстоянию d (рис. 6). Азимутальное смещение положения отклика движущейся цели Δx относительно отклика неподвижного объекта зависит только от тангенциальной скорости V_t , не зависит от d и определяется выражением

$$\Delta x = V_t T_{ca} / \delta_x,$$

где δ_x – азимутальное разрешение РСА.

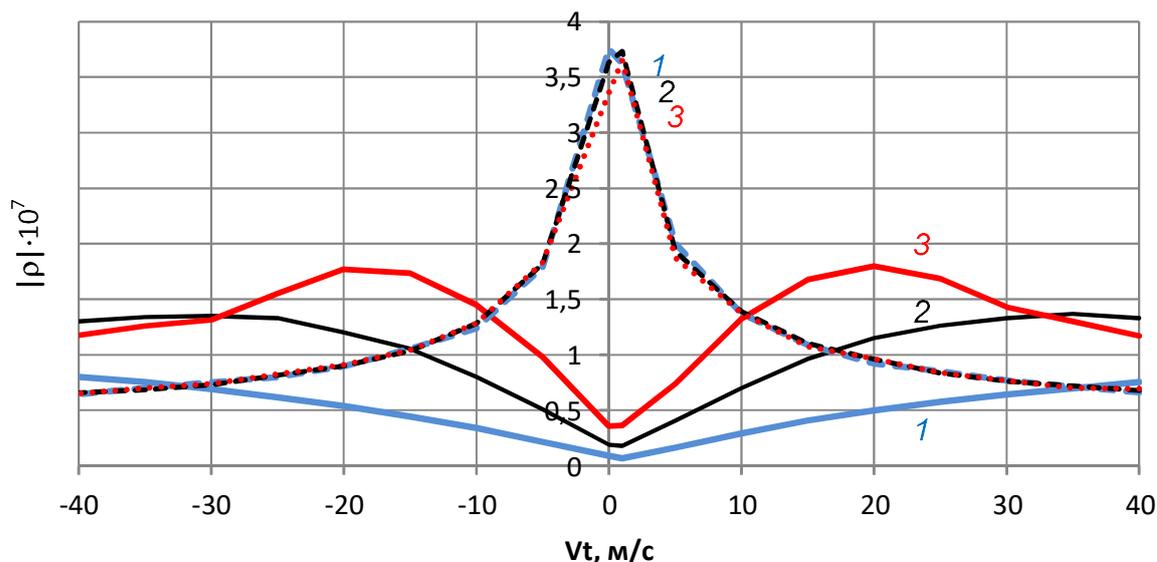


Рис. 5. Амплитуда откликов на РЛИ (пунктир) и отклика системы СДЦ (сплошная) при $d=180$ м (1), $d=450$ м (2) и $d=900$ м (3)

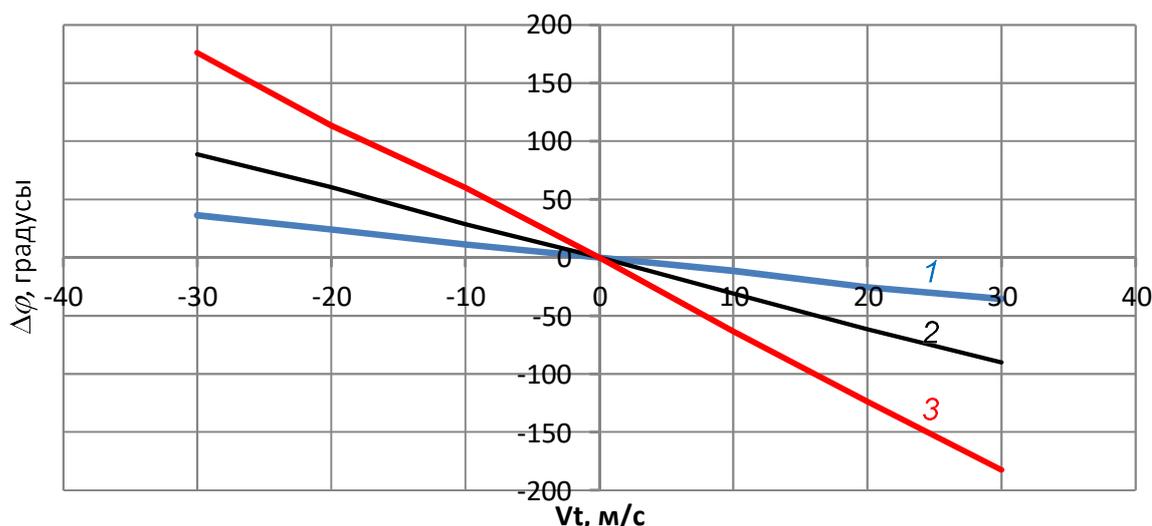


Рис. 6. Разность фаз при $d=180$ м (1), $d=450$ м (2) и $d=900$ м (3)

Алгоритм оценки тангенциальной скорости

Анализ приведенных выше амплитудных и фазовых характеристик откликов системы СДЦ и характера их поведения при изменении V_t свидетельствует о том, что оценка \hat{V}_t тангенциальной скорости цели может быть выполнена при анализе фазовой характеристики разностного комплексного сигнала. Однако для однозначности такого определения требуется информация о ширине отклика цели и его азимутальном положении, которая может быть получена из РЛИ системы СДЦ. Таким образом, можно предложить следующий алгоритм оценки тангенциальной скорости движущегося объекта (рис. 7).

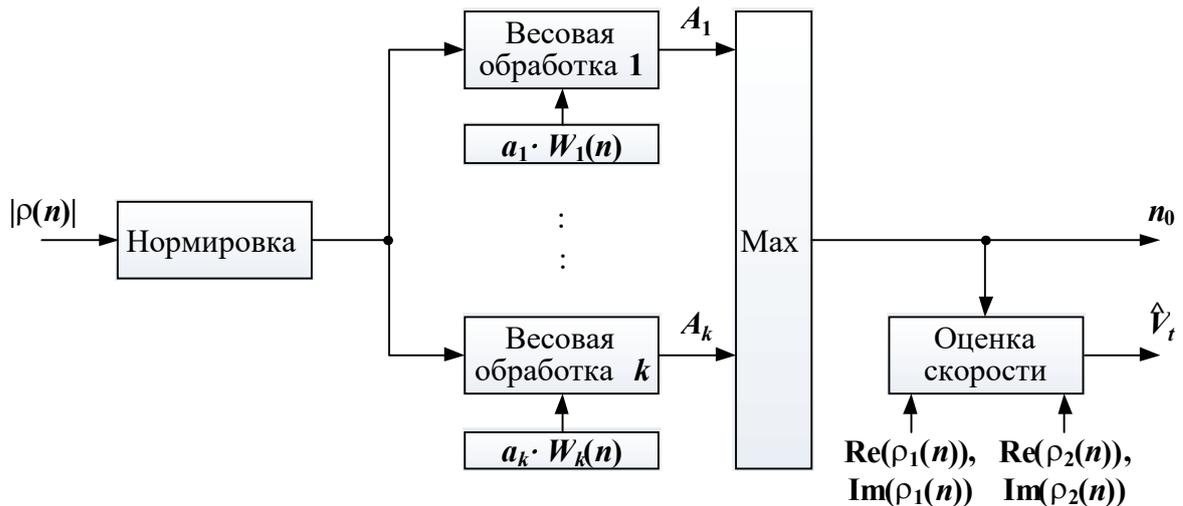


Рис. 7. Схема алгоритма оценки тангенциальной скорости

Структура содержит k каналов весовой обработки сигналов, каждый из которых настроен на обнаружение (выделение) откликов движущихся объектов, имеющих определенную тангенциальную скорость. Допустим, если канал настроен на обнаружение отклика ρ_0 системы СДЦ, создаваемого объектом, который движется с тангенциальной скоростью $V_t = 10$ м/с (назовем такой канал К.10), то амплитуда A на его выходе будет максимальной при наличии отклика ρ_0 . Блок Max реализует алгоритм поиска максимального значения.

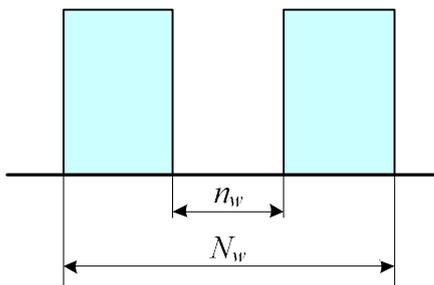


Рис. 8. Форма исследуемой оконной функции $W_k(n)$

Весовая обработка выполняется с использованием оконных функций $a_k \cdot W_k(n)$, где a_k – масштабирующий множитель, форма и длительность которых определяется видом отклика системы СДЦ при конкретном значении тангенциальной скорости. В простейшем случае функция $W_k(n)$ может состоять из двух прямоугольных импульсов длительностью $t_w = (N_w - n_w)/2$ отсчетов каждый (рис. 8).

Весовая обработка выполняется для каждой строки дальности выходного сигнала $|\dot{\rho}(n)|$ системы СДЦ. Необходимость нормировки входного сигнала вызвана зависимостью амплитуды откликов системы СДЦ от тангенциальной скорости движения цели (рис. 5). Таким образом, описанный алгоритм работы можно выразить формулой

$$\max(A_k(n)) = \max\left(\sum_{n=1}^{N_w} |\dot{\rho}(n)| \cdot a_k W_k(n)\right).$$

Для выбора параметров n_w и N_w оконной функции сопоставим ее с откликом системы СДЦ (рис. 9). Очевидно, что импульсы оконной функции должны соответствовать максимумам отклика системы СДЦ. В работе были исследованы три варианта оконных функций: 1 – функция, обозначенная как $W_{0,5}$, у которой параметры n_w и N_w соответствуют половине амплитуды отклика; 2 – функция $W_{0,7}$, у которой эти параметры соответствуют амплитудным значениям отклика по уровню 0,7 от его максимума; 3 – функция W_o , параметр N_w которой соответствует ширине отклика по

уровню 0,7 от максимума, а параметр n_w – определяется азимутальным положением отклика движущейся цели (на рис. 9 оно обозначено маркером).

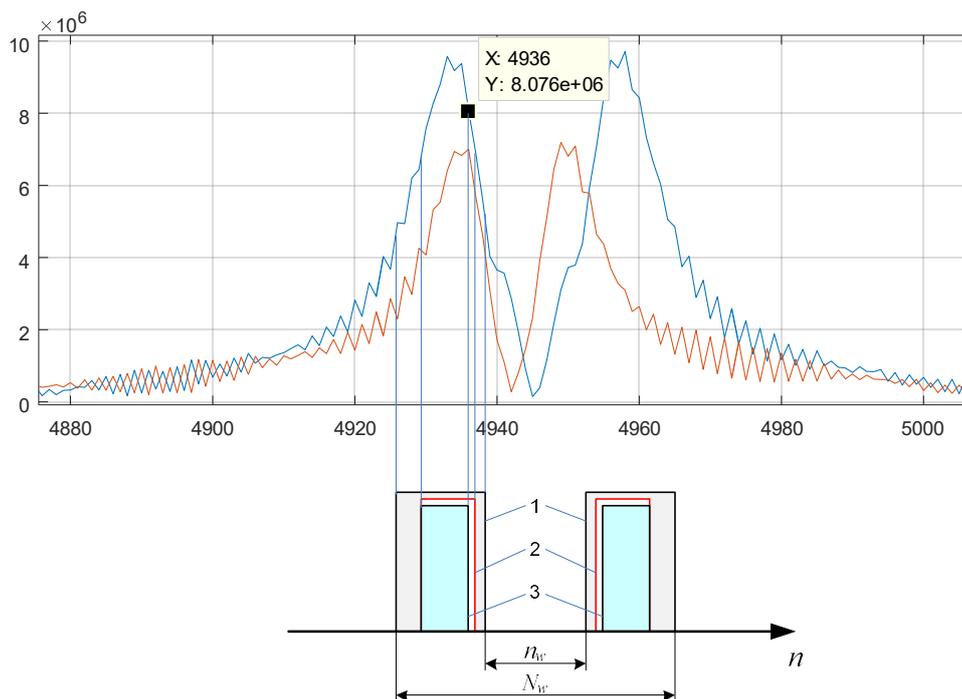


Рис. 9. Пояснение выбора параметров оконной функции

Из приведенного рисунка следует, что при реализации РСА конкретные значения n_w и N_w оконной функции будут определяться параметрами съемки. Как показали исследования, зависимости $N_w(V_t)$ и $t_w(V_t)$ являются практически линейными функциями тангенциальной скорости и могут быть рассчитаны с некоторой погрешностью по двум значениям функций, которые получены, например, на этапе испытаний и настройки системы РСА.

Результаты моделирования работы каналов весовой обработки сигналов для двух оконных функций ($W_{0,5}(n)$ и $W_o(n)$) приведены на рис. 10, где показаны отклики на выходе канала К.10 при наличии точечной движущейся цели с $V_t = 10$ м/с. Из рисунка следует, что формируемый в канале отклик является симметричным и состоит из трех всплесков – центрального с максимальной амплитудой и двух боковых, значения которых почти в два раза меньше центрального. Такой характер отклика объясняется формой импульсов оконной функции и отклика системы СДЦ. Также можно заметить, что увеличение длительности импульсов t_w оконных функций приводит к пропорциональному увеличению амплитуды (энергии) отклика на выходе канала весовой обработки.

Таким образом, канал весовой обработки К.к, на выходе которого отклик имеет наибольшее значение, будет указывать на величину $\hat{V}_{К.к}$ тангенциальной скорости движения цели. Максимальная абсолютная погрешность оценки $\hat{V}_К$, равная половине шага настройки $\Delta \hat{V}_К$ соседних каналов, будет иметь место, если истинное значение тангенциальной скорости цели V_t имеет величину

$$V_t = \Delta \hat{V}_К / 2 = (\hat{V}_{К.к} + \hat{V}_{К.(k+1)}) / 2.$$

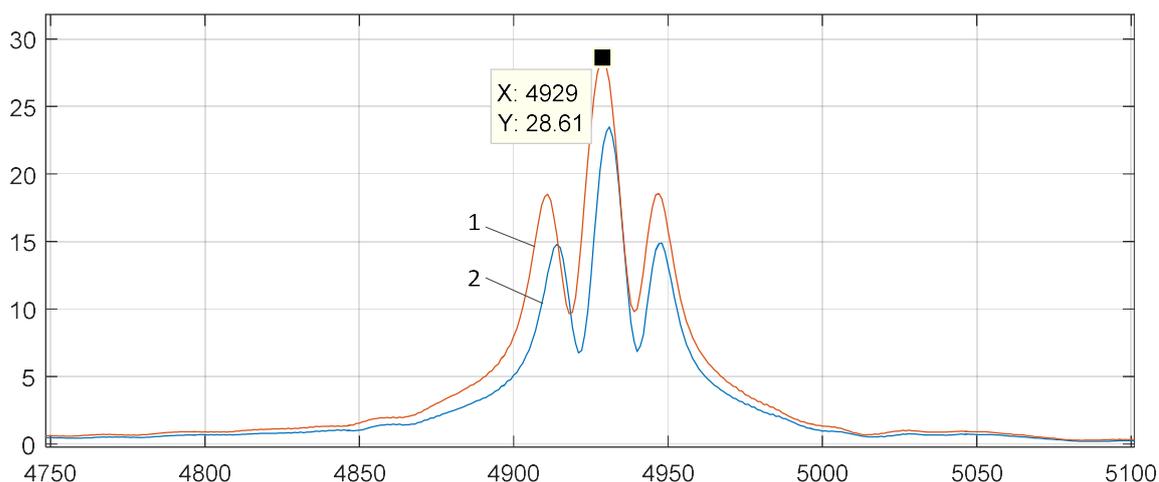


Рис. 10. Отклики на выходе канала весовой обработки сигналов для оконных функций $W_{0,5}(n)$ (1) и $W_0(n)$ (2)

В блоке *Оценка скорости* (рис. 7) выполняется вычисление тангенциальной скорости цели по фазовым характеристикам отклика системы СДЦ с использованием выражения:

$$\begin{aligned} \hat{V}_t(n_0) &= \frac{\Delta\varphi(n_0 + n_w/2) - \Delta\varphi(n_0 - n_w/2)}{2 \cdot b} = \\ &= \frac{1}{2 \cdot b} \left(\operatorname{arctg} \left[\frac{\operatorname{Im}\{\dot{\rho}_2(n_0 + n_w/2)\}}{\operatorname{Re}\{\dot{\rho}_2(n_0 + n_w/2)\}} \right] - \operatorname{arctg} \left[\frac{\operatorname{Im}\{\dot{\rho}_1(n_0 + n_w/2)\}}{\operatorname{Re}\{\dot{\rho}_1(n_0 + n_w/2)\}} \right] - \right. \\ &\quad \left. - \operatorname{arctg} \left[\frac{\operatorname{Im}\{\dot{\rho}_2(n_0 - n_w/2)\}}{\operatorname{Re}\{\dot{\rho}_2(n_0 - n_w/2)\}} \right] + \operatorname{arctg} \left[\frac{\operatorname{Im}\{\dot{\rho}_1(n_0 - n_w/2)\}}{\operatorname{Re}\{\dot{\rho}_1(n_0 - n_w/2)\}} \right] \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\Delta\varphi$ – разность фаз изображений $\dot{\rho}_1$ и $\dot{\rho}_2$ в точках $(n_0 + n_w/2)$ и $(n_0 - n_w/2)$;

n_0 – азимутальная координата, соответствующая центру отклика;

b – коэффициент пропорциональности, зависящий от величины смещения апертур (базы) d (см. рис. 1).

В частности, при $d = 450$ м $s = 3$.

Для определения погрешности

$$\Delta_V = (\hat{V}_t - V_t)/V_t$$

оценки тангенциальной скорости \hat{V}_t цели относительно истинного значения V_t , выполним моделирование алгоритма для различных оконных функций $W_k(n)$ при условии $V_t = \hat{V}_{К.к}$. Результаты моделирования представлены на рис. 11, из которого следует, что минимальную погрешность оценки, которая для рассматриваемых параметров съемки составляет $|\Delta_V| < 5\%$, обеспечивает использование оконной функции $W_0(n)$. Конечное значение погрешности обусловлено дискретным характером РЛИ и оконных функций.

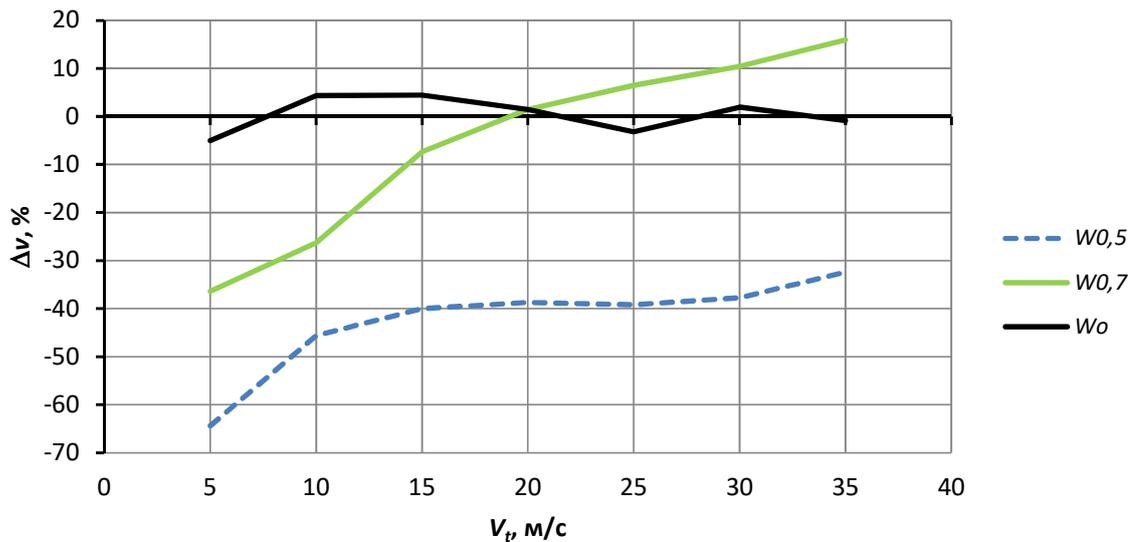
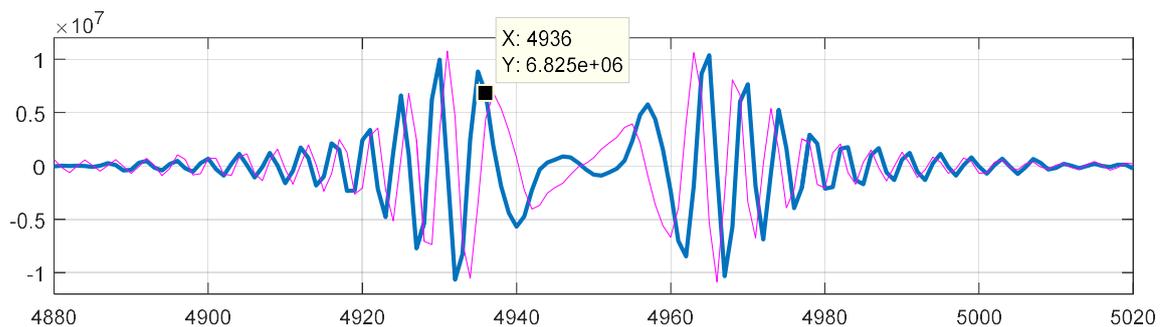
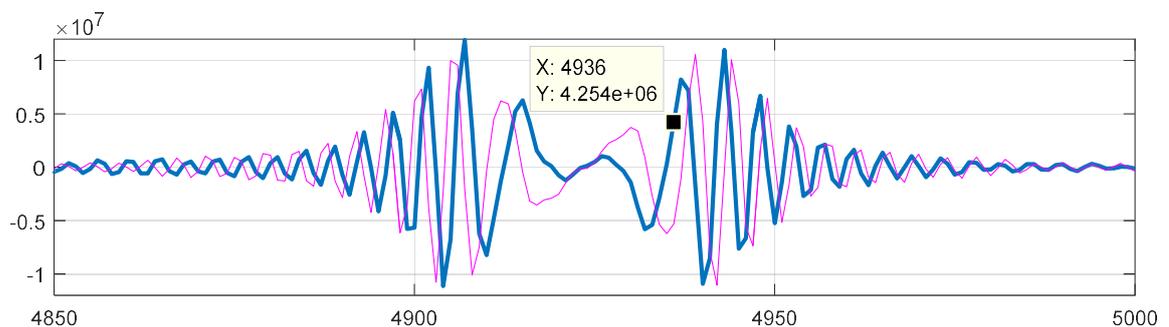


Рис. 11. Погрешности оценки тангенциальной скорости цели при использовании различных оконных функций

Еще одной задачей при реализации алгоритма оценки тангенциальной скорости цели (кроме вычисления значения \hat{V}_t) является определение направления ее движения. Как показали исследования, для этой цели могут быть использованы действительная $\text{Re}[\dot{\rho}(m, n)]$ и мнимая $\text{Im}[\dot{\rho}(m, n)]$ части разностного сигнала системы СДЦ (рис. 12).



а)



б)

Рис. 12. Действительные и мнимые части отклика на выходе системы СДЦ при наличии точечной цели: а) $V_t=20$ м/с, б) $V_t=-20$ м/с

Как видно из приведенного выше рисунка, при движении цели вдоль траектории КА (рис. 12,а) действительные и мнимые части отклика в точках с азимутальными координатами $(n_0 + n_w/2) = 4961$ и $(n_0 - n_w/2) = 4936$ совпадают между собой по знаку. Если точечная цель движется в сторону, противоположную движению КА (рис. 12,б), то действительные и мнимые части в соответствующих точках имеют разные знаки. Маркеры на рисунке соответствуют исходному азимутальному положению цели.

Заключение

В работе предложен алгоритм оценки тангенциальной скорости движущегося объекта для системы СДЦ, основанной на использовании двух апертур, смещенных по траектории движения носителя. Алгоритм подразумевает весовую обработку выходного яркостного сигнала системы СДЦ и вычисление тангенциальной скорости цели по фазовым характеристикам. Весовая обработка выполняется с использованием оконной функции, которая в простейшем случае может состоять из двух прямоугольных импульсов.

Предложенный алгоритм позволяет выполнять оценку скорости и определять направление тангенциального движения объекта.

Исследования алгоритма показали, что погрешность оценки тангенциальной скорости при использовании прямоугольной оконной функции для заданных параметров съемки составляет менее 5%.

Литература

1. Воздушная разведка. Автоматизированное дешифрирование радиолокационных изображений. Монография / Под ред. И.К. Антонова. – М.: Радиотехника, 2021. 296 с.
2. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений / Под ред. Л.А. Школьного. – М.: 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. Федосов В.П., Калиновский П.Ю. Алгоритм селекции наземных движущихся целей // Радиотехника. 2006. №2. С. 86-89.
5. Бабокин М.И., Костров В.В., Толстов Е.Ф. Фазовый портрет в космических РСА радиовидения // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2017. 4. С.4-14.
6. X. Wang, R. Wang, N. Li, and Ch. Zhou, "A velocity estimation method of moving target for SAR high-resolution wide-swath mode," 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), pp. 6819-6822, July 2016, DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7730780.
7. H.-S. Kim, N.A. Goodman, C.K. Lee, and S.-I. Yang, "Improved waveform design for radar target classification," Electronics Letters, vol. 53, no 13, pp. 879-881, June 2017. DOI: 10.1049/el.2017.0536.
8. Kostrov V.V., Khramov K.K. Statistical Characteristics of the Moving Target Indication in Space-borne Interferometry Synthetic Aperture Radar // 2019 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). Proceedings. Omsk, Russia, Nov. 5-7, 2019. DOI: 10.1109/Dynamics47113.2019.8944594.
9. Федосов В.П., Ковтун Д.Г. Исследование влияния тангенциальной скорости наземной цели на отклик согласованного фильтра в РЛС с синтезированной апертурой // Известия ЮФУ, 2016. №3 (176). С. 43-52.
10. V.V. Kostrov, E.F. Tolstov, K.K. Khramov, "The Tangential Velocity MTI Algorithms in Space-borne Systems for Remote Sensing of the Earth," Journal of Physics: Conference

Series, Volume 1632, Russian open scientific conference «Modern problems of remote sensing, radar, wave propagation and diffraction» (MPRSRWPД) 2020 23-25 June 2020, Murom, Russian Federation. DOI: 10.1088/1742-6596/1632/1/012018

11. Татарский Б.Г., Ясенцев Д.А. Оценка тангенциальной составляющей вектора скорости наземной движущейся цели в РСА при вращении фазового центра реальной антенны // Радиотехника. 2019. №10. С.74-81. DOI: 10.18127/j00338486-201910(15)-12.