

Особенности работы алгоритмов СДЦ по тангенциальной скорости в космических системах дистанционного зондирования Земли

В.В. Костров, Е.Ф. Толстов, К.К. Храмов

МИ ВлГУ, 602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23

E-mail: vyk@mit.ru

ЗАО «АЭРОКОН», 140180, г. Жуковский, МО, ул. Жуковского, 1

E-mail: e_tolstov@mail.ru

В докладе рассмотрены два алгоритма селекции движущихся целей (СДЦ) по тангенциальной скорости. Выполнено моделирование и приведены особенности работы этих алгоритмов. Получены амплитудные и фазовые характеристики систем СДЦ. Полученные зависимости позволяют предъявить требования к параметрам космических систем дистанционного зондирования Земли и систем обработки сигналов, реализующих исследуемые алгоритмы.

The report describes two algorithms for estimating the tangential velocity of moving targets. The simulation is performed and the features of these algorithms operation are presented. The amplitude and phase characteristics of the moving target indication (MTI) systems were obtained. The characteristics make it possible to determine the parameters of space systems for remote sensing of the Earth that implement the considered algorithms.

Введение

Современные системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) обладают широкими возможностями в области картографирования и селекции движущихся целей с их последующей обработкой [1-9]. При этом основными задачами такой обработки является обнаружение факта наличия движущихся целей, измерение их координат и параметров движения [4-10]. Методы и алгоритмы селекции целей на основе доплеровского смещения частоты отраженного сигнала, вызванного радиальным движением цели, достаточно хорошо изучены [2-9]. Вместе с тем, учет только радиальной составляющей скорости позволяет выполнить селекцию около 2/3 движущихся наземных объектов [1, 2]. Поэтому в настоящее время авторы уделяют внимание алгоритмам селекции целей по тангенциальной скорости [11, 12]. Особую важность эта задача приобретает при использовании режима бокового обзора поверхности Земли.

В работе рассматриваются особенности работы алгоритмов селекции движущихся целей (СДЦ) по тангенциальной скорости, основанные на использовании синтезированных апертур различной длительности, а также двух апертур, смещенных по траектории движения носителя. Проводится моделирование радиолокаторов с синтезированием апертуры (РСА), реализующих указанные алгоритмы, и анализ полученных характеристик.

Постановка задачи

Рассмотрим принцип селекции движущихся целей по тангенциальной скорости для случая нормального бокового обзора, когда угол наблюдения $\theta_n = 90^\circ$. Пусть точечная цель движется с постоянной тангенциальной скоростью V_t (рис. 1). Угловое положение цели относительно траверзного положения зададим равным $\theta_y = 0^\circ$. Тогда траекторный сигнал $s(t)$, отраженный от цели в одном элементе разрешения по дальности определится выражением [1-3]

$$s(t) = A_y G(\theta) \exp\left(j \frac{4\pi}{\lambda} r(t) + j\varphi_0\right),$$

где A_y , φ_0 – амплитуда и начальная фаза отраженного сигнала; $r(t)$ – закон изменения расстояния между носителем РСА и объектом наблюдения.

При боковом обзоре изменение расстояния носитель-цель можно представить в виде квадратичной зависимости [2]

$$r(t) = R_y + \frac{(V_0 + V_t)^2 t^2}{2R_y},$$

где R_y – расстояние между носителем РСА и центром кадра при $t=0$.

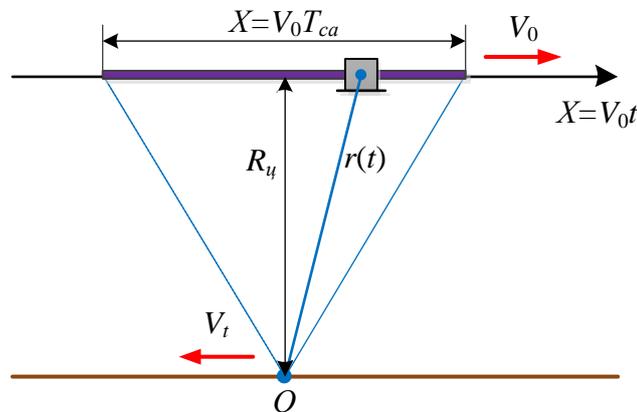


Рис. 1. Геометрические построения к пояснению принципа СДЦ

Мгновенная фаза сигнала связана с $r(t)$ известным соотношением

$$\varphi(t) = \frac{4\pi}{\lambda} r(t).$$

Положим $G(\theta) = 1$, тогда выражение для траекторного сигнала переписывается в виде

$$s(t) = A_0 \exp\left[j \frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{V_0^2 + 2V_0V_t + V_t^2}{2R_y} t^2 \right) + j\varphi_0\right].$$

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

$$\dot{\rho} = A_y \exp(j\varphi_0) \int_{-T_{ca}/2}^{T_{ca}/2} \exp\left[j \frac{4\pi}{\lambda} \frac{V_0 V_t}{R_y} t^2\right] dt. \quad (1)$$

Комплексную амплитуду $\dot{\rho}$ можно представить в показательной форме

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

где $|\dot{\rho}|$ – амплитуда радиолокационного изображения; φ – фаза сигнала.

Как следует из выражения (1), однозначное определение тангенциальной скорости цели по фазовой характеристике выходного сигнала системы обработки невозможно, поскольку фаза сигнала φ зависит не только от параметров движения, но и от начальной фазы φ_0 отраженного сигнала. Поэтому для решения задачи определения тангенциальной скорости цели необходим дополнительный канал синтезирования, который позволит устранить возникающую неоднозначность. В роли такого канала может выступать вторая апертура, которая может быть: 1) другой длительности или 2) смещена по траектории относительно исходной [2]. Рассмотрим оба варианта.

Алгоритм, основанный на использовании синтезированных апертур различной длительности

Пусть на входы двух систем обработки РСА поступают траекторные сигналы, полученные при двух различных значениях длительности синтезирования апертуры: T_{ca1} и T_{ca2} (рис. 2).

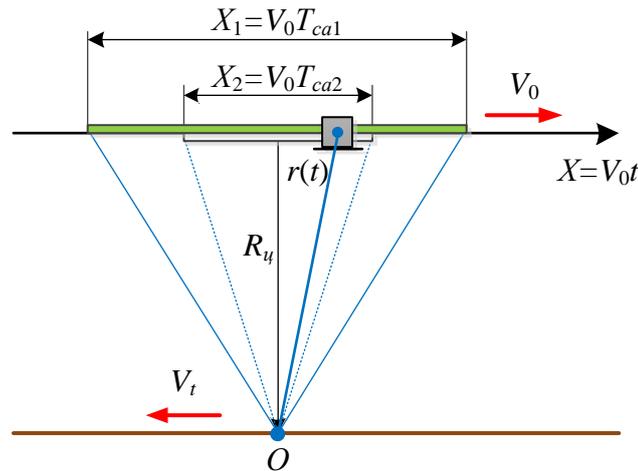


Рис. 2. Геометрические построения при использовании синтезированных апертур различной длительности

По аналогии с (1) на выходах систем обработки сигналов получим комплексные амплитуды $\dot{\rho}_1$ и $\dot{\rho}_2$ вида:

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_1 &= A_y \exp(j\varphi_0) \int_{-T_{ca1}/2}^{T_{ca1}/2} \exp(j2\pi\mu t^2) dt = A_y \exp(j\varphi_0) \sqrt{\frac{2j}{\pi\mu}} \cdot \int_0^{T_{ca1}\sqrt{-j2\pi\mu}} \exp(-t^2) dt = \\ &= A_y \exp(j\varphi_0) \cdot J\left(\frac{T_{ca1}\sqrt{-j2\pi\mu}}{2}\right) / \sqrt{-j2\mu}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{\rho}_2 &= A_y \exp(j\varphi_0) \int_{-T_{ca2}/2}^{T_{ca2}/2} \exp(j2\pi\mu t^2) dt = A_y \exp(j\varphi_0) \sqrt{\frac{2j}{\pi\mu}} \cdot \int_0^{\frac{T_{ca2}\sqrt{-j2\pi\mu}}{2}} \exp(-t^2) dt = \\ &= A_y \exp(j\varphi_0) \cdot J\left(\frac{T_{ca2}\sqrt{-j2\pi\mu}}{2}\right) / \sqrt{-j2\pi\mu},\end{aligned}$$

где $\mu = 2V_0V_t/(\lambda R_y)$; $J(x) = \int_0^x e^{-t^2} dt$ – интеграл, пропорциональный функции ошибок

$$\text{erf}(x): \text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} J(x).$$

Полученные выше выражения могут быть также представлены в виде

$$\begin{aligned}\dot{\rho}_1 &= A_y \exp(j\varphi_0) \left\{ \int_{-T_{ca1}/2}^{T_{ca1}/2} \cos(2\pi\mu t^2) dt + j \cdot \int_{-T_{ca1}/2}^{T_{ca1}/2} \sin(2\pi\mu t^2) dt \right\} = \\ &= A_y \frac{\exp(j\varphi_0)}{\sqrt{\mu}} \left\{ \int_0^{T_{ca1}\sqrt{\mu}} \cos\left(\frac{\pi t^2}{2}\right) dt + j \cdot \int_0^{T_{ca1}\sqrt{\mu}} \sin\left(\frac{\pi t^2}{2}\right) dt \right\}; \\ \dot{\rho}_2 &= A_y \exp(j\varphi_0) \left\{ \int_{-T_{ca2}/2}^{T_{ca2}/2} \cos(2\pi\mu t^2) dt + j \cdot \int_{-T_{ca2}/2}^{T_{ca2}/2} \sin(2\pi\mu t^2) dt \right\} = \\ &= A_y \frac{\exp(j\varphi_0)}{\sqrt{\mu}} \left\{ \int_0^{T_{ca2}\sqrt{\mu}} \cos\left(\frac{\pi t^2}{2}\right) dt + j \cdot \int_0^{T_{ca2}\sqrt{\mu}} \sin\left(\frac{\pi t^2}{2}\right) dt \right\}.\end{aligned}$$

Фазы сигналов при значении начального фазового сдвига $\varphi_0 = 0$ равны:

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \text{arctg} \left\{ \int_0^{T_{ca1}\sqrt{\mu}} \sin\left(\frac{\pi t^2}{2}\right) dt / \int_0^{T_{ca1}\sqrt{\mu}} \cos\left(\frac{\pi t^2}{2}\right) dt \right\} = \text{arctg} \left\{ \frac{F_s(T_{ca1}\sqrt{\mu})}{F_c(T_{ca1}\sqrt{\mu})} \right\}; \\ \varphi_2 &= \text{arctg} \left\{ \int_0^{T_{ca2}\sqrt{\mu}} \sin\left(\frac{\pi t^2}{2}\right) dt / \int_0^{T_{ca2}\sqrt{\mu}} \cos\left(\frac{\pi t^2}{2}\right) dt \right\} = \text{arctg} \left\{ \frac{F_s(T_{ca2}\sqrt{\mu})}{F_c(T_{ca2}\sqrt{\mu})} \right\},\end{aligned}$$

где $F_s(x) = \int_0^x \sin\left(\frac{\pi t^2}{2}\right) dt$, $F_c(x) = \int_0^x \cos\left(\frac{\pi t^2}{2}\right) dt$ – интегралы Френеля.

При малых значениях аргумента x , когда $\text{arctg}(x) \approx x$, разность фаз $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ можно аппроксимировать линейным выражением

$$\Delta\varphi' = \mu(T_{ca1}^2 - T_{ca2}^2)/2,$$

откуда следует, что оценка тангенциальной скорости V_t цели пропорциональна разности фаз $\Delta\varphi$ выходных сигналов, формируемых двумя каналами обработки:

$$\hat{V}_t = \frac{\lambda R_H}{V_0 (T_{ca1}^2 - T_{ca2}^2)} \Delta\varphi'.$$

Таким образом, работа описываемого алгоритма СДЦ заключается в сравнении разности фаз сигналов, отраженных от цели. Причем для повышения точности оценки тангенциальной скорости цели необходимо увеличивать различия в интервалах синтезирования.

На рис. 3 приведены зависимости разности фаз $\Delta\varphi$ и амплитуды радиолокационного изображения $|\dot{\rho}_1|$ от тангенциальной скорости V_t движущейся цели при параметрах, типичных для самолетной РСА. Из приведенных графиков видно, что однозначная оценка тангенциальной скорости возможна в пределах ± 12 м/с.

Аналогичные зависимости для РСА космического базирования показаны на рис. 4 и рис. 5. Графики получены при следующих параметрах: $R_H = 753$ км, $V_0 = 7,61$ км/с, $\lambda = 9,4$ см, $T_{ca1} = 1$ с, $T_{ca2} = 0,5$ с.

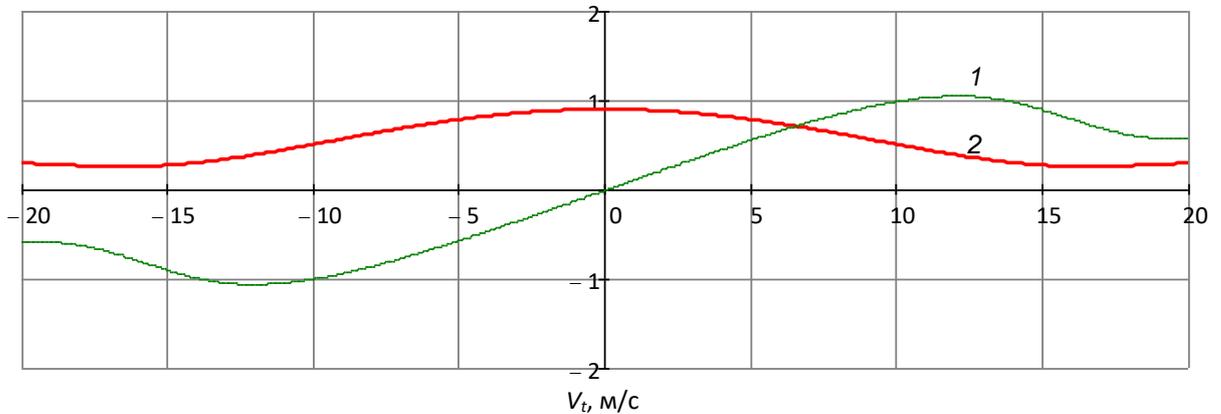


Рис. 3. Зависимости $\Delta\varphi$ (1) и $|\dot{\rho}_1|$ (2) от V_t для самолетной РСА с параметрами $R_H = 35$ км, $V_0 = 200$ м/с, $\lambda = 3$ см, $T_{ca1} = 1$ с, $T_{ca2} = 0,5$ с

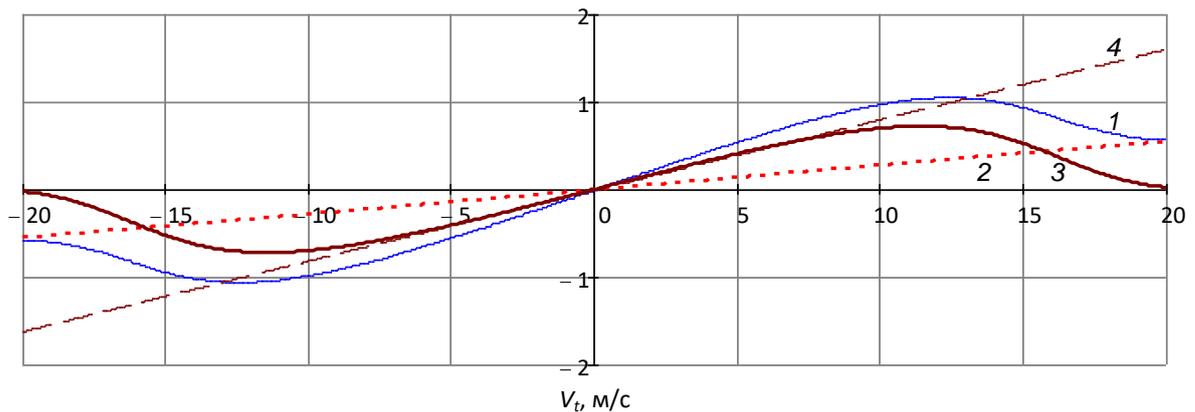


Рис. 4. Фазовые характеристики системы СДЦ космической РСА: 1 – φ_1 ; 2 – φ_2 ; 3 – $\Delta\varphi$; 4 – $\Delta\varphi'$.

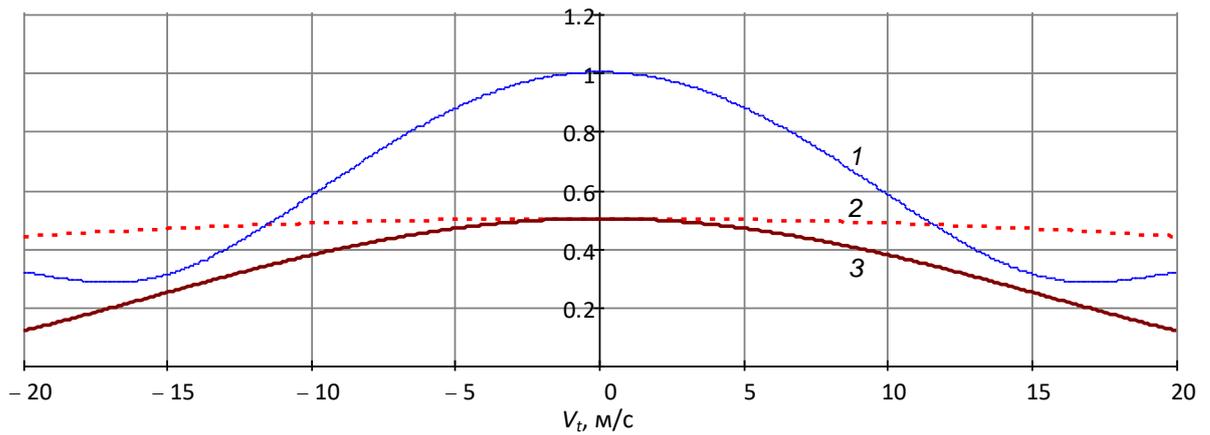


Рис. 5. Амплитудные характеристики системы СДЦ космической РСА:
 1 – $|\rho_1|$; 2 – $|\rho_2|$; 3 – $|\rho_1 - \rho_2|$.

Для сравнения на рис. 6, 7 приведены аналогичные зависимости, построенные для длины волны $\lambda = 3$ см.

Из приведенных на рис.4-7 зависимостей следует, что алгоритм СДЦ по тангенциальной скорости, основанный на использовании синтезированных апертур различной длительности, имеет пределы по однозначной оценке тангенциальной скорости.

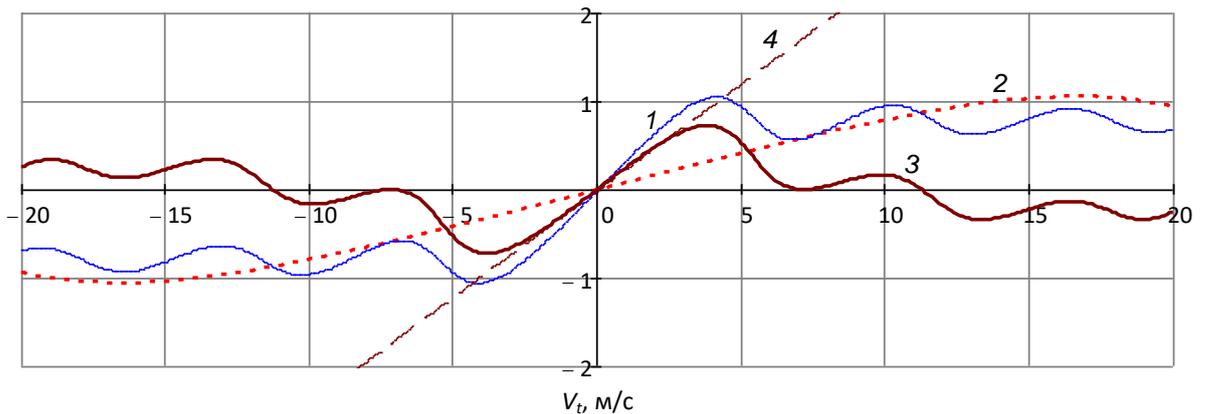


Рис. 6. Фазовые характеристики системы СДЦ космической РСА при $\lambda = 3$ см:
 1 – φ_1 ; 2 – φ_2 ; 3 – $\Delta\varphi$; 4 – $\Delta\varphi'$.

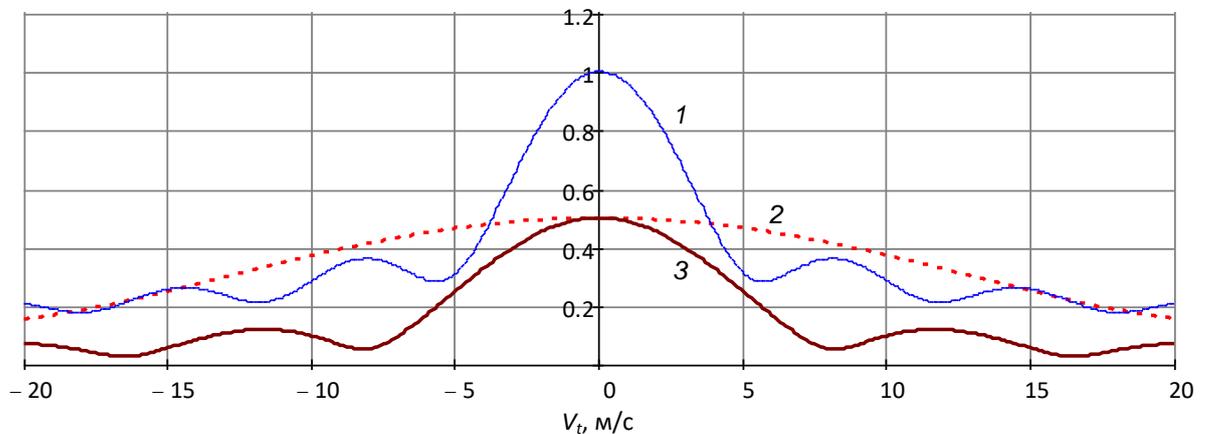


Рис. 7. Амплитудные характеристики системы СДЦ космической РСА при $\lambda = 3$ см:
 1 – $|\rho_1|$; 2 – $|\rho_2|$; 3 – $|\rho_1 - \rho_2|$.

При этом повышение азимутальной разрешающей способности δ_x РСА за счет уменьшения длины волны зондирующего сигнала λ приводит к сужению диапазона однозначно селектируемых скоростей V_t . Так, при $\delta_x < 1$ м и достижимых параметрах РСА диапазон $\Delta\hat{V}_t$ однозначной оценки тангенциальных скоростей движущихся наземных целей не превышает $\pm(5\dots7)$ м/с или $\pm(18\dots25)$ км/ч. Кроме того, при одинаковых значениях λ самолетные РСА будут иметь более широкий диапазон $\Delta\hat{V}_t$ по сравнению с космическими. Также следует отметить, что линейная аппроксимация разности фаз $\Delta\varphi$ удовлетворительно работает в области однозначных измерений; при выходе за пределы этой области начинают быстро расти ошибки измерения скорости. Эти особенности ограничивают области использования рассматриваемого алгоритма для целей селекции движущихся целей по тангенциальной скорости из космоса.

Алгоритм, основанный на использовании двух апертур, смещенных по траектории

При реализации данного алгоритма применяются две синтезированные апертуры, смещенные друг относительно друга на расстояние d по ходу движения носителя РСА (рис. 8). Величина смещения d определяет характеристики и возможности системы СДЦ.

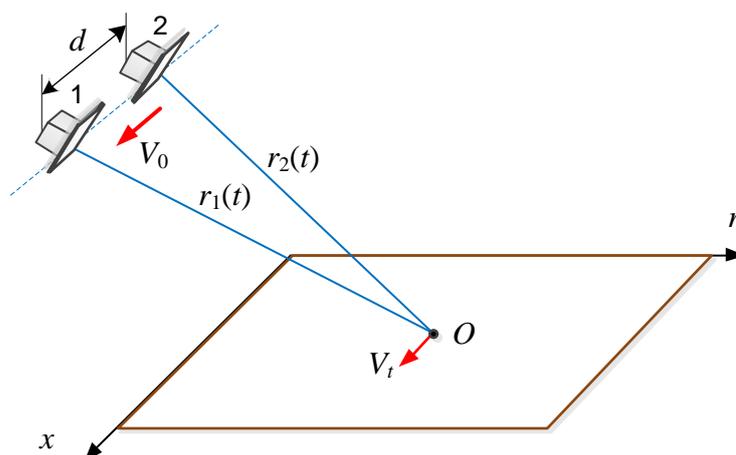


Рис. 8. Геометрические построения при использовании синтезированных апертур, смещенных по траектории

Алгоритм селекции движущихся целей по их тангенциальным скоростям при использовании апертур, смещенных по траектории, заключается [2]:

- в синтезе двух кадров комплексных изображений $\dot{\rho}_1$ и $\dot{\rho}_2$ одного и того же участка местности;
- в обнаружении на РЛИ откликов целей на фоне подстилающей поверхности;
- в вычислении разности фаз $\Delta\varphi$ сигналов обнаруженных целей;
- в оценке по измеренной разности фаз $\Delta\varphi$ тангенциальной скорости \hat{V}_t движения обнаруженных целей.

Описанный алгоритм можно представить в виде модели системы СДЦ (рис. 9), где $\arg(\cdot)$ – блок вычисления фазы сигнала.

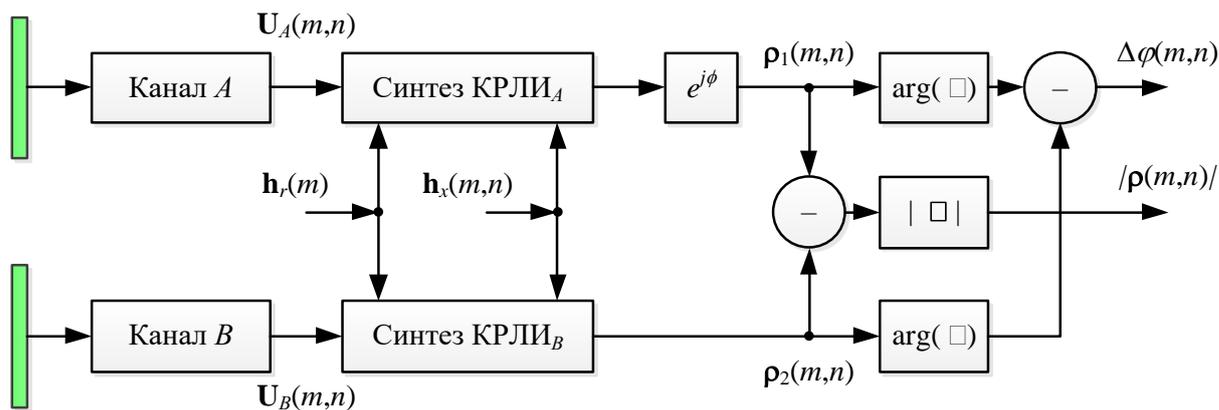


Рис. 9. Модель системы СДЦ по тангенциальной скорости

Выполним моделирование приведенной на рис. 9 системы СДЦ для нормального бокового обзора ($\theta_n = 90^\circ$) со следующими параметрами: $\lambda = 9,4$ см, $\delta_x = 2,7$ м, $\delta_y = 2,6$ м, $V_0 = 7,61$ км/с, $\gamma = 40,2^\circ$. Пусть движущаяся цель имеет только тангенциальную V_t составляющую скорости.

Зададимся смещением апертур $d = 450$ м и рассмотрим вначале случай неподвижной цели, когда $V_t = 0$ (рис. 10, 11). Без использования СДЦ неподвижная цель дает типичное радиолокационное изображение (РЛИ), определяемое откликом I на рис. 10. Азимутальное положение цели обозначено квадратным маркером. При подключении СДЦ на РЛИ имеются отклики, которые подавляются системой СДЦ (рис. 10, кривая 2). Разность фаз $\Delta\phi$ в азимутальном отсчете с целью практически равна нулю (рис. 11).

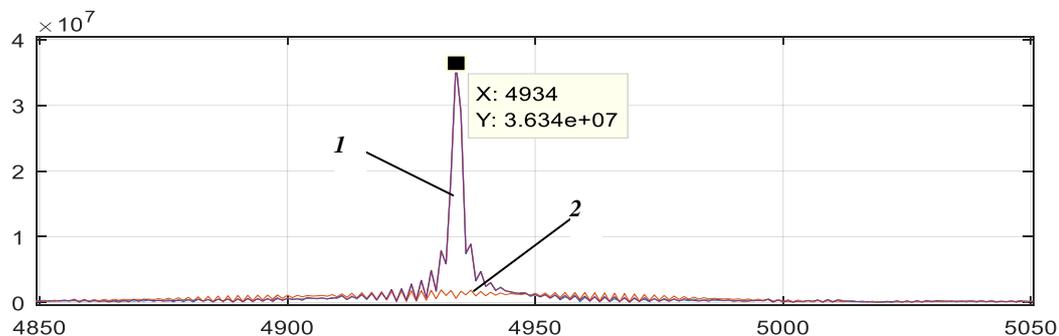


Рис. 10. Отклики от цели на РЛИ ($|\rho_1|$ и $|\rho_2|$) и отклик $|\rho|$ системы СДЦ при $V_t = 0$

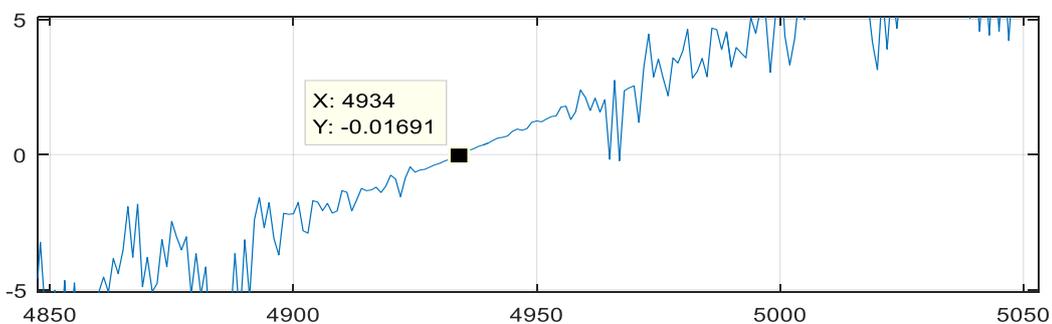


Рис. 11. Разность фаз $\Delta\phi$ в канале дальности с обнаруженной целью при $V_t = 0$

Как показало дальнейшее моделирование 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.

На рис. 12, 13 приведены результаты аналогичного моделирования для цели, имеющей тангенциальную скорость $V_t = 10$ м/с и движущейся вдоль траектории носителя РСА. Из рис. 12 видно, что отклики на РЛИ стали заметно шире, при этом центр отклика не совпадает с азимутальным положением неподвижного объекта (показано маркером). Амплитуда отклика системы СДЦ (разностного сигнала) значительно выросла, а сам отклик 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. 13) имеет линейный характер, при этом фаза азимутальной координаты, соответствующей исходному положению цели, отстает от центра отклика, для которого $\Delta\varphi = 0$, на величину $\Delta\varphi' \approx 30^\circ$.

При увеличении тангенциальной скорости объекта до величины $V_t = 20$ м/с описанные эффекты проявляются пропорционально (рис. 14, 15): амплитуда отклика на РЛИ уменьшилась, амплитуда отклика системы СДЦ возросла почти вдвое, смещение составляет $\Delta x \approx 13$ отсчетов, разность фаз увеличилась до значения $\Delta\varphi' \approx 60^\circ$, линейный участок зависимости $\Delta\varphi$ стал шире.

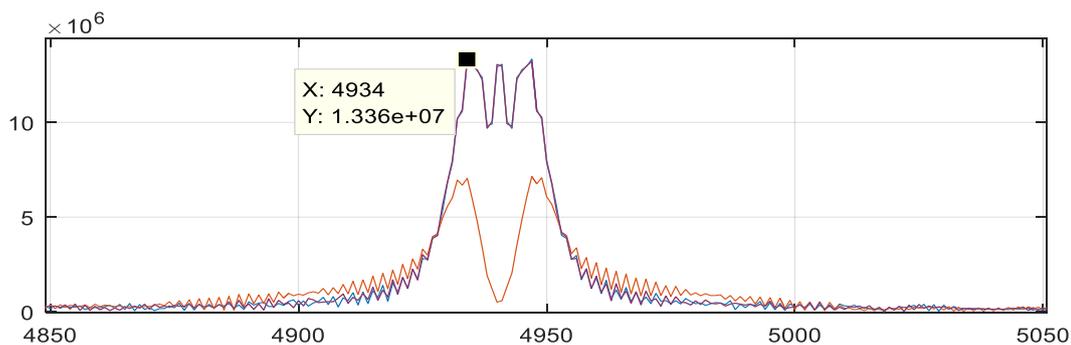


Рис. 12. Отклики от цели на РЛИ ($|\rho_1|$ и $|\rho_2|$) и отклик $|\rho|$ системы СДЦ при $V_t = 10$ м/с и $d = 450$ м

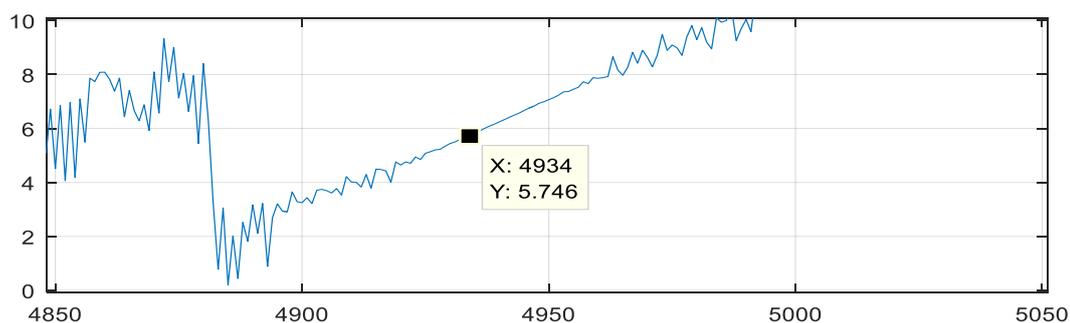


Рис. 13. Разность фаз $\Delta\varphi$ в канале дальности с обнаруженной целью при $V_t = 10$ м/с и $d = 450$ м

При моделировании тангенциального движения точечного объекта в сторону, противоположную движению носителя (отрицательные значения V_t), отклик на РЛИ смещается в сторону движения объекта, амплитуда разностного сигнала соответствует скорости $+V_t$, фазовые соотношения меняют знак на противоположный.

Также были получены аналогичные зависимости для других значений расстояния: $d = 180$ м, $d = 450$ м и $d = 900$ м. Обобщенные результаты представлены на рис.16-18.

Из анализа рис. 16 следует, что при увеличении V_t возрастает амплитуда отклика системы СДЦ. При этом с ростом расстояния 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. 17).

Смещение положения отклика движущегося цели Δx относительно отклика неподвижного объекта зависит только от тангенциальной скорости V_t и не зависит от d (рис. 18) и определяется выражением

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

где δ_x – азимутальное разрешение РСА.

Таким образом, полученные выражения и графические зависимости позволяют выбрать наиболее подходящие параметры системы СДЦ с точки зрения требований к ней и вопросов ее практической реализации.

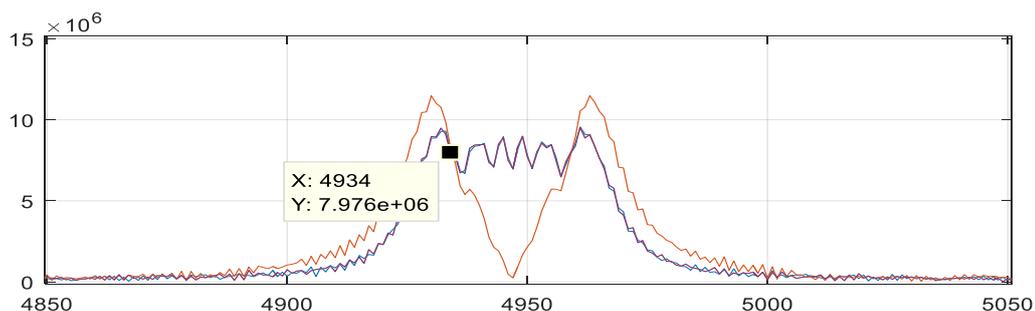


Рис. 14. Отклики от цели на РЛИ ($|\rho_1|$ и $|\rho_2|$) и отклик $|\rho|$ системы СДЦ при $V_t = 20$ м/с и $d = 450$ м

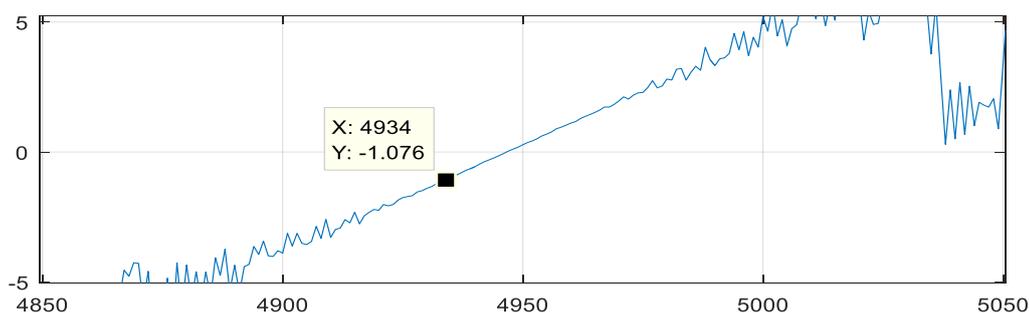


Рис. 15. Разность фаз $\Delta\varphi$ в канале дальности с обнаруженной целью при $V_t = 20$ м/с и $d = 450$ м

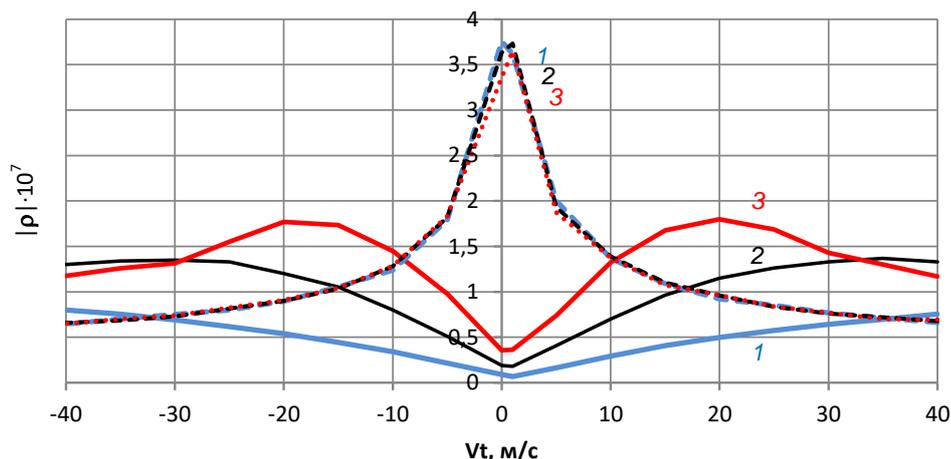


Рис. 16. Амплитуда откликов на РЛИ (пунктир) и отклика системы СДЦ (сплошная) при $d = 180$ м (1), $d = 450$ м (2) и $d = 900$ м (3)

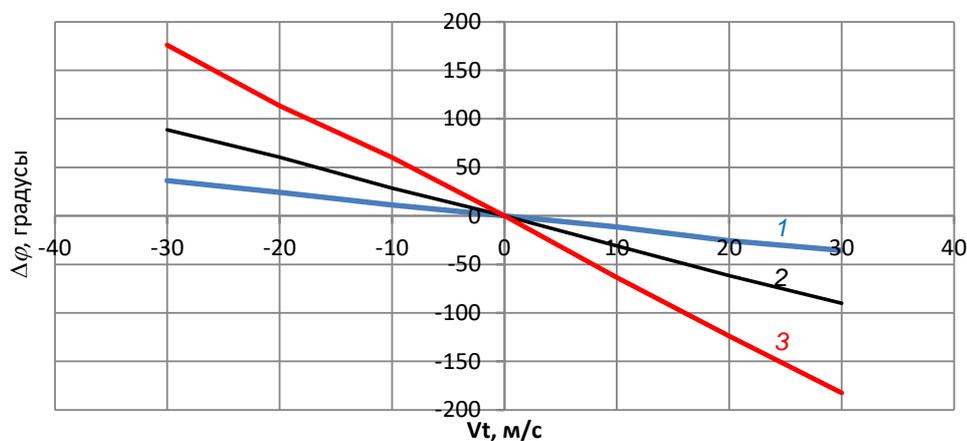


Рис. 17. Разность фаз при $d = 180$ м (1), $d = 450$ м (2) и $d = 900$ м (3)

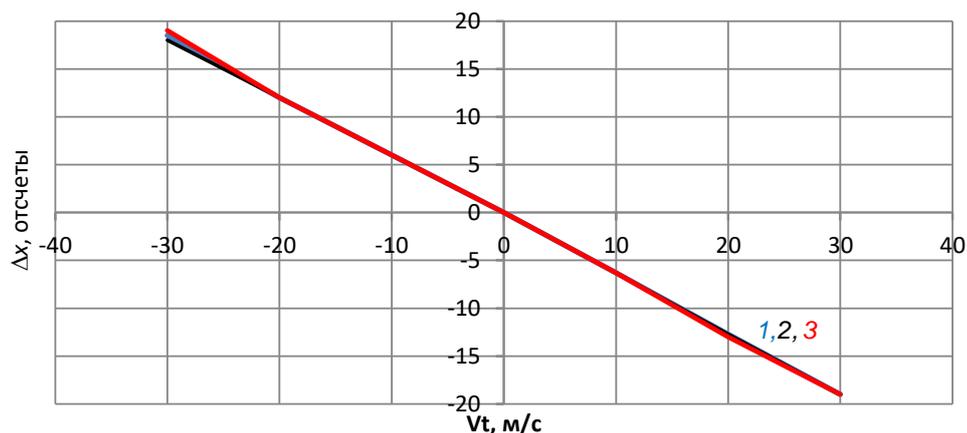


Рис. 18. Смещение положения отклика движущейся цели относительно отклика неподвижного объекта при $d = 180$ м (1), $d = 450$ м (2) и $d = 900$ м (3)

Зададимся значением $d = 450$ м и выполним моделирование сцены, содержащей две точечные цели – неподвижную и движущуюся с тангенциальной скоростью V_t . Пусть исходное азимутальное положение этих объектов одинаковое, а угломестное – имеет сдвиг на Δr (рис. 19).

Результаты такого моделирования приведены на рис. 20, из которого следует, что на выходах каналов РЛИ неподвижный и движущийся объекты, имеющие одинаковые ЭПР, имеют отклики различной интенсивности. Неподвижный объект имеет точечный отклик, а отклик движущейся с тангенциальной скоростью цели размывается по азимуту в сторону его движения и поэтому имеет меньшую интенсивность (рис. 20,а). На выходе системы СДЦ отклик неподвижного объекта подавляется (рис. 20,б), а яркостное изображение движущейся цели – остается, но раздваивается, что соответствует полученным выше зависимостям. Таким образом, особенностью рассматриваемого алгоритма СДЦ является то, что цель, движущаяся с тангенциальной скоростью, создает на РЛИ системы СДЦ два отклика – «истинный» и «ложный», что может быть интерпретировано системой обработки как наличие в сцене двух различных целей. Информацию о том, что оба отклика относятся к одной движущейся цели, можно извлечь из анализа их фазовых соотношений (фазы откликов симметричны и отличаются на 180°), либо из анализа исходного РЛИ, где отклик один.

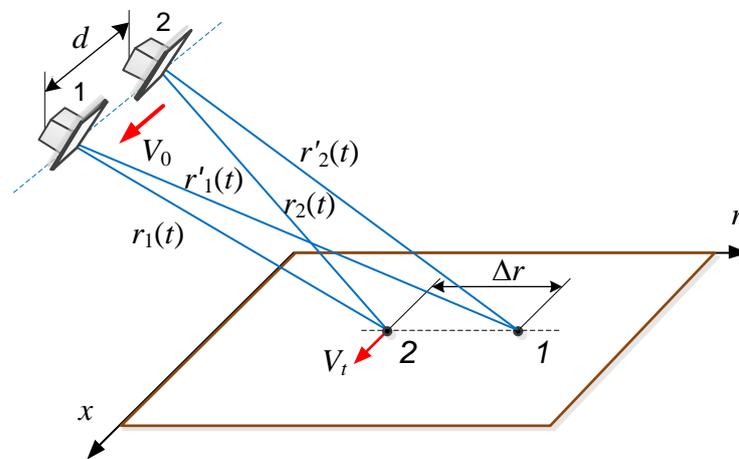
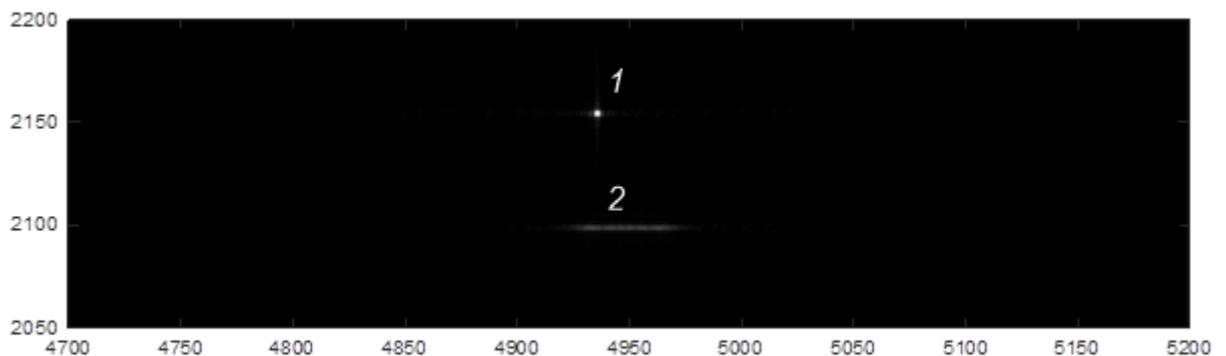


Рис. 19. Сцена моделирования при наличии неподвижного объекта (1) и движущейся (2) с тангенциальной скоростью V_t цели



a

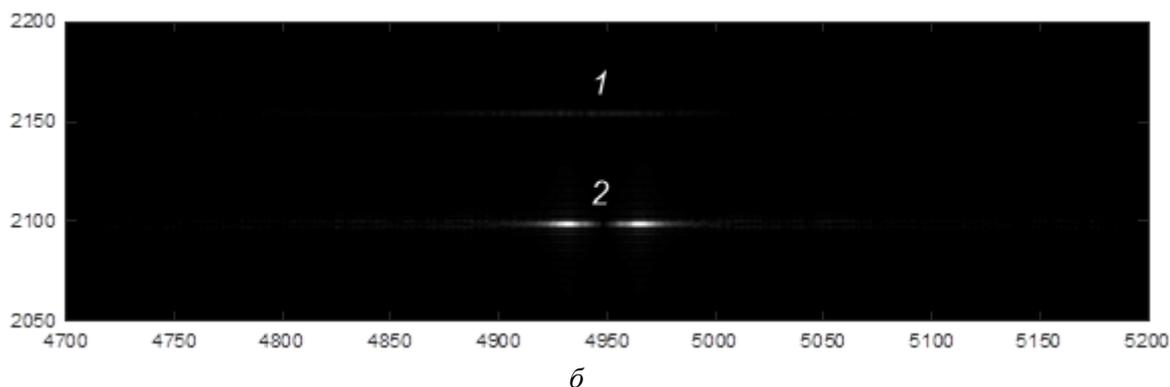


Рис. 20. Отклики неподвижного (1) и движущегося (2) с тангенциальной скоростью $V_t = 20$ м/с объектов на выходе канала РЛИ (а) и на выходе системы СДЦ (б)

Заключение

Как следует из полученных результатов, система СДЦ по тангенциальной скорости, использующая две апертуры со смещением по траектории, достаточно эффективно обнаруживает движущиеся цели и подавляет отклики от неподвижных объектов. Причем для первоначального обнаружения и выделения движущихся целей может быть использована пороговая обработка. Вместе с тем, неподвижные объекты и фон, имеющие высокую отражающую способность, вследствие неполного подавления, сохраняют на разностном РЛИ системы СДЦ остаточный уровень яркости, снижая контрастность изображения и маскируя низкоскоростные цели. Интенсивность этого уровня зависит от амплитуды траекторного сигнала, точности совмещения комплексных изображений в каналах, и величины смещения апертур d . Чем меньше расстояние d , тем эффективнее подавление отклика неподвижного объекта, шире диапазон однозначно селектируемых скоростей V_t , но вместе с тем уменьшается амплитуда отклика тангенциально движущейся цели.

Литература

1. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений / Под ред. Л.А. Школьного. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. – 531 с.
2. Авиационные системы радиовидения / Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М: Радиотехника, 2015. – 648 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. T. Jin, X. Qiu, D. Hu, and C. Ding, "An ML-based radial velocity estimation algorithm for moving targets in spaceborne high-resolution and wide-swath SAR systems," *Remote Sensing*, vol. 9, no. 5, May 2017. DOI: 10.3390/rs9050404.
9. K. Suwa, K. Yamamoto, M. Tsuchida, S. Nakamura, T. Wakayama, and T. Hara, "Image-Based Target Detection and Radial Velocity Estimation Methods for Multichannel SAR-GMTI," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 55, no. 3, pp. 1325-1338, March 2017. DOI: 10.1109/TGRS.2016.2622712.
10. 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.
11. 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.
12. 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(15). – С. 74-81. DOI: 10.18127/j00338486-201910(15)-12.