УДК 621.396.96

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБНАРУЖЕНИЯ ДВУХКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СДЦ С ОСТАНОВЛЕННЫМ ФАЗОВЫМ ЦЕНТРОМ

Костров В.В., *д.т.н., профессор кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ВлГУ, e-mail: kostrov.46@mail.ru*
Храмов К.К., *к.т.н., доцент кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ВлГУ, e-mail: hramovkk@gmail.com*

DETECTION CHARACTERISTICS OF A TWO-CHANNEL DISPLACED PHASE CENTER ANTENNA MTI SYSTEM

Kostrov V.V., Khramov K.K.

One of the effective methods of moving target indication (MTI) in space-borne synthetic aperture radars (SARs) is the displaced phase center antenna technique. The paper describes the MTI algorithm based on a digital two-channel interferometer. The results of processing the trajectory signals for the X-band space-borne SAR are obtained. Graphs of the change in the amplitude and position of the response of a moving target on a radar image are given, as well as graphs of the phase difference of the input signals of the MTI system. Statistical modeling of a two-channel displaced phase center MTI system is performed. Detection characteristics are obtained that allows us to evaluate the potential capabilities of the MTI system.

Key words: synthetic aperture radar, SAR, moving target indication, MTI, displaced phase center antenna, digital two-channel interferometer, radial velocity, detection characteristics.

Ключевые слова радиолокатор с синтезированием апертуры, РСА, селекция движущихся целей, СДЦ, алгоритм с остановленным фазовым центром, цифровой двухканальный интерферометр, радиальная скорость, характеристики обнаружения.

Одним из эффективных методов селекции движущихся целей (СДЦ) в радиолокаторах с синтезированием апертуры антенны (РСА) космического базирования является метод, использующий алгоритм с остановленным фазовым центром. В работе описан алгоритм СДЦ на базе цифрового двухканального интерферометра. Выполнено моделирование алгоритма, получены результаты обработки траекторных сигналов для РСА космического базирования Х-диапазона, приведены зависимости изменения амплитуды и положения отклика движущейся цели на РЛИ, разности фаз входных сигналов системы СДЦ. Выполнено статистическое моделирование двухканальной системы СДЦ с остановленным фазовым центром, получены характеристики обнаружения, которые позволяют оценить потенциальные возможности такой системы СДЦ.

Введение

В радиолокаторах с синтезированием апертуры антенны (РСА) космического базирования одними из эффективных систем селекции движущихся целей (СДЦ) являются системы, функционирующие с использованием алгоритмов СДЦ с остановленным фазовым центром [1-5]. В таких системах используется интерферометр с антеннами или фазовыми центрами, которые разнесены вдоль линии пути носителя РСА. Рисунок 1 иллюстрирует геометрию обзора в РСА с двумя приемными антеннами (двухканальный интерферометр). Антенна 0 подключена к передатчику и формирует диаграмму направленности на передачу. Антенны 1 и 2 разнесены вдоль линии пути на расстояния $\pm d$ относительно точки 0 и подключены, соответственно, к первому и второму приемными каналам. В этом случае положение фазовых центров может быть аппроксимировано средними точками между передающей и приемными антеннами.

Платформа РСА движется с постоянной скоростью V_0 вдоль оси *x* на высоте H над поверхностью Земли. Визирование участка поверхности осуществляется под углом β. Движущаяся цель *O* является точечным объектом, находится в плоскости визирования и имеет угловое положение $\theta_ц$ относительно вектора V_0. Положим, что полный вектор скорости $V_ц$ движущейся цели содержит только постоянную радиальную составляющую V_r. Точка (x_0, y_0) задает положение движущейся цели при $t = 0$, где t – азимутальное (медленное) время, отнесенное к моменту, когда цель находится в центре луча.

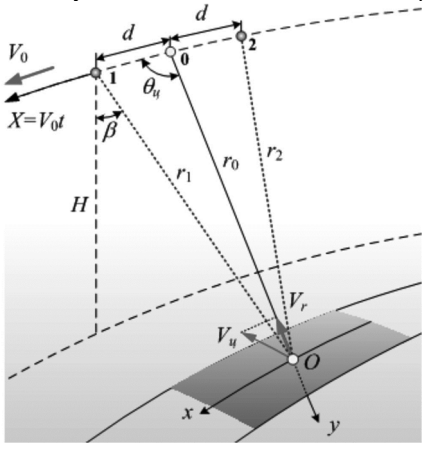


Рисунок 1 – Геометрия обзора в РСА с остановленным фазовым центром

Для подавления сигналов от неподвижных объектов и фона в методе СДЦ с остановленным фазовым цент-

ром необходимы: компенсация радиального движения носителя РСА, задержка сигнала первого по ходу движения приемного канала (рисунок 1) для обеспечения синфазности сигналов, отраженных от неподвижных объектов, и вычитание выходных сигналов приемных каналов [2, 3]. Дальнейшая обработка сводится к когерентному накоплению сигнала цели на фоне шума приемника. При нормальном боковом обзоре такой алгоритм СДЦ может быть записан в виде

$$S \sim \left| \int_0^{T_{ca}} \dot{s}_1(t-\Delta t)\overset{*}{\dot{h}}(t)\mathrm{e}^{-j2\pi f_\phi t}dt - \int_0^{T_{ca}} \dot{s}_2(t)\overset{*}{\dot{h}}(t)\mathrm{e}^{-j2\pi f_\phi t}dt \right| = \left| \int_0^{T_{ca}} \left[\dot{s}_1(t-\Delta t)-\dot{s}_2(t)\right]\overset{*}{\dot{h}}(t)\mathrm{e}^{-j2\pi f_\phi t}dt \right|, \quad (1)$$

где $s_1(t)$ и $s_2(t)$ – траекторные сигналы в приемных каналах; Δt – задержка сигнала первого по ходу движения платформы РСА приемного канала; $\dot{h}(t) = \exp\left(j\frac{4\pi}{\lambda}\frac{V_0^2 t^2}{2R_0} \right)$ – опорная функция, компенсирующая квадратичный фазовый набег траекторных сигналов; f_ϕ – частота пространственного канала, на котором происходит когерентное накопление сигналов; T_{ca} – время синтезирования апертуры.

Разность в квадратных скобках выражения (1) определяет работу компенсатора, на выходе которого сигнал от движущейся цели при обеспечении условия совмещения фазовых центров $V_0\Delta t = d$ примет вид [2]

$$\dot{s}_к(t) = j2\dot{A}_ц G(\theta_ц)\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}V_r\Delta t\right)\times \quad (2)$$

$$\times\exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda}\left(2R_0 - 2V_{0r}t - 2V_0\left(t-\frac{\Delta t}{2}\right)\cos\theta_ц + 2V_r\left(t-\frac{\Delta t}{2}\right)\right)\right],$$

где $A_ц$ – случайная амплитуда отраженного от цели сигнала, которую можно считать постоянной за время T_{ca}; V_{0r} и V_0 – радиальная и тангенциальная составляющие скорости движения носителя РСА относительно направления на опорную точку кадра; $G(\theta_ц)$ – передаточная характеристика диаграммы направленности (ДН) антенны в направлении $\theta_ц$; R_0 – дальность элемента разрешения, в котором находится цель.

Из выражения (2) следует, что амплитуда $A_{СДЦ}$ разностного сигнала является функцией V_r

$$\left|A_{СДЦ}(V_r)\right| = 2A_ц\sin\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\frac{V_r}{V_0}\right), \quad (3)$$

а рассматриваемый метод СДЦ эффективен для радиальных скоростей

$$V_r < \frac{\lambda}{4\Delta t} = \frac{\lambda V_0}{4d}.$$

Разность фаз выходных сигналов $\dot{s}_1(t-\Delta t)$, $\dot{s}_2(t)$ приемных каналов

$$\Delta\varphi(V_r) = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{4\pi d}{\lambda}\frac{V_r}{V_0} = \frac{4\pi}{\lambda}V_r\Delta t \quad (4)$$

определяется смещением движущейся цели в радиальном направлении за время Δt [2, 6].

Соотношения (1)-(4) составляют основу алгоритма СДЦ с остановленным фазовым центром, достаточно хорошо изучены и представлены в известных источниках, в частности [1-7]. Вместе с тем, недостаточное внимание уделено исследованию характеристик обнаружения и ряда других параметров таких систем при их использовании в радиолокаторах с синтезированием апертуры космического базирования.

Целью работы является получение и анализ характеристик обнаружения системы СДЦ на базе цифрового двухканального интерферометра в космических комплексах с РСА.

Алгоритм СДЦ

Модель формирования радиолокационного изображения (РЛИ), реализующая алгоритм (1), представлена на рисунке 2. Она содержит два канала приема, соответствующих антенной системе с разнесенными фазовыми центрами, в которых выполняется синтез комплексных РЛИ (КРЛИ), формируются векторы $\dot{S}_1$ и $\dot{S}_2$ комплексных отсчетов изображений, и осуществляется задержка сигнала первого приемного канала [2-4]. Сформированные сигналы подаются в суммарный и разностный каналы. Суммарный сигнал используется для синтеза КРЛИ фона и целей, разностный – для селекции движущихся целей (ДЦ) с последующим вычислением их радиальных скоростей и поправок для компенсации смещения отметок на РЛИ по азимутальной координате.

Задержка траекторного сигнала может быть осуществлена в частотной области. В этом случае алгоритм (1) запишется в виде [2]

$$S \sim \left|\dot{S}_2(f_\phi) - \mathrm{e}^{j2\pi f_\phi \Delta t}\dot{S}_1(f_\phi)\right|.$$

Пусть с помощью схемы (рисунок 2) выполняется обработка голограмм, сформированных в приемных каналах траекторными сигналами трех точечных целей – неподвижной и двух движущихся с постоянными радиальными скоростями. Угловое положение этих объектов зададим равным $\theta_{ц1} = \theta_{ц2} = \theta_{ц3} = 90°$. Моделирование выполнено для нормального бокового обзора с параметрами РСА космического базирования, приведенными в таблице 1.

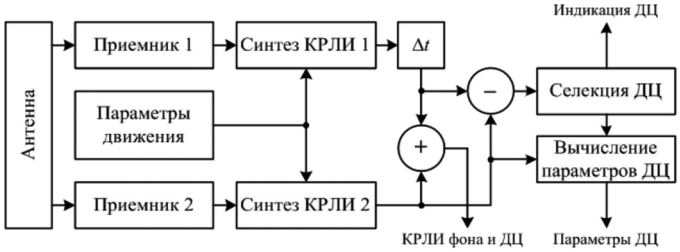


Рисунок 2 – Схема алгоритма, реализующая метод СДЦ с остановленным фазовым центром

Таблица 1 – Параметры РСА для моделирования

Параметр	Значение
Высота орбиты космического аппарата, H, км	510
Угломестное положение максимума ДН антенны, β_0, градусы	45
Ширина луча ДН антенны, $\theta_{x-3дБ} = \theta_{y-3дБ}$, градусы	0,5
Зондирующий сигнал	ЛЧМ
Длина волны зондирующего сигнала, λ, см	3,1
Ширина полосы частот зондирующего сигнала, ΔF, МГц	110
Длительность зондирующих импульсов, τ, мкс	20
Режим работы	Маршрутный

Результаты моделирования при $V_{r1} = -3$ м/с (соответствует отдаляющейся цели), $V_{r2} = 0$ и $V_{r3} = 6$ м/с (приближающаяся цель) приведены на рисунке 3, из которого видно, что пространственное положение неподвижного объекта *2* на РЛИ в каналах приема не изменилось, а отклики от движущихся целей *1* и *3* имеют азимутальное смещение, соответственно, $\Delta x_1 = -165$ и $\Delta x_3 = 330$ отсчетов (рисунок 3,*б*). Такое смещение обусловлено доплеровским сдвигом частоты

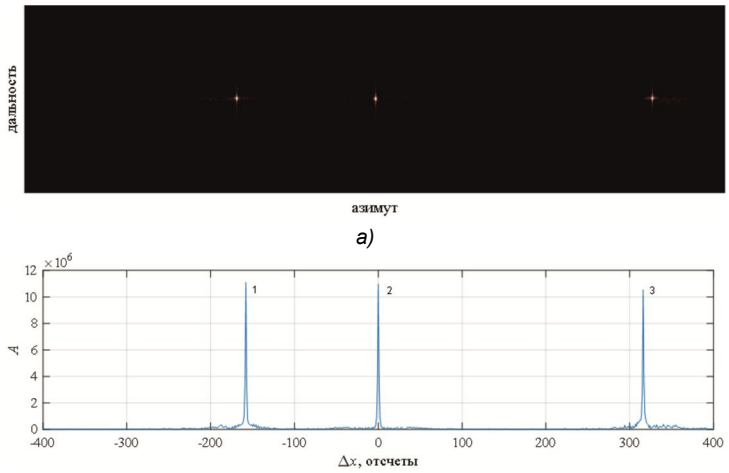
$$f_\partial = \frac{2V_0}{\lambda}\cos\theta_ц + \frac{2V_r}{\lambda},$$

зависящим от величины и знака радиальной составляющей скорости объекта, и при $\theta_ц = 90°$ определяется выражением [1-5]

$$\Delta x(V_r) = 2V_r T_{ca}/\lambda. \quad (5)$$

На РЛИ разностного канала (рисунок 4,*а*) видно, что отклик неподвижного объекта оказался скомпенсирован, а отклики движущихся объектов присутствуют. При этом их амплитуда (рисунок 4,*б*) зависит от радиальной скорости, что соответствует выражению (3). Таким образом, яркостное РЛИ на выходе системы СДЦ позволяет выполнить пороговую селекцию движущейся цели.

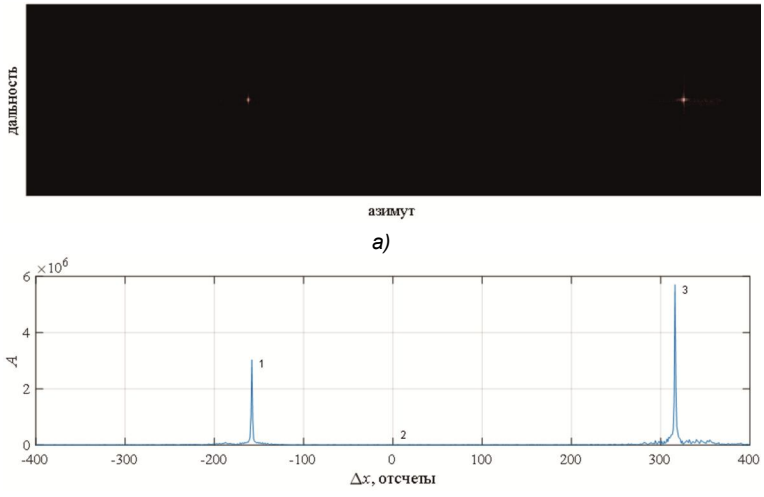
Поскольку доплеровская частота f_∂ сигналов движущихся целей на выходе вычитающего устройства такая же, как на его входе, на выходе системы СДЦ сохранилась неопределённость «угловое положение – радиальная скорость» движущегося объекта. Поэтому отклики целей, имеющих радиальную скорость, на РЛИ сохранили смещение относительно своего исходного азимутального положения на угол $\theta_x = V_r/V_0$, пропорциональный значению V_r.



а)

б)

Рисунок 3 – Фрагмент РЛИ (а) и его сечение по дальности (б) на выходе блока синтеза КРЛИ при моделировании трех точечных целей: неподвижной (2) и движущихся с радиальными скоростями V_{r1} = –3 м/с (1) и V_{r3} = 6 м/с (3)



а)

б)

Рисунок 4 – Фрагмент РЛИ (а) и его сечение по дальности (б) на выходе блока СДЦ при моделировании трех точечных целей: неподвижной (2) и движущихся с радиальными скоростями V_{r1} = –3 м/с (1) и V_{r3} = 6 м/с (3)

Выполним анализ характеристик и параметров двухканальной системы СДЦ с остановленным фазовым центром для принятых параметров РСА.

На рисунке 5,*а* приведена рассчитанная по выражению (5) зависимость азимутального смещения отклика $\Delta x = x_i - x_0$, выраженная в отсчетах относительно исходного положения x_0 цели на РЛИ, от величины радиальной скорости движения V_r (линия 1). Крутизна этой зависимости, имеющей линейный характер, пропорциональна разрешению РСА по азимуту [5-10]. На этом же рисунке приведены результаты моделирования значений $\Delta x(V_r)$ (линия 2). Относительное отклонение полученных значений от расчетных не превышает 1 %.

В РСА высокого разрешения движущаяся цель за время синтезирования перемещается по нескольким элементам разрешения по дальности. На рисунке 5,*б* линия 1 соответствует расчетному значению изменения положения отклика движущейся цели по дальности в зависимости от ее радиальной скорости:

$$\Delta y(V_r) = 2V_r T_{ca} \Delta F / c,$$

где c – скорость света; Δy – смещение в отсчетах.

Однако необходимость коррекции миграции дальности (она реализуется блоками синтеза КРЛИ на рисунке 2) в космических РСА высокого разрешения приводит к дополнительному смещению основной энергии отклика движущейся цели по дальности относительно расчетного значения Δy. Сказанное иллюстрирует кривая 2 (рисунок 5,*б*), полученная при моделировании. Изменение угломестного положения радиально движущейся цели на РЛИ вызывает размытие отклика и соответствующее снижение амплитуды.

Нормированная амплитуда разностного сигнала приемных каналов, полученная с помощью равенства (3), приведена на рисунке 6,*а* (пунктирная линия 1). Предельные однозначно измеряемые значения радиальной скорости $V_{r\max}$ соответствуют величине $\left|A_{СДЦ}/2A_ц\right| = 1$. Для рассматриваемых параметров РСА имеем $V_{r\max} = \pm 33{,}2$ м/с. Как следует из (3) эффективность системы СДЦ возрастает при увеличении разноса d фазовых центров антенны и уменьшении радиальной скорости носителя. Из полученных результатов моделирования видно, что в РСА высокого разрешения амплитуда отклика движущейся цели на выходе СДЦ (кривая 2 на рисунке 6,*а*) меньше расчетной величины, особенно при значениях V_r, близких к максимальным. Причина, как указывалось выше, заключается в расфокусировке отклика из-за его смещения по каналам дальности. Флуктуации амплитуды при изменении V_r обусловлены дискретизацией и «растеканием» отклика по соседним каналам дальности и азимута, если положение эхо-сигнала цели не соответствует в точности моменту дискретизации.

На рисунке 6,*б* представлены два графика разности фаз $\Delta\varphi$ выходных сигналов приемных каналов в зависимости от V_r: рассчитанный по формуле (4) (линия 1) и полученный при моделировании (линия 2). При этом относительное отклонение линии 2 от расчетных значений составляет менее 0,2 %. Как следует из рисунка, зависимость $\Delta\varphi(V_r)$ имеет линейный характер.

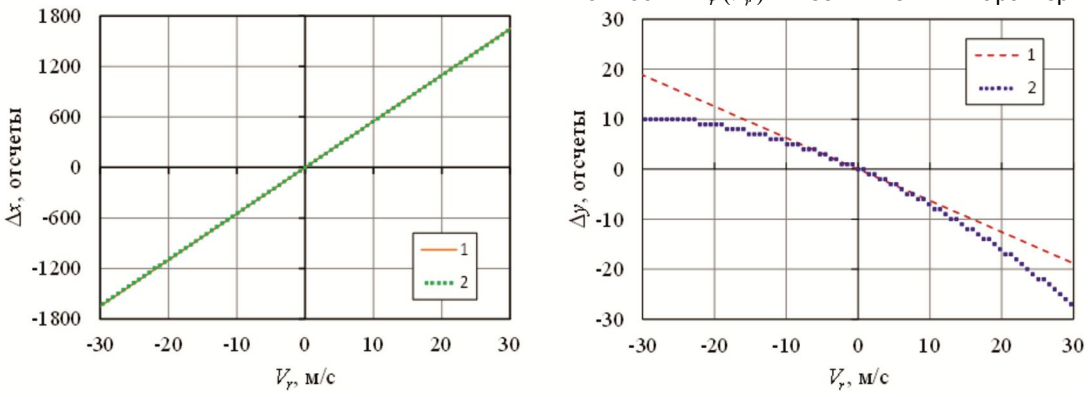


Рисунок 5 – Изменение азимутального положения (а) и дальности (б) отклика движущейся цели в зависимости от ее радиальной скорости



Рисунок 6 – Нормированная амплитуда отклика движущейся цели (а) и разность фаз выходных сигналов приемных каналов системы СДЦ (б) в зависимости от радиальной скорости

Линейность функций $\Delta x(V_r)$ и $\Delta\varphi(V_r)$ позволяет использовать их для оценки радиальной скорости цели [6, 9]. Однако сдвиг функции $\Delta x(V_r)$ при изменении азимута

движущегося объекта может привести к неоднозначности оценки V_r из-за неопределённости «азимут – радиальная скорость». Вместе с тем, разность фаз $\Delta\varphi(V_r)$ выходных сигналов приемных каналов инвариантна к азимутальному положению движущегося объекта. При этом даже если отклик цели на РЛИ окажется размытым из-за ее движения, величина $\Delta\varphi$ сохранит свое значение при выполнении условия $d << r_0$ [8].

Статистическое моделирование

Для анализа статистических свойств и оценки вероятностных характеристик обнаружения рассматриваемой системы СДЦ (рисунок 2) выполним ее моделирование при наличии на входах каналов синтеза КРЛИ сигналов $\dot{s}_1$, $\dot{s}_2$ в виде аддитивной смеси эхо-сигналов и случайной составляющей $\dot{\xi}_1$, $\dot{\xi}_2$ – шума с нормальным распределением и среднеквадратическим отклонением σ_0:

$$\dot{s}_{1,2}(m,n) = A_{ц}(m,n)\exp\left[j\varphi_{1,2}(m,n)\right] + \dot{\xi}_{1,2}(m,n),$$

где $m = 1...M$; $n = 1...N$; M, N – количество отсчетов сигнала, соответственно, по дальности и азимуту; $A_{ц}$ – амплитуда, неизменная на интервале синтезирования; $\varphi_{1,2}$ – фазы входных сигналов. Шумы приемных каналов $\dot{\xi}_1$, $\dot{\xi}_2$ являются независимыми. В приведенном выше выражении не учтен уровень фона от подстилающей поверхности, который добавлялся к сигналу в процессе экспериментов.

Отношение сигнал-шум на входе системы СДЦ определим как

$$q = \frac{A_{ц}^2}{2\sigma_0^2} M\,N. \qquad (6)$$

Оценка радиальной скорости цели может быть выполнена по оценкам разности фаз $\Delta\hat{\varphi}$ входных сигналов системы СДЦ по формуле [6]

$$\hat{V}_r = \frac{\lambda}{4\pi\Delta t}\Delta\hat{\varphi}.$$

Для получения значения $\Delta\hat{\varphi}$ достаточно знать номер доплеровского канала, в котором произошло обнаружение сигнала.

При цифровой обработке радиолокационных изображений, получаемых с помощью РСА, широко используются алгоритмы обнаружения с постоянным уровнем ложных тревог (ПУЛТ) [10]. Стабилизация вероятности ложной тревоги P_f достигается адаптивным формированием порога на основании анализа пикселей, окружающих анализируемый элемент изображения. Как правило, области анализа фона, шума и сигнала представляют собой окна квадратной формы, разделенные защитной зоной (рисунок 7).

Ключевым вопросом обеспечения постоянного уровня ложных тревог является расчет адаптивного порога обнаружения, причем алгоритмы его расчета существенно зависят от функции распределения помех.

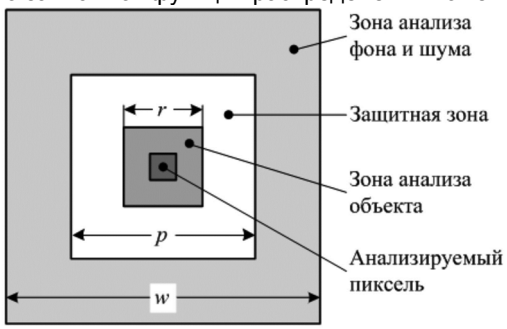


Рисунок 7 – Области объекта и фона для вычисления статистик

Обобщенная структурная схема устройства стабилизации вероятности ложной тревоги, полученная с использованием параметрического подхода, представлена на рисунке 8, где использованы обозначения: K_i – поправочные коэффициенты, зависящие от алгоритма адаптации порога; D – решение об обнаружении пикселя с целью. Такая структура реализует квазиоптимальную оценочно-корреляционно-компенсационную обработку сигналов и изображений [11].



Рисунок 8 – Обобщенная структурная схема ПУЛТ процессора

При использовании модели гауссовского шума и рэлеевских флуктуаций фона порог Неймана-Пирсона T_{NP} рассчитывается для заданной вероятности ложной тревоги P_f по соотношению [12]

$$T_{NP} = \hat{m}_1 + k_{kor} h_{norm} \hat{\sigma},$$

где $\hat{m}_1 = N_f^{-1}\sum_{ij}\rho_{ij}$ и $\hat{\sigma}^2 = N_f^{-1}\sum_{ij}\rho_{ij}^2 - \hat{m}_1^2$ – оценки математического ожидания и дисперсии, получаемые путем усреднения пикселей зоны анализа фона и шума; ρ_{ij} – значение пикселя с номером (i, j); N_f – число пикселей при усреднении; $k_{kor} = 1{,}131$ – корректирующий коэффициент, учитывающий объем выборки в окне анализа фона и шума; $h_{norm} = -1{,}25 + 1{,}061\sqrt{0{,}947 + 5{,}58\lg(P_f^{-1})}$.

Для проведения моделирования использовалось окно с параметрами $r = 3$, $p = 11$ и $w = 21$. Общее количество точек в окне анализа фона и шума составило 320.

В качестве примера обработки РСА изображения рассмотрим случай, когда РЛИ содержит точечную цель, движущуюся с постоянной скоростью на равномерном фоне. Фрагмент выходного изображения системы СДЦ представлен на рисунке 9,*а*. Размер изображения составляет 200×300 пикселей. Экспериментальное исследование ПУЛТ процессора показало, что он обеспечивает приемлемую стабилизацию P_f до значений отношения фон-шум примерно 10…15 дБ.

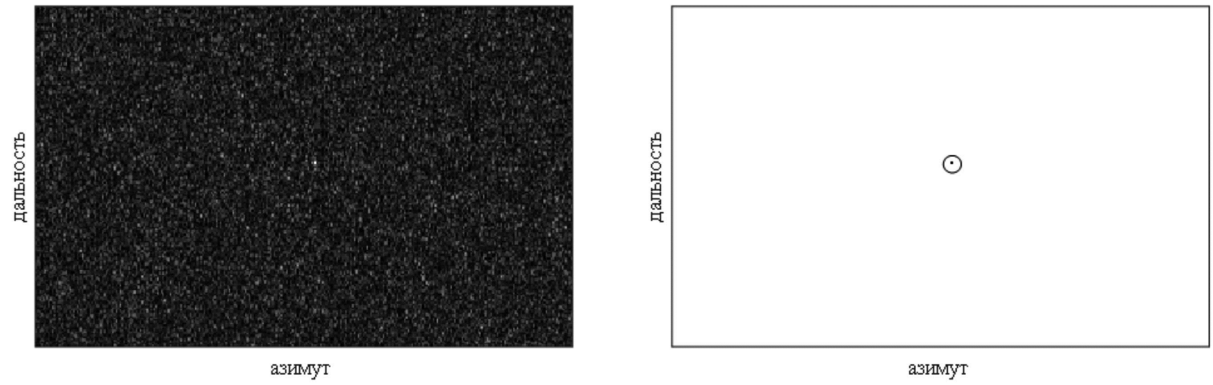
Результат обработки данного изображения в ПУЛТ

процессоре при номинальном значении $P_f = 5 \cdot 10^{-7}$ представлен на рисунке 9,*б*. Видно, что на карте обнаружений имеется автоматически обнаруженная цель (выделена кружком). Ложные объекты на карте обнаружений отсутствуют.

При уменьшении порога обнаружения появляются ложные цели, что хорошо заметно по рисунку 10, где приведены результаты обработки РЛИ при $P_f = 10^{-5}$. На карте обнаружений присутствует отклик движущейся цели и две яркостные отметки (выделены пунктирными кружками), которые представляют собой ложные цели.

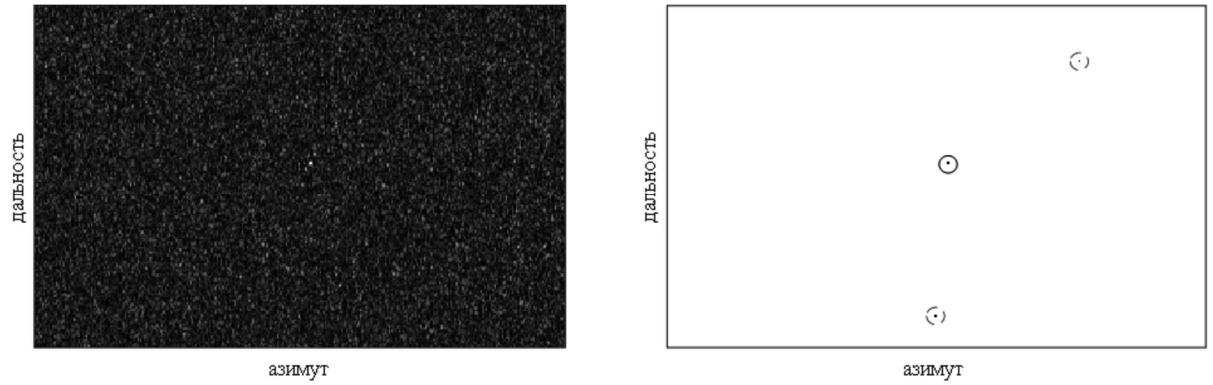
На основе анализа рисунков 9 и 10 можно заключить, что уровень шума на выходе системы СДЦ становится выше, чем уровень шума в каждом из каналов приема. Это связано с тем, что при вычитании выходных сигналов приемных каналов в блоке СДЦ дисперсия шума возрастает в два раза, т.е. $\sigma^2_{СДЦ} = 2\sigma^2_0$.

Для построения характеристик обнаружения было выполнено статистическое моделирование алгоритма при наличии движущейся точечной цели и приведенных выше расфокусировкой отклика движущейся цели при синтезе КРЛИ; 0,3…0,5 дБ составляют потери в ПУЛТ процессоре. Снижению отношения сигнал-шум также способствует удвоение дисперсии шума в блоке СДЦ. Поэтому минимальная радиальная скорость, которую способен селектировать с требуемой вероятностью P_d адаптивный обнаружитель с системой обеспечения ПУЛТ, определя-



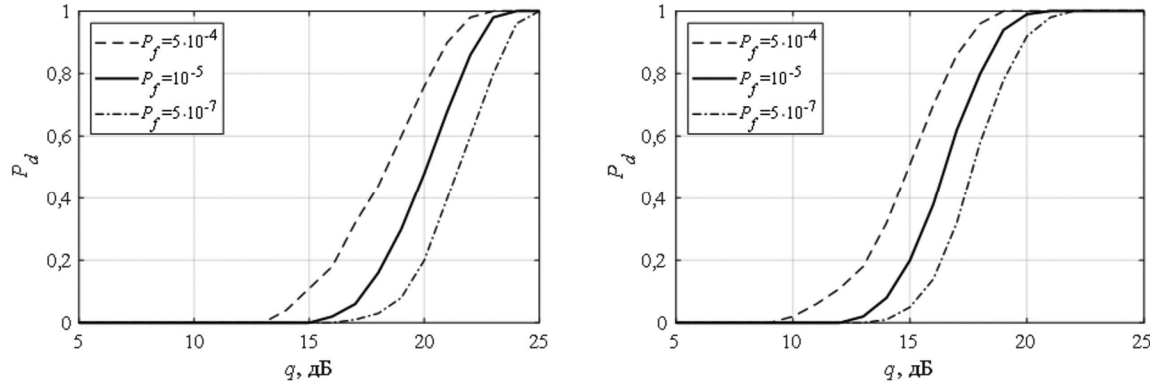
а) *б)*

Рисунок 9 – Фрагмент выходного изображения системы СДЦ (а) и карта обнаружений (б) при наличии точечной цели (V_r = 18,25 м/с, q = 17 дБ, $P_f = 5 \cdot 10^{-7}$)

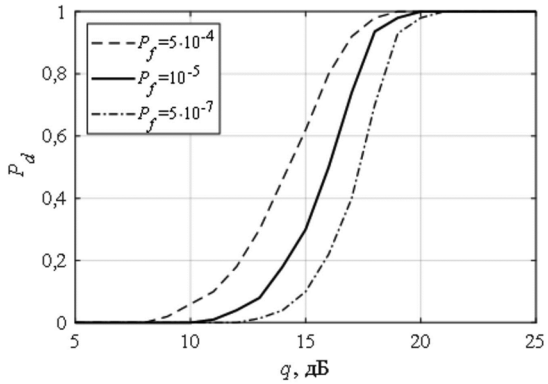


а) *б)*

Рисунок 10 – Фрагмент выходного изображения системы СДЦ (а) и карта обнаружений (б) при наличии точечной цели (V_r = 18,25 м/с, q = 17 дБ, $P_f = 10^{-5}$)



а) *б)*



в)

Рисунок 11 – Характеристики обнаружения двухканальной системы СДЦ с остановленным фазовым центром при наличии движущейся цели с V_r = 9,12 м/с (а), V_r = 18,25 м/с (б), V_r = 27,37 м/с (в)

ется максимально достижимым значением q на входе системы СДЦ. Для значений $V_r < 0,5 \cdot |V_{r\max}|$ выявлена следующая зависимость. При изменении радиальной скорости движущейся цели в k раз вероятность $P_d|_{P_f}$ сохранит свое значение, если пороговое отношение сигнал-шум изменится в 1/k раз. Так, для уверенного обнаружения объектов, имеющих радиальную скорость V_r = 5 м/с, при рассматриваемых параметрах РСА необходимо обеспечить q > 27 дБ $(P_d > 0,95;\ P_f = 10^{-5})$,

Заключение

В работе описан алгоритм, реализующий метод СДЦ с остановленным фазовым центром на базе двухканального интерферометра. Выполнено моделирование алгоритма, получены результаты обработки траекторных сигналов для РСА космического базирования X-диапазона, приведены зависимости изменения амплитуды и положения отклика движущейся цели на РЛИ, разности фаз входных сигналов системы СДЦ. Выполнено статистическое моделирование системы СДЦ с остановленным фазовым центром, построены зависимости вероятности правильного обнаружения от отношения сигнал-шум. Общей закономерностью рассматриваемой системы СДЦ является повышение достоверности оценки радиальной скорости при увеличении последней и возрастании отношения сигнал-шум. Полученные характеристики обнаружения позволяют оценить потенциальные возможности двухканальной системы СДЦ при заданных значениях сигнал-шум и предъявить требования к ее параметрам.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-29-10114.

Литература

1. Груздов В.В., Колковский Ю.В., Криштопов А.В., Кудря А.И. Новые технологии дистанционного зондирования Земли из космоса. М.: Техносфера, 2019. 482 с.

2. Авиационные системы радиовидения / Под ред. Г.С. Кондратенкова. М: Радиотехника, 2015. 648 с.

3. W. Xu, Y. Chen, P. Huang, W. Tan, Y. Qi, «Using the Displaced Phase Center Azimuth Multiple Beams Technique with Spaceborne Synthetic Aperture Radar Systems for Multichannel Reconstruction of Accelerated Moving Targets», Electronics. 2023; 12(24):4954. https://doi.org/10.3390/elect-ronics12244954

4. 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.

5. G. Krieger, N. Gebert and A. Moreira, «Unambiguous SAR signal reconstruction from nonuniform displaced phase center sampling», in IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 1, no. 4, pp. 260-264, Oct. 2004, doi: 10.1109/ LGRS.2004.832700.

6. Попов Д.И. Измерение радиальной скорости цели. Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2015, Вып. 1. С. 53-59.

7. 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.

8. Витязев В.В., Колодько Г.Н., Витязев С.В. Селекция наземных движущихся целей на основе многоско-ростной адаптивной обработки траекторного сигнала. Цифровая обработка сигналов. 2007, № 1. С. 41-50.

9. V.V. Kostrov and K.K. Khramov, «Statistical Characteristics of the Moving Target Indication in Space-borne Interferometry Synthetic Aperture Radar», 2019 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), Omsk, Russia, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/Dynamics47113.2019. 8944594.

10. El-Darymli, Khalid, et al. «Target detection in synthetic aperture radar imagery: A state-of-the-art survey», Journal of Applied Remote Sensing 7.1 (2013): 071598-071598, doi: 10.1117/1.JRS.7.071598.

11. Сосулин Ю.Г., Костров В.В., Паршин Ю.Н. Оценочно-корреляционная обработка сигналов и компенсация помех. М: Радиотехника, 2014. 632 с.

12. V. Kostrov, E. Tolstov and K. Khramov, «Automatic Detection of Thread-like Objects in SAR Using a Modified Radon Transform», 2024 26th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA), Moscow, Russian Federation, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/DSPA 60853.2024.10510127.

13. Лихарев В.А. Цифровые методы и устройства в радиолокации. М.: Советское радио, 1973. 456 с.