

Статистические характеристики системы СДЦ с остановленным фазовым центром космических РСА

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

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

²ЗАО «АЭРОКООН», 140180, г. Жуковский, МО, ул. Жуковского, 1, E-mail: e_tolstov@mail.ru

В докладе описана методика и результаты исследования статистических характеристик при моделировании системы селекции движущихся целей (СДЦ) с остановленным фазовым центром РСА космического базирования. Получены зависимости среднеквадратического отклонения оценки радиальной скорости цели для различных значений отношения сигнал-шум на входе системы. Эти характеристики позволяют оценить потенциальные возможности системы СДЦ.

The report describes the method and results of investigation of statistical characteristics in the simulation of the moving target indication (MTI) system using displaced phase center antenna of spaceborne synthetic aperture radar. The graphs of the standard deviation of the estimate of the target radial velocity for different values of signal-to-noise ratio at the system input are obtained. These characteristics make it possible to assess the potential capabilities of the MTI system.

При организации режима селекции движущихся целей (СДЦ) в РЛС стремятся выделить эхо-сигналы полезных (движущихся) целей и подавить сигналы от неподвижных целей (местных предметов), подстилающих поверхностей, объемно-распределенных естественных и искусственных образований пассивных помех, фона местности. Необходимость в подавлении сигналов перечисленных объектов возникает из-за их большого уровня и динамического диапазона, что препятствует высококачественной обработке слабых полезных сигналов. При этом основными задачами обработки сигналов является обнаружение факта наличия движущихся целей, измерение их координат и параметров движения [1–4].

Одним из эффективных методов селекции движущихся целей в радиолокаторах с синтезированием апертуры антенны (РСА) космического базирования является метод, использующий алгоритм с остановленным фазовым центром. В системе СДЦ с остановленным фазовым центром используется интерферометр с разнесенными антеннами либо приемная антенна с фазовыми центрами, которые разнесены вдоль линии пути носителя РСА [1, 2].

Для подавления сигналов от неподвижных целей и фона при использовании метода СДЦ с остановленным фазовым центром необходимы: компенсация радиального движения космического аппарата (КА) РСА, задержка сигнала первого по ходу движения приемного канала для обеспечения синфазности сигналов, отраженных от неподвижных целей, и вычитание выходных сигналов приемных каналов с последующим когерентным накоплением сигнала цели на фоне шума приемника. При нормальном боковом обзоре такой алгоритм СДЦ описывается выражением [1]

$$S \sim \left| \int_0^{T_{ca}} \dot{s}_1(t - \Delta t) h_x^*(t) e^{-j2\pi f \phi t} dt - \int_0^{T_{ca}} \dot{s}_2(t) h_x^*(t) e^{-j2\pi f \phi t} dt \right|,$$

где $s_1(t)$ и $s_2(t)$ – траекторные сигналы в приемных каналах;

Δt – задержка сигнала первого приемного канала, для бокового обзора равная времени пролета КА половины расстояния между приемниками;

$h_x(t)$ – опорная функция, компенсирующая квадратичный фазовый набег $\varphi(t)$ траекторных сигналов;

f_ϕ – частота пространственного канала, в котором происходит когерентное накопление сигналов.

Если задержка сигнала осуществляется в частотной области, то рассмотренный алгоритм можно записать в виде

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

Рассмотрим вариант реализации алгоритма системы СДЦ с остановленным фазовым центром, использующий способ гармонического анализа для извлечения информации о доплеровском изменении частоты [1, 2].

Выполним моделирование описанного алгоритма для сцены (рис. 1), содержащей точечную цель Ц, движущуюся с постоянной скоростью V_u вдоль линии визирования. Очевидно, что цель имеет только радиальную V_r составляющую скорости, которая для траверзного положения может быть найдена из выражения $V_r = V_u \cos \gamma$, где γ – угол падения электромагнитной волны на объект съемки.

Зададимся следующими основными параметрами: режим съемки – нормальный боковой обзор ($\theta_n = 90^\circ$), длина волны зондирующего сигнала $\lambda = 3,14$ см, разрешение $\delta_x = \delta_r = 1,8$ м, орбитальная скорость носителя РСА $V_0 = 7,54$ км/с, $\gamma = 39^\circ$. Угловое положение цели относительно траверзного положения зададим равным $\theta_u = 0^\circ$.

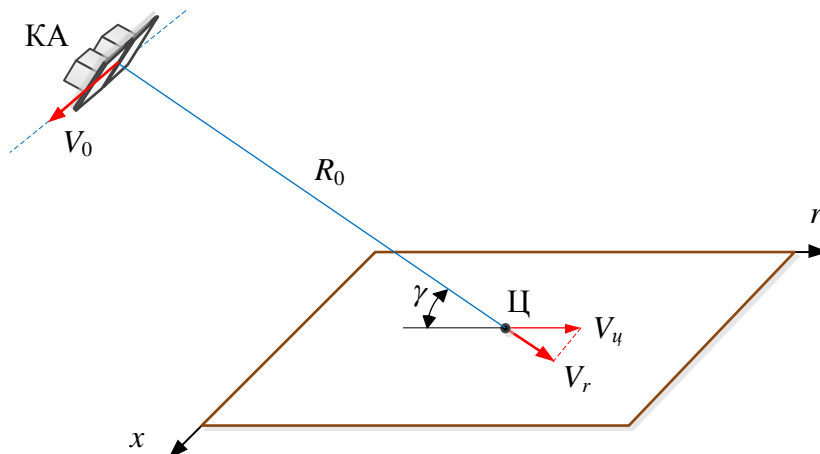


Рис. 1. Геометрия движения КА и цели при моделировании.

Для повышения эффективности обработки сигнала системой СДЦ необходимо учитывать ее статистические характеристики. Для анализа статистических свойств и оценки вероятностных характеристик обнаружения рассматриваемой системы СДЦ выполним ее моделирование при наличии на входах аддитивной смеси входного сигнала с амплитудой A_0 и шумовой составляющей ξ – шума с нормальным распределением и среднеквадратическим отклонением σ_0 :

$$\dot{s}_{1,2}(r, t) = A_0(r, t) \exp(j\phi_{1,2}(r, t)) + \dot{\xi}_{1,2}(r, t).$$

Отношение сигнал-шум на входе системы СДЦ определим как

$$q = \frac{A_0^2}{2\sigma_0^2} N_r N_x,$$

где N_r, N_x – количество отсчетов сигнала, соответственно, по дальности и азимуту.

На рис. 2–4 приведены фрагменты выходных яркостных изображений системы СДЦ и соответствующие сечения по дальности при $q = 20$ дБ для точечных целей, имеющих различную радиальную скорость V_r .

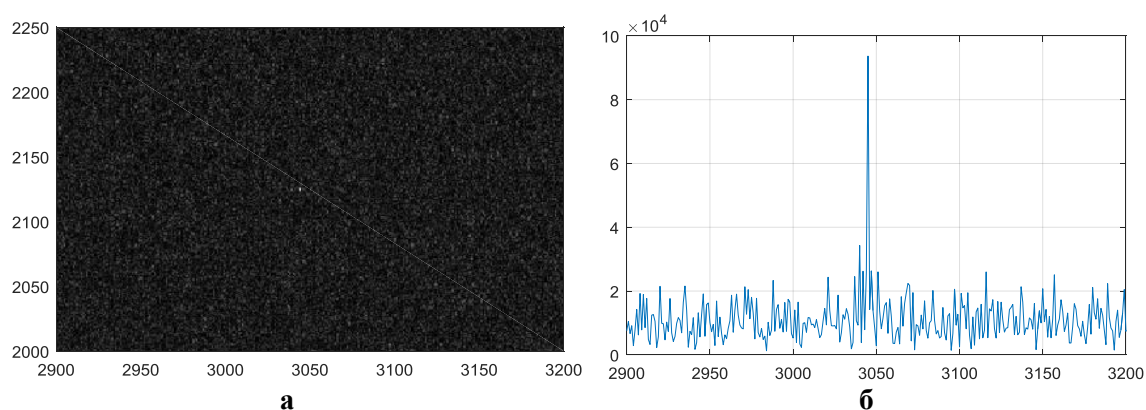


Рис. 2. Фрагмент выходного изображения системы СДЦ (а) и его сечение по дальности (б) при наличии точечной цели с $V_r = 23,3$ м/с и $q = 20$ дБ.

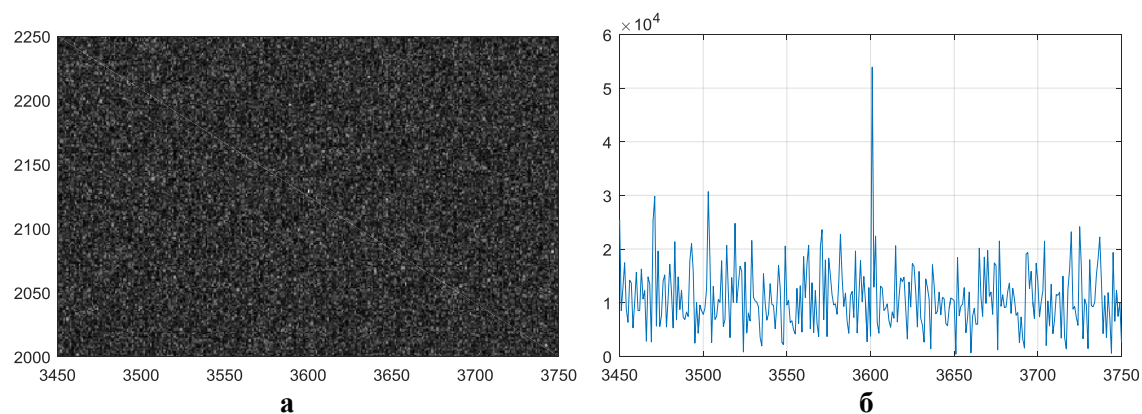


Рис. 3. Фрагмент выходного изображения системы СДЦ (а) и его сечение по дальности (б) при наличии точечной цели с $V_r = 15,5$ м/с и $q = 20$ дБ.

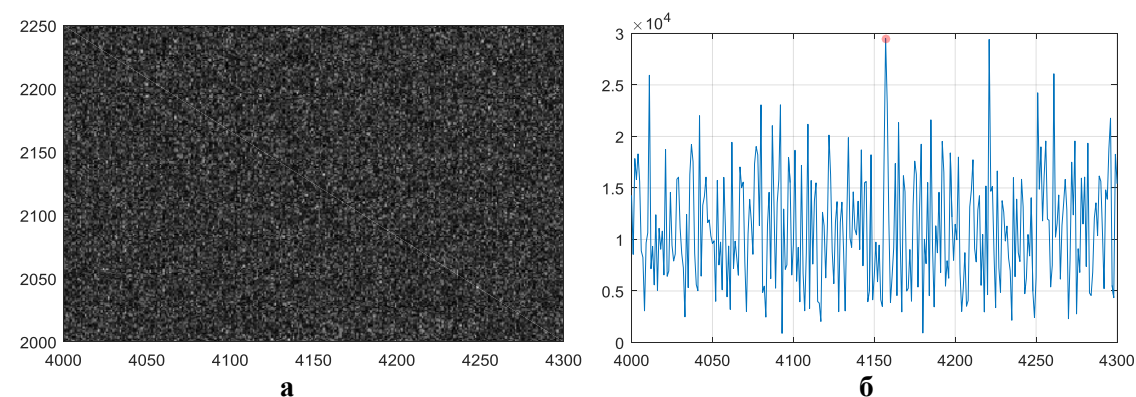


Рис. 4. Фрагмент выходного изображения системы СДЦ (а) и его сечение по дальности (б) при наличии точечной цели с $V_r = 7,75$ м/с и $q = 20$ дБ.

Анализ приведенных рисунков позволяет сделать вывод о том, 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. $\sigma_{СДЦ}^2 = 2\sigma_0^2$. Вместе с тем

амплитуда $A_{СДЦ}$ отклика точечной цели на выходе системы СДЦ определяется выражением [1]

$$A_{СДЦ}(V_r) = 2A_0 \sin\left(2\pi \frac{V_r \Delta t}{\lambda}\right).$$

Зададим среднеквадратическое отклонение СКО выборочной оценки радиальной скорости движущейся цели выражением

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\hat{V}_{ri} - \bar{V}_r)^2},$$

где $\hat{V}_{r1}, \hat{V}_{r2}, \dots, \hat{V}_{rN}$ – последовательность оценок радиальной скорости цели;

\bar{V}_r – выборочное среднее;

N – число статистических экспериментов.

Оценка радиальной скорости для i -го эксперимента определится формулой

$$\hat{V}_{ri} = n_x \frac{\Delta F_\delta}{(N_x - 1)} \cdot \frac{\lambda}{2} = n_x \frac{F_{\delta \max} \cdot \lambda}{N_x - 1},$$

где $\Delta F_\delta = 2F_{\delta \max}$ – ширина спектра доплеровских частот;

n_x – номер азимутального отсчета с максимальным значением амплитуды на выходе системы СДЦ.

С учетом полученных выражений выполним статистическое моделирование рассматриваемой системы СДЦ для различных значений q и V_r . Полученные зависимости $\sigma_v(q)$ при радиальных скоростях точечной движущейся цели $V_r = 23,3$ м/с, $15,5$ м/с и $7,75$ м/с представлены, соответственно, на рис. 5–7. Для достижения 15% точности измерения характеристик оценивания было выполнено 50 статистических экспериментов для каждого значения q .

Из рис. 5–7 видно, что при малых значениях отношения сигнал-шум q все зависимости СКО оценки радиальной скорости достигают предельного значения $\sigma_{v \max}$, которое определяется максимальным разбросом $\Delta \hat{V}_{r \max}$ оценок радиальной скорости

$$\sigma_{v \max} = \Delta \hat{V}_{r \max} / \sqrt{12},$$

не зависит от V_r , оказывается пропорциональным ширине спектра доплеровских частот и определяется параметрами РСА. Для заданных в работе параметров моделирования получим $\sigma_{v \max} = 37,97$ м/с. При увеличении отношения q ($q \geq 20 \dots 25$ дБ) значение СКО уменьшается, стремясь к нулю, что соответствует максимальной точности оценки радиальной скорости цели.

На рис. 8 приведены характеристики обнаружения $p(q)$, полученные статистическим моделированием для различных значений радиальной скорости движения цели. Они позволяют оценить вероятность правильного обнаружения цели с заданной величиной V_r .

Общей закономерностью приведенных статистических характеристик системы СДЦ является повышение достоверности оценки радиальной скорости при ее увеличении и возрастании отношения сигнал-шум. При этом выявлена следующая зависимость. При изменении радиальной скорости движущейся цели на k дБ требуемая вероятность $p_0(q)$ правильного его обнаружения может быть достигнута за счет противоположного изменения отношения сигнал-шум на ту же величину.

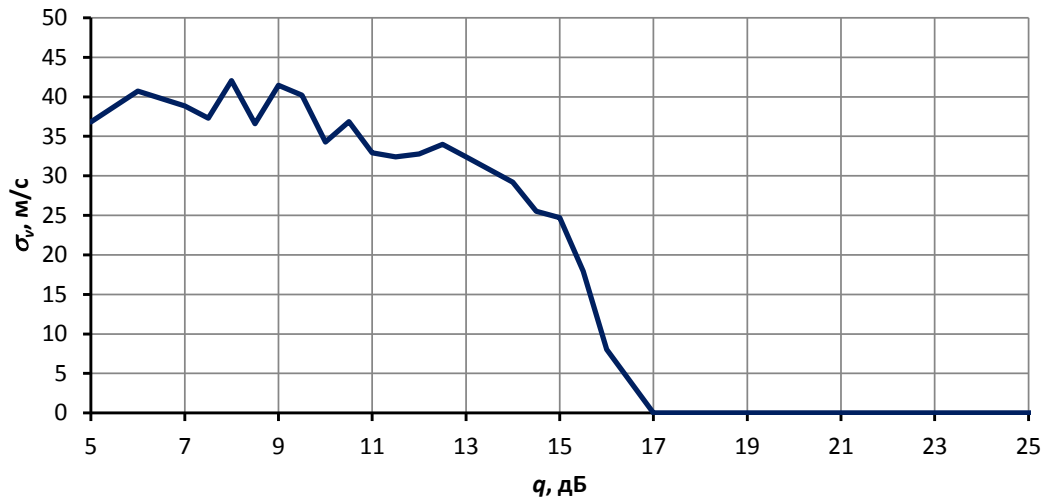


Рис. 5. Среднеквадратическое отклонение оценки радиальной скорости движущейся цели для различных q при $V_r = 23,3$ м/с.

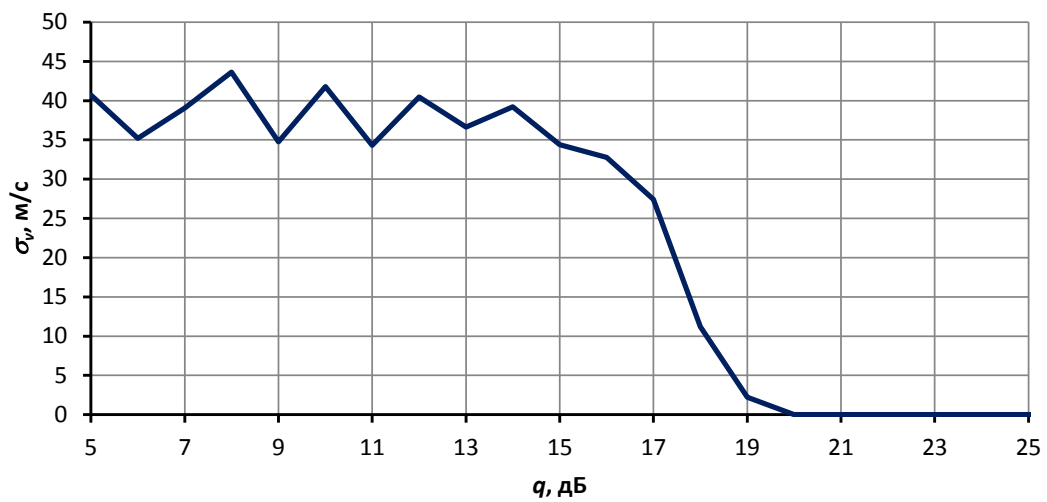


Рис. 6. Среднеквадратическое отклонение оценки радиальной скорости движущейся цели для различных q при $V_r = 15,5$ м/с.

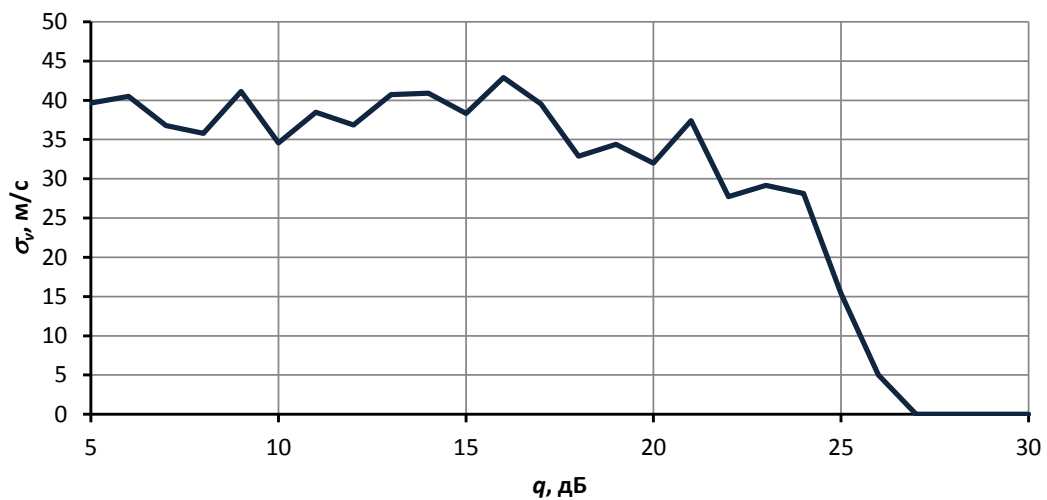


Рис. 7. Среднеквадратическое отклонение оценки радиальной скорости движущейся цели для различных q при $V_r = 7,75$ м/с.

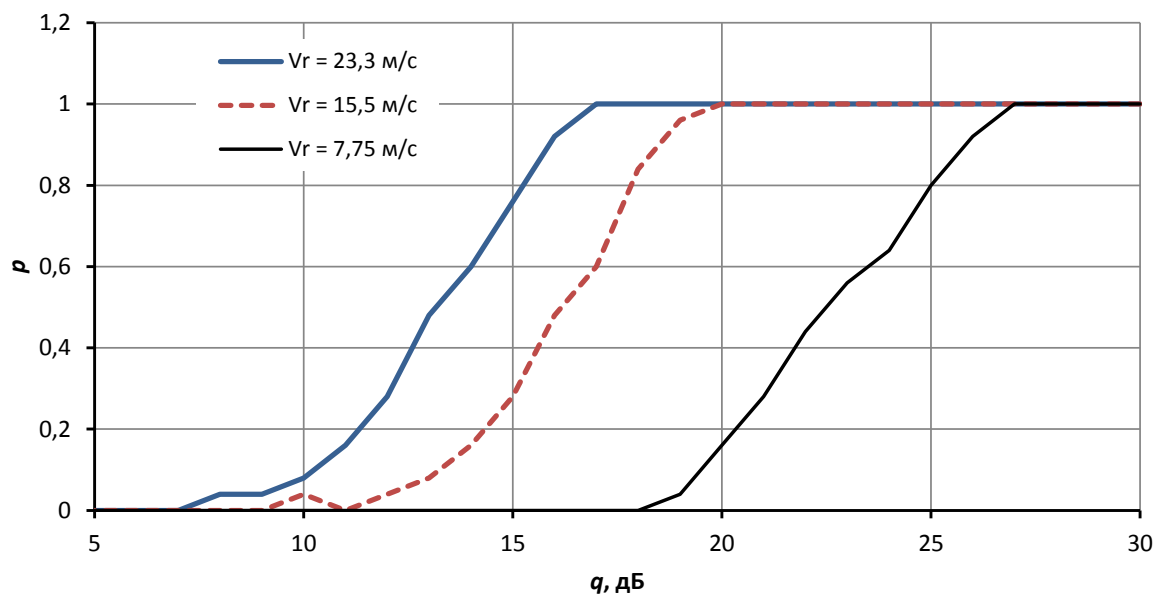


Рис. 8. Характеристики обнаружения, полученные моделированием системы СДЦ с остановленным фазовым центром, для различных значений радиальной скорости V_r .

Таким образом, в работе описана методика исследования статистических характеристик при моделировании системы СДЦ с остановленным фазовым центром космических РСА и приведены зависимости среднеквадратического отклонения оценки радиальной скорости движущейся цели для различных значений отношения сигнал-шум на входе системы. Полученные зависимости позволяют оценить потенциальные возможности системы СДЦ при заданных значениях сигнал-шум и предъявить требования к ее параметрам и характеристикам.

Литература

1. Авиационные системы радиовидения / Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М: Радиотехника, 2015. – 648 с.: ил.
2. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений / Под ред. Л.А. Школьного. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. – 531 с.
3. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В.Н. Антипов, В.Т. Горяинов, А.Н. Кулин, Е.Ф. Толстов и др.; Под ред. В.Т. Горяинова. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.
4. Костров В.В., Толстов Е.Ф. Проблемы дистанционного зондирования Земли с использованием космических РСА высокого разрешения // Проблемы дистанционного зондирования, распространения и дифракции радиоволн: Конспекты лекций / VII Всероссийские Армандовские чтения: молод. школа. – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2017. – С.76-113.