

Свойства системы СДЦ моноимпульсного космического РСА по обнаружению движущихся целей

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

Рассмотрена методика моделирования системы селекции движущихся целей (СДЦ) моноимпульсного радиолокатора с синтезированием апертуры антенны (РСА) космического базирования. Проведено исследование основных статистических характеристик РСА как инструмента по обнаружению движущихся целей и измерения радиальной скорости. В качестве обобщающего параметра, характеризующего помеховую обстановку, взято отношение сигнал-шум на входе системы. Полученные характеристики обнаружения и оценивания позволяют определить потенциальные возможности РСА при решении задач СДЦ.

The methods of modeling of the moving target indicator system of monopulse synthetic aperture space-based radar (SAR) are considered. The main statistical characteristics of SAR as instrument on detection of moving targets and on measurement of radial velocity are studied. As generalized parameter, characterizing the clutter-noise situation, is taken the signal-noise ratio at the input systems. The presented characteristics of the detection and estimation allow to defining the potential possibilities SAR at decision of the moving target indicator problems.

Для выделения движущихся целей и одновременного подавления сигналов фона и неподвижных объектов в моноимпульсном РСА применяется разностная диаграмма направленности антенны (ДНА), равносигнальное направление (РСН) которой направлено на неподвижный объект [1 – 4]. Радиальная скорость движущихся целей дает дополнительное доплеровское смещение частоты по сравнению с частотой эхосигнала от неподвижного объекта, находящегося в той же точке пространства. И наоборот, если доплеровские частоты сигналов движущейся цели и неподвижного объекта совпадают, то они имеют различное азимутальное положение.

Рассмотрим типичную тактическую ситуацию наблюдения объектов с помощью РСА (рис. 1), у которого два независимых идентичных парциальных луча 1 и 2 разнесены на некоторый угол ε_0 . Для простоты и удобства качественного рассмотрения процессов на рис. 1 приведена прямоугольная система координат. При численных расчетах маршрутного режима съемки с моноимпульсным РСА кривизна Земли учитывается в соответствующих алгоритмах обработки. Наземная цель, движущаяся с радиальной скоростью V_r , расположена в точке O , а РСН антенны направлено под углом θ_n по отношению к вектору путевой скорости V_0 космического аппарата (КА) – носителя РСА. Объект O виден с КА под углом β_y (рис. 1) по отношению к РСН.

Типичная зависимость разностной ДНА от азимутальной координаты вдоль линии пути КА представлена на рис. 2. Уровень разностного сигнала U_Δ нормирован относительно максимального значения, путевая координата выражена в дискретах n , нумерующих отсчеты пути, пройденного КА за период следования импульсов. По сути, представленный график характеризует амплитуду отклика разностной схемы приема на точечный объект. ДНА аппроксимирована функцией $(\sin x/x)^2$, которая дает удовлетворительные результаты для АФАР.

Приведем основные соотношения для сигналов моноимпульсного РСА. Интенсивность сигнала пропорциональна коэффициенту направленного действия (КНД) антенны в некотором направлении β_i , поэтому отраженный сигнал i -й точки фона в разностной ДНА может быть записан [1] в форме

$$s_{\Delta i}(t) = A_i G_{\Delta}(\beta_i) \times \exp \left\{ -j2\pi \left[f_0 t + \frac{2V_0}{\lambda} (\cos \theta_n) t - \frac{2V_0}{\lambda} (\sin \theta_n) \beta_i t - \frac{V_0^2 \sin^2 \theta_n}{\lambda R_n} t^2 \right] + j\varphi_i \right\}, \quad (1)$$

где A_i, φ_i – амплитуда и начальная фаза сигнала, отраженного от i -й точки земной поверхности;

$G_{\Delta}(\beta)$ – КНД антенны в направлении β .

В случае нормального бокового обзора, когда $\theta_n = \pi/2$ (рис. 1) последнее выражение упрощается:

$$s_{\Delta i}(t) = A_i G_{\Delta}(\beta_i) \exp \left\{ -j2\pi \left[f_0 t - \frac{2V_0}{\lambda} \beta_i t - \frac{V_0^2}{\lambda R_n} t^2 \right] + j\varphi_i \right\}.$$

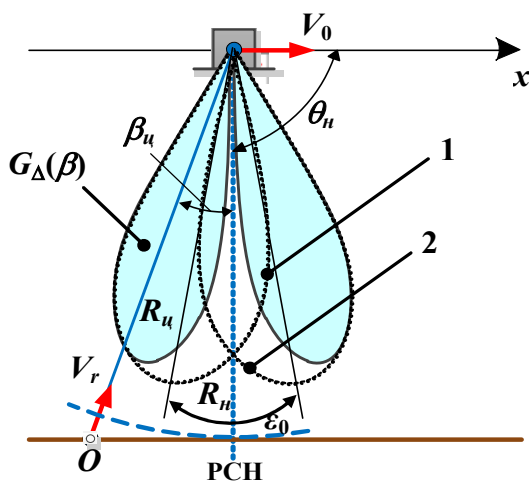


Рис. 1. Принцип работы моноимпульсной системы.

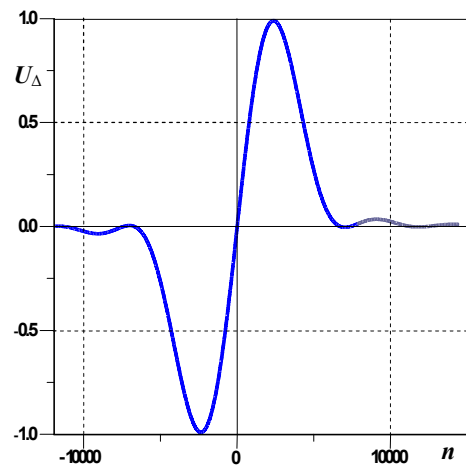


Рис. 2. Разностная ДНА моноимпульсного РСА.

Суммарный траекторный сигнал от всех неподвижных точек фона в пределах ДНА можно представить бесконечной суммой вида $s_{\Delta}(t) = \sum_{i=0}^{\infty} s_{\Delta i}(t)$.

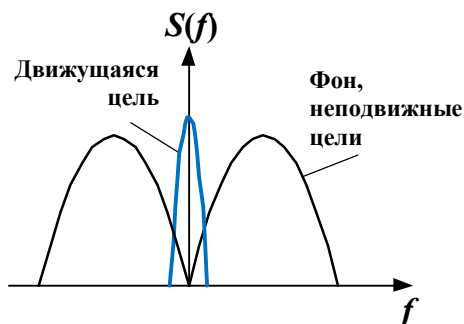


Рис. 3. Спектры сигналов при нормальном боковом наблюдении.

Очевидно, что огибающая спектра $S(f)$ такого сигнала совпадает с формой модуля разностной ДНА (идеализированная зависимость приведена на рис. 3) и имеет в случае скошенного режима обзора нулевую интенсивность на частоте $(2V_0/\lambda) \cos \theta_n$, когда $\beta_i = 0$. При нормальном боковом наблюдении $\theta_n = \pi/2$, $\cos \theta_n = 0$ и модуль спектра траекторного сигнала неподвижной нефлюктуирующей точечной цели на централь-

ной (нулевой) частоте равен 0.

Если в поле ДНА имеется движущийся объект, то отраженный от него сигнал имеет доплеровское смещение частоты, которое зависит от азимутального угла β_u и радиальной скорости V_r , а его уровень определяется значением ДНА в направлении объекта:

$$s_{\Delta u}(t) = A_u G_{\Delta}(\beta_u) \times \exp \left\{ -j2\pi \left[f_0 t + \frac{2V_0}{\lambda} (\cos \theta_n) t - \frac{2V_0}{\lambda} (\sin \theta_n) \beta_u t - \frac{V_0^2 \sin^2 \theta_n}{\lambda R_u} t^2 + \frac{2V_r}{\lambda} t \right] + j\varphi_u \right\}. \quad (2)$$

При нормальном боковом обзоре получим:

$$s_{\Delta u}(t) = A_u G_{\Delta}(\beta_u) \exp \left\{ -j2\pi \left[f_0 t - \frac{2V_0}{\lambda} \beta_u t - \frac{V_0^2}{\lambda R_u} t^2 + \frac{2V_r}{\lambda} t \right] + j\varphi_u \right\}.$$

Как следует из (2), в случае, когда движущийся объект имеет азимутальный угол $\beta_u = V_r / (V_0 \sin \theta_n)$ или $\beta_u = V_r / V_0$ (при $\theta_n = \pi/2$), доплеровская частота $2V_r / \lambda$ отраженного сигнала совпадает с центральной частотой спектра сигнала фона, отраженного от точки $\beta_i = 0$. Однако при этом интенсивность отраженного сигнала, которая пропорциональна $G_{\Delta}(\beta_u)$, не будет равна нулю (рис. 3).

После детектирования и компенсации квадратичного набега фаз [5, 6] комплексные отраженные сигналы фона и движущегося объекта можно записать в виде:

$$s_{\Delta i}(t) = A_i G_{\Delta}(\beta_i) \exp \left\{ j2\pi \frac{2V_0}{\lambda} (\sin \theta_n) \beta_i t + j\varphi_i \right\},$$

$$s_{\Delta u}(t) = A_u G_{\Delta}(\beta_u) \exp \left\{ j2\pi \left[\frac{2V_0}{\lambda} (\sin \theta_n) \beta_u t - \frac{2V_r}{\lambda} t \right] + j\varphi_u \right\}.$$

Если для обработки сигнала применен доплеровский фильтр с нулевой частотой, то амплитуда полезного сигнала в разностном канале при идеальной АЧХ фильтра определится выражением

$$U_{u\Delta} = A_u G_{\Delta}(\beta_u) T_{ca} \operatorname{sinc} \left\{ 2\pi \left[\frac{2V_0}{\lambda} (\sin \theta_n) \beta_u - \frac{2V_r}{\lambda} \right] T_{ca} \right\}, \quad (3)$$

где T_{ca} – время синтезирования апертуры.

Из полученных выражений следует, что амплитуда сигнала пропорциональна радиальной скорости объекта. На рис. 4 под цифрой 1 приведена зависимость нормированного напряжения $U_H = U_{u\Delta} / U_{u\Delta \max}(\beta)$ при значении радиальной скорости цели $V_r = 10$ м/с для нормального бокового обзора в РСА с параметрами $\lambda = 3$ см (X диапазон), $V_0 = 7,5$ км/с, $H = 650$ км, $\theta_0 = 0,5^\circ$, а также график 2 начального участка модуля нормированной разностной ДНА $G_{\Delta}(\beta)$. Максимальное значение

$U_{u\Delta \max} = A_u G_{\Delta}(\beta_u) T_{ca}$ выражение (3) принимает при $\beta_u = V_r / (V_0 \sin \theta_n)$. Данное соотношение может служить отправной точкой для расчета параметров режима работы РСА и определения оптимального диапазона измеряемых скоростей.

Для неподвижных объектов ($V_r = 0$), находящихся на РСН ($\beta_u = 0$), значение $U_{u\Delta}$ равно нулю, что свидетельствует о подавлении сигнала фона. Вообще говоря, зависимость $G_{\Delta}(\beta)$ является нелинейной, рабочий участок которой для положительных значений представлен на рис. 5. Однако отклонение от линейного закона в зависимости от способа аппроксимации составляет не более 6...15 %, поэтому для предварительных инженерных расчетов нелинейность можно не учитывать.

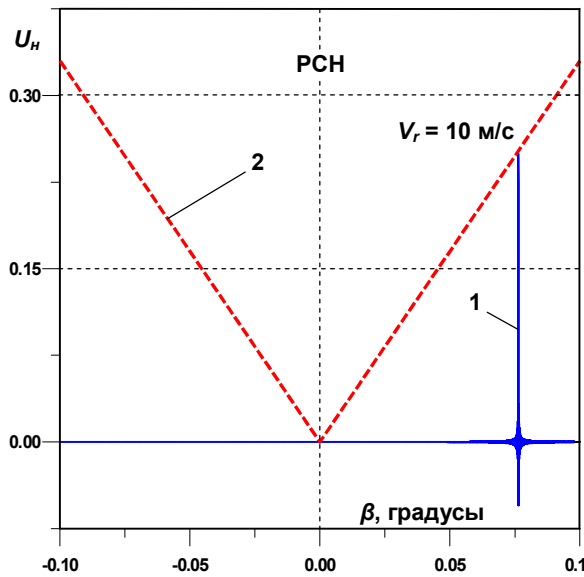


Рис. 4. Полезный сигнал на выходе разностного канала.

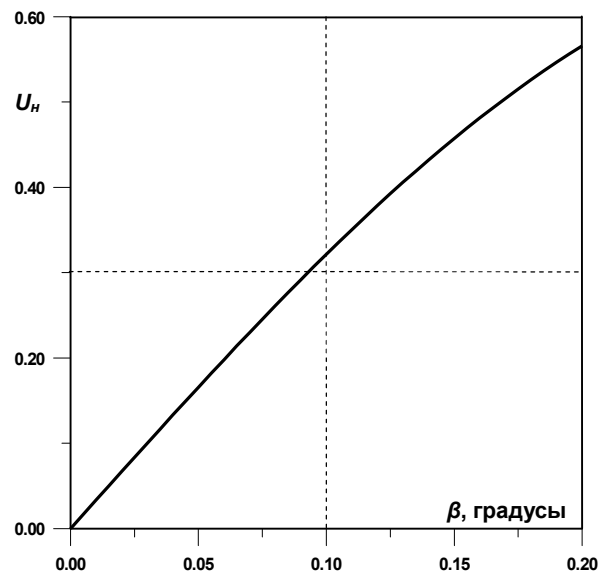


Рис. 5. Зависимость амплитуда полезного сигнала от угла наблюдения.

Если в (3) положить $\beta_u = \beta_i$, а $V_r = 0$, то получим выражение для амплитуды фонового сигнала, отраженного от i -й точки:

$$U_{i\Delta} = A_i G_{\Delta}(\beta_i) T_{ca} \operatorname{sinc} \left\{ 2\pi \left[\frac{2V_0}{\lambda} (\sin \theta_n) \beta_i \right] T_{ca} \right\}. \quad (4)$$

Отношение сигнал-фон в моноимпульсной системе СДЦ в предположении прямоугольности АЧХ доплеровского фильтра в разностном канале и линейности разностной ДНА в пределах угла $\varepsilon_0/2$ определяется соотношением [1]

$$q = \frac{\sigma_u}{\sigma_\phi} \left(\frac{V_r}{V_0 \sin \theta_n} \right)^2 \left(\frac{2\theta_0}{\delta_\beta} \right)^2, \quad (5)$$

где σ_u – ЭПР объекта;

$\sigma_0 = \sigma_\phi / \delta_\beta$ – удельная мощность фона на единицу угла в элементе разрешения по дальности;

$\delta_\beta = \lambda / (2T_{ca} V_0 \sin \theta_n)$ – угловая разрешающая способность РСА.

Качество обнаружения сигналов и оценивания параметров сигналов, как известно [7], определяется отношением сигнал-шум (помеха). Из соотношения (5) видно, что качество обработки сигнала от движущейся цели будет существенно (по квадратичному закону) зависеть от ее радиальной скорости.

На рис. 6 приведены результаты вычислений по (5) отношения сигнал-фон при выделении движущегося объекта с ЭПР $\sigma_u = 3 \text{ м}^2$ на фоне подстилающих поверхностей с различной удельной мощностью фона σ_0 при пространственном разрешении РСА $\delta_x = \delta_y = 1,8 \text{ м}$. Характеристики показывают, что при наличии фона имеется возможность наблюдать малоподвижные цели, движущиеся со скоростями 2,5...10 м/с. Это принципиально отличает метод СДЦ с моноимпульсным РСА от метода доплеровской фильтрации, при котором обнаружение мало скоростных целей вызывает большие проблемы.

Статистические характеристики селекции движущихся целей в РСА с моноимпульсной антенной проводилось при следующих параметрах КА и радиолокационного датчика: угол визирования в угломестной плоскости $\beta_0 = 38^\circ$, наклонная дальность до объекта $R_H = 852 \text{ км}$; режим съемки – нормальный боковой при $\theta_H = 90^\circ$; частота повторения импульсов – 5 кГц, угол отворота парциальных диаграмм от плоскости траверза – $\alpha_{sq} = \pm 0,25^\circ$; зондирующий сигнал – ЛЧМ с базой 100. Остальные параметры орбиты и датчика рассмотрены в предыдущих примерах.

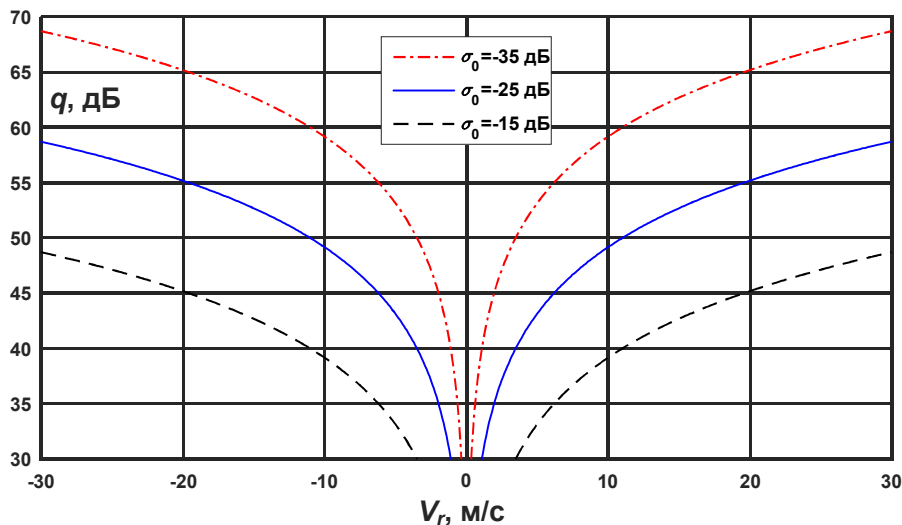


Рис. 6. Зависимости отношения сигнал-фон от скорости в моноимпульсной системе СДЦ.

С целью снижения времени моделирования разрешающая способность по пространственным координатам на местности выбрана $\delta_x = \delta_y = 100 \text{ м}$ при возможности некогерентного накопления 2..3-х отсчетов по наклонной дальности. Это достигается выбором параметров зондирующего сигнала ($\tau_{сж} \approx 0,25 \text{ мкс}$) и временем синтезирования $T_{ca} = 0,987 \text{ с}$. Пространственное разрешение в рассматриваемом примере является достаточно низким. При этом за время синтезирования движущаяся цель не выходит за рамки дискрета по дальности, т.к. при скорости 120 км/ч она проходит всего 33 м, что меньше первичной разрешающей способности. Таким

образом, в данном случае не возникает проблема устранения миграции сигнала по каналам дальности, а структура обработки упрощается.

На рис. 7 представлен отклик РСА на точечный неподвижный объект, расположенный в направлении, обозначенном пунктирной стрелкой. График показывает, что синтезированный сигнал неподвижного объекта подавляется (соответствует РСН). Вместе с тем следует отметить появление двух достаточно мощных откликов, расположенных симметрично относительно истинного положения. Этот простой пример показывает необходимость ограничения зоны анализа откликов подвижных целей, в противном случае в рабочей зоне радиолокатора будет наблюдаться поток ложных целей.

Представление о некоторых системных характеристиках РСА дают графики, представленные на рис. 8 и 9. На рис. 8 представлена зависимость безразмерного напряжения U_H от скорости движения объекта для доплеровского фильтра, настроенного на нулевую частоту. В отличие от метода доплеровской фильтрации, моноимпульсный метод СДЦ начинает работать при малых скоростях объектов, а при больших скоростях его эффективность несколько снижается из-за затухания сигнала в фильтре, поэтому для обеспечения высокого качества работы целесообразно использовать дополнительные фильтры. При диапазоне скоростей объектов до 120 км/ч понадобится 17 таких фильтров. Если решать не только задачу СДЦ, но и определить скорость и ее знак, то понадобится 35 фильтров.

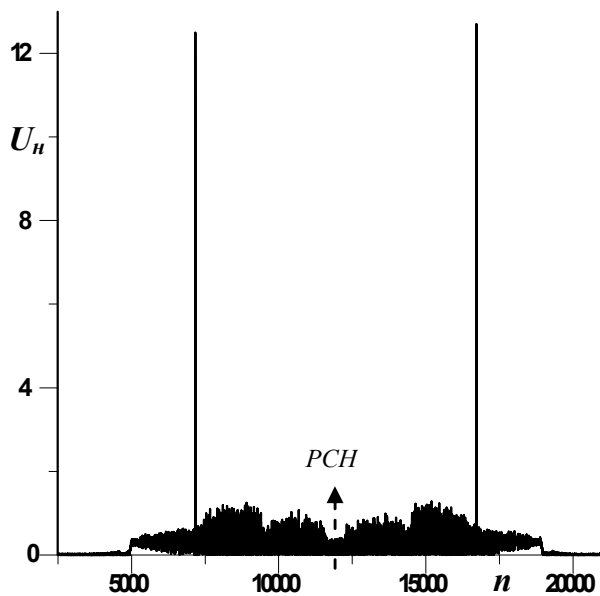


Рис. 7. Отклик РСА на неподвижный объект в процессе съемки.

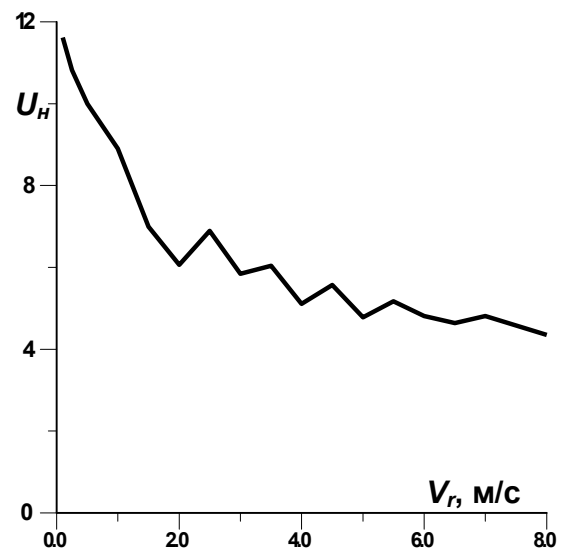


Рис. 8. Скоростная характеристика моноимпульсного РСА.

На рис. 9 приведена зависимость среднеквадратической ошибки оценивания (СКО) азимутальной координаты σ_{az} от отношения сигнал-шум q по мощности в децибелах. Погрешность оценивания азимутальной координаты, как следует из рис. 9, достаточно велика из-за наличия радиальной составляющей скорости. При этом на графике прослеживается некоторый пороговый эффект, свойственный большинству систем с фазовой обработкой сигналов. В условиях данного числового примера этот порог наступает при 23...24 дБ, что необходимо учитывать проектировании системы измерения координат подвижных объектов. Моделирование также показало, что ошибки оценивания азимутальной координаты растут прямо пропорционально скорости движения объекта. Некоторого снижения ошибок можно достичь за счет

применения гребенки доплеровских фильтров, т.к. величину смещения для каждого фильтра можно определить заранее, что снижает неопределенность в оценке. Для дальнейшего повышения точности измерения азимутальной координаты подвижной цели требуется дополнительный, третий канал [1, 4].

Для анализа и расчёта характеристик обнаружения сигналов были разработаны программы моделирования обнаружителя моноимпульсного РСА при различных параметрах сигналов. Программы расчёта значения порога базируются на прямом методе моделирования. С помощью данного программного обеспечения было проведено статистическое моделирование процесса обработки траекторного сигнала в соответствии с режимом и принятыми выше параметрами работы моноимпульсного РСА. В качестве базы для построения модели траекторного сигнала использовалась когерентная импульсная последовательность со случайной начальной фазой, из которой далее в соответствии с выбранным режимом РСА и моделью ДНА формировался траекторный сигнал. Обработка принимаемой смеси эхо-сигнала с шумом производилась по методу гармонического анализа с выходным фильтром на нулевой частоте, реализованным в виде накопителя в пределах интервала синтезирования (прямоугольное окно). Опорная функция формировалась на интервале, соответствующем ширине ДНА, и имела 4936 комплексных отсчетов. Скорость движения объекта во всех экспериментах составляла $V_r = 2,5$ м/с.

На рис. 10 представлены характеристики обнаружения траекторного сигнала для цифровой обработки и гармонического анализа пачки при вероятности ложной тревоги $F = 10^{-4}$ (D – вероятность правильного обнаружения). Характеристики обнаружения снимались для двух случаев: наличие неподвижного объекта (фона) с отношением фон-шум $q_{фш} = 20$ дБ и 30 дБ.

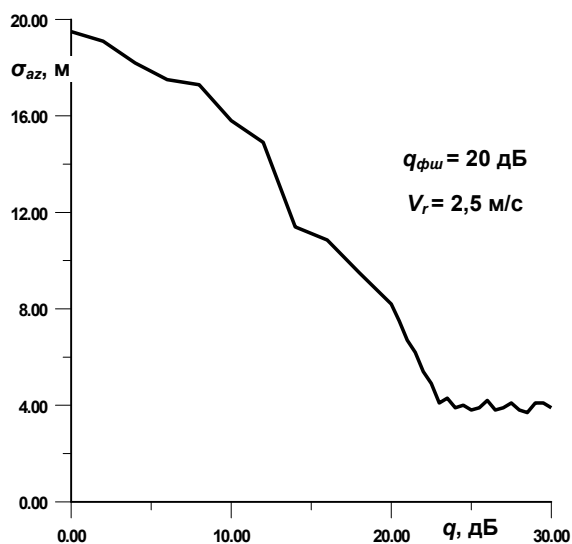


Рис. 9. Характеристики точности оценивания азимутальной координаты.

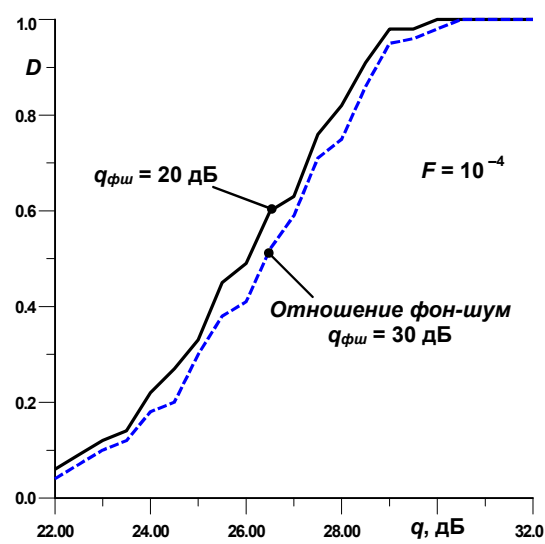


Рис. 10. Характеристики обнаружения сигнала подвижного объекта.

Рассмотрим полученные характеристики и сравним их с предельно достижимыми [7]. Анализ экспериментальных данных, полученных методом статистического эксперимента, показывает, что характеристики обнаружения на рис. 10 проигрывают предельным характеристикам обнаружения сигнала по отношению сигнал-шум порядка 15...16 дБ. Эти потери складываются из следующих компонент: отличие огибающей траекторного сигнала от прямоугольной – 3 дБ; потери на априорную неопределенность относительно фазы сигнала – около 2 дБ; потери в разностной ДНА –

3 дБ; потери в доплеровском фильтре – около 3 дБ; влияние пассивной помехи (фона) – 5...6 дБ. Если дополнительно использовать технологию стабилизации вероятности ложной тревоги, то необходимо прогнозировать увеличение потерь в пороговом отношении сигнал-шум на 0,5...1,5 дБ в зависимости от статистических свойств фона, вероятности ложной тревоги, структуры ПУЛТ-процессора, режима работы РСА.

Следует заметить, что увеличение мощности фона на порядок (на 10 дБ) приводит к ухудшению отношения сигнал-шум на 0,5...1 дБ, что говорит о хорошем подавлении неподвижных помех в моноимпульсном РСА. Однако характеристики подавления будут ухудшаться, если спектр сигналов от подстилающей поверхности будет размываться, например, как в случае воздействия ветра (волны на море, колебания веток и листьев кустарника или деревьев в лесу).

Для получения СКО оценивания радиальной скорости рассматривались сечения радиолокационного изображения в координатах «дальность-скорость». С учетом экспериментально полученной крутизны этой характеристики 25 м/м/с, определялась погрешность оценивания радиальной скорости объекта. При отношениях сигнал-шум порядка 23...24 дБ величина σ_{vr} составила 1..3 м/с, а при $q > 24$ дБ получено значение $\sigma_{vr} \approx 0,5...1$ м/с.

Результаты моделирования на ЦВМ показывают, что используемые в блоке обнаружения режимы работы удовлетворяют по качеству подавления фона в виде неподвижных объектов, однако требуют повышенной энерговооруженности радиолокатора для компенсации возникающих потерь в пороговой мощности, обусловленных применяемым методом моноимпульсной радиолокации. Одним из ключевых моментов обеспечения высококачественной работы моноимпульсных систем является также создание идентичных характеристик антенн и каналов передачи-приема. В каждом пространственном канале должна предусматриваться система автокалибровки для выравнивания коэффициентов усиления и фазовых характеристик каналов моноимпульсного РСА.

Таким образом, проведенное моделирование моноимпульсного метода СДЦ в РСА космического базирования показало, что реализация метода требует сужения ширины зоны съемки, поскольку на границах синтезируемого радиолокационного изображения могут возникать ложные цели. Полученные основные статистические характеристики качества работы алгоритмов обнаружения и оценивания говорят о необходимости повышения потенциала на 8...10 дБ. В отличие от метода доплеровской фильтрации моноимпульсный РСА может измерять скорость цели в более широком диапазоне, в том числе и при малых значениях скорости.

Литература

1. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
2. 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. – 676 с.
3. Soumekh M. Moving target detection in foliage using along track monopulse synthetic aperture radar imaging // IEEE Transactions on Image Processing, 1997. Vol. 6. No. 8. Pp.1148-1163.
4. Авиационные системы радиовидения / Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2015. – 648 с.

5. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений / Под ред. Л.А. Школьного. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. – 531 с.
6. Цифровая обработка сигналов в РСА / Под ред. Е.Ф. Толстова. – Смоленск: Изд-во ВА ВПВО ВС РФ, 2005 – 232 с.
7. Сосулин Ю.Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации: Учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1992. – 304 с.