

Пространственно-временные характеристики сигналов радиолокационных станций с синтезированной апертурой с учетом отражения от целей и местных предметов

Е.А. ПАФИКОВ,
 д-р техн. наук
 (филиал ВА МТО, Пенза),
А.В. ТИМОШЕНКО,
 д-р техн. наук
 (МГУ, Москва),
А.Ю. ТЫЧКОВ,
 д-р техн. наук
 (ПГУ, Пенза),
А.М. САВЧУК,
 д-р физ. мат. наук,
А.С. ЗАХАРОВ
 (МГУ, Москва)
 laperlov@yandex.ru

Рассмотрены пространственно-временные характеристики сигналов радиолокационных станций, отраженных от целей и местных предметов. Радиолокационные станции с синтезированной апертурой установлены на самолетах-носителях. Показано, что наличие априорных пространственно-временных различий характеристик сигналов, отраженных от движущейся наземной цели и подстилающей поверхности, может быть использовано при решении задачи синтеза оптимального устройства обработки сигнала движущейся наземной цели при непрерывном измерении ее координат или автоматическом сопровождении.

Цель, радиолокационная станция, сигнал, сопровождение, помеха, синтез

При использовании современных методов синтеза устройств оптимальной обработки электромагнитных полей требуется знание априорной информации о характеристиках обрабатываемых сигналов и сопровождающих их помех [1, 2]. Для получения выражений, описывающих электромагнитные поля, отраженные от наземной цели и поверхности земли, воспользуемся геометрическими соотношениями, характеризующими типовой режим работы радиолокатора с синтезированной апертурой (рис. 1).

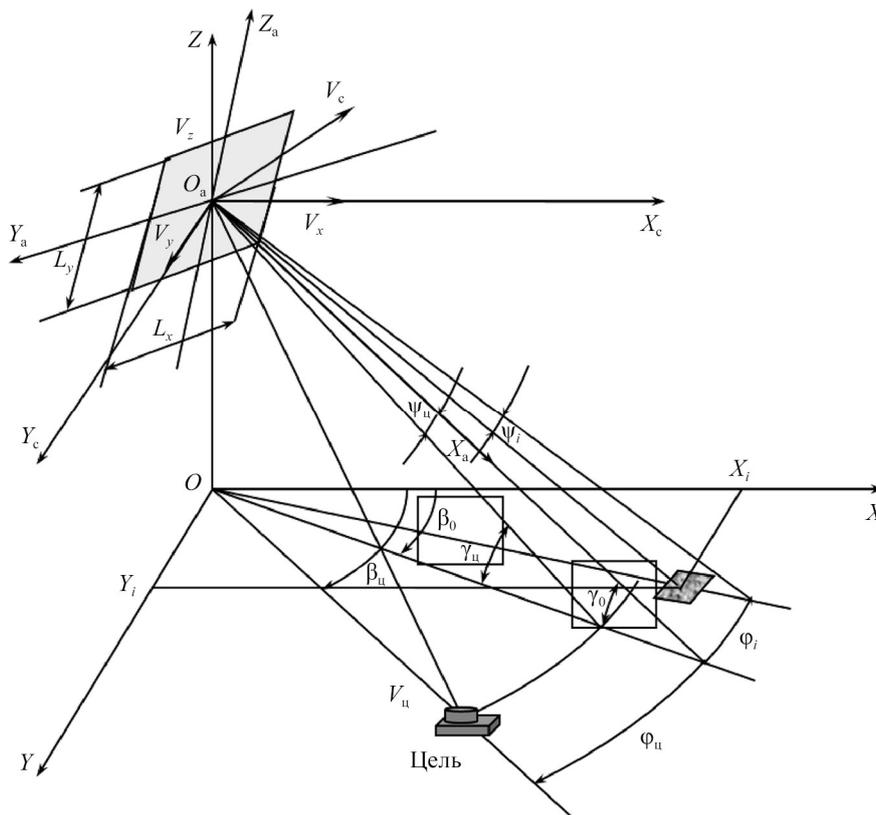


Рис. 1

Самолет-носитель радиолокационной станции (РЛС) выполняет полет с путевой скоростью V_c на высоте H . Наземная цель находится в точке T на дальности D_T и движется со скоростью V_T . Для описания положения наземной цели и фона местности относительно локатора введем сферическую систему координат, связанную с РЛС (рис. 2), – дальность D , азимут β , угол места γ .

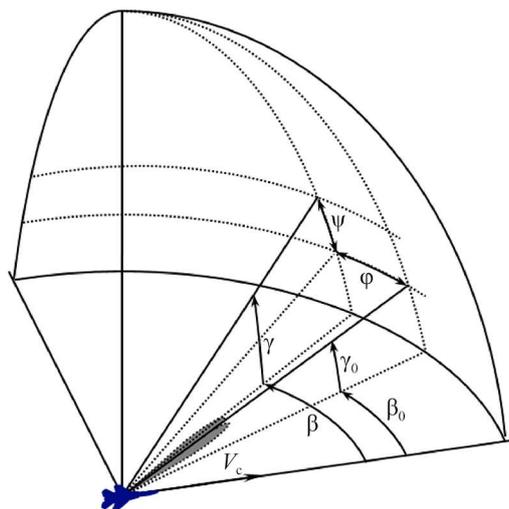


Рис. 2

Направление движения самолета в ней характеризуется углами $\beta = \gamma = 0$, положение оси диаграммы излучения – углами β_0, γ_0 . Ориентируем лучевую систему координат (O_a, φ, ψ) , привязанную к оси диаграммы направленности антенны так, чтобы плоскость $\psi(\varphi = 0)$ совпадала с угломестной плоскостью, при этом $\varphi = (\beta - \beta_0) \cos \gamma$, $\psi = \gamma - \gamma_0$. Угловое положение цели лучевой системы координат характеризуется углами φ_T, ψ_T , а положение i -го элемента отражающего участка подстилающей поверхности, характеризующегося угловым размером $d\varphi \times d\psi$ и находящегося в стробе дальности D_T , – углами φ_i, ψ_i .

Антенная система РЛС имеет двумерную апертуру с размерами в горизонтальной L_y и вертикальной L_z плоскостях. Фазовый центр антенны совмещен с центром масс самолета (точка O_a).

Для решения задачи синтеза оптимальной системы обработки отраженного от наземной цели сигнала в качестве модели зондирующего радиолокационного сигнала используем когерентный импульсный сигнал в виде периодической последовательности радиоимпульсов колокольной формы [3, 4]:

$$\dot{S}_n(t) = \sum_n^N A \exp \left\{ -\frac{\pi}{2\tau_n^2} (t - nT_n)^2 \right\} \exp \{ j2\pi f_0 t \}, \quad (1)$$

где A – амплитуда; f_0 – несущая частота; τ_n – длительность импульса на уровне 0,7 от его амплитуды; T_n – период повторения импульсов; N – количество импульсов в пачке, $N = \frac{T_c}{T_n}$; T_c – длительность сигнала.

Можно было бы ввести в излучаемый сигнал внутриимпульсную модуляцию, например фазово-кодированный сигнал. Однако для целей оптимального синтеза измерителей координат наземной цели форма зондирующего сигнала принципиального значения не имеет, так как процедура свертки фазово-кодированного сигнала является линейной операцией.

Задачи обнаружения, измерения координат и сопровождения движущихся целей в радиолокаторе с синтезированной апертурой решаются в случае, когда $H \ll D_T$. Учитывая возможные реальные размеры антенны, размещенной на самолете, и рабочий диапазон длин волн, полагаем, что отражатели находятся в дальней зоне приемной антенны, т. е. фазовый фронт волны в пределах апертуры антенны можно считать плоским. Кроме того, считаем, что дальность до i -го отражателя и цели много больше размеров антенной системы и синтезированной апертуры, а изменения амплитуды отраженного сигнала во времени и на апертуре реальной антенны пренебрежимо малы. Для получения потенциальных характеристик системы автосопровождения будем считать также, что фазовые изменения сигнала, обусловленные различного рода нестабильностями, скомпенсированы.

Электромагнитное поле, отраженное от i -го элемента земной поверхности (см. рис. 1) в точке раскрытия антенны с координатами z_a, y_a в момент времени t в канале дальности D_T , определяется выражением

$$\dot{S}_i(t, y_a, z_a) = \sum_n \dot{A}(\varphi_i, \psi_i) e^{-\frac{\pi}{2\tau_n^2} \left(t - nT_n - \frac{2D_i}{c} \right)^2} e^{j2\pi \left(ft + \frac{2V(\varphi_i, \psi_i)}{\lambda} t + \frac{\varphi_i}{\lambda} y_a + \frac{\psi_i}{\lambda} z_a \right)}, \quad (2)$$

где $\dot{A}(\varphi_i, \psi_i)$ – комплексная случайная амплитуда, характеризующая изменение сигнала i -го отражателя по пространственным координатам; дисперсия модуля $\dot{A}(\varphi_i, \psi_i)$ определяется выражением

$$\sigma_i^2 = \frac{P\sigma_i G(\varphi_i, \psi_i)}{(4\pi)^2 D_i^4}; \quad D_i = \frac{H}{\sin(\gamma_0 + \psi_i)},$$

где P – импульсная мощность излучения РЛС; $G(\varphi_i, \psi_i)$ – функция, описывающая передающую диаграмму направленности антенны; $\sigma_i = \sigma_0(\varphi_i, \psi_i) dS$ – эффективная поверхность рассеяния i -го элемента отражающей поверхности; площадь отражающего элемента поверхности определяется через якобиан преобразования J , связывающий координаты i -го элемента поверхности в системе $OXYZ$ с координатами в системе (O_a, φ, ψ) (см. рис. 1, 2):

$$X_i = \frac{H \cos(\gamma_0 + \psi_i)}{\sin(\gamma_0 + \psi_i)} \cos \left(\beta_0 + \frac{\varphi_i}{\cos(\gamma_0 + \psi_i)} \right);$$

$$Y_i = \frac{H \cos(\gamma_0 + \psi_i)}{\sin(\gamma_0 + \psi_i)} \sin \left(\beta_0 + \frac{\varphi_i}{\cos(\gamma_0 + \psi_i)} \right);$$

$$dS = |J| d\varphi d\psi = \frac{H^2}{\sin^3(\gamma_0 + \psi)} d\varphi d\psi.$$

Скорость сближения самолета с i -й точкой поверхности земли можно представить в следующем виде:

$$V(\varphi_i, \psi_i) = V_x \cos \gamma_i \cos \beta_i + V_y \sin \beta_i \cos \gamma_i - V_z \sin \gamma_i \approx V_x \cos \gamma_0 \cos \beta_0 +$$

$$+ V_y \sin \beta_0 \cos \gamma_0 - V_z \sin \gamma_0 - (V_x \cos \gamma_0 - V_y \cos \beta_0) \varphi_i -$$

$$- (V_x \sin \gamma_0 \cos \beta_0 + V_y \sin \gamma_0 \cos \beta_0 + V_z \cos \gamma_0) \psi_i = V_0 - V_{\text{та}} \varphi_i - V_{\text{тв}} \psi_i,$$

где V_x, V_y, V_z – составляющие скорости движения носителя по соответствующим координатам самолетной системы координат; $V_0, V_{\text{та}}, V_{\text{тв}}$ – составляющие скорости движения носителя в лучевой системе координат (радиальная скорость, горизонтальная и вертикальная тангенциальные скорости сближения).

Модель подстилающей поверхности выберем в виде совокупности большого числа независимо и случайно расположенных отражателей. При этом в соответствии с центральной предельной теоремой [5–7] допустимо считать закон распределения сигнала, отраженного от участка поверхности, ограниченного величиной элемента разрешения, гауссовским.

В соответствии с этим результирующее электромагнитное поле описывается выражением

$$\dot{S}_n(t, y_a, z_a) = \sum_n \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{A}(\varphi, \psi) \exp \left\{ -\frac{\pi}{2\tau_n^2} \left(t - nT_n - \frac{2D_i}{c} \right)^2 \right\} \times$$

$$\times \exp \left\{ j2\pi \left(ft + \frac{2}{\lambda} V(\varphi, \psi) t + \frac{\varphi}{\lambda} y_a + \frac{\psi}{\lambda} z_a \right) \right\} d\varphi d\psi. \quad (3)$$

Определим пространственно-временную корреляционную функцию помехового электромагнитного поля в следующем виде:

$$\dot{K}(t_1, t_1, y_1, y_2, z_1, z_2) \leq \langle \dot{S}(t_1, y_1, z_1) \dot{S}^*(t_2, y_2, z_2) \rangle. \quad (4)$$

Подставляя в неравенство (4) выражение (3), получим:

$$\begin{aligned} \dot{K}(t_1, t_1, y_1, y_2, z_1, z_2) = & \sum_n^N \sum_m^N \iiint_{-\infty}^{\infty} \iiint_{-\infty}^{\infty} \langle \dot{A}(\varphi_1, \psi_1) \dot{A}^*(\varphi_2, \psi_2) \rangle \exp \left\{ -\frac{\pi}{2\tau_n^2} \left(t_1 - nT_n - \frac{2D_{i1}}{c} \right)^2 \right\} \times \\ & \times \exp \left\{ -\frac{\pi}{2\tau_n^2} \left(t_2 - mT_n - \frac{2D_{i2}}{c} \right)^2 \right\} \exp \left\{ j2\pi \left(f + \frac{2\pi}{\lambda} V(\varphi_1, \psi_1) \right) t_1 + j \frac{2\pi}{\lambda} y_{a1} \varphi_1 + \right. \\ & \left. + j \frac{2\pi}{\lambda} z_{a1} \psi_1 - j2\pi \left(f + \frac{2\pi}{\lambda} V(\varphi_2, \psi_2) \right) t_2 - j \frac{2\pi}{\lambda} y_{a2} \varphi_2 - j \frac{2\pi}{\lambda} z_{a2} \psi_2 \right\} d\varphi_1 d\psi_1 d\varphi_2 d\psi_2, \end{aligned}$$

где $\langle \dot{A}(\varphi_1, \psi_1) \dot{A}^*(\varphi_2, \psi_2) \rangle$ – корреляционная функция подстилающей поверхности.

Так как подстилающая поверхность представлена совокупностью большого количества независимых по пространству отражателей, определим ее как пространственный белый шум со спектральной плотностью $\sigma_{a0}^2 = \frac{\sigma_a^2}{dS}$:

$$\langle \dot{A}(\varphi_1, \psi_1) \dot{A}^*(\varphi_2, \psi_2) \rangle = \sigma_{a0}^2 \delta(\varphi_2 - \varphi_1) \delta(\psi_2 - \psi_1), \quad (5)$$

$$\text{где } \sigma_{a0}^2 = \frac{P\sigma_0(\varphi_i, \psi_i)G(\varphi_i, \psi_i)}{(4\pi)^2 H^2} \sin(\gamma_0 + \psi_i).$$

Предположим, что в пределах элемента разрешения удельная эффективная поверхность рассеяния отражающей поверхности постоянна ($\sigma_0(\varphi_i, \psi_i) = \sigma_0$) и изменения фазы в пределах строба дальности, обусловленные тангенциальной вертикальной составляющей скорости сближения носителя с центром зоны обзора РЛС $\left(\frac{4\pi V_{ty} \Psi}{\lambda} \right)$, малы. Тогда, подставив формулу (5) в неравенство (4) и сделав соответствующие преобразования, для передающей диаграммы направленности антенны гауссовского вида и при скважности излучения $Q \geq 100$ получим корреляционную функцию электромагнитного поля, отраженного от подстилающей поверхности, в виде

$$\begin{aligned} \dot{K}(\tau, \rho_y, \rho_z) = & \frac{1}{N} \sum_n^N \sum_m^N \frac{P\sigma_0 \Delta\varphi \Delta\psi}{Q(4\pi H)^2 a} \exp \left\{ -\frac{\pi \Delta\varphi^2}{\lambda^2} (2V_{ta} \tau + \rho_y)^2 \right\} \times \\ & \times \exp \left\{ -\frac{\pi \psi_i^2}{\Delta\psi^2} + j \frac{2\pi}{\lambda} (2V_{ty} \tau + \rho_z) \psi_i \right\} \exp \left\{ -\frac{\pi}{2\tau_n^2} (\tau + T_n(n-m))^2 - j \frac{4\pi V_0 \tau}{\lambda} \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\tau = t_2 - t_1$; $\rho_y = y_2 - y_1$; $\rho_z = z_2 - z_1$; $\Delta\varphi, \Delta\psi$ – ширина передающей диаграммы направленности антенны по координатам φ, ψ ; $\psi_i = \arcsin\left(\frac{H}{D_i}\right) - \gamma_0$ – угловое положение строба i -го канала дальности относительно оси антенны в плоскости ψ ; $a = \frac{2H \cos \gamma_0 \Delta\psi}{c\tau_n \sin^2 \gamma_0}$ – величина, характеризующая количество стробов дальности, укладываемых в области облучения земной поверхности передающей диаграммы направленности антенны; V_{ta} – составляющая скорости движения носителя в лучевой системе координат (горизонтальная тангенциальная скорость сближения).

Таким образом, корреляционная функция помехового поля, отраженного от земной поверхности, стационарна по времени и пространству. При высокой разрешающей способности по дальности модуль корреляционной функции не зависит от угломестной координаты ρ_z . Для анализа статистических свойств отраженного поля более наглядным представляется исследование пространственно-временной спектральной плотности отраженного поля, которая определяется как трехмерное преобразование Фурье $\dot{K}(\tau, \rho_z, \rho_y)$ по координатам ρ_z, ρ_y, τ :

$$\begin{aligned} \dot{S}_{\Pi}(f, f_{\varphi}, f_{\psi}) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int \int \dot{K}(\tau, \rho_y, \rho_z) \exp(-j2\pi f \tau - j2\pi f_{\varphi} \rho_y - j2\pi f_{\psi} \rho_z) d\tau d\rho_y d\rho_z; \\ \dot{S}_{\Pi}(f, f_{\varphi}, f_{\psi}) &= S_{0\Pi} \sum_m \delta\left(2\pi\left(f - \frac{2V_0}{\lambda} - 2V_{ta}f_{\varphi} - \frac{2V_{ty}\Psi_i}{\lambda} - mF_{\Pi}\right)\right) \times \\ &\times \delta\left(2\pi\left(f_{\psi} - \frac{\Psi_i}{\lambda}\right)\right) \exp\left\{-2\pi\tau_{\Pi}^2\left(f - \frac{2V_0}{\lambda} - 2V_{ta}f_{\varphi} - \frac{2V_{ty}\Psi_i}{\lambda}\right)^2\right\}. \end{aligned} \quad (7)$$

Для сигналов конечной длительности NT выражение (7) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} \dot{S}_{\Pi}(f, f_{\varphi}, f_{\psi}) &= S_{0\Pi} \exp\{-\pi L_y^2 f_{\varphi}^2\} \exp\left\{-\frac{2\pi\Psi_i^2}{\Delta\Psi^2}\right\} \frac{\sin^2\left\{\pi NT_{\Pi}\left(f - \frac{2V_0}{\lambda} - 2V_{ta}f_{\varphi} - \frac{2V_{ty}\Psi_i}{\lambda}\right)\right\}}{\sin^2\left\{\pi T_{\Pi}\left(f - \frac{2V_0}{\lambda} - 2V_{ta}f_{\varphi} - \frac{2V_{ty}\Psi_i}{\lambda}\right)\right\}} \times \\ &\times \exp\left\{-2\pi\tau_{\Pi}^2\left(f - \frac{2V_0}{\lambda} - 2V_{ta}f_{\varphi} - \frac{2V_{ty}\Psi_i}{\lambda}\right)^2\right\} \delta\left(2\pi\left(f_{\psi} - \frac{\Psi_i}{\lambda}\right)\right), \end{aligned} \quad (8)$$

где $S_{0\Pi} = \frac{P\sigma_0\Delta\varphi\Delta\Psi L_y\tau_{\Pi}}{NQ(4\pi H)^2 a}$; $f_{\varphi} = \frac{\varphi}{\lambda}$; $f_{\psi} = \frac{\Psi}{\lambda}$ – пространственные частоты по угломестной и азимутальной координатам.

Рассмотрение спектральной плотности мощности отражений $\dot{S}_{\Pi}(f, f_{\varphi}, f_{\psi})$ в координатах f, f_{φ} определяет ее как периодическую функцию по координате f . Характерный вид ее показан на рис. 3.

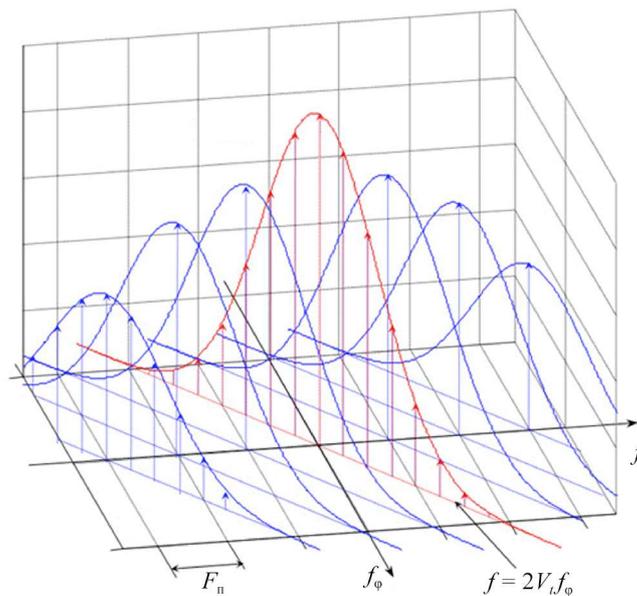


Рис. 3

На рис. 4, *a* представлен вид спектральной плотности помеховых отражений (8) в изометрии при наблюдении пачки длительностью NT_{Π} , а также ее сечения линиями уровней (рис. 4, *б*).

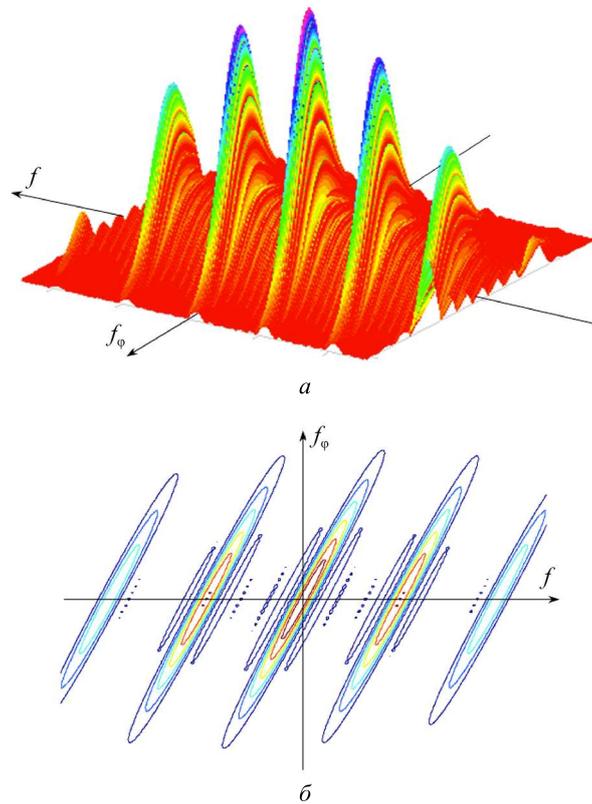


Рис. 4

Спектр мощности представляет собой периодическую последовательность «гребней» с периодом F_{Π} , вытянутых вдоль линий, связывающих доплеровскую частоту отраженного сигнала и угловое положение неподвижного точечного объекта:

$$f = 2V_{\text{та}} + f_{\varphi} + nF_{\Pi}; \quad n = 1, 2, \dots$$

Форма «гребня» определяется передающей диаграммой направленности антенны в азимутальной плоскости, поскольку напряженность электромагнитного поля, отраженного от земли, является суммой плоских монохроматических волн, отраженных от точечных отражателей и находящихся в зоне облучения передающей антенны, а доплеровская частота колебаний поля и направление нормали к плоскости фронта волны жестко связаны между собой.

Толщина «гребней» определяется количеством излученных, а следовательно, принимаемых импульсов (временем синтезирования), их наклон относительно оси f – тангенциальной составляющей скорости движения носителя $V_{\text{та}}$. Периодичность $S(\cdot)$ обусловлена импульсным характером зондирующего сигнала. Как правило, обработка сигналов в РЛС производится в спектральной области, соответствующей основной гармонике излучения (несущей), поэтому достаточно рассматривать только центральную область пространственно-временного спектра мощности сигналов.

В связи с этим для простоты дальнейших преобразований перейдем к непрерывному аналогу сигнала, проходящего в канал дальности. При этом пространственно-временная корреляционная функция и спектральная плотность потока мощности сигнала, отраженного от подстилающей поверхности, имеют вид (см. рис. 2):

$$\dot{K}(\tau, \rho_y, \rho_z) = K_0 \exp \left\{ -\frac{\pi \Delta \varphi^2}{\lambda^2} (2V_{\text{та}} \tau + \rho_y)^2 \right\} \exp \left\{ -\frac{\pi \psi_i^2}{\Delta \psi^2} + j \frac{2\pi}{\lambda} [(2V_{\text{ты}} \tau + \rho_z) \psi_i - 2V_0 \tau] \right\}, \quad (9)$$

где $K_0 = \frac{P_{\text{ср}} \sigma_0 \Delta \varphi \Delta_{\text{стр}}}{(4\pi H)^2}$; $\Delta_{\text{стр}} = \frac{c \tau_{\text{н}} \sin^2 \gamma_0}{2H \cos \gamma}$ – угловой размер строга дальности по угломерной координате;

$P_{\text{ср}}$ – средняя мощность излучения РЛС.

Применив обратное преобразование Фурье, получим спектральную мощность отражений:

$$\begin{aligned} \dot{S}_{\text{н}}(f, f_{\varphi}, f_{\psi}) &= S_{0\text{н}} \exp\{-\pi L_y^2 f_{\varphi}^2\} \exp\left\{-\frac{\pi \psi_i^2}{\Delta \psi^2}\right\} \times \\ &\times \delta\left(2\pi\left(f - \frac{2V_0}{\lambda} - 2V_{\text{та}} f_{\varphi} - \frac{2V_{\text{ты}} \psi_i}{\lambda}\right)\right) \delta\left(2\pi\left(f_{\psi} - \frac{\psi_i}{\lambda}\right)\right). \end{aligned} \quad (10)$$

При использовании модели земной поверхности, учитывающей независимые колебания ее элементов, расширяются «гребни» пространственно-временного спектра мощности и уменьшаются его амплитуды в случае, когда корреляционная функция подстилающей поверхности представляет собой узкополосный процесс с шириной спектра, пропорциональной среднеквадратичному отклонению флуктуации скорости отражателей σ_v [8, 9]:

$$\langle \dot{A}(\varphi_1, \varphi_2) \dot{A}^*(\varphi_1, \varphi_2) \rangle = \sigma_{\text{а0}}^2 \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{4\pi\sigma_v}{\lambda}\right)^2 \tau^2\right\} \delta(\varphi_2 - \varphi_1) \delta(\psi_2 - \psi_1). \quad (11)$$

Спектральная плотность потока мощности отражений от подстилающей поверхности при наличии ветра имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{S}_{\text{н}}(f, f_{\varphi}, f_{\psi}) &= \frac{P \sigma_0 \Delta \varphi \Delta_{\text{стр}} L_y \lambda}{(4\pi H)^2 \sigma_v \sqrt{2\pi}} \exp\{-\pi L_y^2 f_{\varphi}^2\} \exp\left\{-\frac{2\pi \psi_i^2}{\Delta \psi^2}\right\} \times \\ &\times \exp\left\{-\frac{\lambda^2 \left(f - \frac{2V_0}{\lambda} - 2V_{\text{та}} f_{\varphi} - \frac{2V_{\text{ты}} \psi_i}{\lambda}\right)^2}{8\sigma_v^2}\right\} \delta\left(2\pi\left(f_{\psi} - \frac{\psi_i}{\lambda}\right)\right). \end{aligned} \quad (12)$$

Для конечного времени существования отраженного сигнала выражение (12) имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{S}_{\text{н}}(f, f_{\varphi}, f_{\psi}) &= \frac{P \sigma_0 \Delta \varphi \Delta_{\text{стр}} L_y T}{(2\pi H)^2 \sqrt{2 + \frac{32\pi\sigma_v^2 T^2}{\lambda^2}}} \exp(-\pi L_y^2 f_{\varphi}^2) \exp\left(-\frac{2\pi \psi_i^2}{\Delta \psi^2}\right) \times \\ &\times \exp\left\{-\frac{2\pi T^2 \left(f - \frac{2V_0}{\lambda} - 2V_{\text{та}} f_{\varphi} - \frac{2V_{\text{ты}} \psi_i}{\lambda}\right)^2}{1 + \frac{16\pi\sigma_v^2 T^2}{\lambda^2}}\right\} \delta\left(f_{\psi} - \frac{\psi_i}{\lambda}\right). \end{aligned} \quad (13)$$

При анализе формулы (13) установлено, что при $T = 0,1$ с и $\lambda = 0,03$ м ширина спектра мощности отражений по оси f увеличивается в два раза при $\sigma_v = 8 \div 12$ см/с, что соответствует холмистой местности, покрытой растительностью при силе ветра 40–50 м/с [10].

Для небольших значений σ_v расширение $\dot{S}_{\text{н}}(f, f_{\varphi}, f_{\psi})$ по координате f незначительно, что позволяет ограничиться моделью (8) – (10).

Электромагнитное поле, отраженное от наземной цели, определяется тем же выражением (12), с помощью которого определяется сигнал, отраженный от элемента земной поверхности. Однако имеется дополнительное приращение доплеровской частоты, обусловленное радиальной составляющей скорости ее движения:

$$\begin{aligned} \dot{S}_{\Pi}(t, y_a, z_a) = \sum_n \dot{A}_{\Pi} \exp \left\{ -\frac{\pi}{2\tau_{\Pi}^2} \left(t - nT_{\Pi} - \frac{2D_{\Pi}}{c} \right)^2 \right\} \times \\ \times \exp \left\{ j2\pi f t + j \frac{4\pi}{\lambda} V(\varphi_{\Pi}, \psi_{\Pi}) t + j \frac{4\pi}{\lambda} V_{\Pi} t + j \frac{2\pi}{\lambda} y_a \varphi_{\Pi} + j \frac{2\pi}{\lambda} z_a \psi_{\Pi} \right\}, \end{aligned} \quad (14)$$

где V_{Π} – радиальная скорость цели; $\varphi_{\Pi}, \psi_{\Pi}$ – угловые координаты цели в антенной системе координат; \dot{A}_{Π} – комплексная случайная амплитуда сигнала цели с дисперсией

$$\sigma_{\text{ац}}^2 = \frac{PG(\varphi_{\Pi}, \psi_{\Pi})\sigma_{\Pi}}{(4\pi)^2 H^4} \sin^4(\gamma_0 + \varphi_{\Pi}),$$

где σ_{Π} – эффективная поверхность рассеяния цели.

Пространственно-временная спектральная плотность потока мощности сигнала, отраженного движущейся целью, имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{S}_{\Pi}(f, f_{\varphi}, f_{\psi}) = S_{0\Pi} \delta \left(2\pi \left(f - \frac{2V_0}{\lambda} - \frac{2V_{\text{та}}\varphi_{\Pi}}{\lambda} - \frac{2V_{\text{ты}}\psi_{\Pi}}{\lambda} - \frac{2V_{\Pi}}{\lambda} \right) \right) \times \\ \times \delta \left(2\pi \left(f_{\varphi} - \frac{\varphi_{\Pi}}{\lambda} \right) \right) \delta \left(2\pi \left(f_{\psi} - \frac{\psi_{\Pi}}{\lambda} \right) \right). \end{aligned} \quad (15)$$

С учетом того что отраженный сигнал конечен по времени и пространству, выражение (15) принимает вид

$$\begin{aligned} \dot{S}_{\Pi}(f, f_{\varphi}, f_{\psi}) = S_{0\Pi} \exp \left(-\pi \frac{(\varphi_{\Pi} - f_{\varphi}\lambda)^2}{\Delta\varphi_{\Pi}^2} \right) \exp \left(-\pi \frac{(\psi_{\Pi} - f_{\psi}\lambda)^2}{\Delta\psi_{\Pi}^2} \right) \times \\ \times \frac{\sin^2 \left\{ \pi N T_{\Pi} \left(f - \frac{2V_0}{\lambda} - \frac{2V_{\text{та}}\varphi_{\Pi}}{\lambda} - \frac{2V_{\text{ты}}\psi_{\Pi}}{\lambda} - \frac{2V_{\Pi}}{\lambda} \right) \right\}}{\sin^2 \left\{ \pi T_{\Pi} \left(f - \frac{2V_0}{\lambda} - \frac{2V_{\text{та}}\varphi_{\Pi}}{\lambda} - \frac{2V_{\text{ты}}\psi_{\Pi}}{\lambda} - \frac{2V_{\Pi}}{\lambda} \right) \right\}} \times \\ \times \exp \left\{ -2\pi\tau_{\Pi}^2 \left(f - \frac{2V_0}{\lambda} - \frac{2V_{\text{та}}\varphi_{\Pi}}{\lambda} - \frac{2V_{\text{ты}}\psi_{\Pi}}{\lambda} - \frac{2V_{\Pi}}{\lambda} \right)^2 \right\}, \end{aligned} \quad (16)$$

где $S_{0\Pi} = \frac{PG(\varphi_{\Pi}, \psi_{\Pi})\sigma_{\Pi} \sin^4(\gamma_0 + \psi_{\Pi})\lambda^2\tau_{\Pi}}{Q(4\pi)^2 H^4 \Delta\psi_{\Pi} \Delta\varphi_{\Pi}}$; $\Delta\varphi_{\Pi}, \Delta\psi_{\Pi}$ – угловые размеры цели по соответствующим координатам.

Приведем пространственно-временной спектр мощности аддитивной смеси отраженных сигналов от подстилающей поверхности и наземной цели в области центральной частоты спектра мощности отражений в координатах f_{φ}, f в изометрии (рис. 5, 6, а) и в виде рельефа линиями уровней сечений (рис. 5, 6, б).

Проанализировав выражения (7), (8), (15), (16), можно сделать вывод о том, что концентрация мощности отражений в определенных областях плоскости (f_{φ}, f) определяет возможность выделения сигналов подвижных целей на фоне коррелированной помехи и измерения их координат [11, 12].

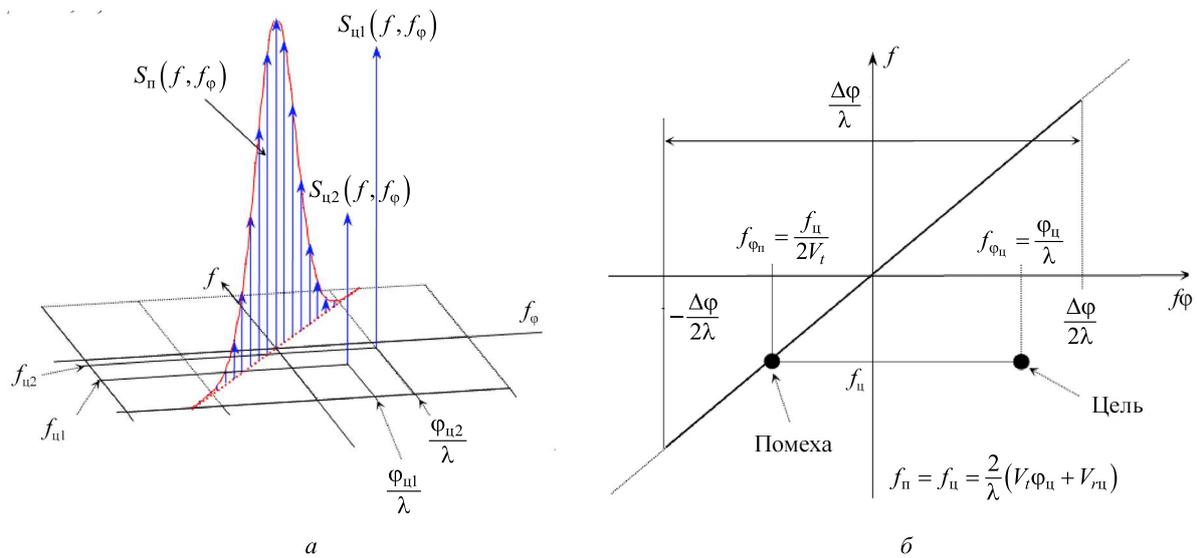


Рис. 5

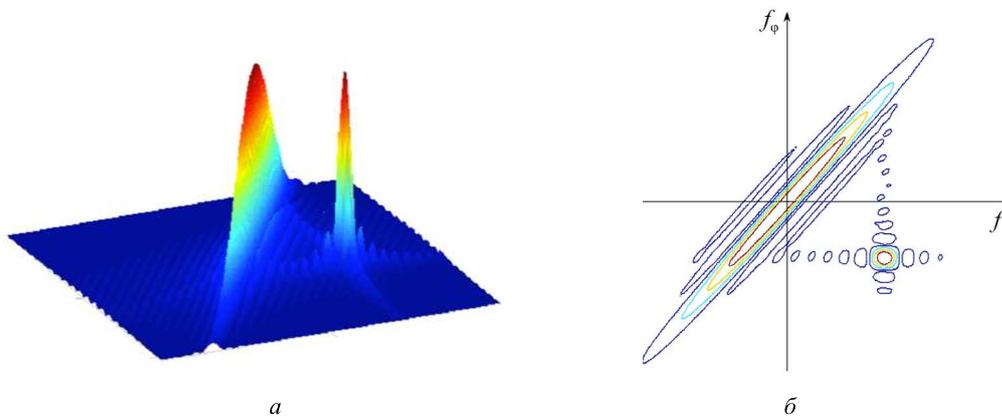


Рис. 6

С другой стороны, идентичность функциональных зависимостей (7), (15) по координате f_ψ свидетельствует о совпадении статистических характеристик отраженных сигналов от подстилающей поверхности и движущейся наземной цели, что позволяет селективировать сигнал цели по координате f_ψ лишь на основе амплитудного контраста.

Следовательно, обработка по угломестной координате сигналов, отраженных наземной целью, будет соответствовать согласованному приему.

Таким образом, наличие априорных пространственно-временных различий характеристик сигналов, отраженных от движущейся наземной цели и подстилающей поверхности, может быть использовано при решении задачи синтеза оптимального устройства обработки сигнала движущейся наземной цели при непрерывном измерении ее координат или автоматическом сопровождении.

Работа выполнена при поддержке Программы развития МГУ, проект № 24-Ш01-04.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бушмин В.В. и др. Контроль процессов жизненного цикла высокотехнологичных образцов вооружения и военной техники в ведущих зарубежных военно-промышленных компаниях: Методологические, методические и организационные аспекты // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму. 2023. № 11-12. С. 101–108.
2. Боев С.В. и др. Отождествление воздушных объектов при обнаружении и сопровождении всеатмосферным радиолокатором // Изв. вузов. Авиационная техника. 2022. № 1. С. 50–59.

3. Шевцов В.А., Тимошенко А.В., Разиньков С.Н. Оценка состояния безопасности полета воздушного судна на основе анализа рисков авиационных инцидентов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2024. № 1. С. 39–44.
4. Computer Simulation of Aerial Radar Sattering, Recognition, Detection and Tracking / Ed. Ya.D. Shirman. Boston – London: Artech House, 2002. 307 p.
5. Skolnik M., Linde G., Meads K. Senrad: An Advanced Wideband Air Surveillance Radar // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2001. Vol. 37. Iss. 4. P. 1163–1175.
6. Курбатский С.А., Новиков А.В., Хомяков Д.А. Алгоритм вычисления вектора весовых коэффициентов в адаптивной антенной решетке // Изв. ТулГУ. 2012. № 11-1. С. 261–268.
7. Tuncer T.E., Friedlander B. Classical and Modern Direction-of-Arrival Estimation. USA: Academic Press, 2009. 456 p.
8. Амнинов Э.В., Хомяков Д.А., Акишин П.Н. Алгоритм обработки сигналов в антенной решетке // Журнал радиоэлектроники [Электронный журнал]. 2013. № 4. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/apr13/11/text.pdf> (дата обращения: 13.10.2024).
9. Румянцев В.Л., Барановский Н.М. Оценка эффективности пространственно-поляризационной селекции // Изв. ТулГУ. Сер. Технические науки. 2014. № 9-1. С. 93–101.
10. Зубков Б.В., Прозоров С.Е. Безопасность полетов. Ульяновск: УВАУ ГА(И), 2012. 451 с.
11. Солдаткин В.М. и др. Модели и анализ погрешностей системы воздушных сигналов с неподвижным невыступающим приемником потока // Изв. вузов. Авиационная техника. 2024. № 2. С. 165–171.
12. Соколов С.В., Погорелов В.А., Шаталов А.Б. Общее решение задачи нелинейной фильтрации параметров ориентации антенного комплекса по инерциальным измерениям // Изв. вузов. Авиационная техника. 2021. № 1. С. 124–132.

Поступила в редакцию 13.11.24

После доработки 22.11.24

Принята к публикации 27.11.24

Spatial and Temporal Characteristics of Synthetic Aperture Radar Signals Taking into Account Reflections from Targets and Local Objects

E.A. PAFIKOV¹, A.V. TIMOSHENKO², A.YU. TYCHKOV³,
A.M. SAVCHUK², AND A.S. ZAKHAROV²

¹ Branch of the Military Academy of Material and Technical Support, Penza

² Moscow State University, Moscow

³ Penza State University, Penza

The paper considers the spatial and temporal characteristics of radar signals reflected from targets and local objects. When considering the system, it is taken into account that synthetic aperture radar stations are installed on carrier aircraft. The presence of spatial and temporal differences in the characteristics of signals reflected from a moving ground target and the underlying surface can be used in solving the problem of synthesising an optimal signal processing device for a moving ground target during continuous measurement of its coordinates or automatic tracking.

Target, radar station, signal, tracking, interference, synthesis