

УДК 621.396.96

К вопросу моделирования радиолокационного портрета движущегося объекта

А. Ю. Анфиногенов, А. Н. Тонких
ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, Россия

High-frequency scattering on surfaces are discussed. Object scattering function definition for moving conducting objects is presented. Examples of SAR images of thin rotating plate are discussed.

Задача построения математической модели процесса получения радиолокационных изображений (РЛИ) распределенных объектов сложной формы в радиолокационных станциях с синтезированной апертурой (РСА) является очень важной для дистанционного зондирования. Поскольку рассеяние электромагнитных волн на большинстве искусственных объектов происходит в высокочастотном диапазоне, то отражение носит локальный характер и для построения функции радиолокационного рельефа (ФРР) можно использовать модели на основе факетов и кромок [1]. В связи с этим интересно рассмотреть вопрос о ФРР идеально проводящей плоской движущейся пластинки.

Пусть решена задача дифракции электромагнитных волн (ЭМВ) на заданной пластинке и получена функция радиолокационного рельефа [1]. Осуществив дискретизацию ФРР по координатам (ρ, χ) с шагом Δ_ρ и Δ_χ соответственно, получим множество точек, принадлежащих пластинке $(\chi_i, \rho_j) \in \Omega$. Для каждой такой точки можно записать значения ФРР:

$$\dot{\gamma}_{i,j} = \dot{\gamma}(i * \Delta_\rho, j * \Delta_\chi) = \gamma_{i,j} e^{j\varphi(\gamma_{i,j})}. \quad (1)$$

Известно [2], что решение задачи получения РЛИ в традиционной РСА при условии, что цель находится в одном канале дальности в течении всего интервала синтезирования, осуществляется в соответствии с выражением:

$$J(\eta, \xi) = \left| \int_{L_c} \int_{\Delta R} \dot{s}(x, r) \dot{h}(x - \chi, r - \rho) dx dr \right|, \quad (2)$$

где L_c - интервал синтезирования, ΔR - интервал наблюдения по наклонной дальности, $\dot{s}(x, r)$ - траекторный сигнал; $\dot{h}(x, r)$ - опорная функция; η, ξ - пространственные сдвиги между сигналом $\dot{s}(x, r)$ и опорной функцией $\dot{h}(x, r)$ по азимуту и наклонной дальности, соответственно. В качестве опорной функции выбирается взвешенная функция, с точностью до начальной фазы комплексно сопряженная с сигналом, отраженном от одиночной точечной цели. В соответствии с [2]

$$\dot{h}(x, r) = H_r(r) H_x(x, r) \exp\{-j\varphi_r(r) - j\varphi(x)\}, \quad (3)$$

где $H_r(r)$, $H_x(x, r)$ - весовые функции, при обработке по наклонной дальности и азимуту соответственно; $\varphi_r(r)$ - закон модуляции сигнала; $\varphi(x)$ - закон изменения фазы по азимутальной дальности. Для увеличения разрешающей способности по наклонной дальности, как правило, используют сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ-сигналы), тогда:

$$\varphi_r(r) = \pi D \frac{\Delta F}{r_u} \left(r - \frac{r_u}{2} \right)^2 = b \left(r - \frac{r_u}{2} \right)^2, \quad (4)$$

где D - параметр характеризующий направление изменения ЛЧМ; ΔF - девиация частоты ЛЧМ-сигнала; r_u - протяженность сигнала по наклонной дальности, связанная с длительностью импульса τ_u выражением $r_u = \frac{2\tau_u}{c}$, c - скорость распространения ЭМВ.

Для неподвижной точечной цели закон изменения фазы по азимутальной дальности определяется [2]:

$$\varphi(x) = \frac{2\pi}{\lambda r_0} x^2 = ax^2, \quad (5)$$

где λ - длина волны сигнала, r_0 - наклонная дальность до опорной точки на интервале синтезирования.

С учетом дискретизации ФРП, траекторный сигнал неподвижной пластинки определяется как сумма траекторных сигналов от совокупности точечных целей:

$$\hat{s}(x, r) = \sum_i \sum_j \dot{\gamma}(x - x_i, r - r_j) A(r) \hat{G}(x - x_i, r - r_j) \exp\{-j\varphi_r(r - r_j) - j\varphi(x - x_i)\} \quad (6)$$

где $A(r)$ - функция, учитывающая форму зондирующего сигнала в угломестной плоскости; $\hat{G}(x, r)$ - функция диаграммы направленности антенны, с учетом прямого и обратного распространения сигнала, как правило аппроксимируемая выражением $\hat{G}(x, r) = Ge^{-\frac{\pi x^2}{\lambda^2 r}}$; далее будем обозначать $\dot{\gamma}_{i,j} = \dot{\gamma}(x - x_i, r - r_j)$ и $\hat{G}_{i,j} = \hat{G}(x - x_i, r - r_j)$. Не теряя общности рассуждений, определим $H_r(r) \equiv 1$, $H_x(x, r) \equiv 1$ и $A(r) \equiv 1$.

Подставляя формулы (1)-(6) в выражение (2) получим:

$$J(\eta, \xi) = \left| \int \int \sum_{i,j} \dot{\gamma}_{i,j} \hat{G}_{i,j} \exp\left\{-jb\left(r - \frac{r_u}{2} - r_j - \eta\right)^2 - ja(x - x_i - \xi)^2\right\} * \right. \quad (7)$$

$$\left. * \exp\left\{-jb\left(r - r_j - \frac{r_u}{2}\right)^2 - ja(x - x_i)^2\right\} dx dr \right|^2$$

Учитывая свойства линейности операторов интегрирования и суммирования и произведя замену $\tilde{r} = r - \frac{r_u}{2} - r_j$ и $\tilde{x} = x - x_i$ выражение (7) можно представить в виде:

$$J(\eta, \xi) = \left| \sum_i \sum_j \dot{\gamma}_{i,j} \dot{G}_{i,j} \int_{L_c - x_i}^{L_c - x_i + \Delta R - \frac{r_u}{2} - r_j} \int \exp\{j2a\tilde{x}\eta - ja\eta^2\} \exp\{j2b\tilde{r}\xi - jb\xi^2\} d\tilde{x} d\tilde{r} \right| \quad (8)$$

Произведем интегрирование и воспользуемся формулой Эйлера

$$\begin{aligned} J(\eta, \xi) &= \left| \sum_i \sum_j \dot{\gamma}_{i,j} \dot{G}_{i,j} e^{-ja\eta^2} e^{-jb\xi^2} \left[\frac{\exp\{j2a\tilde{x}\eta\} \Big|_{\frac{L_c - x_i}{2}}^{\frac{L_c - x_i}{2}}}{j2a\eta} \right] \left[\frac{\exp\{j2b\tilde{r}\xi\} \Big|_{\frac{\Delta R - \frac{r_u}{2} - r_j}{2}}^{\frac{\Delta R - \frac{r_u}{2} - r_j}{2}}}{j2b\xi} \right] \right| = \\ &= \left| \sum_i \sum_j \dot{\gamma}_{i,j} \dot{G}_{i,j} e^{-ja\eta^2} e^{-jb\xi^2} \left[\frac{e^{j2a(L_c - x_i)\eta} - e^{j2a(L_c - x_i)\eta}}{j2a\eta} \right] \cdot \right. \\ &\quad \left. \cdot \left[\frac{e^{j2b(\Delta R - r_j)\xi} - e^{j2b(\Delta R - r_j)\xi}}{j2b\xi} \right] \right| = \left| \sum_i \sum_j \gamma_{i,j} e^{j\varphi(\gamma_{i,j})} G_{i,j} e^{-ja\eta^2} e^{-jb\xi^2} \cdot \right. \\ &\quad \left. \cdot [(L_c - x_i) \sin c(a(L_c - x_i)\eta)] [(\Delta R - r_j) \sin c(b(\Delta R - r_j)\xi)] \right| \end{aligned}$$

или

$$J(\eta, \xi) = \left| \sum_i \sum_j \gamma_{i,j} G_{i,j} g(\eta, \xi) \right| \quad (9)$$

где функция $g(\eta, \xi)$ представляет собой РЛИ точечной цели.

Осуществим предельный переход в выражении (6) при шаге дискретизации, стремящемся к нулю:

$$\begin{aligned} J(\eta, \xi) &= \left| \lim_{\Delta_r \rightarrow 0} \lim_{\Delta_x \rightarrow 0} \sum_i \sum_j \gamma(x - i^* \Delta_x, r - j^* \Delta_r) G(x - i^* \Delta_x, r - j^* \Delta_r) g(x, r) \Delta_x \Delta_r \right| = \\ &= \left| \int_{\Xi} \int_{\Psi} \gamma(x - \eta, r - \xi) G(x - \eta, r - \xi) g(x, r) dx dr \right|. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь Ξ и Ψ - геометрические размеры пластинки. В соответствии с (10), моделирование РЛИ распределенного объекта можно осуществлять на основе интеграла свертки ФРР такого объекта и РЛИ точечной цели.

При движении объекта траекторный сигнал можно записать в таком же виде, что и для неподвижного объекта в соответствии с выражением (6), где закон изменения фазы сигнала по азимуту будет определяться, согласно [2]:

$$\varphi_{i,j}(x) = \frac{2\pi}{\lambda r_0} x^2 + \frac{2\pi V_{rij}}{\lambda V_c} x = ax^2 + \Lambda_{i,j} x \quad (11)$$

где V_{rj} - значение радиальных скоростей в точках $(\chi_i, \rho_j) \in \Omega$ на поверхности объекта; V_c - скорость носителя РСА.

Подставляя выражения (2)-(3), (5), (8) в формулу (1) получим:

$$J(\eta, \xi) = \left| \iint_{L, \Delta R} \sum_i \sum_j \gamma_{i,j} G_{i,j} \exp \left\{ -jb \left(r - \frac{r_c}{2} - r_j - \eta \right)^2 - ja(x - x_i - \xi)^2 - ja_{i,j}(x - x_i - \xi) \right\} \exp \left\{ -jb \left(r - r_j - \frac{r_c}{2} \right)^2 - ja(x - x_i)^2 \right\} dx dr \right| \quad (12)$$

Аналогично случаю неподвижного объекта:

$$J(\eta, \xi) = \left| \sum_i \sum_j \gamma_{i,j} G_{i,j} \left[(L_c - x_i) \sin c(a(L_c - x_i)(\eta - \Lambda_{i,j}/a)) \right]^* \right. \\ \left. [(\Delta R - r_j) \sin c(a(\Delta R - r_j)\xi)] e^{j\phi(r_i, r_j)} e^{j\phi(G(x_i, r_j))} e^{-ja\eta^2} e^{-jb\xi^2} \right| = \\ = \left| \sum_i \sum_j \gamma(x - i^* \Delta_{i,j}, r - j^* \Delta_{i,j}) G(x - i^* \Delta_{i,j}, r - j^* \Delta_{i,j}) g(\eta - \tilde{\Lambda}_{i,j}, \xi) \right| = \\ = \left| \sum_i \sum_j \gamma(x - i^* \Delta_{i,j}, \tilde{\Lambda}_{i,j}, r - j^* \Delta_{i,j}) G(x - i^* \Delta_{i,j}, \tilde{\Lambda}_{i,j}, r - j^* \Delta_{i,j}) g(\eta, \xi) \right|. \quad (13)$$

Здесь $\tilde{\Lambda}_{i,j} = \Lambda_{i,j}/a = \frac{V_{rj}}{V_c} r_0$ смещение по азимутальной координате.

Осуществим предельный переход:

$$J(\eta, \xi) = \left| \lim_{\Delta_i \rightarrow 0} \lim_{\Delta_j \rightarrow 0} \sum_i \sum_j \gamma(x - i^* \Delta_{i,j}, \tilde{\Lambda}_{i,j}, r - j^* \Delta_{i,j}) G(x - i^* \Delta_{i,j}, \tilde{\Lambda}_{i,j}, r - j^* \Delta_{i,j}) g(x, r) \Delta_i \Delta_j \right| = \\ = \left| \iint_{\tilde{\Omega}} \tilde{\gamma}(x - \eta - \tilde{\Lambda}, r - \xi) G(x - \eta - \tilde{\Lambda}, r - \xi) g(x, r) dx dr \right| = \left| \iint_{\tilde{\Omega}} \tilde{\gamma}(x - \eta - \tilde{\Lambda}, r - \xi) G(x - \eta, r - \xi) g(x, r) dx dr \right| \quad (14)$$

где функция $\tilde{\gamma}(x, r) = \gamma(x - \tilde{\Lambda}, r) G(x - \tilde{\Lambda}, r)$ есть не что иное, как преобразованная ФРР, каждая точка которой смещена по x на величину,

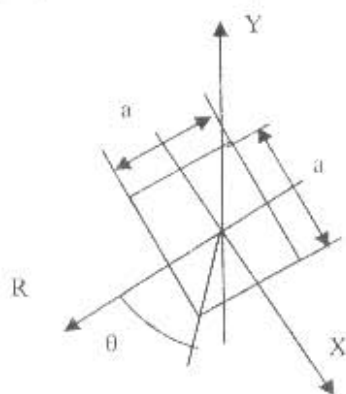


Рис. 1

пропорциональную радиальной скорости движения и помноженная на значение диаграммы направленности в этой точке. На основании этого и сравнении формулы (9) и (14) можно заключить, что при моделировании движущего распределенного объекта необходимо сначала осуществить преобразование в соответствии с выражением (14) и получить новую ФРР объекта, а затем можно воспользоваться алгоритмами моделирования для неподвижного объекта.

В качестве иллюстрации рассмотрим квадратную пластинку со стороной $a=10$ м., облучаемую РСА с длиной волны 3 см.

под следующим ракурсом: азимут $\varphi = 45^\circ$ и угол места $\theta = 20^\circ$ (см. рис. 1).

Разрешение по координатам x и r одинаково и равно 1 м. , наклонная дальность до опорной точки $r_0 = 10000\text{ м.}$, скорость носителя $V_c = 200\text{ м/с.}$ и интервал синтезирования $L_c = 150\text{ м.}$ На рис.2 приведено радиолокационное изображение и яркостной портрет неподвижной пластинки.

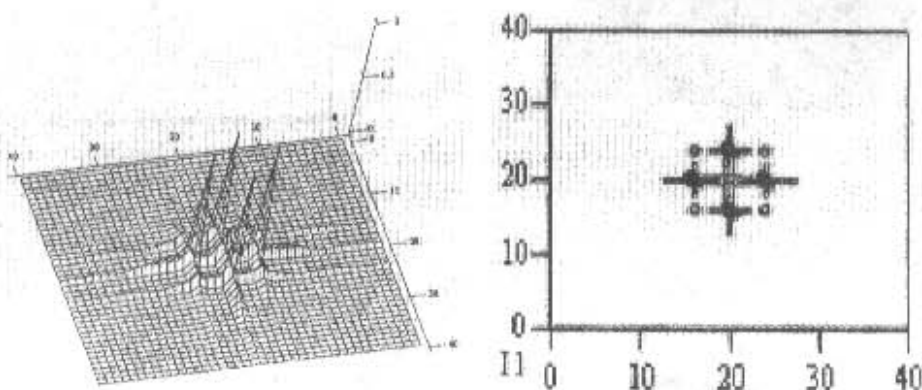


Рис. 2.

Рассмотрим пластинку, вращающуюся в картинной плоскости вокруг своего геометрического центра (рис. 3) с постоянным центростремительным ускорением ω . В этом случае радиальная составляющая скорости, в соответствии с кинематикой движения, будет определяться:

$$V_{r,i,j} = \sqrt{\omega \zeta_{i,j}} \sin\left(\frac{\chi_i}{\zeta_{i,j}}\right)$$

где $\zeta_{i,j} = \sqrt{\chi_i^2 + \rho_j^2}$ - радиус вектор точки на поверхности пластинки.

Определим границу применимости предлагаемой модели. Как оговаривалось выше за время синтезирования смещение по наклонной дальности не должно превышать элемент разрешения δ_r , то есть

$$\frac{V_{r,i,j}}{V_c} L_c \leq \delta_r. \text{ При выбранных параметрах наблюдения, получим } \omega \leq 0.6\text{ м/с}^2$$

На рис.4 приведены РЛИ и яркостные изображения пластинки при различных значениях центростремительного ускорения.

Из анализа этих изображений можно заключить о разрушении РЛИ: изменение геометрических размеров наблюдаемой пластинки, а так же пропадание отдельных отметок при больших радиальных скоростях объекта. Полученные результаты полностью совпадают с результатами приведенными в [1], что говорит о работоспособности предлагаемой модели.

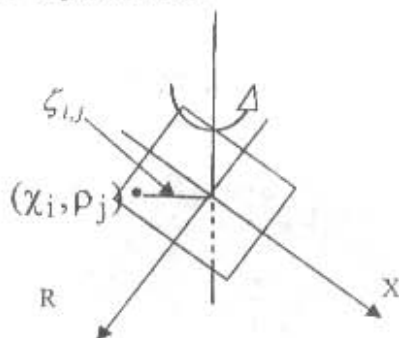
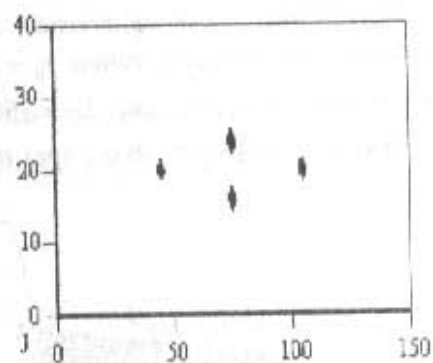
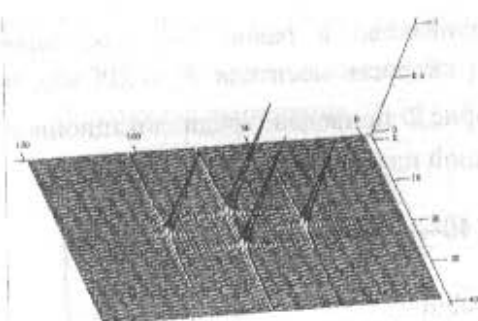
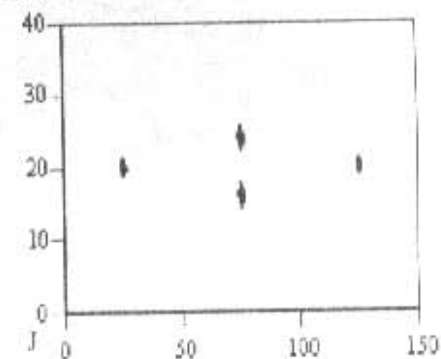
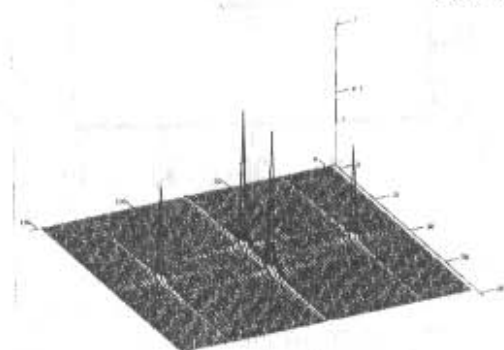
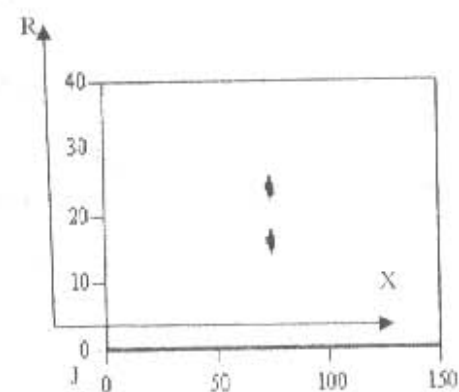
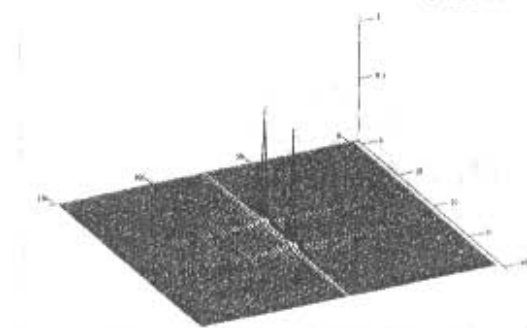


Рис.3

Рис. 4а $\omega=0,1 \text{ м/с}^2$ Рис. 4б $\omega=0,3 \text{ м/с}^2$ Рис. 4в $\omega=0,6 \text{ м/с}^2$

Таким образом, для моделирования РЛИ движущегося распределенного объекта необходимо решать задачу дифракции ЭМВ на поверхности при условии неподвижности объекта, затем преобразовывать полученную ФРП в соответствии с выражением (14) и затем применять алгоритмы формирования РЛИ для неподвижного объекта. Такое получение радиолокационного изображения возможно лишь при условии, что за время синтезирования смещение точки поверхности объекта по наклонной дальности не превосходит элемента разрешения δ_r .

ЛИТЕРАТУРА

1. Анфиногенов А.Ю., Школьный Л.А. К вопросу о математическом моделировании радиолокационных портретов распределенных объектов. - Радиотехника, №10, 1996.
2. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В.Н.Антипов, В.Т. Горяинов, А.Н. Кулич и др. Под Ред. В.Т.Горяинова.-М: Радио и связь, 1988.
3. Школьный Л.А. Два способа описания оператора зондирования при синтезе системы обработки сигналов РСА по координате путевая дальность. НММ по импульсной технике и дискретной обработке информации. ВВИА им. проф. Н.Е.Жуковского, 1981.