УДК 621.396

В. К. ВОЛОСЮК, канд. техн. наук

ОПТИМИЗАЦИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ВЫСОТЫ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ

Задачи оценки геометрических параметров рельефа поверхности в строгой постановке относятся к классу радиоголографических задач, в основе которых лежит когерентная обработка принимаемых сигналов в заданных областях пространства и времени. Рассмотрим задачу оптимизации параметров поверхности и, в частности, получение алгоритма оптимального картографирования высоты рельефа поверхности.

Сигнал, рассеянный поверхностью Ω с координатами $\vec{r}$ и принимаемый в точке $\vec{r}'$ апертуры Ω', можно записать следующим образом [1]:

$$\dot{S}(t, \vec{r}') = \mathrm{Re} \int_{\Omega} \dot{F}[t, \vec{r}, \vec{r}', \vec{\lambda}(\vec{r})]\, \dot{S}_0[t, \vec{r}, \vec{r}', \vec{\lambda}(\vec{r})]\, d\Omega, \qquad (1)$$

где $\dot F[t, \vec r, \vec r', \vec\lambda(\vec r)]$ — функция, характеризующая локальные рассеивающие свойства поверхности; $\vec\lambda(\vec r)$ — совокупность параметров поверхности; $d\Omega$ — дифференциал площади криволинейной поверхности Ω.

Суммарный сигнал, принимаемый апертурой Ω', представим в виде суммы:

$$u(t, \vec r') = \operatorname{Re}\dot S(t, \vec r') + n(t, \vec r'). \tag{2}$$

Здесь $n(t, \vec r')$ — нормальная дельта-коррелированная помеха, обусловленная действием внутренних и внешних помех и неточностью задания функции $\dot F[\vec r, \vec r', \vec\lambda(\vec r), t]$, зависящей от электродинамической модели рассеивающей поверхности.

Для определения оптимального алгоритма оценивания параметров $\vec\lambda(\vec r)$ воспользуемся методом максимума функционала правдоподобия, полагая, что априорные сведения о параметрах $\vec\lambda(\vec r)$ отсутствуют. В результате приходим к необходимости минимизации квадратичного функционала

$$I = \int_T \int_{\Omega'} \{u(t, \vec r) - \operatorname{Re} \int_\Omega \dot F[\vec r, \vec r', \vec\lambda(\vec r), t] \dot S_0 [\vec r, \vec r', \vec\lambda(\vec r), t]\}^2 \, d\Omega' dt. \tag{3}$$

Пусть $\hat{\vec\lambda}(\vec r)$ — оценка векторного параметра; $\delta\vec\lambda(\vec r)$ — его вариация, $\delta\vec\lambda(\vec r) = A\vec\gamma(\vec r)$, где $A = \operatorname{diag}(\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_n)$ — диагональная матрица; $\vec\gamma(\vec r)$ — произвольная векторная функция. Тогда из условия

$$\left.\frac{\partial I}{\partial \alpha_j}\right|_{\alpha_j = 0} = 0 \tag{4}$$

находим, что

$$\int_T \int_{\Omega'} \{u(t, \vec r') + \operatorname{Re} \int_\Omega \dot F[t, \vec r\, \vec r', \vec\lambda_{-j}(\vec r), \hat\lambda_j(\vec r)] \dot S_0[t, \vec r, \vec r', \vec\lambda_{-j}(\vec r), \hat\lambda_j(\vec r)]\, d\Omega\} \times$$

$$\times \operatorname{Re} \int_\Omega \left[\frac{\partial \dot F(\cdot)}{\partial \lambda_j} \dot S_0(\cdot) + \dot F(\cdot) \frac{\partial \dot S_0(\cdot)}{\partial \lambda_j}\right] \gamma_j(\vec r)\, d\Omega\, d\Omega' dt. \tag{5}$$

Здесь $\vec\lambda_{-j}(\vec r)$ — совокупность параметров $\vec\lambda(\vec r)$, из которой исключен параметр $\lambda_j(\vec r)$.

Система интегральных уравнений (5) является исходной для определения оптимальных алгоритмов оценок заданной совокупности параметров $\vec\lambda(\vec r)$.

Предположим, что

$$\frac{\partial \dot F\,[t, \vec r, \vec r\,', \hat\lambda_j(\vec r), \vec\lambda_{-j}(\vec r)]}{\partial \vec\lambda_j(\vec r)} = 0. \tag{6}$$

Тогда в системе (5) соответствующие уравнения легко приводятся к следующему виду:

$$\int\limits_T \int\limits_{\Omega'} u(t, \vec r\,') \frac{\partial \dot S_0\,[t, \vec r, \vec r\,', \hat\lambda_j(\vec r)\,\vec\lambda_{-j}(\vec r)]}{\partial \lambda_j}\, dt d\Omega' =$$

$$= \frac{1}{2} \int\limits_\Omega \dot F^* (\ldots, \vec r = \vec r_1)\, d\Omega_1 \int\limits_T \int\limits_{\Omega'} \dot S^* (\ldots, \vec r = \vec r_1) \frac{\partial \dot S_0(\cdot)}{\partial \lambda_j}\, d\Omega' dt, \tag{7}$$

где $(\ldots, \vec r = \vec r_1)$ — совокупность аргументов, например, в выражении (6), с учетом замены $\vec r$ на $\vec r_1$, а $d\Omega_1$ является также дифференциалом площади криволинейной поверхности Ω.

Учитывая, что $\vec\lambda(\vec r)$ по отношению к операции интегрирования по $\vec r\,'$ — параметр, получим алгоритм оценки параметров поверхности, удовлетворяющих условию (6):

$$\int\limits_T \int\limits_{\Omega'} u(t, \vec r\,')\, \dot S_0\, [t, \vec r\,', \vec r, \vec\lambda_{-j}(\vec r),\ \hat\lambda_j, (\vec r)]\, d\Omega' =$$

$$= \frac{1}{2} \int\limits_\Omega \dot F^* (\ldots, \vec r = \vec r_1) \dot\Psi\, [\vec r, \vec r_1, \hat\lambda_j(\vec r), \vec\lambda_{-j}(\vec r_1)]\, d\Omega_1. \tag{8}$$

Здесь $\dot\Psi(\cdot)$ — функция неопределенности лоцирующей системы,

$$\dot\Psi(\cdot) = \int\limits_{\Omega'} \int\limits_T \dot S_0^* (\ldots, \vec r = \vec r_1)\, \dot S_0(\cdot)\, d\Omega' dt. \tag{9}$$

Условию (6) удовлетворяют дальность до поверхности $R = R(\vec r)$ и связанная с нею высота

$$h(\vec\rho) = H - R(\vec r) \cos\theta, \tag{10}$$

где $\vec\rho = (x, y)$; $\vec r = (\rho, \theta)$; H — высота, измеряемая при лоцировании в надир; $R(\vec r)$ — дальность до поверхности; θ — угол между вертикалью и направлением на разрешаемый участок поверхности.

Пусть Ω' — вертикальная или горизонтальная решетка с соответствующими направлениями осей z' или y', расположенная перпендикулярно к направлению обзора. Причем по каждому выходу осуществляется синтезирование апертуры, а опорный сигнал для каждого из элементов решетки имеет вид [2]:

$$\dot{S}_0(\cdot) = \Pi\left(\frac{t - x/v}{T}\right) \dot{A}\left\{t - \frac{2[H - h(\vec{\rho})]}{\cos\theta}\right\} \times \tag{11}$$

$$\times \exp\left\{jk\left[2[H - h(\vec{\rho})]/\cos\theta - \frac{(vt - x)^2}{H - h(\vec{\rho})}\cos\theta\right]\right\}\varphi(\vec{r}_i', \theta).$$

Здесь для вертикальной решетки

$$\varphi(\vec{r}_i', \theta) = \exp(jkz_i' \cos\theta), \tag{12}$$

для горизонтальной

$$\varphi(\vec{r}_i', \theta) = \exp(jky_i' \sin\theta). \tag{13}$$

Тогда исходный оптимальный алгоритм пространственно-временной обработки принимаемого поля, например, для вертикальной решетки

$$\int\limits_T \int\limits_{\Omega'} u(t, \vec{r}') \dot{S}_0(\cdot)\, dt\, d\Omega' =$$

$$= \sum_{i=1}^{N} \exp(jkz_i \cos\theta) \int\limits_T u(t, z_i') \Pi\left(\frac{t - \frac{x}{v}}{T}\right) \times \tag{14}$$

$$\times \dot{A}\left\{t - \frac{2[H - h(\vec{\rho})]}{\cos\theta}\right\} \exp\left\{jk\left[\frac{2[H - h(\vec{\rho})]}{\cos\theta} - \frac{(vt - x)^2}{H - h(\vec{\rho})}\cos\theta\right]\right\} dt.$$

Таким образом, исходный выходной эффект, необходимый для оценки $h(\vec{\rho})$ может формироваться либо синтезированием апертуры на выходе каждого из элементов с последующим дискретным преобразованием Фурье относительно элементов решетки, либо первоначальным дискретным преобразованием Фурье-сигналов, снимаемых с элементов антенной решетки с последующим синтезированием апертуры. Второй путь более целесообразен, так как требует лишь одного канала синтезирования апертуры.

Список литературы: 1. *Малькович С. Е., Волосюк В. К.* Оценка параметров поверхностей в задачах оптимальной статистической интерпретации на основе электродинамических моделей рассеянных полей//Радиоэлектроника летат. аппаратов. — 1984. — Вып. 13. — С. 11—20. 2. *Фалькович С. Е., Хомяков Э. Н.* Статистическая теория измерительных радиосистем. — М.: Радио и связь, 1981. — 287 с.

Поступила в редколлегию 26.12.85