УДК 621.396.96+537.874.4

А.В. КСЕНДЗУК

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ОПТИМАЛЬНОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ РЕЛЬЕФА В МНОГОПОЗИЦИОННЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ РСА

Синтезированы оптимальные алгоритмы формирования карт высот рельефа поверхности в многопозиционных интерферометрических радиолокационных системах с синтезированием апертуры антенны, показаны наиболее важные частные случаи разработанных алгоритмов, позволяющие понять принципы функционирования многопозиционных интерферометрических систем.

интерферометр, многопозиционная РСА, карта рельефа поверхности

Введение

Одной из важнейших задач, решаемой системами дистанционного зондирования аэрокосмического базирования, является построение карт высот рельефа поверхности [1]. Среди ряда методов, применяемых для решения этой задачи, наибольшее распространение получил интерферометрический. Оценка высоты в соответствии с этим методом основывается на измерении разности фаз (связанной с высотой рельефа) в двух пространственно разнесенных точках [2]. Традиционно в системах такого типа выделяют алгоритмы первичной (оценка разности фаз, либо связанных с ней величин) и вторичной обработки (развертка фазы, устранение шумов).

Постановка задачи. В настоящее время существует множество алгоритмов обработки в интерферометрических РСА (ИРСА), [3 – 6]. Создание многопозиционных систем с синтезированием апертуры предполагает модификацию алгоритмов обнаружения с целью достижения максимальной эффективности работы обнаружителей.

Именно решение задачи разработки алгоритмов оценка карты высот поверхности в многопозиционной РСА является **целью данной работы**.

Синтез алгоритма оптимальной обработки сигналов

При синтезе оптимальных алгоритмов обработки в многопозиционных интерферометрических РСА, оптимальные оценки высоты будем определять из векторно-матричного интегрального уравнения

$$\int_0^T\int_0^T \mathrm{u}^T(t_1)\mathrm{R}_u^{-1}(t_1,t_2)\frac{\delta\dot{\mathrm{S}}_D[t_2,\lambda(\mathrm{r})]}{\delta\lambda}dt_1dt_2 = \\ = \frac{1}{2}\int_0^T\int_0^T \dot{\mathrm{S}}_D^{T*}[t_1,\lambda(\mathrm{r})]\mathrm{R}_u^{-1}(t_1,t_2)\frac{\delta\dot{\mathrm{S}}_D[t_2,\lambda(\mathrm{r})]}{\delta\lambda}dt_1dt_2. \qquad (1)$$

Учитывая общую модель сигнала в рассматриваемом интерферометре для произвольной бистатической пары *i*–*k*:

$$S_{Dik}[t,\lambda(\mathbf{r})] = \mathrm{Re}\int_D \dot{K}_k(t,\mathbf{r},\lambda)\dot{K}_i(t,\mathbf{r},\lambda)\dot{G}_k(t,\mathbf{r},\lambda)\tilde{\dot{G}}_i(t,\mathbf{r},\lambda)\times \\ \times\dot{F}_{ik}[\mathbf{r},\mathbf{p}(\mathbf{r}),\lambda]\dot{S}_{0k}[t-\tau_{ik}(t,\mathbf{r},\lambda)]\exp\{j\omega_{0k}[t-\tau_{ik}(t,\mathbf{r},\lambda)]\}d\mathbf{r}, \qquad (2)$$

запишем (1) в рамках статических моделей поверхности и среды распространения. При этом решение, справедливое для произвольных распределений пространственных функций $\dot{K}_d(\mathbf{r})$, $\dot{F}_d[\mathbf{r},\mathbf{p}(\mathbf{r})]$ необходимо определять из

$$\int_0^T\int_0^T \mathbf{u}^T(t_1)\mathbf{R}_N^{-1}(t_1,t_2)\dot{S}_d^0(t_2,\mathbf{r})dt_1dt_2 = \frac{1}{2}\times \\ \times\int_0^T\int_0^T \dot{\mathbf{S}}_D^{T*}[t_1,\lambda(\mathbf{r})]\mathbf{R}_N^{-1}(t_1,t_2)\dot{S}_d^0(t_2,\mathbf{r})dt_1dt_2. \qquad (3)$$

С учетом вида сигнала (2) запишем выражение для вектора, в котором содержится информация о высоте λ в виде $\dot{\mathbf{f}}^T(t,\mathbf{r},\lambda) = \dot{\mathbf{f}}_0^T(t,\mathbf{r},\lambda)\dot{\mathbf{A}}(t,\mathbf{r})$, где первый сомножитель представляет собой зависимость экспоненты времени запаздывания от высоты рельефа, а второй – зависимость поправок комплексного коэффициента отражения, коэффициента искажений в бистатических парах относительно точки d_0 (центра базы ИРСА). Полагая, что в окрестности произвольной точки $t_0 \in [0...T]$ вектор $\dot{\mathbf{f}}_0^T(t,\mathbf{r},\lambda)$ имеет производные до $(n+1)$ и взаимное перемещения векторов $\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j$ позволяет пренебречь нестационарной компонентой, получим

$$\int_0^T\int_0^T \mathbf{u}^T(t_1)\mathbf{R}_N^{-1}(t_1,t_2)\dot{S}_d^{0^*}(t_2,\mathbf{r}_1)dt_1dt_2 = \\ =\frac{1}{2}\int_D \dot{K}_d(\mathbf{r})\dot{F}_d[\mathbf{r},\mathbf{p}(\mathbf{r})]\frac{\delta\dot{\mathbf{f}}_0^T(t_0,\mathbf{r},\lambda)}{\delta\lambda}\times \\ \times\int_0^T\int_0^T \dot{\mathbf{A}}(t_1,\mathbf{r})\dot{S}_d^0(t_1,\mathbf{r})\mathbf{R}_N^{-1}(t_1,t_2)\dot{S}_d^{0^*}(t_2,\mathbf{r}_1)dt_1dt_2d\mathbf{r}.$$

Для статических (по крайней мере, на интервале синтезирования апертуры) моделей зависимости значений $\dfrac{\dot{K}_d(t,\mathbf{r})\tilde{\dot{G}}_d(t,\mathbf{r})\dot{F}_d[\mathbf{r},\mathbf{p}(\mathbf{r})]}{\dot{K}_{ik}(t,\mathbf{r})\tilde{\dot{G}}_{ik}(t,\mathbf{r})\dot{F}_{ik}[\mathbf{r},\mathbf{p}(\mathbf{r})]}$, являющихся элементами матрицы $\dot{\mathbf{A}}(t_1,\mathbf{r})$, последнее выражение позволяет выделить пространственную функцию неопределенности траекторного сигнала для d_0:

$$\int_0^T\int_0^T \mathrm{u}^T(t_1)\mathrm{R}_N^{-1}(t_1,t_2)\dot{S}_d^{0^*}(t_2,\mathrm{r}_1)dt_1dt_2 = \frac{1}{2}\int_D \dot{K}_d(\mathrm{r})\dot{F}_d[\mathrm{r},\mathrm{p}(\mathrm{r})]\times \\ \times\frac{\delta\dot{\mathrm{f}}_0^T(t_0,\mathrm{r},\lambda)}{\delta\lambda}\dot{\mathrm{A}}(\mathrm{r})\int_0^T\int_0^T \dot{S}_d^0(t_1,\mathrm{r})\mathrm{R}_N^{-1}(t_1,t_2)\dot{S}_d^{0^*}(t_2,\mathrm{r}_1)dt_1dt_2d\mathrm{r} = \\ =\frac{1}{2}\int_D \dot{K}_d(\mathrm{r})\dot{F}_d[\mathrm{r},\mathrm{p}(\mathrm{r})]\frac{\delta\dot{\mathrm{f}}_0^T(t_0,\mathrm{r},\lambda)}{\delta\lambda}\dot{\mathrm{A}}(\mathrm{r})\dot{\Psi}_d^0(\mathrm{r},\mathrm{r}_1)d\mathrm{r},$$

где $\dot{\mathbf{\Psi}}_d^0(\mathbf{r},\mathbf{r}_1)$ – матрица пространственных функций неопределенности траекторного сигнала базы $\dot{S}_d^0(t_1,\mathbf{r})$ с учетом декоррелирующего преобразования с ядром $\mathbf{R}_N^{-1}(t_1,t_2)$.

Частным, но, тем не менее, важным с практической точки зрения случаем является стационарность вектора $\dot{\mathbf{f}}(t,\mathbf{r},\lambda)=\dot{\mathbf{f}}(\mathbf{r},\lambda)$, по крайней мере, на интервале синтеза апертуры. При этом оптимальные оценки высоты определяются из решения уравнения

$$\dot{\mathrm{Y}}(\mathrm{r}_1) = \int_0^T\int_0^T \mathrm{u}^T(t_1)\mathrm{R}_N^{-1}(t_1,t_2)\dot{S}_d^{0^*}(t_2,\mathrm{r}_1)dt_1dt_2 = \\ =\frac{1}{2}\int_D \dot{\tilde{F}}_d(\mathrm{r})\frac{\delta\dot{\mathrm{f}}^T(\mathrm{r},\lambda)}{\delta\lambda}\dot{\Psi}_d^0(\mathrm{r},\mathrm{r}_1)d\mathrm{r}. \tag{4}$$

Как видно из последнего выражения, оптимальный выходной эффект многопозиционной ИРСА – вектор $\dot{\mathbf{Y}}(\mathbf{r}_1)$ – представляет собой искаженный комплексный коэффициент отражения для центра базы $\dot{\tilde{F}}_d(\mathbf{r})=\dot{K}_d(\mathbf{r})\dot{F}_d[\mathbf{r},\mathbf{p}(\mathbf{r})]$, умноженный на вектор вариационных производных функций, зависящих от высоты рельефа $\dot{\mathbf{f}}(\mathbf{r},\lambda)$ и сглаженный матрицей пространственных функцией неопределенности $\dot{\mathbf{\Psi}}_d^0(\mathbf{r},\mathbf{r}_1)$.

Если все элементы корреляционной и, соответственно, обратно-корреляционной матрицы не равны нулю (это означает, что помехи в произвольных двух каналах интерферометрической РСА коррелированны), причем спектральная плотность мощности элементов $\mathbf{R}_N^{-1}(t_1,t_2)$ не может быть аппроксимирована равномерной, то выражения для оптимальных оценок можно записать, с учетом выполнения операций векторно-матричного умножения, в виде:

$$\dot{Y}_i(\mathrm{r}_1) = \sum_m\int_0^T\int_0^T \mathrm{u}_m^T(t_1)\mathrm{R}_{N\,m,i}^{-1}(t_1,t_2)\dot{S}_d^{0^*}(t_2,\mathrm{r}_1)dt_1dt_2 = \\ =\frac{1}{2}\int_D \dot{K}_d(\mathrm{r})\dot{F}_d[\mathrm{r},\mathrm{p}(\mathrm{r})]\sum_n\int_0^T\int_0^T\frac{\delta\dot{\mathrm{f}}_n^T(t_1,\mathrm{r},\lambda)}{\delta\lambda}\dot{S}_d^0(t_1,\mathrm{r})\times \\ \times\mathrm{R}_{N\,n,i}^{-1}(t_1,t_2)\dot{S}_d^{0^*}(t_2,\mathrm{r}_1)dt_1dt_2d\mathrm{r};$$

$$Y_i(\mathrm{r}_1) = \sum_m\int_0^T\int_0^T \mathrm{u}_m^T(t_1)\mathrm{R}_{N\,m,i}^{-1}(t_1,t_2)\dot{S}_d^{0^*}(t_2,\mathrm{r}_1)dt_1dt_2 = \\ =\frac{1}{2}\int_D \dot{\tilde{F}}_d(\mathrm{r})\sum_n\frac{\delta\dot{\mathrm{f}}_n^T(\mathrm{r},\lambda)}{\delta\lambda}\dot{\Psi}_{d\,n,i}^0(\mathrm{r},\mathrm{r}_1)d\mathrm{r}. \tag{5}$$

Если помехи в различных каналах некоррелированы (это означает что матрицы $\mathbf{R}_N(t_1,t_2)$ и, соответственно, $\mathbf{R}_N^{-1}(t_1,t_2)$ являются диагональными), выражения для оптимальных выходных эффектов будут следующими:

$$\dot{Y}_i(\mathrm{r}_1) = \int_0^T\int_0^T \mathrm{u}_i^T(t_1)\mathrm{R}_{N\,i,i}^{-1}(t_1,t_2)\dot{S}_d^{0^*}(t_2,\mathrm{r}_1)dt_1dt_2 =$$

$$= \frac{1}{2}\int_D \dot{K}_d(\mathrm{r})\dot{F}_d[\mathrm{r},\mathrm{p}(\mathrm{r})]\int_0^T\int_0^T \frac{\delta\dot{\mathrm{f}}_i^T(t_1,\mathrm{r},\lambda)}{\delta\lambda}\dot{S}_d^0(t_1,\mathrm{r})\times \quad (6)$$

$$\times \mathrm{R}_{N\,i,i}^{-1}(t_1,t_2)\dot{S}_d^{0^*}(t_2,\mathrm{r}_1)dt_1dt_2d\mathrm{r};$$

$$Y_i(\mathrm{r}_1) = \int_0^T\int_0^T \mathrm{u}_i^T(t_1)\mathrm{R}_{N\,i,i}^{-1}(t_1,t_2)\dot{S}_d^{0^*}(t_2,\mathrm{r}_1)dt_1dt_2 =$$

$$= \frac{1}{2}\int_D \dot{\tilde{F}}_d(\mathrm{r})\frac{\delta\dot{\mathrm{f}}_i^T(\mathrm{r},\lambda)}{\delta\lambda}\dot{\Psi}_{d\,i,i}^0(\mathrm{r},\mathrm{r}_1)d\mathrm{r}. \quad (7)$$

Если в пределах полосы пропускания интерферометрической системы спектральная плотность мощности помехи может быть с достаточной точностью аппроксимирована равномерной, выражения (6), (7) упрощаются до:

$$\dot{Y}_i(\mathrm{r}_1) = \int_D \frac{\mathrm{N}_i^{-1}\dot{K}_d(\mathrm{r})}{2}\dot{F}_d[\mathrm{r},\mathrm{p}(\mathrm{r})]\times$$

$$\times\int_0^T \frac{\delta\dot{\mathrm{f}}_i^T(t,\mathrm{r},\lambda)}{\delta\lambda}\dot{S}_d^0(t,\mathrm{r})\dot{S}_d^{0^*}(t,\mathrm{r}_1)dtd\mathrm{r};$$

$$Y_i(\mathbf{r}_1) = \frac{\mathbf{N}_i^{-1}}{2}\int_D \dot{\tilde{F}}_d(\mathbf{r})\frac{\delta\dot{\mathbf{f}}_i^T(\mathbf{r},\lambda)}{\delta\lambda}\int_0^T \dot{S}_d^0(t,\mathbf{r})\dot{S}_d^{0^*}(t,\mathbf{r}_1)dtd\mathbf{r},$$

где $\mathbf{N}_i^{-1}$ – величина, обратная спектральной плотности мощности помехи в i-м канале интерферометра.

Формально, в приведенных выше алгоритмах каждая из координат вектора $\dot{\mathbf{f}}(\mathbf{r},\boldsymbol{\lambda})$ содержит информацию об оцениваемой функции $\lambda(\mathbf{r})$, связанной с высотой возвышения точки $\mathbf{r}$. Для восстановления $h(\mathbf{r})$ по результатам обработки для каждой бистатической пары необходимо определить (по крайне мере, с точностью до фазы) значения комплексного коэффициента отражения $\dot{F}(\cdot)$, коэффициентов, учитывающих влияние диаграмм направленности антенн $\dot{G}(\cdot)$ и искажений при распространении сигнала в свободном пространстве $\dot{K}(\cdot)$.

В большинстве практических случаев найти данные величины не удается, поэтому для оценки высоты рельефа или связанных с ней функций используют операторные преобразования оценок $\dot{\mathbf{f}}(\mathbf{r},\boldsymbol{\lambda})$. Наиболее простыми являются произведение/частное координат оптимальных выходных эффектов.

В общем случае для коррелированных помех при различном поведении составляющих вектора $\dot{\mathbf{f}}(\mathbf{r},\boldsymbol{\lambda})$, результат частного выходных эффектов в двух произвольных каналах многопозиционной интерферометрической РСА будет иметь вид

$$\begin{aligned}
\frac{\dot{Y}_i(\mathbf{r}_1)}{\dot{Y}_j(\mathbf{r}_1)} = {} & \int_D \dot{K}_d(\mathbf{r})\dot{F}_d[\mathbf{r},\mathbf{p}(\mathbf{r})]\sum_{n,g}\frac{\delta\dot{f}_{0id_g}(t_0,\mathbf{r},\lambda)}{\delta\lambda}\int_0^T\int_0^T \dot{A}_{id_{gn}}(t_2,\mathbf{r})\times \\
& \times\dot{S}_d^0(t_1,\mathbf{r})\mathbf{R}_{Nni}^{-1}(t_1,t_2)\dot{S}_d^{0^*}(t_2,\mathbf{r}_1)dt_1dt_2d\mathbf{r} + \int_D \dot{K}_d(\mathbf{r})\dot{F}_d[\mathbf{r},\mathbf{p}(\mathbf{r})]\times \\
& \frac{\delta}{\delta\lambda}\sum_{n,g}\int_0^T\int_0^T\sum_b \frac{(t_1-t_0)}{b!}\frac{\partial^b \dot{f}_{0id_g}^{\,b}(t_0,\mathbf{r},\lambda)}{\partial t_1^b}\dot{A}_{id_{gn}}(t_2,\mathbf{r})\dot{S}_d^0(t_1,\mathbf{r})\times \\
& \times\mathbf{R}_{Nni}^{-1}(t_1,t_2)\dot{S}_d^{0^*}(t_2,\mathbf{r}_1)dt_1dt_2d\mathbf{r}\times\left\{-\int_D \dot{K}_d(\mathbf{r})\dot{F}_d[\mathbf{r},\mathbf{p}(\mathbf{r})]\frac{\delta}{\delta\lambda}\right. \\
& \frac{\delta}{\delta\lambda}\sum_{n,g}\int_0^T\int_0^T\left(\dot{f}_{0jd_g}(t_0,\mathbf{r},\lambda) + \sum_b \frac{(t_1-t_0)}{b!}\frac{\partial^b \dot{f}_{0jd_g}^{\,b}(t_0,\mathbf{r},\lambda)}{\partial t_1^b}\right)\times \\
& \left.\dot{A}_{jd_{gn}}(t_2,\mathbf{r})\dot{S}_d^0(t_1,\mathbf{r})\mathbf{R}_{Nnj}^{-1}(t_1,t_2)\dot{S}_d^{0^*}(t_2,\mathbf{r}_1)dt_1dt_2d\mathbf{r} - \right\}^{-1}.
\end{aligned} \quad (8)$$

Для того чтобы понять принцип функционирования интерферометра, рассмотрим выражение (8) при условии, что изменением оцениваемых параметров и их производных в пределах функции неопределенности можно пренебречь

$$\frac{\dot{Y}_i(\mathbf{r}_1)}{\dot{Y}_j(\mathbf{r}_1)} \cong \frac{\dfrac{\mathbf{N}_i^{-1}}{2}\dfrac{\delta\dot{\mathbf{f}}_i^T(\mathbf{r}_1,\lambda)}{\delta\lambda}\int_D \dot{\tilde{F}}_d(\mathbf{r})\int_0^T \dot{S}_d^0(t,\mathbf{r})\dot{S}_d^{0^*}(t,\mathbf{r}_1)dtd\mathbf{r}}{\dfrac{\mathbf{N}_j^{-1}}{2}\dfrac{\delta\dot{\mathbf{f}}_i^T(\mathbf{r}_1,\lambda)}{\delta\lambda}\int_D \dot{\tilde{F}}_d(\mathbf{r})\int_0^T \dot{S}_d^0(t,\mathbf{r})\dot{S}_d^{0^*}(t,\mathbf{r}_1)dtd\mathbf{r}}.$$

Используя приведенную выше модель сигнала, запишем последнее выражение в виде

$$\frac{\dot{Y}_i(\mathbf{r}_1)}{\dot{Y}_j(\mathbf{r}_1)} = \frac{\mathbf{N}_i^{-1}}{\mathbf{N}_j^{-1}}\frac{\dot{K}_{jm}(t,\mathbf{r})\tilde{\dot{G}}_{jm}(t,\mathbf{r})\dot{F}_{jm}[\mathbf{r},\mathbf{p}(\mathbf{r})]}{\dot{K}_{ik}(t,\mathbf{r})\tilde{\dot{G}}_{ik}(t,\mathbf{r})\dot{F}_{ik}[\mathbf{r},\mathbf{p}(\mathbf{r})]}\times$$

$$\times\frac{\dfrac{\delta}{\delta\lambda}\exp\{-j\omega_{0k}\tau_{id}^{\Delta}(t,\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_i,\mathbf{r}_j,\lambda)\}}{\dfrac{\delta}{\delta\lambda}\exp\{j\omega_{0m}\tau_{jd}^{\Delta}(t,\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_i,\mathbf{r}_j,\lambda)\}}. \quad (9)$$

Для дальнейших преобразований положим, что оцениваемым параметром является функция $\tau_{ij}^{\Delta}(t,\mathbf{r},\mathbf{r}_i,\mathbf{r}_j,\lambda)$ – разность хода сигнала в различных антеннах относительно центра базы (точки d_0) для случая различных частот сигналов, излучаемых различными передатчиками МПИРСА:

$$\frac{\dot{Y}_i(\mathbf{r}_1)}{\dot{Y}_j(\mathbf{r}_1)}=\frac{\mathbf{N}_i^{-1}}{\mathbf{N}_j^{-1}}\frac{\dot{K}_{jm}(t,\mathbf{r})\tilde{\dot{G}}_{jm}(t,\mathbf{r})\dot{F}_{jm}[\mathbf{r},\mathbf{p}(\mathbf{r})]}{\dot{K}_{ik}(t,\mathbf{r})\tilde{\dot{G}}_{ik}(t,\mathbf{r})\dot{F}_{ik}[\mathbf{r},\mathbf{p}(\mathbf{r})]}\frac{\omega_{0k}}{\omega_{0m}}\times \quad (10)$$
$$\times\exp\{j[-\tau_{ij}^{\Delta}[\omega_{0m}+\omega_{0k}]+\omega_{0k}\tau_{jd}^{\Delta}+\omega_{0m}\tau_{id}^{\Delta}]\}.$$

Оценка фазы (например, арктангенсное преобразование отношения комплексных выходных эффектов) позволяет определить пространственно-временную функцию, связанную с высотой возвышения точек $\mathbf{r}\in D$:

$$\arg\frac{\dot{Y}_i(\mathbf{r}_1)}{\dot{Y}_j(\mathbf{r}_1)}=[\varphi_{jm}^{K}(\mathbf{r})-\varphi_{ik}^{K}(\mathbf{r})]+[\varphi_{jm}^{G}(\mathbf{r})-\varphi_{ik}^{G}(\mathbf{r})]+$$
$$+[\varphi_{jm}^{F}(\mathbf{r})-\varphi_{ik}^{F}(\mathbf{r})]-\tau_{ij}^{\Delta}[\omega_{0m}+\omega_{0k}]+\omega_{0k}\tau_{jd}^{\Delta}+\omega_{0m}\tau_{id}^{\Delta}.$$

Последнее уравнение показывает необходимость априорного определения моделей поведения $\dot{K}_{jm}(t,\mathbf{r})\tilde{\dot{G}}_{jm}(t,\mathbf{r})\dot{F}_{jm}[\mathbf{r},\mathbf{p}(\mathbf{r})]$ для заданной геометрии наблюдения, несущих частот и др. В большинстве практических случаев определение достаточно точных моделей $\dot{K}(t,\mathbf{r})$ $\dot{F}[\mathbf{r},\mathbf{p}(\mathbf{r})]$ затруднено. В связи с этим для построения карт интерферометрическими системами целесообразно использовать такие наборы приемных и передающих элементов, которые обеспечивают выполнение условий:

$$\dot{F}_{dk}[\mathbf{r},\mathbf{p}(\mathbf{r})]\cong\dot{F}_{ki}[\mathbf{r},\mathbf{p}(\mathbf{r})]\cong\dot{F}_{mj}[\mathbf{r},\mathbf{p}(\mathbf{r})];$$
$$\dot{K}_{dk}[\mathbf{r},\mathbf{p}(\mathbf{r})]\cong\dot{K}_{ki}[\mathbf{r},\mathbf{p}(\mathbf{r})]\cong\dot{K}_{mj}(t,\mathbf{r});$$
$$\dot{S}_{0k}[t-\tau_k(t,\mathbf{r},\mathbf{r}_k)-\tau_{kij}^{d}(t,\mathbf{r},\mathbf{r}_k,\mathbf{r}_i,\mathbf{r}_j)]\cong\dot{S}_{0m}[t-\tau_k(t,\mathbf{r},\mathbf{r}_k)].$$

В этом случае результат обработки (8) имеет вид

$$\arg\frac{\dot{Y}_i(\mathbf{r}_1)}{\dot{Y}_j(\mathbf{r}_1)}=-\tau_{ij}^{\Delta}[\omega_{0m}+\omega_{0k}]+\omega_{0k}\tau_{jd}^{\Delta}+\omega_{0m}\tau_{id}^{\Delta},$$

а в случае равенства несущих частот передатчиков, участвующих в формировании выходных эффектов $\dot{Y}_i(\mathbf{r}_1)$, $\dot{Y}_j(\mathbf{r}_1)$ последнее выражение упростится до

$$\arg\frac{\dot{Y}_i(\mathbf{r}_1)}{\dot{Y}_j(\mathbf{r}_1)}=-\omega_{0m}\tau_{ij}^{\Delta}(t,\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_i,\mathbf{r}_j,\lambda).$$

При невыполнении этих условий оценка высоты будет искажена пространственной функцией, зависящей от характеристик антенных систем, отражающих характеристик антенны, свойств среды распространения.

Заключение

В работе получены оптимальные алгоритмы восстановления высоты рельефа в многопозиционной интерферометрический системе с синтезированием апертуры антенны. Вырожденные формы данных алгоритмов совпадают с известными методами формирования карт высот рельефа поверхности в однопозиционных интерферометрических РСА.

Литература

1. Егоров В.В., Федотова З.К. Задачи, программы и космические системы исследования Земли // Итоги науки и техники. Сер. исследование Земли из космоса. – 1987. – Т. 1. – С. 180 – 194.
2. Ksendzuk A.V. Volosyuk V.K. Multi-base InSAR with enhanced signal processing // IV International Conference on Antenna Theory and Techniques. – Sevastopol, Ukraine. – 2003. – Vol. 1. – P. 405 – 408.
3. Rees W.G. Physical principle of remote sensing. – Cambridge University Press. – Cambridge, UK, 1990.
4. Abdelfattah R., Nicolas J.M., Boussema M.R. Impact of orbital parameters on DEM production by SAR Interferometry Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International. – Vol. 2. – 24-28 July 2000. – P. 739 – 741.
5. Ksendzuk A.V. SAR interferometer optimal processing algorithms for the stochastic surface models // The 5 Kharkov Symposium MSMW. – Kharkov. – 2004. – P. 253 – 255.
6. Massonnet D., Feigl K. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface // Rev. Geophys. – Vol. 36, no. 4. – P. 441 – 500.

Поступила в редакцию 25.10.2005

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.К. Волосюк, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.