

Алгоритмы оценки уклонов земной поверхности в РЛС с синтезированием апертуры антенны

М.И. Бабокин, И.Н. Ерманёнок

ГУП НПП «Спурт», Москва, Зеленоград, 4-й западный проезд, д.8, E-mail: titovmp@mail.ru

В статье рассмотрены вопросы формирования отражённого от земной поверхности со сложным рельефом сигнала в РЛС с синтезированием апертуры антенны (РСА). Наличие уклонов поверхности по дальности и азимуту приводит к изменениям амплитудно-фазовых соотношений отраженного сигнала. Представлена модель траекторного сигнала и квазиоптимальные алгоритмы обработки сигналов РСА для оценки уклонов земной поверхности. Приведены экспериментальные результаты, подтверждающие обоснованность модели отраженного от земной поверхности со сложным рельефом сигнала.

The problems of forming the SAR signal reflected from the earth surface with complex relief are considered. The presence of the surface's grade leads to the complex gain-phase changes of the reflected signals. Trajectory signal model and suboptimal algorithms for slope earth surface evaluation as a result of signal processing of SAR systems are considered. The experimental results which confirm the validity of such model are given.

Одной из приоритетных задач РЛ комплексов дистанционного зондирования Земли является предоставление цифровой картографической информации высокой точности. При наличии рельефа местности с уклонами задача значительно усложняется. При разработке алгоритмов измерения рельефа местности, математическую модель отражённого от земной поверхности сигнала необходимо изменить.

На рис. 1 представлена геометрическая схема дистанционного зондирования земной поверхности со сложным рельефом.

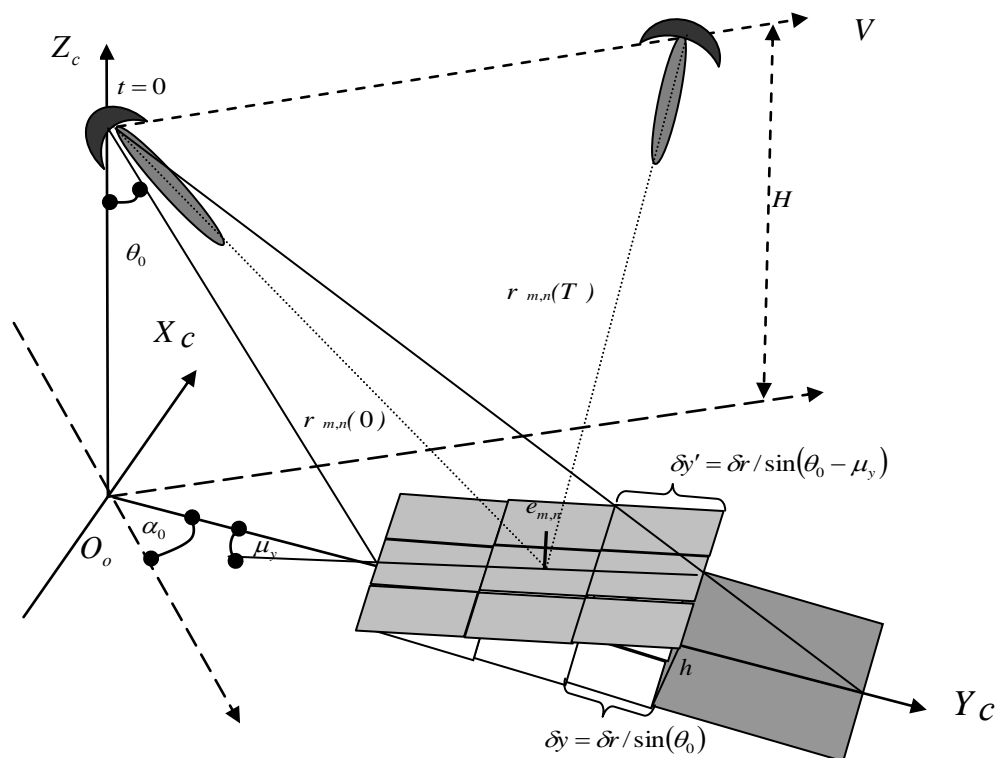


Рис. 1. Геометрическая схема дистанционного зондирования земной поверхности

Луч реальной диаграммы направленности (ДНА) РЛС при угле падения θ_0 отклонен вперед на угол α_0 (при боковом обзоре $\alpha_0 = 0^\circ$). Для описания процесса формирования сигнала РСА, система координат располагается так, что ось ДНА антенны в начальный момент времени лежит в плоскости $Y_c O_o Z_c$, её начало совмещено с проекцией ФЦА на земную поверхность, ось $O_o Z_c$ направлена по местной вертикали, а ось $O_o X_c$ ортогональна плоскости $Y_c O_o Z_c$.

Одним из вариантов сложного рельефа является плавно нарастающий вдоль оси $O_o Y_c$ с постоянным уклоном μ_y рельеф, максимальное значение которого h , относительно начала возвышения, значительно превышает разрешающую способность РСА.

Учитывая возможность пространственного разрешения импульсно-доплеровских РСА, облучаемую поверхность разбивают на элементы разрешения [2,3,4] вдоль оси $O_o Y_c$ размером $\delta y' = \delta r / \sin(\theta_0 - \mu_y)$, а вдоль оси $O_o X_c$ размером $\delta x \approx \delta y = \delta r / \sin(\theta_0)$.

При описании модели отражений от поверхности часто используют функцию радиолокационного рельефа (РЛР) $e(x, y)$ [1,2,4]. В качестве упрощенной модели РЛР, представляющей физические процессы, используют дискретную матрицу, элемент которой можно трактовать как среднее значение функции РЛР на некоторой площадке пространственного разбиения [2,3]. Тогда, комплексный траекторный сигнал, отраженный от элементарной площадки разрешения, можно представить в виде:

$$s_{mn}(t) = \sum_i \sum_j e_{m+i, n+j} \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} r_{m+i, n+j}(t) \right\}, \quad (1)$$

где $e_{m+i, n+j}$ – элементы дискретной модели РЛР внутри площадки разрешения с координатами центра x_n, y_m ; $m = -M/2 \dots M/2$ – номер элемента разрешения вдоль оси y ; $n = -N/2 \dots N/2$ – номер элемента разрешения вдоль оси x ; $i = -I/2 \dots I/2$ – номер элементарного отражателя вдоль оси y внутри элемента разрешения; $j = -J/2 \dots J/2$ – номер элементарного отражателя вдоль оси x внутри элемента разрешения; $r_{m+i, n+j}(t)$ – расстояние от ФЦА носителя РСА до элементарного

отражателя. Преобразуем (1) к виду: $s_{mn}(t) = e_{mn}^\infty \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} r_{mn}(t) \right\}$, где параметр

$$e_{mn}^\infty = \sum_i \sum_j e_{m+i, n+j} \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} (r_{m+i, n+j}(t) - r_{mn}(t)) \right\},$$

имеет смысл комплексного

коэффициента рассеяния разрешаемой РСА площадки поверхности. Расстояние от ФЦА до фазового центра площадки разрешения $r_{mn}(t) \approx r^0(t) + m\delta r + \delta r/2 + \Delta r_{ym}^\mu$. Рассмотрим дополнительный сдвиг по наклонной дальности относительно фазового центра элемента разрешения Δr_{ym}^μ . Подобное смещение происходит и в азимутальном направлении (уклон μ_x). При малых величинах μ_y, μ_x , дополнительное изменение дальности: $\Delta r_{mn}^\mu \approx \Delta r_{ymn}^\mu + \Delta r_{xmn}^\mu \approx (\mu_y + \mu_x) \delta r \operatorname{ctg}(\theta_m)/2$. Значительное относительное отклонение и пространственная корреляция позволяет поставить задачу оценивания

уклонов поверхности. Представим модель местного рельефа в виде: $h_{mn} \approx h_{m-1 n-1} + \mu_{ymn} \Delta y + \mu_{xmn} \Delta x$, $h_{00} = h_a$, где Δy , Δx – шаг дискретной модели рельефа. В этом случае можно определить относительное изменение наклонной дальности между соседними элементами модели местного рельефа $\Delta r_{hmn} \approx \Delta r_{h_{m-1} n-1} + \cos(\theta_m)(\mu_y \Delta y + \mu_x \Delta x)$ и уравнение наблюдения для каждой независимой полосы дальности:

$$\xi_m(t) \approx \sum_n s_{mn}(t, \mu_x, \mu_y) + \mathbf{n}_m(t) = \mathbf{S}_m(t, \mu_x, \mu_y) + \mathbf{n}_m(t), \quad (2)$$

где

$$\mathbf{S}_m(t, \mu_x, \mu_y) = g(t) \sum_n (G^0_{mn})^2 \mathbf{e}_{mn} \exp \left\{ -j \left(\Delta \varphi_{mn}(t) + \frac{4\pi}{\lambda} (\Delta r_{h_{m-1} n-1} + \cos(\theta_m)(\mu_y \Delta y + \mu_x \Delta x)) \right) \right\}$$

– модель принимаемого сигнала;

$$\mathbf{S}_m(t, \mu_x, \mu_y) = \left\| S_m^{22}(t, \mu_x, \mu_y), S_m^{2\theta}(t, \mu_x, \mu_y), S_m^{6\theta}(t, \mu_x, \mu_y) \right\|;$$

$$g(t) = \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} [r_{00}(0, t)] \right\} \text{ – множитель, учитывающий фазовую модуляцию сигнала относительно } (y_0, x_0);$$

G^0_{mn} – функции, описывающие ДНА (телескопический обзор);

$\Delta \varphi_{mn}(t)$ – фазовая траектория, определяемая относительным изменением наклонной дальности до (m, n) -ой точки, в случае «ровной» поверхности земли;

$$\mathbf{e}_{mn} = \left\| e_{mn}^{22} \ e_{mn}^{2\theta} \ e_{mn}^{6\theta} \right\|^T \text{ – вектор-столбец дискретной модели РЛР; } \mathbf{n}_m(t) \text{ – реализация}$$

шума (БГШ).

Параметрами оценивания являются уклоны поверхности в ортогональных направлениях μ_x, μ_y . Два вектора оцениваемых параметров, определяются

$$\text{следующим образом: } \boldsymbol{\mu}_{xm} = \left\| \mu_{xm0} \dots \mu_{xmN} \right\|^T, \quad \boldsymbol{\mu}_{ym} = \left\| \mu_{ym0} \dots \mu_{ymN} \right\|^T.$$

Предположим, что эти параметры на всём интервале наблюдения неизменны во времени, и описывающее их поведение разностное уравнение $\boldsymbol{\mu}_{xm}(t_k) = \boldsymbol{\mu}_{xm}(t_{k-1})$,

$$\boldsymbol{\mu}_{ym}(t_k) = \boldsymbol{\mu}_{ym}(t_{k-1}) \text{ определяет уравнение наблюдения: } \xi(t) = \mathbf{s}(t, \boldsymbol{\mu}_x, \boldsymbol{\mu}_y) + \mathbf{n}(t).$$

Векторы оцениваемых параметров $\boldsymbol{\mu}_x, \boldsymbol{\mu}_y$ нелинейно связаны с наблюдением $\xi(t)$,

поэтому воспользуемся методами марковской теории оптимального нелинейного оценивания случайных процессов [4,5], а именно методом текущей линеаризации уравнения наблюдения. В этом случае оценку параметров можно произвести следующим образом:

$$\hat{\boldsymbol{\mu}}_{xm}(t_k) \approx \bar{\boldsymbol{\mu}}_{xm}(t_k) + \left(\frac{\mathbf{R}_{\mu x k}}{N_0} \right) \left\{ \mathbf{P}_1(t, \bar{\boldsymbol{\mu}}_{xm}(t_k)) - \mathbf{Q}_1(t, \bar{\boldsymbol{\mu}}_{xm}(t_k)) \right\}, \quad (3)$$

$$\hat{\boldsymbol{\mu}}_{2yj}(t_k) \approx \bar{\boldsymbol{\mu}}_{yn}(t_k) + \left(\frac{\mathbf{R}_{\mu yk}}{N_0} \right) \left\{ \mathbf{P}_2(t, \bar{\boldsymbol{\mu}}_{yn}(t_k)) - \mathbf{Q}_2(t, \bar{\boldsymbol{\mu}}_{yn}(t_k)) \right\},$$

где $\mathbf{P}_1(t, \bar{\boldsymbol{\mu}}_{xm}(t_k)) = \int_{t_{k-1}}^{t_k} \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\mu}_{xm}} \bar{\mathbf{S}}(t, \boldsymbol{\mu}_x, \boldsymbol{\mu}_y)^* \times \boldsymbol{\xi}(t)^T dt$; $\mathbf{P}_2(t, \bar{\boldsymbol{\mu}}_{yn}(t_k)) = \int_{t_{k-1}}^{t_k} \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\mu}_{yn}} \bar{\mathbf{S}}(t, \boldsymbol{\mu}_x, \boldsymbol{\mu}_y)^* \times \boldsymbol{\xi}(t)^T dt$;

$$\mathbf{Q}_1(t, \bar{\boldsymbol{\mu}}_{xm}(t_k)) = \int_{t_{k-1}}^{t_k} \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\mu}_{xm}} \bar{\mathbf{S}}(t, \boldsymbol{\mu}_x, \boldsymbol{\mu}_y)^* \times \bar{\mathbf{S}}(t, \boldsymbol{\mu}_x, \boldsymbol{\mu}_y)^T dt$$
;

$$\mathbf{Q}_2(t, \bar{\boldsymbol{\mu}}_{yn}(t_k)) = \int_{t_{k-1}}^{t_k} \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\mu}_{yn}} \bar{\mathbf{S}}(t, \boldsymbol{\mu}_x, \boldsymbol{\mu}_y)^* \times \bar{\mathbf{S}}(t, \boldsymbol{\mu}_x, \boldsymbol{\mu}_y)^T dt$$
;

$$\mathbf{R}_{\mu xk}^{-1} = (\mathbf{R}_{\mu xk-1} + \mathbf{D}_{\mu})^{-1} + N_0^{-1} \int_{t_{k-1}}^{t_k} \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\mu}_{xm}} \bar{\mathbf{S}}(t, \boldsymbol{\mu}_x, \boldsymbol{\mu}_y)^* \times \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\mu}_{xm}} \bar{\mathbf{S}}(t, \boldsymbol{\mu}_x, \boldsymbol{\mu}_y)^T dt$$
;

$$\mathbf{R}_{\mu yk}^{-1} = (\mathbf{R}_{\mu yk-1} + \mathbf{D}_{\mu})^{-1} + N_0^{-1} \int_{t_{k-1}}^{t_k} \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\mu}_{yn}} \bar{\mathbf{S}}(t, \boldsymbol{\mu}_x, \boldsymbol{\mu}_y)^* \times \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\mu}_{yn}} \bar{\mathbf{S}}(t, \boldsymbol{\mu}_x, \boldsymbol{\mu}_y)^T dt$$
;

\mathbf{D}_{μ} – матрица дисперсий формирующих шумов;

$$\bar{\mathbf{S}}(t, \boldsymbol{\mu}_x, \boldsymbol{\mu}_y) = \left\| \bar{S}_0(t, \boldsymbol{\mu}_x, \boldsymbol{\mu}_y)^{z_0} \dots \bar{S}_M(t, \boldsymbol{\mu}_x, \boldsymbol{\mu}_y)^{z_M} \bar{S}_0(t, \boldsymbol{\mu}_x, \boldsymbol{\mu}_y)^{e_0} \dots \bar{S}_M(t, \boldsymbol{\mu}_x, \boldsymbol{\mu}_y)^{e_M} \bar{S}_0(t, \boldsymbol{\mu}_x, \boldsymbol{\mu}_y)^{e_0} \dots \bar{S}_M(t, \boldsymbol{\mu}_x, \boldsymbol{\mu}_y)^{e_M} \right\|^T$$
 –

экстраполированная на момент t_k модель принимаемого сигнала.

Упрощенный субоптимальный вариант алгоритма оценивания, полученный из выражения (6), имеет вид:

$$\hat{\boldsymbol{\mu}}_{ymn} \approx \left(\frac{\lambda}{4\pi\Delta y \cos(\theta_m)} \right) \arg \left(\sum_{mm} \sum_{nn} \hat{\mathbf{e}}_{mm}^* \hat{\mathbf{e}}_{mm+1}^T \exp \{ j4\pi\Delta y \sin(\theta_m) / \lambda \} \right), \quad (4)$$

$$\hat{\boldsymbol{\mu}}_{xmn} \approx \left(\frac{\lambda}{4\pi\Delta x \cos(\theta_m)} \right) \arg \left(\sum_{mm} \sum_{nn} \hat{\mathbf{e}}_{mm}^* \hat{\mathbf{e}}_{mm+1}^T \right),$$

где $mm = (m - MM/2) \dots (m + MM/2)$, $nn = (n - NN/2) \dots (n + NN/2)$; MM, NN –

количество элементов усреднения по дальности и азимуту; $\hat{\mathbf{e}}_{mn} = \left\| \hat{e}_{mn}^{z_0} \hat{e}_{mn}^{z_0} \hat{e}_{mn}^{e_0} \right\|^T$ –

вектор-столбец оценки РЛР. Алгоритм (4) фактически сводится к нахождению усредненной оценки разности фаз между соседними элементами комплексного изображения земной поверхности сначала по дальности, а затем в ортогональном направлении.

Другой метод измерения уклона поверхности основан на относительном изменении фазы при изменении длины ЭМВ в одном или смежных наблюдениях. Рассмотрим

парную корреляцию сигналов через коэффициент частотной корреляции (КЧК): $r_e^{\lambda_1 \lambda_2} = \overline{e_{mn}^{\lambda_1} e_{mn}^{\lambda_2*}} / D_e$, где D_e – дисперсия коэффициента рассеяния.

При боковом обзоре:

$$r_e^{\lambda_1 \lambda_2} \approx \sin\left(2\pi\left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 \lambda_0}\right) \frac{\delta r}{\sin(\theta_m)}\right) / \left(2\pi\left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 \lambda_0}\right) \frac{\delta r}{\sin(\theta_m)}\right).$$

Для измерения смещения наклонной дальности до фазового центра сигнала, отражённого от элемента разрешения изотропной поверхности, парные сигналы должны иметь высокую корреляцию, а это накладывает ограничение на допустимое частотное смещение ЭМВ: $\Delta f \leq \frac{\Delta f_{cn} \sin(\theta_m)}{4}$, где $\Delta f_{cn} \approx \frac{c}{\delta r}$ – ширина спектра зондирующего сигнала.

В этом случае представим оцениваемые параметры $\mu = (\mu_y + \mu_x)$ в виде вектора-столбца для каждой из M полосок дальности, а уравнение наблюдения также представим в векторном виде:

$$\xi_m(t) = \mathbf{s}_m(t, \mu) + \mathbf{n}_m(t),$$

где $\xi_m(t) = \left\| \xi_m(t)^{22 \lambda_1} \dots \xi_m(t)^{22 \lambda_Q} \xi_m(t)^{26 \lambda_1} \dots \xi_m(t)^{26 \lambda_Q} \xi_m(t)^{66 \lambda_1} \dots \xi_m(t)^{66 \lambda_Q} \right\|^T$ – вектор-функция наблюдаемых сигналов на момент времени t при различных длинах ЭМВ $\lambda_q, q = 1 \dots Q$. Как и в предыдущем случае, воспользуемся квазилинейным алгоритмом фильтрации:

$$\hat{\mu}(t_k) \approx \bar{\mu}(t_k) + \left(\frac{\mathbf{R}_\mu}{N_0} \right) \{ \mathbf{P}(t, \bar{\mu}(t_k)) - \mathbf{Q}(t, \bar{\mu}(t_k)) \}, \quad (5)$$

где $\mathbf{P}(t, \bar{\mu}(t_k)) = \int_{t_{k-1}}^{t_k} \frac{\partial}{\partial \mu} \bar{\mathbf{S}}(t, \bar{\mu}(t_k))^* \times \xi(t)^T dt$; $\mathbf{Q}(t, \bar{\mu}(t_k)) = \int_{t_{k-1}}^{t_k} \frac{\partial}{\partial \mu} \bar{\mathbf{S}}(t, \bar{\mu}(t_k))^* \times \bar{\mathbf{S}}(t, \bar{\mu}(t_k))^T dt$;

$$\mathbf{R}_\mu^{-1} = (\mathbf{R}_{\mu-1})^{-1} + \frac{2}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k} \frac{\partial}{\partial \mu} \bar{\mathbf{S}}(t, \bar{\mu}(t_k))^* \times \frac{\partial}{\partial \mu} \bar{\mathbf{S}}(t, \bar{\mu}(t_k))^T dt.$$

Из (5) в случае наблюдения за земной поверхностью на различных несущих частотах можно получить субоптимальный алгоритм оценки уклона земной поверхности:

$$\hat{\mu}_{mn} = \hat{\mu}_{ymn} + \hat{\mu}_{xmn} \approx ((\lambda_1 - \lambda_2) / (\pi \delta r \operatorname{ctg}(\theta_m) \lambda_1 \lambda_2)) \arg \left(\sum_{mn} \sum_{nn} \hat{e}_{mn}^{\lambda_1} \hat{e}_{mn}^{*\lambda_2} \right), \quad (6)$$

Экспериментальная проверка алгоритмов обработки сигналов, отраженных от земной поверхности со сложным рельефом, проводилась по радиоголограммам, записанным на борту космической системы радиолокационного наблюдения КА «Алмаз-1».

На рис. 2 представлено радиолокационное изображение вулканического острова и, в том же масштабе, амплитудного представления отклонения дальности до фазового центра элемента (матрицы элементов) разрешения, где яркость изображения соответствует величине фазового отклонения.

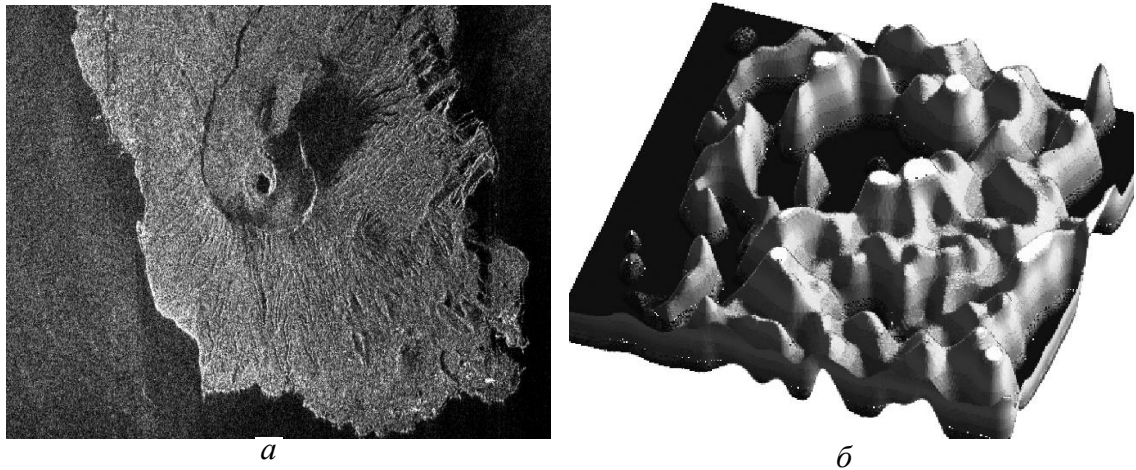


Рис. 2. Радиолокационные изображения вулканического острова (а) и амплитудного представления отклонения дальности до фазового центра элемента (матрицы элементов) разрешения (б)

Эта матрица фазовых отклонений получена путем совместной обработки пары комплексных изображений на смещенных несущих частотах (смещение по частоте меньше четверти ширины спектра сигнала), в соответствии с алгоритмом (б).

Пара комплексных изображений на смещенных несущих частотах получена путем «расщепления» спектра импульсного сигнала.

Экспериментальная проверка показала работоспособность синтезированных алгоритмов оценки уклонов земной поверхности.

Литература

1. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В.Н. Антипов, В.Т. Горяинов, А.Н. Кулин и др.; Под ред. В.Т. Горяинова. – М.: Радио и связь, 1988.
2. Дворецкий Е.М., Коваленко С.А., Суворов С.Г. Методика создания цифровых моделей рельефа повышенной точности // Информация и космос. – 2005. – № 1. – С.52-54.
3. Бабокин М.И. Алгоритмы оценки относительного рельефа местности в многопозиционных комплексах РСА космического базирования // Радиотехника. – 2009. – № 7.
4. Ярлыков М.С., Швецов В.И. Учет рельефа подстилающей поверхности при обработке радиосигналов в бортовых комплексных радионавигационных системах для определения скорости и дальности // Радиотехника. – 1994. – №2.
5. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. – М.: Радио и связь, 2004.