Радиофизика и радиоастрономия, 2001, т. 6, №4, стр. 310-316

УДК 621.396.96:621.391.26

# Случайная погрешность определения рельефа поверхности по ее радиояркости

И. А. Дулова, Ю. В. Корниенко

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,*
*61085, г. Харьков, ул. Академика Проскуры, 12*
*E-mail: yukor@ire.kharkov.ua*

*Статья поступила в редакцию 18 июля 2001 г.*

Исследованы статистические свойства случайной погрешности определения рельефа поверхности по значениям ее яркости, полученным ранее предложенным методом при локации из различных направлений. Найдены выражения для спектральной плотности погрешности высоты и наклона. Показано, что для гладкого рельефа существует автокорреляционная функция погрешности высоты с той же степенью гладкости, что и автокорреляционная функция рельефа.

Досліджено статистичні властивості випадкової похибки визначення рельєфу поверхні за значеннями її радіо яскравості, одержаними раніше запропонованим методом у процесі локації з різних напрямків. Знайдено вирази для спектральної густини похибки висоти та нахилу. Показано, що для гладкого рельєфу існує автокореляційна функція похибки висоти з тим же ступенем гладкості, що й автокореляційна функція рельєфу.

В работе [1] был развит метод определения рельефа поверхности по серии ее оптических или радиоизображений. В [2] было показано, как этот метод может быть применен для определения рельефа поверхности по ее радиояркости, измеренной с помощью радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА). Настоящая работа является продолжением этих исследований и посвящена вопросу о случайных погрешностях данного метода.

## 1. Краткая история вопроса

Зависимость яркости элемента поверхности от его ориентации по отношению к падающему излучению делает возможным определение рельефа этой поверхности по ее наклонам в каждой точке исследуемого участка. Эти наклоны можно найти, измеряя яркость поверхности в каждой точке и используя заранее известную зависимость яркости элементарной площадки от ее ориентации. Одной из первых работ, в которой эта идея была предложена в ее простейшем виде, была работа ван Диггелена [3]. В [4] была показана некорректность задачи, поставленной в [3], и изложена математически корректная постановка задачи определения рельефа поверхности по ее полю наклонов, основанная на статистическом подходе. Позднее в [1] был сформулирован метод определения рельефа поверхности по набору ее изображений, полученных при различных направлениях освещения и наблюдения. Применимость этого метода не зависит от длины волны излучения, поэтому в дальнейшем он условно называется фотометрическим, даже если речь идет о его применении за пределами оптического диапазона. В [2] было показано, как этот метод может быть эффективно применен в радиодиапазоне и какова специфика его применения в случае, когда исходные изображения поверхности формируются с помощью радиолокатора с синтезированной апертурой. Результатом этих исследований явился оптимальный фильтр, переводящий исходный набор радиоизображений в функции, описывающие зависимость высоты и радиооптических параметров участка поверхности от координат. Выражение для этого фильтра получено в линейном приближении в предположении малости наклонов поверхности и вариаций ее радиооптических параметров по исследуемому участку.

В [5] путем численного моделирования было проведено экспериментальное исследование погрешностей определения рельефа по серии радиоизображений поверхности. С этой целью была создана компьютерная модель рельефа кратерированной поверхности лунного типа, затем моделировалось формирование его изображений с помощью РСА и замытие этих изображений фазовыми искажениями в среде распространения и другими факторами, после чего к этому изображению добавлялся шум, моделирующий когерентный шум и шум приемника. Полученные изображения затем использовались в качестве исходных данных для определения рельефа поверхности предложенным в [1, 2] методом. Найденный таким путем рельеф сравнивался с заранее известным истинным рельефом поверхности, и строилась карта погрешностей. Эти исследования подтвердили работоспособность метода и приемлемую величину его погрешностей. Несмотря на это, желательно провести теоретическое исследование погрешностей метода и получить для них аналитические выражения.

## 2. Происхождение погрешностей при определении рельефа поверхности по ее радиояркости

Погрешности, возникающие при определении рельефа "фотометрическим" методом [1, 2], имеют двоякое происхождение. Во-первых, прием сигнала сопровождается шумами различного происхождения. Это порождает случайную погрешность в конечном результате, тем большую, чем выше уровень шума. Во-вторых, в [1, 2] уравнение, определяющее оптимальный фильтр, решено лишь приближенно, что порождает систематическую погрешность в конечном результате тем большую, чем больше наклоны поверхности и вариации ее параметров. В настоящей работе исследуется вопрос о случайной погрешности "фотометрического" метода. При этом, чтобы избежать громоздких выкладок, рассматривается упрощенная задача определения рельефа поверхности, когда ее радиооптические параметры считаются известными и постоянными по всему исследуемому району поверхности. Как будет видно из дальнейшего, случайная погрешность определения рельефа, обусловленная шумом, в свою очередь складывается из двух слагаемых, одно из которых связано с прямым влиянием шума и линейно зависит от его реализаций, имевших место в конкретном эксперименте, а другое определяется только статистикой шума, но не зависит от его конкретной реализации.

## 3. Формулировка задачи определения рельефа

При рассмотрении будем считать, как и в [1, 2], что выполняются следующие предположения. Искомый рельеф $H(\mathbf{r})$ (т. е. функция, описывающая зависимость высоты $H$ над некоторой средней плоскостью от декартовых координат $x, y$ на ней; $x, y$ являются компонентами двумерного вектора $\mathbf{r}$) представляет собой реализацию стационарного гауссова процесса со спектральной плотностью $1/\alpha(\mathbf{k})$, $\mathbf{k}$ – двумерный вектор пространственной частоты. Угол, под которым виден исследуемый участок поверхности из точки расположения радиолокатора, достаточно мал, чтобы направление на радиолокатор можно было приближенно считать одним и тем же во всех точках этого участка. Радиояркость элемента поверхности на $j$-ом изображении зависит от ориентации нормали $\mathbf{n}$ к нему по закону

$$I_j = F_j(\mathbf{n}),$$

где $F_j$ – известная функция, характеризующая свойства рассеивающей поверхности. Предполагая наклоны поверхности малыми, можно разложить $F_j(\mathbf{n})$ в ряд Тейлора по $\mathbf{n}$ в окрестности средней нормали к поверхности $\mathbf{n}_0$ и ограничиться первым членом разложения:

$$I_j = I_{0j} + \mathbf{c}_j(\mathbf{n} - \mathbf{n}_0).$$

Это соотношение с точностью до членов второго порядка малости можно переписать в виде

$$I_j = I_{0j} + \mathbf{c}_j\,\mathbf{t}(\mathbf{r}), \tag{1}$$

где

$$\mathbf{t}(\mathbf{r}) = \nabla H(\mathbf{r}) \;\; - \tag{2}$$

двумерный вектор наклона поверхности, $\nabla$ – двумерный градиент, а $\mathbf{c}_j$ – двумерная векторная константа, определяемая свойствами поверхности и геометрией эксперимента.

Каждая реализация рельефа $H(\mathbf{r})$ характеризуется своим значением априорной плотности вероятности

$$\rho_h(H) \cong \exp\left(-\int_{-\infty}^{\infty} \tilde{H}^*(\mathbf{k})\alpha(\mathbf{k})\tilde{H}(\mathbf{k})\mathrm{d}S_{\mathbf{k}}\right), \tag{3}$$

где $\mathrm{d}S_{\mathbf{k}}$ – элемент площади в частотной области. Аналогично для шума

$$\rho_n(N) \cong \exp\left(-\int_{-\infty}^{\infty} \tilde{N}^*(\mathbf{k})\beta(\mathbf{k})\tilde{N}(\mathbf{k})\mathrm{d}S_{\mathbf{k}}\right). \tag{4}$$

Здесь нормирующий множитель не играет существенной роли, поскольку в окончательный результат он не входит (поэтому он будет опущен и в дальнейших выкладках); $\tilde{H}(\mathbf{k})$ и $\tilde{N}(\mathbf{k})$ – фурье-образы соответственно рельефа и шума; $\beta(\mathbf{k})$ – величина, обратная спектральной плотности шума; звездочка означает комплексное сопряжение.

Экспериментально полученные реализации радиояркости $J_j(\mathbf{r})$ связаны с $I_j(\mathbf{r})$ соотношением

$$J_j(\mathbf{r}) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} g_j(\mathbf{r} - \mathbf{r}')I_j(\mathbf{r}')\mathrm{d}S_{\mathbf{r}'} + N_j(\mathbf{r}), \tag{5}$$

где $g_j(\mathbf{r} - \mathbf{r}')$ – ядро, описывающее замытие $j$-го изображения под действием фазовых искажений в среде распространения и других мешающих факторов; $\mathrm{d}S_{\mathbf{r}}$ – элемент площади в пространственной области; $N_j(\mathbf{r})$ – произвольная реализация стационарного аддитивного гауссова шума. Это соотношение для дальнейшего рассмотрения удобнее записать в частотном представлении, выполнив над обеими частями равенства преобразование Фурье:

$$\tilde{J}_j(\mathbf{k}) = \tilde{g}_j(\mathbf{k})\tilde{I}_j(\mathbf{k}) + \tilde{N}_j(\mathbf{k}).$$

Пусть имеется $m$ таких изображений, полученных из разных точек траектории полета летательного аппарата. Требуется найти наиболее вероятный вид рельефа.

## 4. Наиболее вероятный рельеф

Выражение для апостериорной плотности вероятности рельефа $H(\mathbf{r})$ получается из формулы Байеса [6] с учетом (3) – (5). В дальнейшем удобнее пользоваться логарифмом этого выражения, т. е. логарифмической функцией правдоподобия

$$L(H) = \int \tilde{H}^*(\mathbf{k})\alpha(\mathbf{k})\tilde{H}(\mathbf{k})\mathrm{d}S_{\mathbf{k}} +$$

$$+\sum_j \int [\tilde{J}_j(\mathbf{k}) - i\tilde{g}_j(\mathbf{k})\mathbf{c}_j\mathbf{k}\tilde{H}^*(\mathbf{k})]^*\beta(\mathbf{k}) \times$$

$$\times[\tilde{J}_j(\mathbf{k}) - i\tilde{g}_j(\mathbf{k})\mathbf{c}_j\mathbf{k}\tilde{H}^*(\mathbf{k})]\mathrm{d}S_{\mathbf{k}}.$$

Условие максимума этого функционала определяет наиболее вероятный рельеф $H_m(\mathbf{r})$ при данном наборе исходных изображений $J_j(\mathbf{r})$ $(j = 1, \ldots, m)$.

Приравнивая нулю производную функционала по $\tilde{H}(\mathbf{k})$, получим уравнение

$$\left[\alpha(\mathbf{k}) + \sum_j (\mathbf{kc}_j)^2 \tilde{g}_j^{\,*}(\mathbf{k})\tilde{g}_j(\mathbf{k})\beta(\mathbf{k})\right]\tilde{H}(\mathbf{k}) =$$

$$= i\sum_j \mathbf{kc}_j \tilde{g}_j^*(\mathbf{k})\beta(\mathbf{k})\tilde{J}_j(\mathbf{k}).$$

Его решение:

$$\tilde{H}_m(\mathbf{k}) = \left[\alpha(\mathbf{k}) + \sum_j (\mathbf{kc}_j)^2 \tilde{g}_j^{\,*}(\mathbf{k})\tilde{g}_j(\mathbf{k})\beta(\mathbf{k})\right]^{-1} \times$$

$$\times i\sum_j \mathbf{kc}_j \tilde{g}_j^*(\mathbf{k})\beta(\mathbf{k})\tilde{J}_j(\mathbf{k}). \qquad (6)$$

(Это выражение определяет оптимальный фильтр, переводящий наблюдаемую совокупность изображений $J_j(\mathbf{r})$ в наиболее вероятный рельеф $H_m(\mathbf{r})$. Оно является частным случаем результата, полученного в [1, 2], и совпадает с ним, если все радиооптические параметры считать константами.)

## 5. Случайная погрешность определения высоты

Пусть истинный рельеф описывается функцией $H_0(\mathbf{r})$. Тогда в результате эксперимента мы получим в соответствии с (1), (5) совокупность изображений

$$J_j(\mathbf{r}) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} g_j(\mathbf{r}-\mathbf{r}')\mathbf{c}_j\nabla H_0(\mathbf{r}')\mathrm{d}S_{r'} + N_j(\mathbf{r}), \qquad (7)$$

где $N_j(\mathbf{r})$ – независимые реализации шума регистрации. Воздействуя на $J_j(\mathbf{r})$ оптимальным фильтром (6), получим рельеф, наиболее вероятный при данной совокупности изображений, который в частотном представлении имеет вид

$$\tilde{H}_m(\mathbf{k}) = P(\mathbf{k})\tilde{H}_0(\mathbf{k}) + \sum_j Q_j(\mathbf{k})\tilde{N}_j(\mathbf{k}),$$

где

$$P(\mathbf{k}) = \frac{\sum (\mathbf{kc}_j)^2 \tilde{g}_j^*(\mathbf{k})\tilde{g}_j(\mathbf{k})}{\dfrac{\alpha(\mathbf{k})}{\beta(\mathbf{k})} + \sum_j (\mathbf{kc}_j)^2 \tilde{g}_j^*(\mathbf{k})\tilde{g}_j(\mathbf{k})}, \qquad (8)$$

$$Q(\mathbf{k}) = \frac{i\mathbf{kc}_j \tilde{g}_j^*(\mathbf{k})}{\dfrac{\alpha(\mathbf{k})}{\beta(\mathbf{k})} + \sum_j (\mathbf{kc}_j)^2 \tilde{g}_j^*(\mathbf{k})\tilde{g}_j(\mathbf{k})}. \qquad (9)$$

Таким образом, мы получили соотношение между истинным рельефом и статистической оценкой наиболее вероятного рельефа, в которое входят неизвестные реализации шума $N_j(\mathbf{r})$, приводящие к тому, что $\tilde{H}_m(\mathbf{k})$ не равен $\tilde{H}_0(\mathbf{k})$. Разность

$$\delta(\mathbf{r}) = H_m(\mathbf{r}) - H_0(\mathbf{r}) \qquad (10)$$

является погрешностью определения рельефа, случайный характер которой обусловлен влиянием входящих в (7) реализаций шума $N_j(\mathbf{r})$ и случайным характером искомого рельефа (который тоже вносит вклад в погрешность за пределами полосы пропускания фильтра). Записывая (10) в частотном представлении и подставляя в него выражения (1), (7), получим

$$\tilde{\delta}(\mathbf{k}) = (P(\mathbf{k})-1)\tilde{H}_0(\mathbf{k}) + \sum Q_j(\mathbf{k})\tilde{N}_j(\mathbf{k}). \qquad (11)$$

Из этого выражения видно, что случайная погрешность определения рельефа складывается из двух слагаемых существенно различной природы. Второе слагаемое линейно зависит от реализации шума и по сути представляет собой шум, пропущенный через фильтр, который формирует рельеф из исходных изображений. Первое же слагаемое происходит от самого сигнала, линейно выражается через него и связано со сглаживающим характером формирующего фильтра. Оба слагаемых зависят от частотной характеристики фильтра, а значит от статистических свойств рельефа и шума. Однако первое слагаемое не зависит от конкретных реализаций шума $N_j(\mathbf{r})$, а второе – от истинного рельефа $H_0(\mathbf{r})$.

Заметим, что сказанное относится к случаю, когда погрешность определяется для статистического ансамбля реализаций рельефа. Если же экспериментатор имеет дело только с единственной реализацией рельефа, первое слагаемое остается одним и тем же во всех экспериментах и потому становится составной частью систематической погрешности определения рельефа.

## 6. Статистические свойства погрешности определения высоты

Поскольку $H_0(\mathbf{r})$ и $N_j(\mathbf{r})$ являются стационарными гауссовыми процессами, это же, в силу (11), относится и к $\delta(\mathbf{r})$, откуда следует, что значения $\tilde{\delta}(\mathbf{k})$ для разных значений $\mathbf{k}$ не коррелируют между собой. Поэтому статистические свойства погрешности $\delta(\mathbf{r})$ полностью характеризуются функцией

$$\tilde{D}(\mathbf{k}) = \overline{\tilde{\delta}^*(\mathbf{k})\,\tilde{\delta}(\mathbf{k})},$$

где черта означает усреднение по ансамблю реализаций сигнала и шума. Подставляя в это выражение $\tilde{\delta}(\mathbf{k})$ из (11) и принимая во внимание, что реализации шума $\tilde{N}_j(\mathbf{k})$ не коррелируют с рельефом и друг с другом, получим

$$\tilde{D}(\mathbf{k}) = (P(\mathbf{k})-1)^2\,\overline{\tilde{H}_0^*(\mathbf{k})\tilde{H}_0(\mathbf{k})} + $$
$$+\sum_j Q_j^*(\mathbf{k})\,Q_j(\mathbf{k})\,\overline{\tilde{N}_j^*(\mathbf{k})\tilde{N}_j(\mathbf{k})}. \qquad (12)$$

Это выражение представляет собой спектральную плотность погрешности $\delta(\mathbf{r})$. Подставляя в первое и второе слагаемые вместо усредненных значений соответственно $1/\alpha(\mathbf{k})$ и $1/\beta(\mathbf{k})$, с учетом (8), (9) получим

$$\tilde{D}(\mathbf{k}) = \frac{1}{\alpha(\mathbf{k})+\beta(\mathbf{k})\sum_j (\mathbf{kc}_j)^2\,\tilde{g}_j^*(\mathbf{k})\tilde{g}_j(\mathbf{k})}. \qquad (13)$$

Функция $D(\mathbf{r})$, фурье-образом которой является $\tilde{D}(\mathbf{k})$, представляет собой автокорреляционную функцию погрешности $\delta(\mathbf{r})$. Существование этой функции обеспечивается тем, что для гладкого рельефа первое слагаемое в знаменателе (13) неограниченно возрастает при стремлении $\mathbf{k}$ к бесконечности. Поскольку второе слагаемое в знаменателе обычно быстро убывает на бесконечности из-за ограниченной пространственной полосы пропускания тракта (что выражается быстрым убыванием $\tilde{g}(\mathbf{k})$ с ростом модуля $\mathbf{k}$), функция $\tilde{D}(\mathbf{k})$ стремится на бесконечности к нулю по тому же закону, что и спектральная плотность рельефа (стремление последней к нулю на бесконечности предполагается из соображений регулярности истинного рельефа). Отсюда, в частности, следует, что $D(\mathbf{r})$ обладает той же степенью гладкости (имеет столько же производных), что и автокорреляционная функция рельефа.

Анализируя (12), легко убедиться, что, как и следовало ожидать, на множестве произвольных частотных характеристик фильтра, формирующего рельеф из исходных изображений, дисперсия погрешности $\tilde{D}(\mathbf{k})$ достигает минимума при всех $\mathbf{k}$, когда этот фильтр определяется равенством (6). Таким образом, фильтр (6), будучи оптимальным в том смысле, что он дает наиболее вероятный рельеф, является в то же время оптимальным и в том смысле, что он обеспечивает минимум среднеквадратичной погрешности определения каждой фурье-компоненты рельефа, а следовательно и математического ожидания интеграла от квадрата погрешности по всему району.

## 7. Погрешность определения наклонов

Поскольку второе слагаемое в знаменателе (13) при $\mathbf{k}\to 0$ обращается в нуль, поведение $\tilde{D}(\mathbf{k})$ в нуле определяется поведением в нуле функции $\alpha(\mathbf{k})$. Если последняя стремится к нулю при $\mathbf{k}\to 0$, $\tilde{D}(\mathbf{k})$ в нуле стремится к бесконечности, что приводит к бесконечно большой дисперсии погрешности $\delta(\mathbf{r})$ в каждой точке $\mathbf{r}$. Такой результат является вполне естественным, так как обсуждаемый метод определения рельефа основан на связи между рельефом и полем наклонов поверхности и не дает информации о значениях абсолютной высоты поверхности. Поэтому вся информация об абсолютной высоте, которая содержится в конечном результате, происходит от априорной информации, выражаемой величиной $\alpha(0)$, и исчезает с обращением $\alpha(0)$ в нуль.

В качестве величины, лучше характеризующей точность метода, можно использовать погрешность разности высот в точках $\mathbf{r}$ и $\mathbf{r}'$, т. е. $\delta(\mathbf{r})-\delta(\mathbf{r}')$, дисперсия которой в силу однородности рассматриваемой задачи зависит только от $\mathbf{r}-\mathbf{r}'$. Однако здесь мы воспользуемся другой характеристикой, непосредственно связанной с существом метода – ковариационной матрицей наклона элемента поверхности.

Дифференцируя (10) по радиусу-вектору точки на исследуемой поверхности, получим выражение для двумерного вектора погрешности наклона поверхности в точке $\mathbf{r}$:

$$\varepsilon(\mathbf{r})=\nabla H_m(\mathbf{r})-\nabla H_0(\mathbf{r})=\nabla\delta(\mathbf{r}).$$

Фурье-образ этой погрешности согласно (11) имеет вид:

$$\varepsilon(\mathbf{r})=\nabla H_m(\mathbf{r})-\nabla H_0(\mathbf{r})=\nabla\delta(\mathbf{r}). \qquad (14)$$

Статистические свойства этой погрешности характеризуются ковариационной матрицей $\|C\|$, которая представляет собой результат усреднения по ансамблю внешнего произведения погрешности на саму себя. Компоненты ее фурье-образа с индексами $\mu$, $\nu$ $(\mu,\nu=1,2)$ легко получить из (14) по аналогии с (13):

$$\tilde{C}_{\mu\nu}(\mathbf{k})=\frac{k_\mu k_\nu}{\alpha(\mathbf{k})+\beta(\mathbf{k})\sum_j(\mathbf{k}\mathbf{c}_j)^2\tilde{g}_j^*(\mathbf{k})\tilde{g}_j(\mathbf{k})}. \qquad (15)$$

Автокорреляционная функция погрешностей наклона $C_{\mu\nu}(\mathbf{r}-\mathbf{r}')$, фурье-образом которой является $\tilde{C}_{\mu\nu}(\mathbf{k})$, существует, если существует такая же функция для наклонов исследуемой поверхности. Это видно из того, что при $\mathbf{k}\to 0$ второе слагаемое в знаменателе (15) стремится к нулю и выражение (15) асимптотически переходит в фурье-образ автокорреляционной функции наклонов исследуемой поверхности.

Если спектральная плотность пространственного шума конечна в нуле, выражение (15) также конечно в нуле и имеет конечный предел при $\alpha(\mathbf{k})\to 0$, откуда следует, что и в случае полного отсутствия априорной информации о значениях абсолютной высоты автокорреляционая функция погрешности наклона $\tilde{C}_{\mu\nu}(\mathbf{k})$ является адекватной характеристикой точности метода.

Матрица с элементами $C_{\mu\nu}(\mathbf{r})$ при $\mathbf{r}=0$ является корреляционной матрицей компонент вектора наклона в произвольной точке поверхности. Ее след,

$$\tilde{C}=\int\frac{\mathbf{k}^2}{\alpha(\mathbf{k})+\beta(\mathbf{k})\sum_j(\mathbf{k}\mathbf{c}_j)^2\tilde{g}_j^*(\mathbf{k})\tilde{g}_j(\mathbf{k})}\mathrm{d}S_{\mathbf{k}},$$

(интегрирование ведется по всей частотной плоскости) представляет собой дисперсию погрешности определения наклона элемента исследуемой поверхности.

## 8. Заключительные замечания

Обсуждаемый метод определения рельефа позволяет находить абсолютные значения наклона поверхности в каждой точке и относительные значения высоты поверхности, отсчитываемые от нулевого уровня, который должен быть заранее известен. Как уже было сказано, эксперимент не дает информации о значении нулевой фурье-компоненты рельефа, в результате дисперсия погрешности этой компоненты определяется только априорной информацией и при ее отсутствии обращается в бесконечность.

Даже для поверхности с нормальным распределением значений высоты представление о рельефе как о реализации стационарного гауссова процесса может быть не вполне соответствующим действительности. Более приемлемым может оказаться представление о рельефе как о реализации винеровского случайного процесса. Изучение статистических свойств погрешности в этом случае должно стать предметом дальнейших исследований.

Авторы выражают благодарность Ю. Г. Шкуратову за полезные замечания.

## Литература

1. Ю. В. Корниенко, И. А. Дулова, Нгуен Суан Ань. Кинематика и физика небесных тел. 1994, **10**, №5, с. 69-76.
2. Ю. В. Корниенко, Нгуен Суан Ань. Радиофизика и электроника. Сб. научн. трудов. ИРЭ НАН Украины. 1996, №1, с. 129-133.
3. I. Diggelen. B.A.N. 1951, No. **11**, pp. 283-423.
4. В. Г. Парусимов, Ю. В. Корниенко. Астрометрия и астрофизика. 1973, №19, с. 20-24.
5. I. A. Dulova, Yu. V. Kornienko, Nguyen Xuan Anh, V. V. Pugach. The 30th Microsymposium on Comparative Planetology. Moscow, Vernadsky-Brown Microsymp. 30, Oct. 8-9, 1999, pp. 15-16.
6. М. Лоэв. Теория вероятностей. Москва, ИЛ. 1962, 719 с.

## Random Error of Surface Relief Reconstruction by Radio Brightness

**I. A. Dulova, Yu. V. Kornienko**

Previously a method has been developed for the reconstruction of the surface relief by its radio brightness obtained by location from various directions. In the present paper the statistical properties of a random error of the relief reconstruction are studied. The expressions for the spectral density of the altitude and slope errors are obtained, and it is shown that for a smooth relief there exists the autocorrelation function of the altitude error having the same rate of smoothness as that of the relief.