

УДК 621.396

В.К. ВОЛОСЮК, К.Н. ЛЁВКИНА

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МЕЛКОМАСШТАБНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПАССИВНОМ ДИСТАНЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ**

Для модели мелкомасштабной поверхности, удовлетворяющей приближению малых возмущений, исследуются погрешности оценки параметров поверхности на основе анализа диагональных элементов матрицы, обратной к информационной матрице Фишера. Приводятся результаты теоретических исследований и математического моделирования.

дистанционное зондирование, коэффициент излучения, яркостная температура, угол визирования, потенциальная погрешность

Введение

При исследовании электрофизических параметров Земли очень важным является правильный выбор электродинамической модели поверхности. Это позволяет учесть определенную априорную информацию и дает возможность получить оценки диэлектрической проницаемости, проводимости, геометрических и других характеристиках поверхности.

Большинство поверхностей в той или иной степени шероховаты. К настоящему времени наиболее полно разработана модель поверхности, удовлетворяющей приближению малых возмущений [1, 2]:

$$\begin{aligned} h(\vec{r}) &\ll \lambda; \\ \Delta_{\perp} h &\ll 1, \end{aligned} \quad (1)$$

где h – высота; $\vec{r}(x, y)$ – координаты подстилающей поверхности; λ – длина волны электромагнитного поля; $\Delta_{\perp} = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$ – поперечный оператор дифференцирования.

Изучение и анализ электродинамической модели мелкомасштабной поверхности, а также оценка ее параметров представляет значительный интерес и является важным научным и практическим заданием, связанным с целым комплексом проблем мониторин-

га окружающей среды (изучением природных ресурсов, экологической защитой, сейсморазведкой и др.).

При оценках параметров поверхности обычно используется классический подход, основанный на решении системы нелинейных уравнений с учетом погрешностей, обусловленных как влиянием внешних и внутренних помех при приеме излучения, так и неадекватностью применяемых моделей [1 – 4].

Недостатком такого подхода является то, что эти задачи без учета характера оптимальной обработки сигналов и характера ошибок, соответствующих заданным критериям оптимальности, не дают полного ответа относительно поведения качественных показателей искомых оценок при различных условиях проведения измерений.

Целью данной работы является исследование предельных погрешностей оценок параметров электродинамической модели мелкомасштабной поверхности, являющихся качественными показателями оптимальной обработки принимаемого излучения в рамках метода максимального правдоподобия. Именно эти исследования позволяют определить те условия проведения измерений, которые смогут обеспечить либо минимальные, либо заданные погрешности реальных измерений.

Характеристики собственного радиоизлучения исследуемой среды

В пассивных РТС дистанционного зондирования регистрируется собственное радиотепловое излучение Земли. При этом основным анализируемым параметром является яркостная температура поверхности. Яркостная температура без учета подсветки атмосферы определяется выражением [5]

$$T_y = \chi(\theta, \dot{\epsilon}, \sigma) T_o, \quad (2)$$

где $\chi(\theta, \dot{\epsilon}, \sigma)$ — коэффициент излучения поверхности (θ — угол визирования, $\dot{\epsilon}$ — комплексная диэлектрическая проницаемость поверхности, σ — среднеквадратическая высота неровностей поверхности); T_o — термодинамическая температура поверхности.

Коэффициент излучения поверхности определяется выражением [4]

$$\chi(\theta, \dot{\epsilon}, \sigma) = 1 - (K_{FB(\Gamma)}(\theta, \dot{\epsilon}) + K_{B(\Gamma)}(\theta, \lambda, \dot{\epsilon}, \sigma)), \quad (3)$$

где коэффициенты Френеля для вертикальной (горизонтальной) поляризации равны:

$$K_{FB}(\theta, \dot{\epsilon}) = \frac{|\dot{\epsilon} \cos(\theta) - \sqrt{\dot{\epsilon} - \sin^2(\theta)}|^2}{|\dot{\epsilon} \cos(\theta) + \sqrt{\dot{\epsilon} - \sin^2(\theta)}|^2}; \quad (4)$$

$$K_{F\Gamma}(\theta, \dot{\epsilon}) = \frac{|\cos(\theta) - \sqrt{\dot{\epsilon} - \sin^2(\theta)}|^2}{|\cos(\theta) + \sqrt{\dot{\epsilon} - \sin^2(\theta)}|^2}; \quad (5)$$

$\dot{\epsilon}$ — комплексная диэлектрическая проницаемость поверхности; θ — угол визирования.

Комплексная диэлектрическая проницаемость поверхности определяется следующим образом [1]:

$$\dot{\epsilon} = \epsilon r - i60\lambda g = \epsilon r - j\epsilon i, \quad (6)$$

где $\epsilon r, \epsilon i$ — действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости; λ — длина волны; g — удельная проводимость поверхности.

Интегральные коэффициенты рассеяния $K_{B(\Gamma)}(\theta, \dot{\epsilon}, \sigma)$ для вертикальной и горизонтальной поляризации соответственно равны [4]:

$$K_B(\theta, \lambda, \dot{\epsilon}, \sigma) = 16\pi \cos^2(\theta) \left(\frac{2\pi\sigma}{\lambda} \right)^2 \times \left| \frac{(\dot{\epsilon} - 1)}{(\cos(\theta) + \sqrt{\dot{\epsilon} - \sin^2(\theta)})^2} \right|^2; \quad (7)$$

$$K_\Gamma(\theta, \lambda, \dot{\epsilon}, \sigma) = 16\pi \cos^2(\theta) \left(\frac{2\pi\sigma}{\lambda} \right)^2 \times \left| \frac{(\dot{\epsilon} - 1) [\dot{\epsilon} \sin^2(\theta) - \dot{\epsilon} + \sin^2(\theta)]}{(\dot{\epsilon} \cos(\theta) + \sqrt{\dot{\epsilon} - \sin^2(\theta)})^2} \right|^2. \quad (8)$$

Выражение под знаком модуля (8) соответствует случаю рассеяния «вперед» и узкой индикатрисе [6]. В случае обратного рассеяния в числителе знак $\dot{\epsilon}$ и $\sin(\theta)$ следует изменить на обратный [1].

В соответствии с представленными формулами проведено моделирование. Расчеты выполнены в предположении, что исследуются три типа поверхностей со следующей действительной частью диэлектрической проницаемости ϵ и удельной проводимостью поверхности g [1]:

- сухая почва ($\epsilon = 4, g = 10^{-1}$);
- влажная почва ($\epsilon = 20, g = 3$);
- вода ($\epsilon = 80, g = 10$).

На рис. 1 представлена зависимость яркостной температуры мелкомасштабной поверхности от угла визирования для представленных выше типов поверхностей (сухая почва — $T1(\theta)$; влажная почва — $T2(\theta)$; вода — $T3(\theta)$) при горизонтальной поляризации (среднеквадратическая высота неровностей $\sigma = 0,0002$ м; угол визирования $\theta \in (0^\circ - 90^\circ)$, длина волны $\lambda = 0,032$ м; термодинамическая температура $T_0 = 293$ К).

На рис. 2 представлена аналогичная зависимость для вертикальной поляризации.

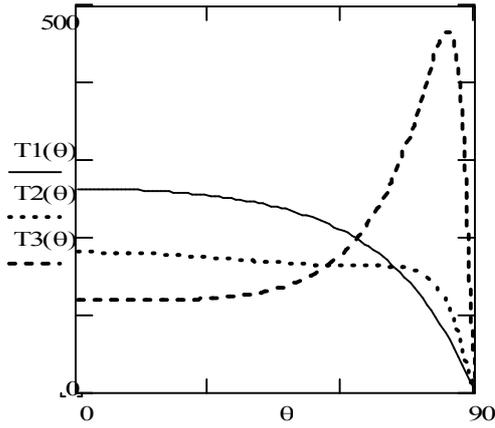


Рис. 1. Яркостная температура собственного радиоизлучения мелкомасштабной поверхности как функция угла визирования при горизонтальной поляризации

Исследование показателей качества

Предельные погрешности измерений (дисперсии) определяются диагональными элементами ковариационной матрицы ошибок Φ^{-1} , обратной к информационной матрице Фишера Φ , элементы которой рассчитываются по формуле [3]:

$$\Phi_{kl} = \sum_{i=1}^I \frac{T_i \Delta F_i}{2} \frac{\partial \ln T_{ai}(\alpha)}{\partial \alpha_k} \frac{\partial \ln T_{ai}(\alpha)}{\partial \alpha_l}, \quad (9)$$

где I – число измерений, обеспечивающих заданное число независимых нелинейных уравнений (не меньше, чем число оцениваемых параметров);

$\Delta F_i = \int_{-\infty}^{\infty} |K_i(j2\pi f)|^2 df$ – эквивалентная полоса пропускания радиометра; α_k – k -ая компонента вектора оцениваемых параметров α .

При этом надо учитывать, что антенная температура

$$T_a = \int_{\Theta} T_{\gamma}(\theta) F(\theta - \theta_0) d\theta = T_n \left(1 + \frac{1}{\mu} \right),$$

где $F(\theta)$ – диаграмма направленности приемной антенны по мощности; $\mu = \frac{T_n}{T_{\phi}}$ – отношение полезной и фоновой составляющих антенной температуры – аналог энергетического отношения сигнал-шум.

Для исследования влияния на погрешности измерений параметров поверхности лишь самой ее электродинамической модели, целесообразно пренебречь сглаживающим действием. В этом случае в формуле (9) можно использовать вместо антенной температуры яркостную T_{γ} , рассчитываемую по формулам, описывающим модель поверхности. В приведенных ниже расчетах полагалось, что время интегрирования и полоса пропускания линейного тракта радиометра связаны соотношением

$$\frac{2}{T\Delta F} = 10^{-6}.$$

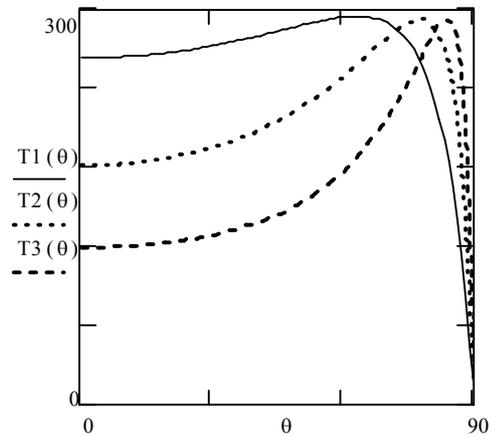


Рис. 2. Яркостная температура собственного радиоизлучения мелкомасштабной поверхности как функция угла визирования при вертикальной поляризации

Яркостная температура мелкомасштабной поверхности зависит от нескольких параметров, т.е. задача оценивания ее параметров является многопараметрической. Необходимо оценить ϵ_r , ϵ_i , σ , T_o , а угол визирования и длина волны известны. Количество уравнений в системе должно быть не менее числа оцениваемых параметров, в данном случае – четырех.

Для решения такой задачи дополним систему двумя уравнениями, применив синхронные измерения идентичными каналами радиометра на двух поляризациях с двух углов визирования θ_1, θ_2 , т.е. получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} T_{ЯГ}(\theta_1) = \left(1 - |K_{ЯГ}(\theta_1, \varepsilon)|^2\right) \cdot T_0; \\ T_{ЯГ}(\theta_2) = \left(1 - |K_{ЯГ}(\theta_2, \varepsilon)|^2\right) \cdot T_0; \\ T_{ЯВ}(\theta_1) = \left(1 - |K_{ЯВ}(\theta_1, \varepsilon)|^2\right) \cdot T_0; \\ T_{ЯВ}(\theta_2) = \left(1 - |K_{ЯВ}(\theta_2, \varepsilon)|^2\right) \cdot T_0. \end{cases} \quad (10)$$

Далее в соответствии с (9) строим матрицу Φ^{-1} размерностью четыре на четыре (число измерений $I = 4$, вектор оцениваемых параметров равен $\vec{\alpha} = (\varepsilon r, \varepsilon i, \sigma, T_0)$). На рис. 3 представлены зависимости предельных погрешностей оценки действительной части диэлектрической проницаемости от одного из углов визирования при синхронных измерениях идентичными каналами радиометра на двух поляризациях с двух углов визирования ($\theta_1 \in (0^\circ, 90^\circ)$, $\theta_2 = 60^\circ$) для сухой $\sigma_1(\theta_1)_1$ и влажной почвы $\sigma_2(\theta_1)_1$. Параметры поверхности T_0 , λ , σ предполагаются равными приведенным выше.

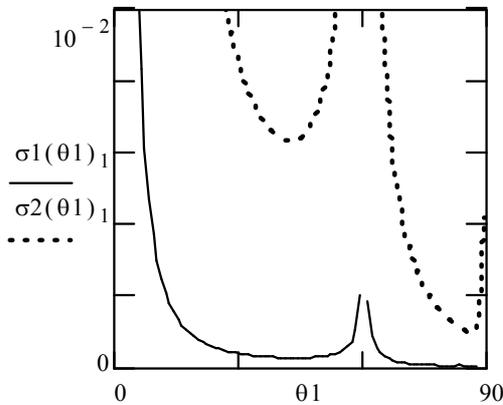


Рис. 3. Предельная погрешность оценивания действительной части диэлектрической проницаемости мелкомасштабной поверхности как функция угла визирования

Аналогичные графики для оценки мнимой части диэлектрической проницаемости представлены на рис. 4 ($\sigma_1(\theta_1)_2, \sigma_2(\theta_1)_2$).

На рис. 5 представлены зависимости предельных погрешностей оценки высоты неровностей σ от

угла визирования для сухой и влажной ($\sigma_1(\theta_1)_3, \sigma_2(\theta_1)_3$) при измерениях на двух поляризациях с двух углов визирования. Рис. 6 представляет аналогичную зависимость для оценки термодинамической температуры T_0 для тех же поверхностей – $\sigma_1(\theta_1)_4, \sigma_2(\theta_1)_4$.

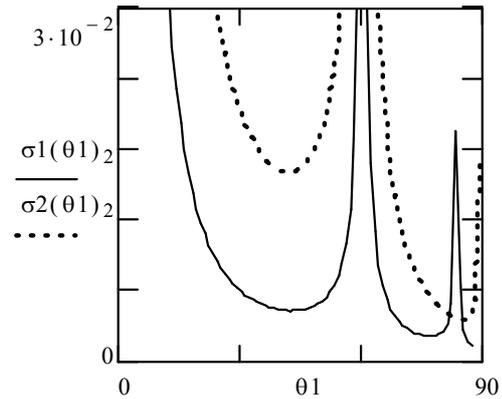


Рис. 4. Предельная погрешность оценивания мнимой части диэлектрической проницаемости мелкомасштабной поверхности как функция угла визирования

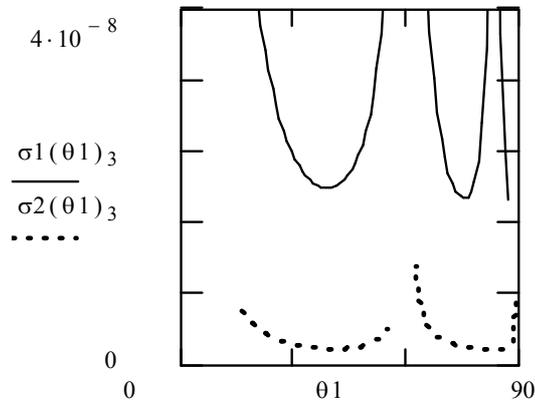


Рис. 5. Предельная погрешность оценивания высоты неровностей мелкомасштабной поверхности как функция угла визирования

На рис. 7 представлены графики зависимости предельных погрешностей оценивания действительной части диэлектрической проницаемости мелкомасштабной поверхности от среднеквадратической высоты неровностей σ для сухой $\sigma_1(\sigma)$ почвы. Углы визирования приняты равными 20 и 60°, высота неровностей $\sigma \in (0; 0,032)$ м.

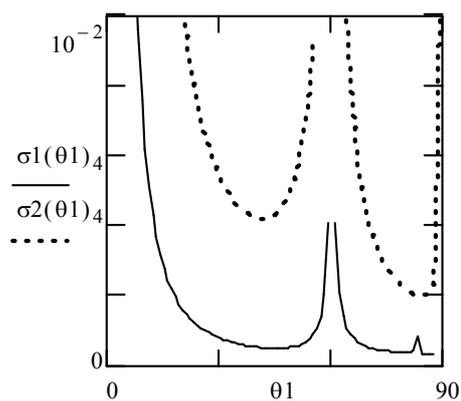


Рис. 6. Предельная погрешность оценивания термодинамической температуры мелкомасштабной поверхности как функция угла визирования

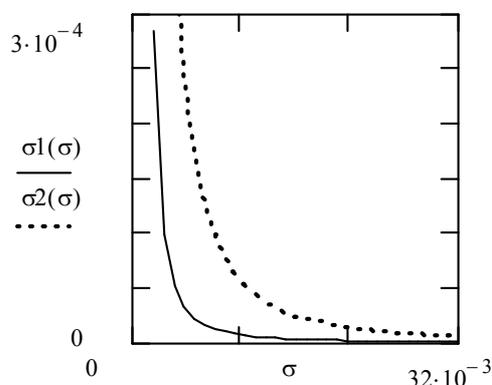


Рис. 7. Предельная погрешность оценивания действительной части диэлектрической проницаемости мелкомасштабной поверхности как функция среднеквадратической высоты неровностей

Заключение

По результатам проведенного анализа можно сделать определенные выводы. Поведение яркостной температуры зависит от типа поляризации: при горизонтальной – плавно уменьшается до 50 градусов при углах визирования порядка 90°, при вертикальной – сначала увеличивается, затем снижается до 100 градусов при $\theta \approx 90^\circ$ (рис. 1, 2).

Из рис. 3 – 6 следует, что предельные погрешности резко увеличиваются при углах визирования $\theta \approx 0^\circ$ и $\theta \approx 90^\circ$, а также в районе углов, близких ко второму углу визирования $\theta \approx \theta_2$. Углы визирования, при которых погрешности минимальны –

$\theta \in (20^\circ, 50^\circ)$ и $\theta \in (70^\circ, 85^\circ)$, рекомендуются для проведения экспериментов.

Увеличение среднеквадратической высоты неровностей приводит к уменьшению предельных погрешностей оценивания ε_r (рис. 7). При σ , равной длине волны, погрешности стремятся к нулю.

Итак, результаты исследования и полученные рекомендации могут быть использованы при организации и реализации экспериментов и выборе условий их проведения.

Литература

1. Мельник А.Ю., Зубкович С.Г., Степаненко В.Д. и др. Радиолокационные методы исследования Земли. – М.: Сов. радио, 1980. – 264 с.
2. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Радиоизлучение Земли как планеты. – М.: Наука, 1974. – 232 с.
3. Степаненко В.Д., Щукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплолокация в метеорологии. – Л.: Гидрометеоздат, 1987. – 284 с.
4. Богородский В.В., Канарейки Д.В., Козлов А.И. Поляризация рассеянного и собственного радиоизлучения земных покровов. – Л.: Гидрометеоздат, 1981. – 280 с.
5. Волосяк В.К. Теоретические основы пассивного дистанционного зондирования природных сред с аэрокосмических летательных аппаратов. – Х.: ХАИ, 1997. – 84 с.
6. Волосяк В.К. Физические основы дистанционного зондирования природных сред радиотехническими средствами аэрокосмического базирования. – Х.: ГАКУ “ХАИ”, 1997. – 98 с.
7. Фалькович С.Е., Волосяк В.К., Горбуненко О.А. Радиотехнические системы дистанционного зондирования. – Х.: НАУ “ХАИ”, 2002. – 157 с.

Поступила в редакцию 21.03.05

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных Сил.