

УДК 551.48

ФЛУКТУАЦИИ РАССЕЯННОГО И ИЗЛУЧЕННОГО СИГНАЛОВ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

К.С. МОСОЯН

Научно-производственный институт "Комета"

(Поступила в редакцию 2 марта 2004 г.)

Описана методика расчета флуктуаций удельной эффективной поверхности рассеяния (УЭПР) и радиояростной температуры (РТ) с учетом низкочастотных флуктуаций, обусловленных крупномасштабным волнением морской поверхности. Приведены графики зависимости фоновой чувствительности и точности измерения РТ от аппаратурных параметров и скорости ветра над морской поверхностью.

При исследовании гидрофизических полей океана и поверхности суши открываются широкие возможности применения радиофизических методов дистанционного зондирования. Наряду с развитием методов, основанных на использовании оптического и инфракрасного диапазонов, широко применяются и радиофизические методы, преимущества которых обусловлены возможностью работы при любых погодных условиях и в любое время суток. Причем все эти свойства характерны как для радиолокационных, так и для радиотеплолокационных систем, работающих в сверхвысокочастотном диапазоне.

При дистанционном зондировании информативными параметрами могут служить различные характеристики рассеянного и собственного радиоизлучения. Задача часто сводится к обеспечению необходимой точности измерения среднего значения удельной эффективной поверхности рассеяния (УЭПР) (σ) и радиояростной температуры (T_s) морской поверхности (МП).

Точность измерения среднего значения УЭПР морской поверхности. В работе [1] мы рассматривали вопросы повышения точности измерения среднего значения УЭПР, обусловленные модуляцией рассеянного сигнала углами крупномасштабных морских волн и высокочастотными флуктуациями. В работе [2] обсуждаются вопросы точности измерения среднего значения УЭПР, обусловленные только высокочастотными флуктуациями. Влияние нестабильности (модуляции) коэффициента усиления на чувствительность радиометрических систем рассмотрено в работе [3].

Точность измерения рассеянного сигнала на выходе энергетического приемника будет определяться как квадратный корень от суммы среднеквад-

ратичных отклонений высокочастотных и низкочастотных флуктуаций при условии их статистической независимости. Абсолютная погрешность (пороговая чувствительность) измерения среднего значения УЭПР, обусловленная низкочастотными и высокочастотными флуктуациями, запишется в виде:

$$\delta\sigma = \sqrt{[\delta\sigma_h^0(N)]^2 + [\delta\sigma_l^0(d, V)]^2}, \quad (1)$$

где $\delta\sigma_h^0(N)$ – среднеквадратичное отклонение высокочастотных флуктуаций ЭПР, с учетом усреднения по N независимым реализациям (известно, что $\delta\sigma_h^0(1) = \sigma^0$), σ^0 – среднее значение УЭПР, $\delta\sigma_l^0(d, V)$ – среднеквадратичное отклонение низкочастотных флуктуаций УЭПР с учетом усреднения по пространству.

Разделив обе части выражения (1) на σ^0 , получим относительную пороговую чувствительность по измерению среднего значения УЭПР:

$$\beta = \frac{\delta\sigma}{\sigma^0} = \sqrt{\frac{[\delta\sigma_h^0(N)]^2}{(\sigma^0)^2} + \frac{[\delta\sigma_l^0(d, V)]^2}{(\sigma^0)^2}}. \quad (2)$$

Величина дисперсии низкочастотных флуктуаций при их усреднении по элементу разрешения d определяется как [4]

$$[\delta\sigma_l^0(d, V)]^2 = (\delta\sigma_l^0)^2 \psi_l^2(d, V),$$

где $1+\beta$ определена как контрастная чувствительность в относительных единицах [1], $\delta\sigma_l^0$ – среднеквадратичное отклонение низкочастотных флуктуаций рассеянного сигнала при $d \ll \Lambda$ (Λ – средняя длина гравитационных волн МП), $\psi_l(d, V)$ – коэффициент ослабления флуктуаций при пространственном усреднении, V – скорость ветра.

При усреднении флуктуационного процесса среднеквадратичное значение среднего выборочного определяется выражением [5]

$$\delta\sigma_h^0(N) = \frac{\delta\sigma_h^0}{\sqrt{2N}},$$

где N – число независимых реализаций, которое при временном усреднении определяется шириной спектра временной реализации процесса: $N_\tau = \Delta f \cdot \tau$. В общем случае вместо N можно брать как временные, так и пространственные и частотные независимые реализации.

Таким образом, формулу (2) можно записать в следующем виде:

$$\beta = \frac{\delta\sigma(d, \tau)}{\sigma^0} = \sqrt{\frac{(\delta\sigma_h^0)^2}{2(\sigma^0)^2 \cdot \Delta f \cdot \tau} + \frac{(\delta\sigma_l^0)^2 \psi_l^2}{2(\sigma^0)^2 \cdot \Delta F_l \cdot \tau}}, \quad (3)$$

где $\delta\sigma^0(d, \tau)$ – среднеквадратичное отклонение УЭПР с учетом пространственного и временного усреднения, Δf – ширина спектра рассеянного сигнала, τ – время усреднения, ΔF_l – ширина спектра низкочастотных флуктуа-

ций, обусловленных модуляцией УЭПР уклонами крупных волн.

В большинстве случаев $\tau \leq 1c$, а ΔF_i меняется в пределах до нескольких Гц [6], поэтому число низкочастотных независимых реализаций по времени не превышает 2, т. е. уменьшение второго члена под корнем в выражении для β осуществляется, в основном, пространственным усреднением. Естественно, пространственное усреднение приводит к ухудшению разрешающей способности радиолокационной системы.

Для уменьшения первого члена под корнем в (3) можно использовать как временные, так и пространственные и частотные независимые реализации.

Важно отметить, что при наборе соответствующего количества высокочастотных независимых реализаций предельная точность измерения среднего значения ЭПР определится разрешающей способностью радиолокационной системы.

На рис.1 приведена относительная погрешность измерения УЭПР для случая вертикально поляризованного сигнала [4] при угле облучения $40-70^\circ$, обусловленная флуктуациями высокочастотных и низкочастотных составляющих спектра рассеянных сигналов при $\tau = 1c$ (а) и $\tau = 0,1c$ (б). Основной вклад в общую дисперсию, как и следовало ожидать, вносят низкочастотные составляющие при размере элемента разрешения менее Λ . Однако с увеличением размера элемента разрешения ($d > \Lambda$) преобладает вклад высокочастотных составляющих.

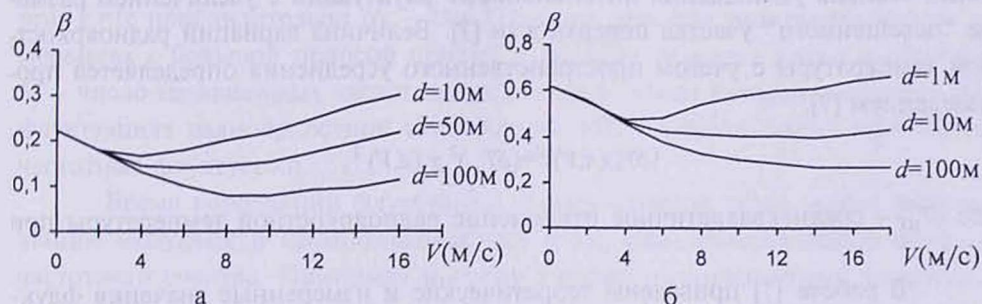


Рис.1. Относительная погрешность измерения УЭПР, обусловленная флуктуациями высокочастотных и низкочастотных составляющих спектра рассеянных сигналов при $\tau = 1c$ (а) и $0,1c$ (б).

Таким образом, наличие низкочастотных флуктуаций ЭПР при определенных условиях приводит к ухудшению точности измерения среднего значения рассеянного сигнала. При малых значениях d (менее средней длины волны гравитационных крупных волн на поверхности моря — Λ) и больших значениях τ (больше $1c$), в основном, они определяют предельное значение точности измерения среднего значения рассеянного сигнала.

Точность измерения среднего значения радиояркостной температуры морской поверхности. Рассмотрим вопросы точности измерения среднего зна-

чения радиояркой температуры, обусловленные временными флуктуациями морской поверхности, путем оценки этих флуктуаций в реальных условиях наблюдения. Ошибка измерения радиояркой температуры δT_a определяется суммой среднеквадратичных значений двух независимых процессов

$$\delta T_a = \sqrt{[\delta T_{a,h}(N)]^2 + [\delta T_{a,l}(d, V)]^2}, \quad (4)$$

где $\delta T_{a,h}(N)$ – среднеквадратичное отклонение радиояркой температуры, обусловленное высокочастотными флуктуациями, с учетом усреднения по N независимым реализациям, $\delta T_{a,l}(d, V)$ – среднеквадратичное отклонение, обусловленное модуляцией крупномасштабных волн, с учетом усреднения по пространству.

Ниже рассмотрим флуктуации радиояркой температуры на выходе детектора в зависимости от размера элемента разрешения на поверхности и параметров волнения морской поверхности в стационарных условиях наблюдения.

Как и в случае активной локации [4], определим функцию ослабления флуктуаций радиоизлучения в виде

$$\chi(d, V) = \sqrt{R_\chi(0)},$$

где $R_\chi(0)$ – функция корреляции излучательной способности, характеризующая степень уменьшения интенсивности флуктуаций с увеличением размера “освещенного” участка поверхности [7]. Величина вариаций радиояркой температуры с учетом пространственного усреднения определяется произведением [7]

$$[\delta T_{a,l}(d, V)]^2 = (\delta T_{a,l})^2 \chi(d, V)^2,$$

где $\delta T_{a,l}$ – среднеквадратичное отклонение радиояркой температуры при $d \ll \Lambda$.

В работе [7] приведены теоретические и измеренные значения флуктуаций радиоизлучения моря на сантиметровых волнах. Из работы следует, что максимальная величина флуктуаций наблюдается при направлении наблюдения, нормальном к фронту морской волны, и при настильных углах наблюдения на вертикальной поляризации (при $\tau = 1$ с) точечная дисперсия радиояркой температуры $\delta T_{a,l} = (7,0 - 7,5)$ К и на горизонтальной $\delta T_{a,l} = (3,5 - 4,0)$ К. При направлении наблюдения вдоль фронта волны флуктуации яркой температуры минимальны и составляют $\delta T_{a,l} = (1,0 - 1,5)$ К.

На рис.2а представлена функция ослабления флуктуаций для трехмерной регулярной модели [7]. Видно, что при $d > 100$ м и среднем волнении ($V \geq 4$ м/с) флуктуации существенно сглаживаются, т.е. флуктуаций ослабляются более чем в 10 раз. При слабых волнениях функция ослабления имеет крутой спад и уменьшается до 10 раз при размере элемента разрешения < 10 м.

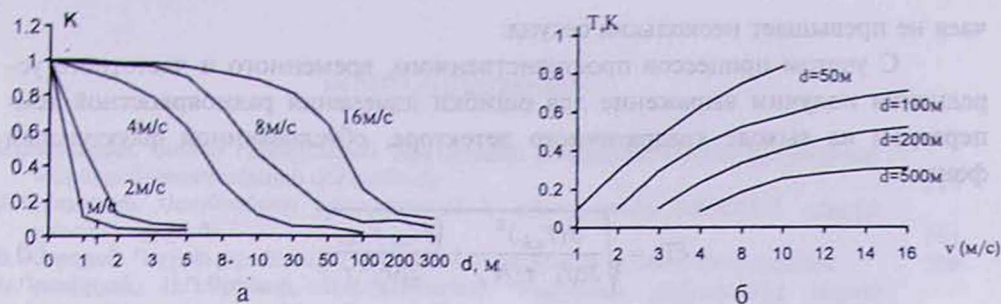


Рис.2. а) Зависимость функции ослабления флуктуаций собственного излучения от степени волнения и разрешающей способности на МП. б) Чувствительность по измерению радиояркой температуры в зависимости от размера элемента разрешения и степени волнения ($\tau = 1\text{с}$).

Рассмотрим уменьшение высокочастотных флуктуаций радиояркой температуры в процессе временного усреднения (интегрирования). Для оценки уменьшения (δT_{ah}) воспользуемся известным выражением

$$\delta T_{ah}(N) = \frac{\delta T_{ah}}{\sqrt{2N}}, \quad (5)$$

где $N = N_f = \Delta f_h \cdot \tau$ при временном усреднении, Δf_h – ширина спектра высокочастотных флуктуаций, τ – время наблюдения (накопления).

Время корреляций высокочастотного случайного процесса ~ 4 мс [6], следовательно, для радиометрических систем число независимых реализаций при $\tau = 1\text{с}$ приблизительно $N_f \sim 250$. Отметим, что при радиометрических измерениях с большой полосой приема и средних размерах пятна разрешения N_f – число независимых частотных реализаций имеет большое значение и во флуктуациях радиояркой температуры МП основной вклад дают низкочастотные флуктуации.

Время корреляции флуктуаций низкочастотной компоненты, обусловленное модуляцией крупномасштабных волн, определяется полосой низкочастотного спектра. Принимая ширину спектра низкочастотных флуктуаций собственного излучения моря равной ширине спектра низкочастотных флуктуаций рассеянного сигнала, запишем уменьшение низкочастотных флуктуаций собственного излучения, обусловленное крупномасштабным волнением с учетом временного усреднения, в виде

$$\delta T_{al}(N) = \frac{\delta T_{al}}{\sqrt{2\Delta F \cdot \tau}}, \quad (6)$$

где $\delta T_{al}(N)$ – среднеквадратичное отклонение радиояркой температуры с учетом временного усреднения, обусловленного низкочастотными флуктуациями.

Однако уменьшение низкочастотных флуктуаций, как таковое, в данном случае не имеет места. Это связано с тем, что ширина полосы низкочастотного спектра меньше 1 Гц, а время накопления для практических слу-

чаев не превышает нескольких секунд.

С учетом процессов пространственного, временного и частотного усреднения получим выражение для ошибки измерения радиояркостной температуры на выходе квадратичного детектора, обусловленной флуктуацией фона:

$$\delta T_a = \sqrt{\frac{\delta(T_{ah})^2}{2\Delta f_h \cdot \tau \cdot N_f} + \frac{(\delta T_{aj})^2 \chi_i^2}{2\Delta F_i \cdot \tau}} \quad (7)$$

При учете аппаратурных флуктуаций под корнем в формуле (7) появится третий член — $(\delta T_r)^2$ [3].

Согласно этой формуле, на рис.2б приведены кривые δT_a , построенные в зависимости от размера элемента разрешения и степени волнения морской поверхности для вертикальной поляризации при настильных углах наблюдения и времени интегрирования $\tau = 1$ с.

Анализ формулы (7) показывает, что основной вклад в дисперсию флуктуаций радиояркостной температуры при $\tau = 1$ с вносят низкочастотные флуктуации. В случае, когда низкочастотные флуктуации существенно сглажены путем пространственного усреднения (которое имеет место в экспериментах, выполненных с искусственных спутников Земли, когда $d \geq 1$ км), величина пороговой чувствительности по измерению среднего значения радиояркостной температуры ограничивается только дисперсией аппаратурных и высокочастотных флуктуаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. К.С. Мосоян, Г.И. Мариносян. Изв. НАН Армении, Физика, 38, 342 (2003).
2. Р.К. Мур, Ф.Т. Улаби. ТИИЭР, 57, 240 (1969).
3. Н.А. Есепкина и др. Радиотелескопы и радиометры. М., Наука, М., 1972.
4. С.В. Переслегин. Физика атмосферы и океана, 6, 610 (1975).
5. H. Ray. Microwave J., 9, 63 (1966).
6. А.А. Загородников. Радиотехника и электроника, 3, 477 (1972).
7. Н.М. Цейтлин и др. Препринт ИРЭ АН СССР, №6, 1974.

FLUCTUATIONS OF SCATTERED AND SELF-RADIATED SIGNALS OF SEA SURFACE

K.S. MOSOYAN

The method of counting of effective scattering cross-section and radiobrightness temperature fluctuations is described, taking into account the low-frequency fluctuations caused by large scale disturbance. The background sensitivity and accuracy of measurement of radiobrightness temperature curves versus apparatus parameters and wind speed are presented.