

УДК 621.396

В. Э. ГОЛУБИЦКИЙ, Г. П. КУЛЕМИН, д-р техн. наук,
А. И. СИДОРОВ, канд. техн. наук

ЧАСТОТНАЯ КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ФУНКЦИЯ ФЛУКТУАЦИИ ПОЛЯ, РАССЕЯННОГО ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Ниже рассматривается статистическая зависимость флуктуаций поля, рассеянного стационарной, изотропной шероховатой земной поверхностью при зондировании ее двумя электромагнитными сигналами на разных частотах миллиметрового диапазона. При этом предполагается, что поверхность с крупномасштабными, пологими неровностями; углы облучения поверхности таковы, что не происходит затенений и переотражений; размер облученной поверхности гораздо больше характерных размеров неровностей, ее кривизна мала; точка излучения приема и точка измерителя размещены и находятся в дальней зоне.

Для пояснения дальнейших выкладок рассмотрим схему пространственного расположения измерителя и поверхности (рис. 1). Здесь в точке P прямоугольной системы координат o_1uvw находится измеритель; система координат $oxyz$, связанная с поверхностью

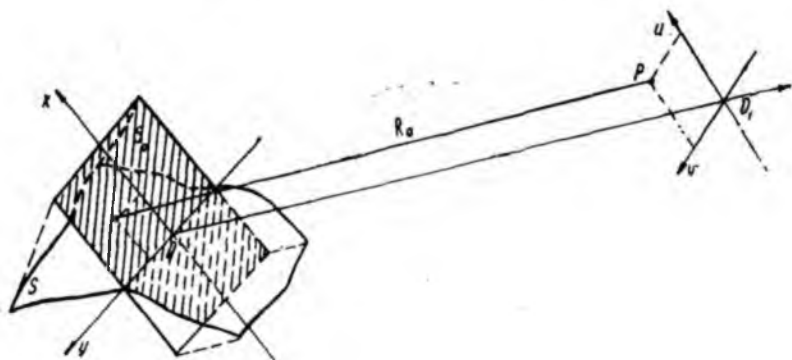


Рис. 1

земли и такая, что плоскость oxy — картинная, оси oz и o_1z совпадают; на расстоянии R_0 находится облучаемая плоской монохроматической волной поверхность S , которая описывается регулярной частью $f(x, y)$ и случайной $h(x, y)$, характеризующей отклонение неровностей от регулярной поверхности.

Полагаем, что в пределах облучаемой поверхности коэффициент Френеля γ постоянен и выполняются ранее введенные ограничения. Тогда в приближении Кирхгофа потенциал рассеянного поля в точке расположения измерителя (u, v) можно записать в следующем виде [1]:

$$\Phi(u, v, \nu) = -j\nu e^{i2\pi\nu t} e^{i\frac{4\pi R_0 \nu}{c}} \Phi_0 \int_{S_0} e^{i\frac{\pi\nu}{cR_0} [(u-x)^2 + (v-y)^2]} e^{i\frac{4\pi\nu}{c} f(x,y)} e^{i\frac{4\pi\nu}{c} h(x,y)} dx dy, \quad (1)$$

где Φ_0 — потенциал облучающего поля плоской монохроматической волны; ν — частота излучения; c — скорость света; S_0 — проекция облучаемой поверхности на картинную плоскость.

Взаимную корреляционную функцию флуктуаций поля будем определять при условии, что рассеяние происходит одной и той же неподвижной поверхностью. Тогда

$$R(u, v, \Delta\nu) = F(u, v, \Delta\nu) - \langle \Phi(u, v, \nu_1) \rangle \langle \Phi^*(u, v, \nu_2) \rangle,$$

где $F(u, v, \Delta\nu) = \langle \Phi(u, v, \nu_1) \Phi^*(u, v, \nu_2) \rangle$;

$\Phi(u, v, \nu_j)$ — потенциал рассеянного поля в точке (u, v) на частоте ν_1 либо ν_2 ; $\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1$; $\langle \cdot \rangle$ — знак усреднения.

Учитывая соотношение (1) и предполагая, что френелевские коэффициенты в пределах изменения частоты остаются практически постоянными, получаем

$$F(u, v, \Delta v) = \gamma^2 v_1 v_2 \frac{\Phi_0^2}{c^2 R_0^2} \exp \left\{ -j2\pi \left(\frac{2R_0}{c} + t \right) \Delta v \right\} \times \\ \times \iint_{S_1, S_2} \exp \left\{ j \frac{\pi}{c R_0} \{ [(u - x_1)^2 + (v - y_1)^2] v_1 - [(u - x_2)^2 + \right. \\ \left. + (v - y_2)^2] v_2 \} \right\} \exp \left\{ j \frac{r\pi}{c} [f(x_1, y_1) v_1 - f(x_2, y_2) v_2] \right\} \times \\ \times \langle \exp \left\{ j \frac{4\pi}{c} [h(x_1, y_1) v_1 - h(x_2, y_2) v_2] \right\} \rangle dx_1 dy_1 dx_2 dy_2.$$

Характеристическая функция совместного распределения $h(x_1, y_1)$ и $h(x_2, y_2)$ в точке с координатами $\left(\frac{4\pi}{c} v_1, -\frac{4\pi}{c} v_2 \right)$ определится следующим соотношением:

$$\langle \exp \left\{ j \frac{4\pi}{c} [h(x_1, y_1) v_1 - h(x_2, y_2) v_2] \right\} \rangle = \\ = \exp \left\{ -\frac{8\pi^2 \sigma^2}{c^2} [v_1^2 - 2K(\eta) v_1 v_2 + v_2^2] \right\},$$

где σ^2 — дисперсия высот неровностей поверхности; $K(\eta)$ — коэффициент автокорреляции неровностей,

$$\eta^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2; \quad \Delta x = x_2 - x_1, \quad \Delta y = y_2 - y_1.$$

В соотношении (1) перейдем к новым переменным Δx и Δy и учтем, что радиус корреляции неровностей значительно меньше линейных размеров S_0 . Это позволяет перейти к бесконечным пределам интегрирования по переменным. Тогда имеем

$$F(u, v, \Delta v) = v_1 v_2 \gamma^2 \frac{\Phi_0^2}{c^2 R_0^2} \exp \left\{ -j2\pi \left(\frac{2R_0}{c} + t \right) \Delta v \right\} \times \\ \times \exp \left\{ -\frac{8\pi^2 \sigma^2 (v_1^2 + v_2^2)}{c^2} \right\} \times \iiint_{S_1, S_2} \exp \left\{ j \frac{\pi}{c R_0} \{ [(u - x_1)^2 + \right. \\ \left. + (v - y_1)^2] v_1 - [(u - x_1 - \Delta x)^2 + (v - y_1 - \Delta y)^2] v_2 \} \right\} \times \\ \times \exp \left\{ j \frac{4\pi}{c} [f(x_1, y_1) v_1 - f(x_1 + \Delta x, y_1 + \Delta y) v_2] \right\} \times \\ \times \exp \left\{ \frac{16\pi^2 \sigma^2}{c^2} K(\eta) v_1 v_2 \right\} dx_1 dy_1 d\Delta x d\Delta y.$$

Для многих практических случаев выполняется условие

$$\frac{16\pi^2\sigma^2}{c^2} v_1 v_2 \gg 1.$$

Это условие позволяет вычислить интегралы по Δx и Δy методом перевала [2, с. 528]. Учитывая, что облучается одна и та же поверхность, получаем

$$F(u, v, \Delta v) = \frac{\gamma^2 \Phi_0^2}{8\pi R_0^2 \sigma^2 |K''_{\eta}(0, 0)|} \exp\left\{-j2\pi\left(\frac{2R_0}{c} + t\right)\Delta v\right\} \times \\ \times \left(\exp\left\{-\frac{8\pi^2\sigma^2}{c^2}\Delta v^2\right\}\right) \int_{S_0} \exp\left\{j\frac{\pi}{cR_0}[(u-x)^2 + (v-y)^2]\Delta v\right\} \times \\ \times \exp\left\{-j\frac{4\pi}{c}f(x, y)\Delta v\right\} dx dy, \quad (3)$$

где $K''_{\eta}(0, 0)$ — вторая производная коэффициента корреляции $h(x, y)$ по η в точке $\Delta x = \Delta y = 0$.

Введем обозначения для нормированной корреляционной функции

$$B(u, v, \Delta v) = \frac{R(u, v, \Delta v)}{[\langle \Phi^2(u, v, v_1) \rangle \langle \Phi^2(u, v, v_2) \rangle]^{1/2}}. \quad (4)$$

Проведя вычисления, получим

$$\langle \Phi^2(u, v, v_1) \rangle = \langle \Phi^2(u, v, v_2) \rangle = \frac{\gamma^2 \Phi_0^2 \Sigma_0}{8\pi R_0^2 \sigma^2 |K''_{\eta}(0, 0)|} \quad (5)$$

и

$$\langle \Phi(u, v, v_1) \rangle \langle \Phi^*(u, v, v_2) \rangle = \frac{v_1 v_2 \gamma^2 \Phi_0^2}{c^2 R_0^2} \exp\left\{j2\pi\left(\frac{2R_0}{c} + t\right)\right\} \times \\ \times \exp\left\{-\frac{8\pi^2\sigma^2}{c^2}(v_1^2 + v_2^2)\right\} \int_{S_0} \exp\left\{-j\frac{\pi\Delta v}{cR_0}[(u-x)^2 + (v-y)^2]\right\} \times \\ \times \exp\left\{-j\frac{4\pi\Delta v}{c}f(x, y)\right\} dx dy, \quad (6)$$

где Σ_0 — площадь S_0 .

Подставляя (5) и (6) в (4), находим

$$B(u, v, \Delta v) = \frac{1}{\Sigma_0} \exp\left\{-j2\pi\Delta v\left(\frac{2R_0}{c} + t\right)\right\} \int_{S_0} \exp\left\{-j\frac{\pi\Delta v}{cR_0} \times \right. \\ \left. \times [(u-x)^2 + (v-y)^2] \exp\left\{-j\frac{4\pi}{c}f(x, y)\Delta v\right\} dx dy \times$$

$$\begin{aligned} & \times \left[\exp \left\{ -\frac{8\pi^2\sigma^2}{c^2} \Delta v^2 \right\} + \frac{v_1 v_2 8\pi\sigma^2}{c^2} \exp \left\{ -\frac{8\pi^2\sigma^2}{c^2} (v_1^2 + v_2^2) \right\} \right] = \\ & = \frac{1}{\Sigma_0} \exp \left\{ -\frac{8\pi^2\sigma^2 \Delta v^2}{c^2} \right\} \exp \left\{ -j2\pi\Delta v \left(\frac{2R_0}{c} + t \right) \right\} \int_{\Sigma_0} \exp \left\{ -j \frac{\pi\Delta v}{cR_0} \times \right. \\ & \left. \times [(u-x)^2 + (v-y)^2] \right\} \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{c} f(x, y) \Delta v \right\} dx dy. \quad (7) \end{aligned}$$

Легко убедиться, что последнее приближение на практике выполнимо. Проанализируем влияние параметров рассеивающей поверхности на поведение корреляционной функции (7). Для облегчения анализа предположим, что освещаемая поверхность в пределах S близка к плоскости. При этом

$$f(x, y) = f(0, 0) + f'_x(0, 0)x + f'_y(0, 0)y,$$

где $f'_{x,(y)}(0,0)$ — наклон облучаемой регулярной части поверхности относительно картинной плоскости.

Кроме того, примем, что освещаемая поверхность является прямоугольником со сторонами, параллельными осям ox , oy и равными соответственно L_x и L_y . Центр координат в центре прямоугольника. Тогда

$$\begin{aligned} & \int_{\Sigma_0} \exp \left\{ -j \frac{\pi}{cR_0} [(u-x)^2 + (v-y)^2] \Delta v \right\} \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{c} f(x, y) \Delta v \right\} \times \\ & \times dx dy = \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{c} f(0, 0) \Delta v \right\} \int_{-L_x/2}^{L_x/2} \exp \left\{ -j \frac{\pi}{cR_0} (u-x)^2 \Delta v \right\} \times \\ & \times \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{c} f'_x(0, 0) x \Delta v \right\} dx \int_{L_y/2}^{L_y/2} \exp \left\{ -j \frac{\pi}{cR_0} (v-y)^2 \Delta v \right\} \times \\ & \times \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{c} f'_y(0, 0) y \Delta v \right\} dy. \quad (8) \end{aligned}$$

Полагая

$$e^{-j \frac{4\pi}{c} f'_x(0,0) L_x \Delta v} = e^{-j2\pi}; \quad e^{-j \frac{4\pi}{c} f'_y(0,0) L_y \Delta v} = e^{-j2\pi},$$

получаем оценку частотного радиуса корреляции поля в виде

$$\Delta v_L = \frac{c}{2f'_{x,(y)}(0, 0) L_{x,(y)}}. \quad (9)$$

Например, при $f'_x(0,0) = 0,1$; $L_x = 100$ м имеем $\Delta v_L = 15$ МГц.

В том случае, если в соотношении (8) значение интеграла существенно не меняется при вариациях $\Delta\nu$, радиус частотной корреляции можно определить, положив

$$\exp\left(-\frac{8\pi^2\sigma^2}{c^2}\Delta\nu^2\right) = e^{-2}.$$

При этом получим

$$\Delta\nu_s = \frac{c}{2\pi\sigma}, \quad (10)$$

или

$$\Delta\nu_s \approx \frac{48}{\sigma}, \quad (10a)$$

где σ^2 — дисперсия высот неровностей облучаемой поверхности. Так, при $\sigma = 0,1$ м имеем $\Delta\nu_s = 480$ МГц. Следует отметить, что оценкой (10) можно пользоваться в случаях малоразмерной облучаемой поверхности и отсутствия ее наклона относительно картинной плоскости.

Анализ соотношения (7) показывает, что нормированная частотная корреляционная функция поля, рассеянного земной поверхностью, зависит как от параметров регулярной освещенной поверхности (ее формы, размеров и наклона относительно картинной плоскости), так и от параметров неровностей (их среднеквадратической высоты).

Вместе с тем функция не зависит от несущей частоты, зондирующих сигналов, а зависит лишь от их разности.

Примеры, приведенные к оценкам частотных радиусов корреляции (9) и (10), показывают, что на практике при наклонном зондировании поверхности земли частотная декорреляция менее зависит от неровностей поверхности и больше от ее наклона и размеров.

Экспериментальные исследования частотной декорреляции радиоволн СВЧ земной поверхностью показывают, что наблюдается достаточно удовлетворительное совпадение расчетов по (10) с полученными экспериментальными результатами. Так, в работе [3] получены частотные корреляционные функции зем-

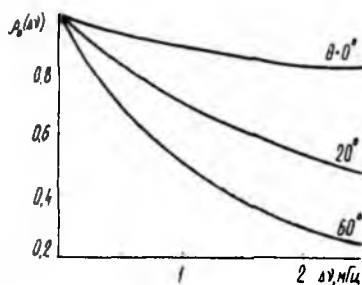


Рис. 2

ной поверхности с сельскохозяйственными посевами. В качестве примера на рис. 2 приведены зависимости $\rho(\Delta\nu)$ при нескольких значениях углов θ наклона облучаемой площадки относительно картинной плоскости. Видно, что радиус частотной корреляции уменьшается с увеличением угла θ .

Аналогичные измерения, проведенные при обратном рассеянии радиоволн СВЧ морской поверхностью [4], показали, что при

разное в $\Delta\nu=25$ ГГц пространственная корреляция практически отсутствует (коэффициенты взаимной корреляции не превышают 0,3), что обусловлено сменой механизмов рассеяния при столь большом частотном разном.

Список литературы: 1. Семенов Л. А. Теория электромагнитных волн. М., 1968. 240 с. 2. Фелсен П., Маркувиц Н. Излучение и рассеяния волн. М., 1978. Т. I. 220 с. 3. Ulabi F. T. Vegetation clutter model//IEEE Trans. 1980. AP 28, N 4. P. 538—545. 4. Кулемин Г. П., Разказовский В. Б. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью Земли под малыми углами. К., 1987. 230 с.

Поступила в редколлегию 14.09.89