УДК 621.396

В. Э. ГОЛУБИЦКИЙ, Е. П. ПУТЯТИН, д-р техн. наук, *А. И. СИДОРОВ,* канд. техн. наук, *В. И. СТРЕЛЬЧЕНКО*

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ИМПУЛЬСНОГО СИГНАЛА, РАССЕЯННОГО ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

При создании алгоритмов обработки сигналов, формирующихся в результате рассеяния электромагнитного импульса некоторой случайной шероховатой поверхностью, необходимо знание статистических характеристик флюктуаций этих сигналов. Во многих работах рассматривались вопросы статистической теории рассеяния зондирующих электромагнитных волн, например [1; 2]. Однако полученные результаты в основном относятся к рассеянию монохроматических волн и модулированных гармонических колебаний, что ограничивает их практическое использование.

В работе получена пространственно-временная корреляционная функция флюктуаций сигнала, рассеянного шероховатой поверхностью для произвольного импульсного зондирующего сигнала на основе применения метода касательной плоскости.

Рассеивающую поверхность представим суммой двух функций, соответствующих регулярной и стохастической составляющим поверхности $\varphi(x, y) = f(x, y) + \xi(x, y)$, причем $f(x, y)$ — медленно меняющаяся в пределах облучаемого участка регулярная составляющая поверхности, $\xi(x, y)$ — стохастическая составляющая, однородна и изотропна в широком смысле. Предполагается, что $\xi(x, y)$ описывается гауссовским законом распределения с нулевым математическим ожиданием, дисперсией σ^2 и автокорреляционной функцией $\rho(\tilde{x}, \tilde{y})$, где $\tilde{x}$, $\tilde{y}$ — параметры смещения. Неоднородности поверхности, заданные функцией $\xi(x, y)$, крупномасштабные по сравнению с длиной волны λ, где $\lambda = c/\nu_0$, ν_0 — центральная частота в спектре сигнала $s(t)$.

Предполагаем, что передающая и приемная антенны находятся в зоне Фраунгофера относительно облучаемой поверхности и совмещены. Зондирующий сигнал падает на шероховатую поверхность под таким углом к $f(x, y)$, при котором отсутствуют затенение и переотражение.

Известно [3], что при указанных предположениях флюктуации поля в плоскости приемной антенны описываются гауссовским законом распределения. Следовательно, математическое ожидание и автокорреляционная функция однозначно характеризуют данный стохастический процесс.

Для оценки указанных характеристик воспользуемся спектральным разложением зондирующего сигнала $s(\vec{r}, t)$ по плоским монохроматическим волнам, где $\vec{r}$ — радиус вектор. Пусть

$$S(\vec{k}, \omega) = \int\limits_{-\infty}^{\infty} s(\vec{r}, t)\, \mathrm{e}^{-j(\vec{k}\vec{r}+\omega t)} \mathrm{d}\vec{r}\mathrm{d}t$$

($\vec{k}$ — волновой вектор).
Тогда отраженный сигнал в плоскости антенны можно представить в виде

$$s_{\text{п}}(\vec{r}, t) = \frac{1}{(2\pi)^4} \int\limits_{-\infty}^{\infty} S(\vec{k}, \omega)\, A(E)\, \mathrm{e}^{j\omega t} \mathrm{d}\vec{k}\mathrm{d}\omega,$$

где A — оператор, учитывающий преобразование монохроматической волны E при отражении от шероховатой поверхности. Примем, что на поверхность падает плоская волна, тогда для указанных предположений справедливо приближение метода касательной плоскости [4], и в плоскости антенны

$$A(E) \approx -j \frac{\omega\gamma}{2\pi R_0 c} \mathrm{e}^{j\omega\frac{R_0}{c}} \int\limits_{\Omega_0} \exp\left[j\omega \frac{(u-x)^2+(v-y)^2}{cR_0}\right] \times$$
$$\times \exp\left[j\frac{2\omega}{c} f(x, y)\right] \exp\left[j\frac{2\omega}{c} \xi(x, y)\right] \mathrm{d}x\mathrm{d}y, \qquad (1)$$

здесь γ — коэффициент отражения поверхности; R_0 — расстояние от центра роскрыва антенны до координатной плоскости xoy; (u, v) — координата точки во вспомогательной системе координат, расположенной в плоскости приемной антенны с центром, совмещенным с центром роскрыва антенны и осями, параллельными осям ox и oy; Ω_0 — ортогональная проекция облучаемого участка поверхности на плоскость xoy.

Вычисление математического ожидания и автокорреляционной функции $s_{\text{п}}(\vec{r}, t)$ по ансамблю реализаций случайной функции $\xi(x, y)$ сводится к определению этих характеристик для отраженных монохроматических волн. Усредняя (1) и учитывая, что

$$M\left\{\exp\left[j\frac{2\omega}{c}\xi(x, y)\right]\right\} = \exp\left(-\frac{2\omega^2\sigma^2}{c^2}\right),$$

получаем

$$M[A(E)] = -j\frac{\omega}{2\pi R_0 c} \mathrm{e}^{j\omega\frac{R_0}{c}} \exp\left(-\frac{2\omega^2\sigma^2}{c^2}\right) \times$$
$$\times \int\limits_{\Omega_0} \exp\left[j\omega\frac{(u-x)^2+(v-y)^2}{cR_0}\right] \exp\left[j\frac{2\omega}{c} f(x, y)\right] \mathrm{d}x\mathrm{d}y.$$

Здесь $M[\cdot]$ — операция усреднения по ансамблю.

При принятых исходных предположениях $M[A(E)] \approx 0$, следовательно, $M[s_п(\vec{r}, t)] \approx 0$. Пространственно-временная автокорреляционная функция $K(u_1, v_1, t_1, u_2, v_2, t_2)$ выражается через корреляционную двухчастотную функцию $R(u_1\ v_1, \omega_1, u_2, v_2, \omega_2)$, где

$$R(u_1, v_1, \omega_1, u_2, v_2, \omega_2) = M\{A[E(u_1, v_1, \omega_1)][E^*(u_2, v_2, \omega_2)]\}. \quad (2)$$

Подставляя (1) в (2), с учетом

$$M\left\{\exp\left\{j\frac{2}{c}[\xi(x_1, y_1)\omega_1 - \xi(x_2, y_2)\omega_2]\right\}\right\} =$$
$$= \exp\left\{-j\frac{2\sigma^2}{c^2}[\omega_1^2 - 2\rho(\tilde{x}, \tilde{y})\omega_1\omega_2 + \omega_2^2]\right\},$$

имеем

$$R(u_1, v_1, \omega_1, u_2, v_2, \omega_2) = \frac{\omega_1\omega_2\gamma^2}{4\pi R_0^2 c^2}\exp\left(-j\frac{R_0}{c}\Delta\omega\right)\times$$
$$\times\exp\left[-\frac{2\sigma^2}{c^2}(\omega_1^2 + \omega_2^2)\right]\int\limits_{\Omega_0}\int\limits_{\Omega_0}\exp\left\{j\frac{1}{cR_0}[((u_1 - x_1)^2 +\right.$$
$$\left.+ (v_1 - y_1)^2)\omega_1 - ((u_2 - x_2)^2 + (v_2 - y_2)^2)\omega_2]\right\}\exp\left\{j\frac{2}{c}\times\right.$$
$$\left.\times[f(x_1, y_1)\omega_1 - f(x_2, y_2)\omega_2]\right\}\exp\left[\frac{4\sigma^2}{c^2}\rho(\tilde{x}_1\tilde{y})\omega_1\omega_2\right]\times$$
$$\times dx_1dy_1dx_2dy_2, \quad (3)$$

Здесь

$$\tilde{x} = x_2 - x_1,\ \tilde{y} = y_2 - y_1,\ \Delta\omega = \omega_2 - \omega_1.$$

При условии, что радиус корреляции функции $\xi(x, y)$ значительно меньше размеров Ω_0 и

$$\frac{2\sigma^2\omega_2\omega_2}{c^2} \gg 1,$$

для упрощения (3) воспользуемся методом перевала [4]. Тогда получим

$$R(u_1, v_1, \omega_1, u_2, v_2, \omega_2) = \frac{\gamma^2}{8\pi R_0^2\sigma^2|\rho''_{\tilde{x}\tilde{x}}(0, 0)|}\times$$
$$\times\exp\left(-j\frac{R_0}{c}\Delta\omega\right)\exp\left(-2\frac{\sigma^2}{c^2}\Delta\omega^2\right)\int\limits_{\Omega_0}\exp\left\{j\frac{1}{cR_0}[((u_1 - x_1)^2 +\right.$$
$$\left.+ (v_1 - y_1)^2)\omega_1 - ((u_2 - x_1)^2 + (v_2 - y_1)^2)\omega_2]\right\}\times$$
$$\times\exp\left[-j\frac{2}{c}f(x_1, y_1)\Delta\omega\right]dx_1dy_1.$$

Введем вспомогательную функцию

$$\Phi(x, y, u, v) = \left\{R_0 + \frac{1}{R_0}[(u - x)^2 + (v - y)^2] + 2f(x, y)\right\}/c,$$

тогда $$R(u_1, v_1, \omega_1, u_2, v_2, \omega_2) = \frac{\gamma^2}{8\pi R_0^2\sigma^2|\rho''_{\tilde{x}\tilde{x}}(0, 0)|}\times$$

$$\times \exp\left(-\frac{2\sigma^2}{c^2}\Delta\omega^2\right)\int_{\Omega_0} \exp\{j[\Phi(x_1, y_1, u_1, v_1)\omega_1 -$$

$$-\Phi(x_1, y_1, u_2, v_2)\omega_2]\}\, dx_1 dy_1. \quad (4)$$

Связь между пространственно-временной автокорреляционной и двухчастотной корреляционной функциями определяется формулой [5]

$$K(u_1, v_1, t_1, u_2, v_2, t_2) = \frac{1}{(2\pi)^8}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} S(\vec{k}_1, \omega_1) S^*(\vec{k}_2, \omega_2) \times$$

$$\times R(u_1, v_1, \omega_1, u_2, v_2, \omega_2)\, e^{j(\omega_1 t_1 - \omega_2 t_2)} d\omega_1 d\vec{k}_1 d\omega_2 d\vec{k}_2, \quad (5)$$

где $S(\vec{k}, \omega)$ — спектр падающего на рассеивающую поверхность зондирующего сигнала. Подставив (4) в (5) и проделав несложные преобразования, найдем

$$K(u_1, v_1, t_1, u_2, v_2, t_2) = C\int_{\Omega_0}\int_{-\infty}^{\infty} s(t + t_1 + \Phi(x_1, y_1, u_1, v_1)) \times$$

$$\times s(t + t_2 + \Phi(x_1, y_1, u_2, v_2)) \exp\left[-\frac{c^2(t_2 - t)^2}{8\sigma^2}\right] dt\, dx_1 dy_1. \quad (6)$$

Здесь $C = \dfrac{\gamma^2}{2\pi R_0^2 c\sigma \,|\rho''_{\bar{x}\bar{x}}(0, 0)|}$.

Как видно из (6), влияние крупномасштабных шероховатостей эквивалентно временному гауссовскому фильтру. Фильтрующее воздействие шероховатостей приводит к уменьшению ширины спектра сигнала. В случае, если частотная полоса $s(t)$ значительно меньше $^1/_2\sigma$, то экспоненциальный член, учитывающий влияние шероховатостей, можно считать равным δ-функции и, следовательно,

$$K(u_1, v_1, t_1, u_2, v_2, t_2) = \frac{2C\sigma\sqrt{\pi}}{c}\int_{\Omega_0} s(t_1 + t_2 +$$

$$+ \Phi(x, y, u_1, v_1))\, s(2t_2 + \Phi(x, y, u_2, v_2))\, dx dy.$$

Полученные выражения (6) и (7) позволяют производить корреляционный анализ для импульсных зондирующих сигналов, условия рассеяния которых соответствуют исходным предположениям.

Проведенный сравнительный анализ формулы (6) с результатами, полученными в работах [1; 2], для случая, когда зондирующий сигнал — гармоническое колебание, промодулированное заданной временной финитной функцией, подтверждает ее справедливость.

Список литературы: 1. *Зубкович С. Г.* Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от земной поверхности. М., 1968. 224 с. 2. *Андреев Г. А., Потапов А. А.* Влияние хаотических неровностей поверхности на отраженный импульсный сигнал миллиметровых волн // Радиотехника и электрон. 1986. Т. 7. С. 1404—1405. 3. *Ахманов С. А., Дьяков Ю. Е., Чиркин А. С.* Введение в статистическую радиофизику и оптику. М., 1981. 640 с. 4. *Фелсен Л., Маркувиц Н.* Излучение и рассеяние волн. М., 1978. Т. 1. 547 с. 5. *Свешников А. А.* Прикладные методы теории случайных функций. М., 1968. 463 с.

Поступила в редколлегию 28.03.88