УДК 621.396

В. К. ВОЛОСЮК, канд. техн. наук

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НЕИДЕНТИЧНОСТИ КОЭФФИЦИЕНТОВ РАССЕЯНИЯ НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ МНОГОЧАСТОТНОГО ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Одно из требований, предъявляемых к многочастотным радиосигналам при решении задач подповерхностной селекции слоистых сред,— правильный выбор взаимного разноса отдельных гармоник, обеспечивающий высокую степень идентичности коэффициентов рассеяния на каждой из частот. Основными факторами, влияющими на значения коэффициентов рассеяния, являются диффракционные явления, связанные с характером неровностей поверхности, а также частотная зависимость комплексной диэлектрической проницаемости. В работе анализ неидентичности коэффициентов рассеяния и их воздействия на показатели качества селекции проведен для двухмасштабной поверхности [1]. Показателем селекции принят коэффициент, равный отношению мощностей сигналов, рассеянных подповерхностным слоем и поверхностью раздела: $K_N = P_2/P_1$ (1). Считаем, что оба слоя находятся в равных условиях, т. е. затухание отсутствует. Это предположение не связывается с упрощением задачи, поскольку эффекты затухания должны учитываться наряду с введенным показателем.

Проведем анализ для случая лоцирования поверхности двухчастотным сигналом. Пусть на одной из частот коэффициент рассеяния поверхностью раздела равен $\dot{A}_1(\theta)$, а на другой — $\dot{A}_2(\theta) = \dot{A}_1(\theta)(1+\dot{\Delta})$ (2). Умножая это выражение на компенсирующий множитель exp $(-j2\psi)$ и вычитая его из $\dot{A}_1(\theta)$, находим

$$\Delta A(\theta) = \dot{A}_1(\theta)\, e^{-j\Psi}(2j\sin\Psi - \dot{\Delta}\, e^{-j\Psi}), \tag{3}$$

где

$$\Psi = \Delta k H\left(\frac{\cos\theta_0 - \cos\theta}{\cos\theta\cos\theta_0}\right); \tag{4}$$

Δk — разность волновых векторов колебаний соответствующих частот; H — высота расположения фазового центра антенны над исследуемой поверхностью; θ, θ_0 — текущий угол места и угол, соответствующий направлению максимума диаграммы направленности.

Если ширина диаграммы направленности мала, то получим разность фаз $\Psi \approx \Delta kHb\,(\theta - \theta_0)$ (5). Здесь b — коэффициент пропорциональности в первом члене разложения в ряд Тейлора выражения, стоящего в скобках (4), $b = \operatorname{tg}\theta_0/\cos Hb\,(\theta - \theta_0)$.

Сигнал, рассеянный поверхностью раздела, с учетом компенсации (3) имеет следующий вид:

$$\dot{S}_1(t) = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \dot{g}(\theta - \theta_0)\,\dot{A}_1(\theta)\,e^{-j2kHb\theta}\,[2j\sin\Delta kHb\,(\theta - \theta_0) - \dot{\Delta}(\theta)\,e^{j\Delta kb(\theta - \theta_0)}]\,d\theta. \tag{6}$$

Слагаемое, содержащее величину Δ, характеризует остаток, не подвергнутый компенсации и обусловленный различием в значениях коэффициентов рассеяния на различных частотах. Очевидно, что мощность колебаний, определяемых этим остатком, должна быть меньше или сравнима с той мощностью колебаний, которая остается после компенсации в случае идеального равенства коэффициентов рассеяния.

Запишем коэффициент селекции (1) с учетом (6) для двухчастотного сигнала

$$K_2 = \frac{4\int_{\theta_1}^{\theta_2} |\dot{g}(\theta - \theta_0)|^2\,d\theta}{\int_{\theta_1}^{\theta_2} |\dot{g}(\theta - \theta_0)|^2\,[4(1 + \Delta)\sin^2\Delta kHb\,(\theta - \theta_0) + \Delta^2]\,d\theta}. \tag{7}$$

Примем, что величина Δ является вещественной, и покажем это в дальнейших расчетах.

Для аппроксимации диаграммы направленности функцией

$$\dot{g}(\theta) = \begin{cases} \text{const} & \theta \in \left(-\frac{\Delta\theta}{2}, \frac{\Delta\theta}{2}\right) \\ 0 & \theta \notin \left(-\frac{\Delta\theta}{2}, \frac{\Delta\theta}{2}\right) \end{cases}; \tag{8}$$

коэффициент селекции $K_2 = 3/(1 + \Delta)\left(\Delta kHb\frac{\Delta\theta}{2}\right)^2 + \frac{\Delta^2}{2}$ (9). Аналогично для случая использования трех частот

$$K_3 = \frac{5}{(1 + 2\Delta)\left(\Delta kHb\frac{\Delta\theta}{2}\right)^4 + \Delta^2\left(\Delta kHb\frac{\Delta\theta}{2}\right)^2}. \tag{10}$$

Первые слагаемые в знаменателях (9) и (10) характеризуют зависимость показателя качества селекции в основном от ширины диаграммы направленности, вторые — от степени неидентичности коэффициентов рассеяния. Практический интерес представляет рассмотрение случаев, когда величины вторых слагаемых меньше или сравнимы с первыми. Например, для оценки первого слагаемого возьмем следующие данные: $\lambda = 0{,}3$ м; $\Delta k = 0{,}01k$; $H = 100$ м; $\Delta\theta = 0{,}02$; $\theta_0 = 15°$.

Тогда

$$\Delta kHb\frac{\Delta\theta}{2} \approx 0{,}058.$$

Величину Δ оценим на основе электродинамической модели двухмасштабной поверхности, представляющей собой совокупность пологих неровностей h_1 с радиусами кривизны, значительно большими длины волны, или совокупность плоских пластин-фацетов, совпадающих с положением касательных плоскостей, покрытых мелкими неровностями h_2. Такие модели хорошо описывают морскую поверхность (волны, покрытые рябью), песчаные пустыни, снежные покровы, в частности снежные покровы на материковых льдах и др. Это наиболее сложная и полная электродинамическая модель среди моделей, исследованных теоретически [1].

Поле, рассеянное двухмасштабной поверхностью, состоит из двух компонент: зеркальной (когерентной), которая формируется фацетами (касательными плоскостями), расположенными перпендикулярно к линии лоцирования, и диффузной компоненты, формирующейся мелкими неровностями, покрывающими фацеты. Обычно когерентная компонента на 10—20 дБ больше диффузной и проявляет себя при углах лоцирования, близких к нормальным, вплоть до 20...30° [2]. Для получения высоких коэффициентов селекции целесообразно выбирать угол θ_0 не более 15°. В таком секторе преобладает когерентная компонента, поэтому достаточно оценить ее изменение с изменением частоты. Воспользуемся формулами для удельной ЭПР σ^0 [2], которые учитывают статистику наклонов фацетов, находящихся в луче диаграммы направленности, и влияние мелких неровностей, покрывающих фацет:

$$\langle |\dot A_1(\theta)|^2\rangle \sim \sigma^0 = (|\dot K_f(0)|^2/a^2_{ш_1}) \times \\ \times \exp\left[-\mathrm{tg}^2\theta/a^2_{ш_1} - \left(\frac{4\pi\sigma_{h_2}}{\lambda}\right)^2\right]\sec^4\theta, \qquad (11)$$

где $a^2_{ш_1} = 4\sigma^2_{h_1}/l^2_{h_1}$; $\sigma^2_{h_1}$, $l^2_{h_1}$ — дисперсия высот и радиус корреляции неровностей, обусловливающих зеркальное отражение; $\sigma^2_{h_2}$ — дисперсия высот мелких неровностей. Пусть $l_{h_1} = 2\sigma_{h_1}$, тогда $a^2_{ш} = 1$ и множитель $\exp(-\mathrm{tg}^2\theta)\sec^4\theta$ в диапазоне углов от 0 до 15° изменяется от 1 до 1,069. Поэтому

$$\sigma^0 \approx |\dot K_f(0)|^2 \exp\{-(4\pi\sigma_{h_2}/\lambda)^2\}, \qquad (12)$$

$$\dot A_1(\theta) \approx \dot K_f(0)\exp\left\{-\frac{1}{2}(4\pi\sigma_{h_2}/\lambda)^2\right\}. \qquad (13)$$

Здесь $\dot{K}_f(0)$ — коэффициент отражения Френеля для $\theta=0$,

$$\dot{K}_f(0)=\frac{\sqrt{\dot{\varepsilon}}-1}{\sqrt{\dot{\varepsilon}}+1}, \tag{14}$$

где $\dot{\varepsilon}$ — комплексная диэлектрическая проницаемость, зависящая от частоты [2] $\dot{\varepsilon}=\varepsilon+j60\lambda g$.

При изменении частоты от f_1 до $f_2=f_1+\Delta f$ коэффициент рассеяния изменяется от $\dot{A}_1$ до

$$\dot{A}_1+\Delta\dot{A}=\frac{\sqrt{\dot{\varepsilon}+j60g(\lambda_1+\Delta\lambda)}-1}{\sqrt{\dot{\varepsilon}+j60g(\lambda_1+\Delta\lambda)}+1}\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(4\pi\frac{\sigma_{h_2}}{\lambda_1+\Delta\lambda}\right)^2\right\}. \tag{15}$$

Разложим в ряд это выражение по малым приращениям длин волн и ограничимся первыми двумя членами ряда:

$$\dot{\Delta}=\frac{\Delta\dot{A}}{\dot{A}_1}=\left[\frac{j\,60g\lambda_1}{\sqrt{\dot{\varepsilon}+j\,60g\lambda_1}+(\dot{\varepsilon}+j\,60g\lambda_1-1)}+\left(\frac{4\pi\sigma_{h_2}}{\lambda_1}\right)^2\right]\delta, \tag{16}$$

где $\delta=\Delta k/k$.

Наиболее целесообразно лоцирование сред с низким затуханием радиоволн (малая проводимость) — песчаных грунтов, известняковых пород, материковых льдов и др. [4]. Для них проводимость g составляет $10^{-2}...10^{-6}$ см/м. Тогда для приведенных данных при $\varepsilon=4$ и $\sigma_{h_2}=\lambda/16$ (условие применимости модели [3])

$$\dot{\Delta}\approx j\,3{,}6(10^{-4}...10^{-8})+6\cdot10^{-3}\approx\delta,$$

т. е. приращение $\dot{\Delta}$ практически вещественно. Полученное значение Δ по сравнению с ранее оцененной величиной $\Delta kHb\frac{\Delta\theta}{2}$ меньше примерно на порядок.

Список литературы: 1. *Басс Ф. Г., Фукс И. М.* Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М., 1972. 327 с. 2. *Радиолокационные* методы исследования Земли / Под ред. Ю. А. Мельника. М., 1980. 261 с. 3. *Зубкович С. Г.* Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от земной поверхности. М., 1968. 224 с. 4. *Финкельштейн М. И., Мендельсон В. Л., Кутев В. А.* Радиолокация слоистых земных покровов. М., 1977. 174 с.

Поступила в редколлегию 15.07.86