Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова т. LXII, вып. 1, 1972 г.

К РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРОВ РАДИОКАНАЛА ПРИ ОПЕРАТИВНОМ УПРАВЛЕНИИ НА КАРЬЕРЕ

И. Г. Рогов, М. И. Ханукаев

Автоматизация управления на современных карьерах предъявляет повышенные требования к системам передачи информации, которые в силу особенностей горного производства (подвижности объектов управления, их рассредоточенности и т. д.) в качестве физического канала связи используют радиоканал. Одним из эффективных путей обеспечения высокой достоверности передачи информации является переход в диапазон ультракоротких волн (УКВ), что позволяет уменьшить влияние помех, обычно весьма интенсивных на карьере. Однако проектирование УКВ радиоканала в условиях сложного рельефа при размерах неровностей, соизмеримых с длиной волны, затрудняется отсутствием методов расчета параметров канала, важнейшим из которых является множитель ослабления. Ниже приводится метод расчета множителя ослабления при условии, что между передатчиком и приемником расположен один уступ.

Пусть два корреспондирующих пункта A и B расположены на соседних горизонтах карьера (рис. 1, *а*) и выполняются следующие условия:

$$x \gg \lambda; \quad (R - x) \gg \lambda; \tag{1}$$

$$\frac{2\pi}{\lambda}(h_1 + h_2) \gg \sqrt{1 + \varepsilon}; \tag{2}$$

$$\rho' = \frac{\rho_1}{\sin \gamma_1} \ll OC, \tag{3}$$

где ρ' — продольный размер первой зоны Френеля на плоскости MN (зоны, существенной для отражения); ρ_1 — радиус первой зоны Френеля в плоскости LS, перпендикулярной OB; γ_1 — угол встречи; h_1 и h_2 — высоты антенн в пунктах A и B, отсчитанные относительно горизонта MN; ε — модуль комплексной диэлектрической проницаемости почвы; λ — длина волны; x — расстояние от основания антенны A до точки отражения O; R — расстояние между M и N.

Условие (1) позволяет считать волну плоской, при соблюдении условия (2) можно пользоваться методом отраженного источника*.

* Фейнберг Е. Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. АН СССР, 1961.

Предположим, что уступ перпендикулярен линии, соединяющей основания антенн, и протяженность его в поперечном направлении по меньшей мере порядка диаметра первой зоны Френеля, что позволяет свести задачу к двумерной. При соблюдении, кроме того, условия (3), результирующее поле в точке B можно рассматривать как сумму полей

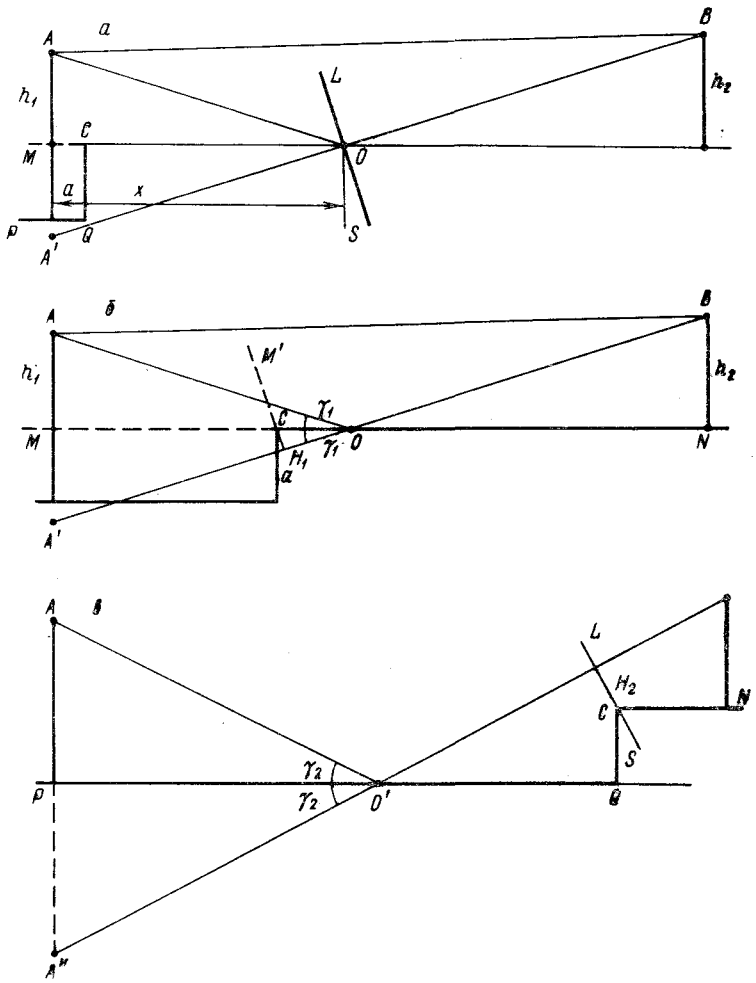


Рис. 1. Различные положения уступа на трассе

двух источников: находящегося в точке A и создающего поле E_0 такое же, как если бы он находился в свободном пространстве, и источника в точке A', являющегося зеркальным отражением источника A в плоскости MN, создающего в точке B поле

$$E_1 = E_0 f_1 e^{-i\left(\theta_1 + \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r_1\right)}, \qquad (4)$$

где f_1 — модуль коэффициента отражения; θ_1 — фаза коэффициента отражения; Δr_1 — разность хода лучей AB и $A'B$.

Множитель ослабления определяется при этом по известной отражательной формуле*

$$W = 1 + f_1 e^{-i\left(\theta_1 + \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r_1\right)} \tag{5}$$

до тех пор, пока уступ расположен настолько далеко от точки геометрического отражения, что существенная для отражения область почти полностью расположена на поверхности CN. Если же условие (3) нарушается (вследствие перемещения уступа, изменения положения точки отражения O), на поверхности CN умещается все меньший участок существенной для отражения области, и формулой (5) пользоваться нельзя.

Временно допустим, что поверхность CQP полностью поглощает падающую на нее энергию электромагнитного поля. Тогда уменьшение существенной области при сближении точек O и C может быть вызвано действием виртуального поглощающего экрана MC (пунктир, рис. 1, *б*), расположенного между точкой наблюдения B и мнимым источником отраженного поля в точке A'. Влияние экрана не изменится, если его повернуть вокруг точки C в положение CM' так, чтобы его плоскость стала перпендикулярна линии $A'B$. Обозначив расстояние от края экрана до линии $A'B$, соединяющей зеркальное изображение источника и точку наблюдения через H_1, и введя

$$v_1 = \frac{H_1\sqrt{2}}{\rho_1}, \tag{6}$$

получим в точке B для поля E_1, создаваемого лучом, исходящим из A' и дифрагировавшем на экране CM',

$$E_1 = E_0 f_1 \sqrt{\frac{A^2(v_1) + B^2(v_1)}{2}}\, e^{-i\left(\theta_1 + \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r_1 + \alpha_1\right)}. \tag{7}$$

где

$$A(v_1) = \frac{1}{2} + C(v_1);$$

$$B(v_1) = \frac{1}{2} + S(v_1);$$

$$\operatorname{tg}\alpha_1 = -\frac{A(v_1) - B(v_1)}{A(v_1) + B(v_1)};$$

и интегралы Френеля

$$C(v_1) = \int_0^{v_1} \cos\frac{\pi x^2}{2}\,dx;$$

$$S(v_1) = \int_0^{v_1} \sin\frac{\pi x^2}{2}\,dx;$$

H_1 — расстояние от точки C до линии $A'B$.

Пусть теперь точка отражения O' находится на поверхности PQ, т. е. на нижнем горизонте (рис. 1, *в*).

По-прежнему, если выполняется условие

$$\rho'' = \frac{\rho_2}{\sin\gamma_2} \ll QO' \tag{8}$$

* Долуханов М. П. Распространение радиоволн. Связь, 1965.

(ρ_2 — радиус первой зоны Френеля в плоскости SL), можно пользоваться отражательной формулой для расчета напряженности поля в точке B. По мере сближения точек Q и O' существенная для отражения область на поверхности PQ уменьшается и можно, как и в приведенном выше рассуждении, считать, что поле, создаваемое зеркальным изображением A'' источника A в плоскости PQ дифрагирует на экране (теперь не виртуальном, а действительном), CQ. Повернув этот экран вокруг точки C до совмещения с плоскостью SL, получим выражение для поля

$$E_2 = E_0 f_2 \sqrt{\frac{A^2(v_2) + B^2(v_2)}{2}}\, e^{-i\left(\theta_2 + \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r_2 + \alpha_2\right)},$$

$$\operatorname{tg}\alpha_2 = -\frac{A(v_2) - B(v_2)}{A(v_2) + B(v_2)}, \qquad (9)$$

$$v_2 = \frac{H_2\sqrt{2}}{\rho_2},$$

где H_2 — расстояние от края экрана до линии $A''B$, положительное в случае просвета.

Продолжая перемещать уступ по направлению к точке отражения O', вернемся снова к ситуации, представленной на рис. 1, *б*, где точка отражения находится на верхнем горизонте CN. При этом поле, создаваемое мнимым источником A'', по-прежнему определяется формулой (9), источником A' — выражением (7), а суммарное поле в точке B определится как сумма поля в свободном пространстве E_0 и полей E_1 и E_2. Следовательно, множитель ослабления

$$w = 1 + f_1 \sqrt{\frac{A^2(v_1) + B^2(v_1)}{2}}\, e^{-i\left(\theta_1 + \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r_1 + \alpha_1\right)} +$$

$$+ f_2 \sqrt{\frac{A^2(v_2) + B^2(v_2)}{2}}\, e^{-i\left(\theta_2 + \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r_2 + \alpha_2\right)}. \qquad (10)$$

Модуль и фаза входящих в эту формулу комплексных коэффициентов отражения зависят от соответствующих углов встречи, вида поляризации и электрических свойств отражающей поверхности. В дальнейшем ограничимся рассмотрением только весьма малых углов встречи и горизонтальной поляризации, при этом

$$f_1 = f_2 = 1;$$

$$\theta_1 = \theta_2 = \pi.$$

Модуль множителя ослабления в этом случае

$$|w| = \sqrt{(1 - M_1\cos\beta_1 - M_2\cos\beta_2)^2 + (M_1\sin\beta_1 + M_2\sin\beta_2)^2}, \qquad (11)$$

где

$$M_1 = \sqrt{\frac{A^2(v_1) + B^2(v_1)}{2}};$$

$$M_2 = \sqrt{\frac{A^2(v_2) + B^2(v_2)}{2}};$$

$$\beta_1 = -\left(\alpha_1 + \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r_1\right);$$

$$\beta_2 = -\left(\alpha_2 + \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r_2\right);$$

$$\Delta r_1 = \frac{2h_1h_2}{R};$$

$$\Delta r_2 = \Delta r_1 + \frac{2a}{R}(h_1 + h_2 + a);$$

a — высота уступа; H_1, H_2, ϱ_1 и ϱ_2 определяются из простых геометрических соотношений между высотами антенн, расстоянием R, высотой уступа a и расстоянием до уступа b (рис. 2).

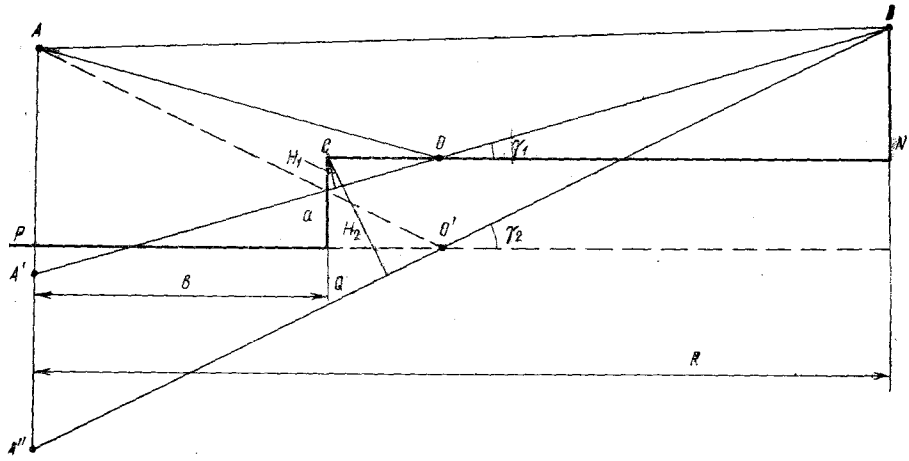


Рис. 2. Схема для определения величин H_1 и H_2

$$H_1 \cong h_1 - b\frac{h_1 + h_2}{R};$$

$$H_2 \cong -H_1 - \frac{2a}{R}(R - b); \qquad (12)$$

$$\varrho_1 \cong \varrho_2 \cong \sqrt{\frac{b(R-b)}{R}\lambda}.$$

Итак, если высота уступа a стремится к нулю, то

$$H_2 \to -H_1,$$
$$\Delta r_2 \to \Delta r_1,$$
$$v_2 \to -v_1. \qquad (13)$$

При этом сумма

$$M_1 e^{-i\alpha_1} + M_2 e^{-i\alpha_2} \to 1,$$

и формула для множителя ослабления принимает вид

$$w = 1 - e^{-i\frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda R}}, \qquad (14)$$

$$|w| = 2\left|\sin\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda R}\right|,$$

т. е. вырождается в отражательную формулу.

Зависимости модуля множителя ослабления, приведенные на рис. 3, вычислены по формуле (11) при $R=800$ *м*, $h_1=h_2=20$ *м*, $\lambda=2$ *м*. Начало координат графика помещено в точку отражения, которая при равных высотах антенн находится на середине трассы, и по оси абсцисс отложено расстояние от точки отражения до уступа. Из графика виден слож-

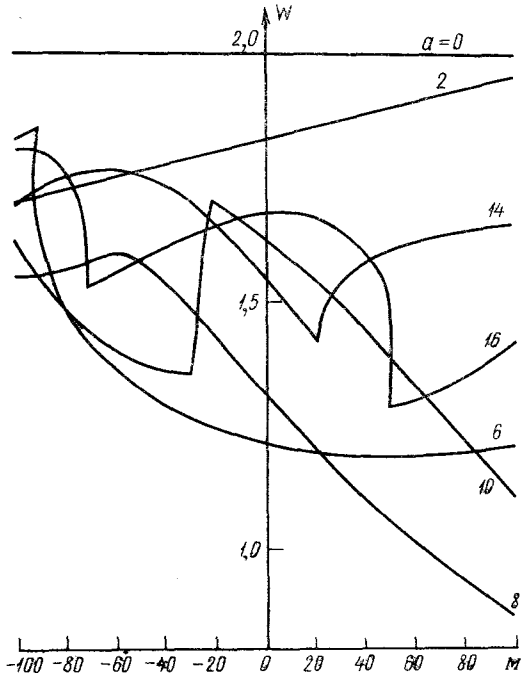


Рис. 3. Зависимость модуля множителя ослабления от положения уступа на трассе

ный характер зависимости множителя ослабления от положения уступа, что объясняется интерференцией полей, отраженных от верхнего и нижнего горизонтов.

Анализ полученной формулы для множителя ослабления и численные расчеты по ней свидетельствуют о том, что положение уступа на трассе и его высота сильно сказываются на величине напряженности поля в точке приема. Приведенный метод расчета множителя ослабления позволяет определить основные характеристики приемных и передающих устройств при заданных положении уступа на трассе и его высоте.