

УДК 621.396.67

ВЛИЯНИЕ ПРЕПЯТСТВИЯ НА СВЯЗЬ ПРИЗЕМНЫХ АПЕРТУРНЫХ АНТЕНН

В. В. Бодров, Д. И. Заичкин

Рассматривается задача о влиянии гладкого импедансного протяженного земного препятствия, расположенного поперек трассы, на связь двух апертурных антенн. Предполагается, что радиус кривизны поперечного сечения и высота препятствия значительно больше длины волны и намного меньше длины трассы. Представленные численные результаты говорят о том, что препятствие оказывает, в основном, затеняющее действие, описываемое с помощью интегралов Френеля.

ВВЕДЕНИЕ

В предлагаемой работе рассматривается задача о связи двух апертурных антенн, расположенных над земной поверхностью, с одиночным препятствием между ними (рис. 1). Предварительно авторами обсуждался вопрос о связи апертурных антенн над ровной землей [1], и была найдена функция Грина задачи дифракции сферической волны на протяженном гладком цилиндрическом препятствии, расположенном на ровной земле [2]. Настоящая работа является обобщением двух предыдущих.

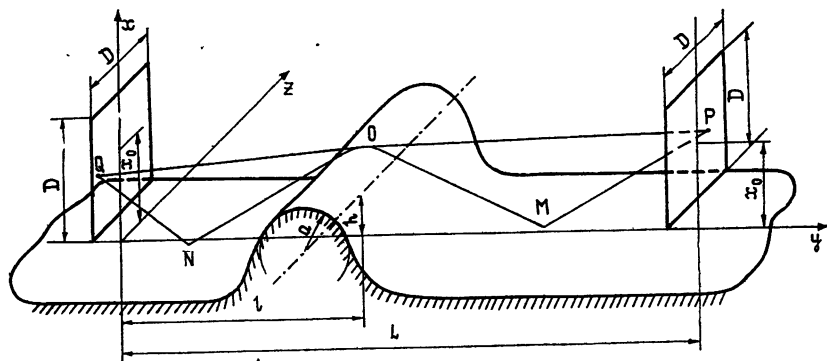


Рис. 1.

Количество работ, посвященных влиянию препятствий на связь апертурных антенн, невелико [3, 10], в то время как развитие техники связи сантиметрового и миллиметрового диапазонов требует более подробного изучения этого вопроса. В качестве препятствия в задаче рассматривается бесконечный импедансный цилиндр кругового поперечного сечения. Аппроксимация реального препятствия бесконечным цилиндром возможна в том случае, если протяженность препятствия в направлении, поперечном распространению, больше зоны, существенной для распространения радиоволн. Хотя эта задача рассматривается для кругового цилиндра, полученные результаты справедливы и для цилиндра произвольного поперечного сечения, если его поверхность в области огибания его лучом (рис. 1) можно аппроксимировать круговым цилиндром. При исследовании связи двух апертурных антенн естественно воспользоваться теоремой эквивалентности и свести задачу о связи реаль-

ных антенн к задаче о связи плоских раскрывов с заданным распределением возбуждения. При этом будем считать, что в плоскости раскрыва тангенциальные компоненты поля связаны соотношением

$$E_{\tau} = H_{\tau} W, \quad (1)$$

где W — волновое сопротивление свободного пространства. Предполагается, что размер апертур и поперечные размеры препятствия значительно меньше длины трассы и намного больше длины волны. Для количественной характеристики связи двух антенн используется коэффициент передачи по мощности (КПМ) [1].

ФОРМУЛИРОВКА АЛГОРИТМА

Для апертурных антенн в случае вертикальной поляризации КПМ можно записать [1]:

$$\eta = \frac{\left| \int_{s_2} H_{z2}(s_2) f_2(s_2) ds_2 \right|^2}{\int_{s_1} |H_{z1} f_1(s_1)|^2 ds_1 \int_{s_2} |f_2(s_2)|^2 ds_2}, \quad (2)$$

где H_{z1} и H_{z2} — напряженности магнитного поля в раскрывах передающей и приемной апертур соответственно, f_1 и f_2 — функции распределения возбуждения передающей и приемной апертур, s_1 и s_2 — площади апертур. Связь напряженности поля в раскрыве приемной апертуры с напряженностью поля в раскрыве передающей апертуры выражается с помощью формул [4]

$$H_{z2} = \frac{1}{i \omega \mu_a'} \left(k^2 A_z^M + \frac{\partial^2 A_z^M}{\partial z^2} \right), \quad (3)$$

$$A_z^M = \int_{s_1} j_z^M f_1(s_1) G(s_1, s_2) ds_1,$$

где $j_z^M = H_{z1} W$, $G(s_1, s_2)$ — функция Грина рассматриваемой задачи. Выражения (2), (3) будут верны и для горизонтальной поляризации, если в них заменить $H_z \rightarrow E_z$, $\mu_a' \rightarrow \epsilon_a'$, $A_z^M \rightarrow A_z^O$, $j_z^M \rightarrow j_z^O$. Для эквивалентного поверхностного тока j_z^O справедливо $j_z^O = E_{z1}/W$.

Для нахождения функции Грина $G(s_1, s_2)$ нужно решить задачу дифракции сферической волны на препятствии. Как уже говорилось во Введении, препятствие мы аппроксимируем импедансным цилиндром радиуса a (рис. 1). Ось цилиндра поднята над поверхностью земли на высоту h . Для учета влияния ровных участков земной поверхности кроме луча QOP , непосредственно дифрагирующего на препятствии, нужно ввести еще три — $QNOP$, $QOMP$, $QNOMP$, испытывающих отражение от земли [5]. По этой причине функция Грина G вычисляется как сумма функций Грина G_i для каждого из лучей с учетом отражений последних от земной поверхности:

$$G = G_{QOP} + \Phi_N G_{QNOP} + \Phi_M G_{QOMP} + \Phi_N \Phi_M G_{QNOMP}, \quad (4)$$

где Φ_N , Φ_M — коэффициенты отражения Френеля в точках N и M . Для функции Грина i -го луча G_i воспользуемся готовым результатом [2]

$$G_i = \frac{1}{2\pi} \frac{Me^{-ihs}}{\sqrt{2k(\xi' - \eta)(\xi - \eta)} S} V_{11}(\zeta, \mu, q, \theta_i) \quad (\zeta > 0); \quad (5a)$$

$$G_l = \frac{e^{-i(kS+\omega_0)}}{4\pi S} + \frac{1}{2\pi} \frac{Me^{-ikS}}{\sqrt{2k(\xi'-\eta)(\xi-\eta)}S} V_{11}(\zeta, \mu, q, \theta_i) \quad (\zeta < 0), \quad (56)$$

который можно упростить, учитывая то, что поперечные размеры в нашей задаче: размеры и высота апертур, высота и радиус кривизны препятствия, — значительно меньше длины трассы и расстояний от препятствия до каждой из апертур:

$$G_l = \frac{\exp\left\{-ik\left[L + \frac{(x-x')^2}{2L} + \frac{(z-z')^2}{2L}\right]\right\}}{4\pi L} \times$$

$$\times \begin{cases} \frac{e^{i\pi/4}}{\sqrt{\pi}} \int_{\mu\zeta}^{\infty} e^{-is^2} ds & \text{для } \zeta > 0 \\ 1 - \frac{e^{i\pi/4}}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\mu\zeta} e^{-is^2} ds & \text{для } \zeta < 0 \end{cases} + \frac{e^{-ikS}}{4\pi L\mu} \left[-\frac{e^{i\pi/2}}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \exp(-t\zeta e^{-i\pi/6}) \times \right.$$

$$\left. \times \frac{v'(t) + e^{i\pi/3} q v(t)}{\omega_1'(t) + e^{i\pi/3} q \omega_1(t)} dt - \frac{e^{-i\pi/4}}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} e^{-it\zeta} \frac{v'(t) - q v(t)}{\omega_2'(t) - q \omega_2(t)} dt \right], \quad (6)$$

где L — длина трассы, x', z' — координаты источника, x, z — координаты точки наблюдения, $v, v', \omega_1, \omega_1', \omega_2, \omega_2'$ — функции Эйри и их производные.

Выражения для ζ, μ, S и q имеют вид

$$\zeta = M \left(\frac{a+h-x'}{l} + \frac{a+h-x}{L-l} \right), \quad \mu^2 = \frac{M}{a} \frac{l(L-l)}{L}, \quad (7)$$

$$S = L + \frac{(h+a-x')^2}{2l} + \frac{(h+a-x)^2}{2(L-l)} + \frac{(z-z')^2}{2L},$$

$$q = -i \frac{M}{Z} \quad \text{— для горизонтальной поляризации,} \quad (8)$$

$q = -iMZ$ — для вертикальной поляризации,

где $M = (ka/2)^{1/3}$, $Z = \sqrt{\mu_{\text{пр}}'/\epsilon_{\text{пр}}}$ — поверхностный импеданс препятствия. Выражение (6) можно записать как сумму трех слагаемых

$$G_l = G_l^{\text{гл}} + G_{l1}^{\text{доб}} + G_{l2}^{\text{доб}}, \quad (9)$$

из которых первое, содержащее интеграл Френеля, является главным:

$$G_l \approx G_l^{\text{гл}} = \frac{\exp\left\{-ik\left[L + \frac{(x-x')^2}{2L} + \frac{(z-z')^2}{2L}\right]\right\}}{4\pi L} \times$$

$$\times \begin{cases} \frac{e^{i\pi/4}}{\sqrt{\pi}} \int_{\mu\zeta}^{\infty} e^{-is^2} ds & \text{для } \zeta > 0 \\ 1 - \frac{e^{i\pi/4}}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\mu\zeta} e^{-is^2} ds & \text{для } \zeta < 0 \end{cases}. \quad (10)$$

Вклад двух других слагаемых, учитывающих материал и кривизну препятствия, мал из-за большой величины μ в знаменателе. Это положение отмечалось в работах [6, 7] при описании дифракции на выпуклых телах больших электрических размеров. Как показано в [2] для малых дифракционных углов, оно остается верным и для интерференции четырех попарно противофазных (из-за отражений от земли) лучей. При инженерных расчетах КПМ (2) весьма желательно вычислять функцию Грина G_i по упрощенной формуле (10). С физической точки зрения это эквивалентно замене дифракции на выпуклом гладком препятствии дифракцией на поглощающем экране той же высоты. Такая эквивалентная замена не только сильно упростила бы вычисления, но и позволила бы рассчитывать дифракцию на препятствиях довольно произвольного вида, поскольку в настоящее время известен широкий круг решенных дифракционных задач для экранов различной формы. Настоящая работа в значительной мере посвящена численной оценке ошибки расчета КПМ, возникающей из-за пренебрежения в функции Грина G_i (6) слагаемыми, учитывающими материал и кривизну препятствия.

АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

При составлении программы для расчетов на ЭВМ одним из центральных был вопрос о выборе эффективного метода численного кратного интегрирования. Авторами был выбран метод кратного интегрирования по Гауссу [8], позволивший проводить расчеты на машине класса М-20. Результаты расчетов представлены на рис. 2—4. При расчетах функция распределения возбуждения обеих апертур была принята равной

$$f(t) = \cos\left(\frac{t - t_0}{D} \pi\right), \quad (11)$$

где t_0 — середина апертуры, D — размер апертуры, по каждой из координат. Длина трассы — $kL = 10^4$. Электрические параметры препятствия $\epsilon'_{\text{пр}} = 15 - i3$, $\mu'_{\text{пр}} = 1$ соответствуют в СВЧ диапазоне мокрой земле. По оси ординат на всех графиках отложен корень квадратный из отношения КПМ над землей с препятствием η к КПМ в свободном пространстве η' . По оси абсцисс — ka , где a — радиус препятствия. Параметром является размер передающей и приемной апертур D . Высота расположения центров апертур x_0 выбрана равной $kx_0 = 125$, что при принятой длине трассы $kL = 10^4$ соответствует случаю синфазного сложения прямого и отраженного от ровной поверхности земли без препятствия сигнала в точке приема. Поэтому величина $\sqrt{\eta/\eta'}$ в дБ на графиках больше 0 при малых ka и стремится к 6 дБ при уменьшении размеров препятствия и обеих апертур (рис. 2). Результаты представлены только для горизонтальной поляризации, так как для вертикальной они мало отличаются. Пунктирной линией на графиках показано поведение КПМ, рассчитанного с учетом только главного члена (10) в функции Грина G_i для каждого луча. Сплошной — поведение КПМ, рассчитанного с учетом всех членов в функции Грина G_i .

На рис. 2 показано поведение КПМ в зависимости от величины препятствия ka для земной поверхности с параметрами $\epsilon'_2 = 15 - i3$, $\mu'_2 = 1$. Препятствие расположено посередине трассы ($l = 0,5L$). Как видно из рис. 2, с ростом размеров препятствия увеличивается его экранирующее действие и КПМ падает. Для малых апертур ($D \rightarrow 0$) уменьшение КПМ носит колебательный характер, что связано, вероятно, интерференцией четырех лучей. Для больших апертур интерференции не происходит из-за их высокой направленности. Из анализа рис. 2

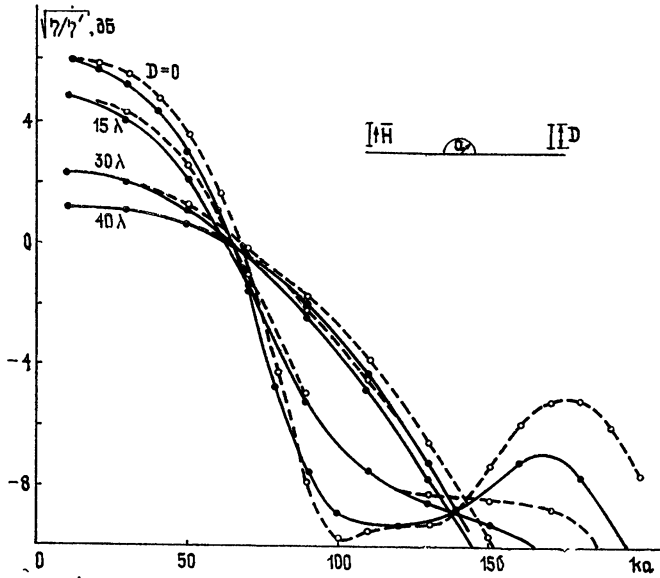


Рис. 2.

можно сделать вывод о том, что ошибка в величине КПМ из-за расчета функции Грина каждого луча по формуле (10) невелика (0,5 дБ) для больших апертур. Для малых апертур ошибка невелика до тех пор, пока препятствие не затеняет передающую антенну, и может возрасти до 2—3 дБ, если приемная антенна окажется в тени препятствия. На основании сказанного можно сделать вывод о том, что при поперечных размерах препятствия, значительно меньших длины трассы и не превышающих высот подвеса антенн, оно оказывает на распространение электромагнитных волн, в основном, экранирующее действие, не зависящее от кривизны и материала препятствия и описываемое с достаточной точностью с помощью интегралов Френеля (10).

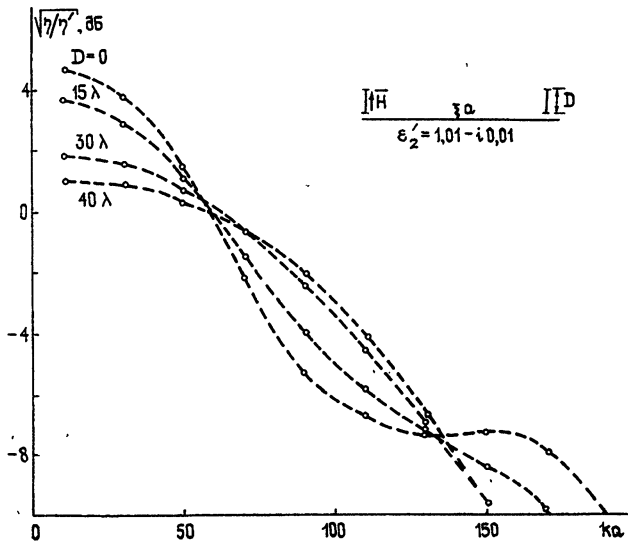


Рис. 3.

Расчеты, результаты которых представлены на рис. 3, 4, были проведены для оценки влияния на КПМ различных видов подстилающей поверхности. На рис. 3, 4 показано поведение КПМ, рассчитанного с учетом только главного члена функции Грина (10), для двух видов земной поверхности. При выборе параметров подстилающих поверхностей авторы руководствовались стремлением рассмотреть крайние случаи. Поэтому для одной поверхности (рис. 3) было выбрано значение диэлектрической проницаемости $\epsilon'_2 = 1,01 - i0,01$ при $\mu'_2 = 1$, а для другой — коэффициент отражения был принят равным коэффициенту отражения от поверхности, покрытой растительностью, и изменяющимся по закону, предложенному в [9]:

$$|\Phi| = e^{-(\varphi^\circ/1,9)},$$

где φ° — угол скольжения в градусах. Из сравнения рис. 3 с рис. 2 видно, что изменение электрических параметров почвы мало сказывается на КПМ, его поведение меняется только количественно. Объясняется это отражением лучей от земной поверхности в рассматриваемой задаче под малыми углами. При этих углах коэффициент отражения Френеля близок к -1 для широкого диапазона изменения электрических параметров земной поверхности. Для земной поверхности с растительным покровом (рис. 4) поведение КПМ меняется не только количественно, но и качественно — практически перестает наблюдаться интерференция.

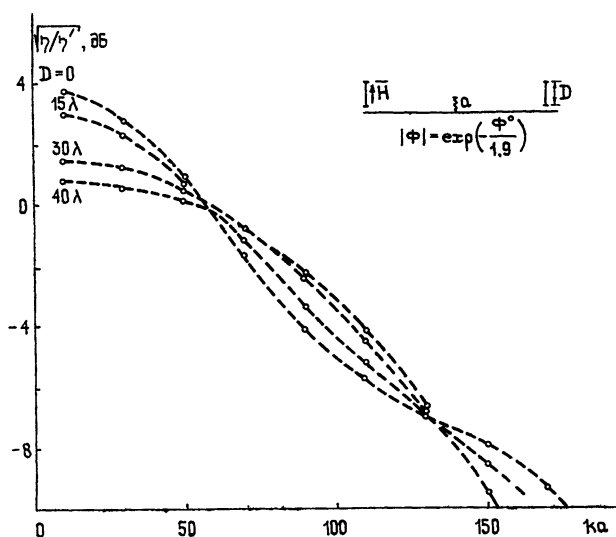


Рис. 4.

Это говорит о том, что замена реальной земной поверхности идеализированной ровной поверхностью может привести к ошибкам при расчетах КПМ.

Настоящая работа является продолжением и обобщением проделанных ранее авторами исследований связи апертурных антенн над ровной поверхностью земли [1] и функции Грина задачи дифракции сферической волны на протяженном земном препятствии [2]. Основным результатом работы являются алгоритм численного расчета КПМ и программа, реализующая алгоритм на языке АЛГОЛ. По мнению авто-

ров важным для дальнейших применений является полученный на основании численных расчетов вывод о том, что при большой длине трассы и высоте препятствия, не превышающей высот расположения апертурных антенн, препятствие оказывает на КПМ экранирующее действие, не зависящее от материала и кривизны поперечного сечения препятствия и описываемое с достаточной точностью интегралами Френеля.

Авторы считают приятным долгом выразить благодарность Г. Т. Маркову за полезные советы при выполнении работы и участие в ее обсуждении.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Бодров, Д. И. Заичкин, Изв. вузов — Радиофизика, 20, № 8, 1201 (1977).
2. В. В. Бодров, Д. И. Заичкин, Изв. вузов — Радиофизика, 22, № 10, 1205 (1979).
3. А. Ф. Казюлин, Радиотехника и электроника, 19, № 12, 2632 (1974).
4. Г. Т. Марков, А. Ф. Чаплин, Возбуждение электромагнитных волн, изд. Энергия, М.—Л., 1967.
5. В. Н. Троицкий, Распространение ультракоротких волн в горах, изд. Связь, М., 1968.
6. В. А. Фок, УФН, 43, № 4, 587 (1950).
7. Е. М. Хомяк, сб. Распространение ультракоротких радиоволн в условиях гористой местности, Тр. Бурятского института естественных наук СО АН СССР, вып. 1, 161 (1968).
8. Библиотека алгоритмов 16—506 (справочное пособие), изд. Сов. радио, М., 1975.
9. Б. А. Редькин, В. В. Клочко, Ж. Г. Очерет, Изв. вузов — Радиофизика, 16, № 8, 1172 (1973).
10. F. L. Cain, C. E. Ryan, B. J. Cown, IEEE Int. Electrom. Compatib. Symp. Rec. Arlington Heights, Ill., 1972, New York, 1972, p. 310.

Московский энергетический
институт

Поступила в редакцию
19 июня 1979 г.

EFFECT OF AN OBSTACLE ON THE COMMUNICATION OF GROUND-BASED ANTENNA APERTURES

V. V. Bodrov, D. I. Zaichkin

A problem is considered on the effect of a smooth impedance extended earth obstacle located transverse the path on the communication of two aperture antennas. It is assumed that the curvature radius of the transverse section and the height of the obstacle is considerably larger than the wavelength and much smaller than the length of the path. Numerical results testify to the fact that the obstacle has mainly a shading effect described by Fresnel integrals.