

Сопротивление излучения произвольно ориентированного электрического диполя над плоским экраном

Н. П. Елисеева

Харьковский государственный университет,
310077, Харьков, пл. Свободы, 4,
e-mail: Nadezhda.P.Yeliseyeva@univer.kharkov.ua

Статья поступила в редакцию 13 января 1998 г., после переработки 25 мая 1998 г.

В рамках метода равномерной геометрической теории дифракции на основе решения трехмерной задачи дифракции электромагнитного излучения произвольной ориентированного электрического диполя на бесконечно тонком металлическом экране прямоугольной формы разработан высокоэффективный алгоритм расчета сопротивления излучения диполя, расположенного над плоским экраном под произвольным углом. Проведен детальный компьютерный анализ зависимостей сопротивления излучения диполей с разной ориентацией от удаления диполя от экрана, размеров экрана, а также от отношения сторон экрана при фиксированном размере одной из них. Доказана возможность увеличения значения сопротивления излучения диполя, расположенного над экраном на определенной высоте, путем выбора ориентации диполя, оптимальных размеров экрана и отношения его сторон.

В рамках метода рівномірної геометричної теорії дифракції на основі рішення тривимірної задачі дифракції електромагнітного випромінювання довільно орієнтованого електричного диполя на безмежно тонкому металевому екрані прямокутної форми, розроблено високоєфективний алгоритм розрахунку опору випромінювання диполя, розміщеного над плоским екраном під довільним кутом. Проведено детальний комп'ютерний аналіз залежностей опору випромінювання диполей з різною орієнтацією від відстані між ними і екраном, розмірів екрану, а також відношення сторін екрану при фіксованому розмірі однієї із них. Доведено можливість збільшення опору випромінювання диполя, розташованого над екраном на визначеній висоті, шляхом вибору орієнтації диполя, оптимальних розмірів екрана і відношення його сторін.

1. Введение

Как известно, направленные свойства излучающего вибратора существенным образом изменяются в присутствии близко расположенных металлических тел и, в частности, плоского экрана конечных размеров. Расчет и анализ диаграмм направленности элементарных электрических вибраторов, расположенных параллельно и перпендикулярно плоскому экрану квадратной формы, проводился в работах [1,2] строгим методом численного решения интегро-дифференциальных уравнений, приводящим к сложному вычислительному алгоритму и требующим больших затрат машинного времени. В работах [3,4] эта же задача для прямоугольного экрана решалась асимптотическим методом равномерной геометрической теории дифракции (РГТД), который обеспечивает в пределах границ своей применимости достаточную точность расчетов. Для определения границ применимости метода РГТД при разной ориентации диполя относительно экрана в [3,4] рассчитывались диаграммы направленности

при тех же геометрических параметрах анализируемых систем, что и в [1,2]. Сравнение диаграмм направленности, вычисленных строгим и асимптотическим методами, показало, что в случае диполя, параллельного плоскому экрану, результаты совпадают с графической точностью, когда сторона экрана больше или равна длине волны, а при перпендикулярном к экрану диполе – при размере экрана не менее трех длин волн. Таким образом, при анализе во всем пространстве наблюдения характеристик направленности излучающих систем с параметрами, допускающими применение метода РГТД, быстрое действие алгоритмов расчетов на основе этого метода делает его предпочтительней. Важным электрическим параметром, характеризующим эффективность антенн, является сопротивление излучения R_e . В данной статье метод РГТД применяется для расчета сопротивления излучения произвольно ориентированного электрического диполя, расположенного над плоским прямоугольным экраном, в зависимости от его удаления от экрана, размеров и отношения сторон экрана.

2. Алгоритм решения задачи

Рассмотрим излучающую систему, состоящую из металлического экрана – идеально проводящей бесконечно тонкой пластины прямоугольной формы с размерами сторон L и W и произвольно ориентированного электрического диполя длины l , расположенного на расстоянии h от середины экрана. Введем прямоугольную систему координат XYZ , начало которой совпадает с серединой экрана, а оси X и Y параллельны сторонам W и L соответственно.

Асимптотическое решение трехмерной задачи дифракции электромагнитного излучения произвольно ориентированного электрического диполя на бесконечно тонком металлическом экране прямоугольной формы получено в [3] на основе метода РГТД. Общее решение задачи в случае возбуждения экрана диполем, отклоненным на произвольный угол α от оси Z , находится в виде суперпозиции трех независимых решений для диполя с ортогональными ориентациями: вдоль оси Z (вертикальный диполь) и вдоль осей X и Y (горизонтальные диполи). Излучение в дальней зоне диполя, расположенного над прямоугольным экраном, определяем как сумму геометрического поля и полей краевых волн первичной и вторичной дифракций. Геометрическое поле рассчитывается методом зеркальных изображений, заменяющим влияние идеально проводящего экрана бесконечных размеров отраженной волной. Для расчета дифрагированных полей на краях экрана используются асимптотические выражения, полученные из точного решения Ю. Вандакурова задачи дифракции электромагнитных волн, испускаемых произвольно ориентированным электрическим диполем на идеально проводящей полуплоскости [5]. Вследствие конечных размеров экрана геометрические и краевые волны имеют ограниченные области излучения, определяемые в пространстве наблюдения уравнениями границ свет-тень каждой из волн.

Сопротивление излучения R_Σ определяется через излучаемую антенной среднюю мощность P_Σ , которая в сферической системе координат r, θ, φ находится интегрированием по поверхности сферы наблюдения квадрата модуля вектора электрического поля \vec{E}

$$P_\Sigma = \frac{r^2}{240\pi} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} |E|^2 \sin \theta \, d\theta \, d\varphi. \quad (1)$$

С учетом подстановки $E = E_0 f(\theta, \varphi)$, где $E_0 = i60\pi l \exp(-ikr)/\lambda r$, $k = 2\pi/\lambda$, λ – длина волны,

I – величина тока антенны; $f(\theta, \varphi)$ – диаграмма направленности антенной системы, имеем

$$P_\Sigma = AP I^2 / 2.$$

Здесь $A = 30\pi(l/\lambda)^2$ – числовой коэффициент, прямо пропорциональный квадрату электрической длины вибратора l/λ ; P – интеграл от диаграммы направленности антенны во всем пространстве наблюдения. Произведение этих величин суть сопротивление излучения

$$R_\Sigma = AP.$$

В случае диполя, находящегося в свободном пространстве, напряженность электрического поля в дальней зоне равна $E_\theta = E_0 \sin \theta$ (угол θ отсчитывается от оси диполя, здесь и далее временная зависимость опущена). С учетом этого из (1) следует, что $P = 8\pi/3$, а величина сопротивления излучения диполя определяется как $R_\Sigma = 80\pi^2(l/\lambda)^2$.

Рассмотрим влияние экрана бесконечных размеров на сопротивление излучения горизонтального диполя, расположенного на расстоянии h от экрана, с помощью метода зеркальных изображений. В результате интерференции полей падающей и отраженной волн напряженность электрического поля определяется выражением

$$E_\theta = 2E_0 \sin(kh \sin \theta \cos \varphi),$$

где угол φ отсчитывается от нормали к экрану в плоскости, перпендикулярной диполу. Для диполя с такой диаграммой направленности после ряда несложных преобразований имеем

$$P = \frac{8\pi}{3} + \pi \left[\int_0^{\pi/2} \sin^3 \theta J_0(2kh \sin \theta) d\theta - 3 \int_0^{\pi/2} \sin \theta J_0(2kh \sin \theta) d\theta \right]. \quad (2)$$

Преобразование входящих в (2) интегралов с функциями Бесселя $J_0(2kh \sin \theta)$ [6] приводит к следующему выражению для сопротивления излучения диполя над бесконечным экраном R_∞

$$R_\infty = A(8\pi/3 + \pi S(kh)), \quad (3)$$

где

$$S = \frac{-((kh)^2 - 1)\sin(2kh) - 2kh \cos(2kh)}{2(kh)^3} - \frac{3\sin(2kh)}{2kh} \quad (4)$$

Из (3) видно, что величина R_∞ осциллирует относительно значения сопротивления излучения диполя в свободном пространстве, причем амплитуда осцилляций зависит от удаления диполя от экрана. При удалении экрана на бесконечно большое расстояние ($h \rightarrow \infty$) из (4) следует, что $S = 0$, и выражение (3) определяет величину сопротивления излучения диполя в свободном пространстве. В случае $h = 0$ выражение (4) принимает значение $S = -8/3$, а из (3) имеем $R_\infty = 0$. При $h = 0,25\lambda$ получаем $R_\infty = 9,647A$. Необходимо отметить, что метод зеркальных изображений, как и метод РГТД, предполагает выполнение условия $h \ll r$ (r – расстояние от экрана до точки наблюдения).

В случае диполя, расположенного над экраном с конечными размерами, сопротивление излучения определяем подстановкой в выражение (1) квадрата модуля полного поля антенны $|\vec{E}|^2 = |E_\theta|^2 + |E_\phi|^2$, где компоненты E_θ , E_ϕ в сферической системе координат определяются методом РГТД.

3. Анализ результатов расчетов

По разработанным на основе метода РГТД алгоритмам нами были рассчитаны зависимости нормированного сопротивления излучения R_Σ/A электрических диполей с разной ориентацией относительно экрана прямоугольной формы от ширины экрана L , отношения сторон W/L и расстояния между диполем и экраном h . В данной работе эти зависимости приводятся и обсуждаются для вертикального и горизонтального (параллельного одной из кромок экрана) диполей и диполей, расположенных в плоскости ZOY под углом α к оси Z. На рис. 1, а показаны зависимости R_Σ/A горизонтального диполя от размера L стороны квадратного экрана при различных расстояниях h . Здесь же приведены соответствующие значения сопротивления излучения диполей, расположенных над бесконечным экраном R_∞/A . Заметное отличие значений R_Σ и R_∞ наблюдается при размерах экрана $L < 1,3\lambda$, а для больших L значения R_Σ практически совпадают с R_∞ . Максимальное значение $R_\Sigma = 12,87A$ имеет место при $L = 0,7\lambda$ вблизи значения $h = 0,35\lambda$ и превышает R_∞ на 15%, а R_Σ диполя в свободном пространстве – на 54%.

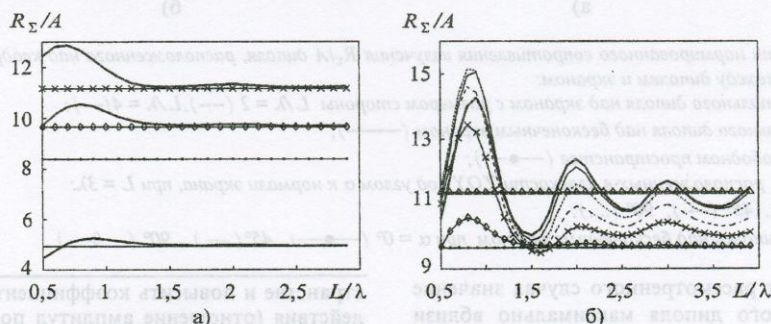


Рис. 1. Зависимости нормированного сопротивления излучения R_Σ/A диполя, расположенного на расстоянии h от квадратного экрана:

а) для горизонтального диполя над бесконечным экраном при $h/\lambda = 0,15$ (—); $0,25$ (—○—); $0,35$ (—×—); соответствующие зависимости для экрана с размером стороны L (—);

для диполя в свободном пространстве (—●—);

б) для диполей, расположенных в плоскости ZOY под углом α к оси Z, при $h/\lambda = 0,25$:

$\alpha = 0^\circ$ (—), 15° (—), 30° (····), 45° (----), 60° (—×—), 90° (—○—);

для тех же диполей над бесконечным экраном при углах $\alpha = 0^\circ$ (—△—), 90° (—●—)

На рис. 1,б представлены зависимости R_Σ вертикального, горизонтального и наклонных диполей от размера экрана при $h = 0,25\lambda$. Видно, что относительное изменение R_Σ вертикального и наклонных диполей, обусловленное влиянием экрана конечных размеров, существенно выше,

чем для горизонтального диполя. Это объясняется большими значениями амплитуд дифракционных полей при вертикальной ориентации диполя. Величина R_Σ вертикального и наклонных диполей, расположенных над конечным экраном, осциллирует относительно величины R_∞ ($R_\infty = 11,3634A$

для вертикального диполя), причем осцилляции носят затухающий характер. Максимальное значение R_{Σ} вертикального диполя достигает величины $14,284A$ при $L = 0,9\lambda$, что превышает значение R_{∞} на 26 %, а значение R_{Σ} диполя в свободном пространстве на 71 %. Относительное изменение R_{Σ} по сравнению с R_{∞} при размере экрана $L = 2\lambda$ составляет 9 %, при $L = 3\lambda$ уменьшается до 3 %.

Величина R_{Σ} в зависимости от расстояния h между диполем и экраном осциллирует относительно значения R_{Σ} диполя в свободном про-

странстве (рис. 2), причем амплитуда осцилляций зависит от ориентации диполя, размера экрана и значения h . В случае горизонтального диполя наличие экрана приводит к уменьшению величины R_{Σ} при $h < 0,2\lambda$ (рис. 2, а). Максимальное значение R_{Σ} имеет место при всех размерах экрана вблизи $h = 0,35\lambda$. При $L = 2\lambda$ максимальное значение $R_{\Sigma} = 11,632A$, таким образом, относительное изменение R_{Σ} по сравнению со значением R_{Σ} диполя в свободном пространстве достигает 39 %. Для следующих двух максимумов при $h = 0,85\lambda$ и $h = 1,35\lambda$ относительное изменение R_{Σ} составляет соответственно 14 % и 10 %.

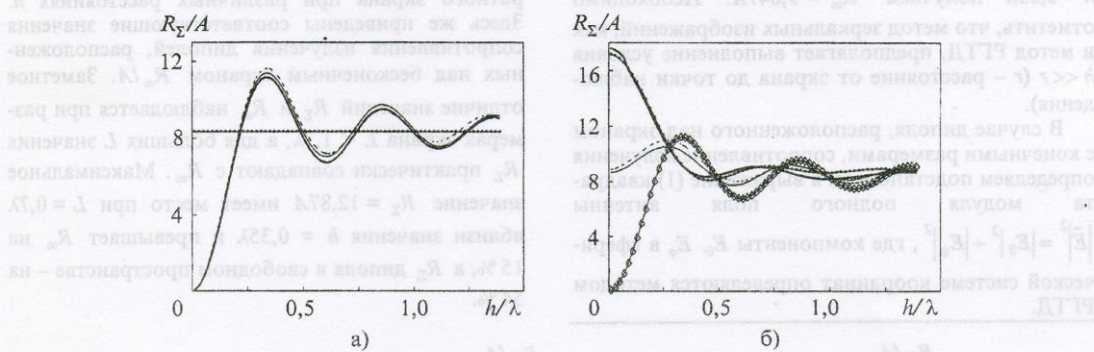


Рис. 2. Зависимости нормированного сопротивления излучения R_{Σ}/A диполя, расположенного над квадратным экраном, от расстояния h между диполем и экраном:

- а) для горизонтального диполя над экраном с размером стороны $L/\lambda = 2$ (----), $L/\lambda = 4$ (—); для горизонтального диполя над бесконечным экраном (—●—); для диполя в свободном пространстве (—●—);
- б) для диполей, расположенных в плоскости ZOY под углом α к нормали экрана, при $L = 3\lambda$: $\alpha = 0^\circ$ (—), 45° (----), 90° (....); для тех же диполей над бесконечным экраном при $\alpha = 0^\circ$ (—●—), 45° (—), 90° (—◇—)

В отличие от рассмотренного случая значение R_{Σ} вертикального диполя максимально вблизи экрана и тем больше, чем меньше размер экрана (рис. 2, б). Значения h , начиная с которых R_{Σ} вертикального диполя, расположенного над экраном, практически становится равным R_{Σ} диполя в свободном пространстве, также зависят от размера экрана. При $h = 0,35\lambda$ относительное изменение R_{Σ} составляет 13% и 7% при размерах экрана $L = \lambda$ и $L = 3\lambda$ соответственно.

Проанализируем далее влияние отношения сторон экрана прямоугольной формы W/L на сопротивление излучения диполя с разной ориентацией. В [3] показано, что надлежащим выбором отношения сторон экрана можно существенно уменьшить излучение вибраторных антенн в направлении нормали к экрану в заднем полупро-

странстве и повысить коэффициент их защитного действия (отношение амплитуд поля в направлениях нормалей в переднем и заднем полупространствах). На рис. 3 приведены линии равных значений R_{Σ}/A вертикального, горизонтального и наклонного диполей, расположенных на расстоянии $h = 0,1\lambda$ и $h = 0,25\lambda$ от прямоугольного экрана в системе координат $(W/L, L)$, где $L = 0,5\lambda \dots 2,5\lambda$ и $W/L = 0,1 \dots 2$. В случае вертикального диполя ($\alpha = 0^\circ$) зависимость R_{Σ} от отношения сторон экрана W/L имеет явно выраженный резонансный характер, особенно при размерах экрана $L = 0,7\lambda \dots 1,2\lambda$ в интервале значений $W/L = 0,7 \dots 1,2$. Величина R_{Σ} горизонтального диполя ($\alpha = 90^\circ$) практически не зависит от отношения сторон экрана, особенно при малых значениях h .

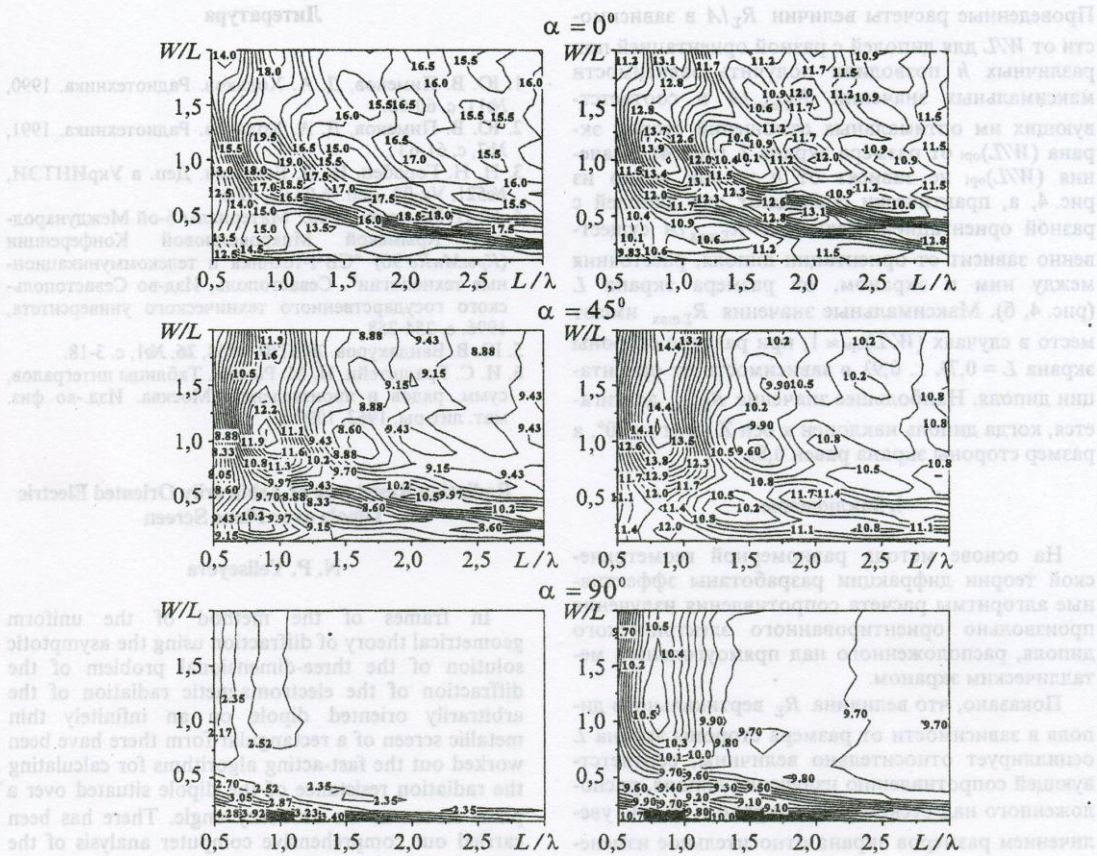


Рис. 3. Линии равных значений нормированного сопротивления излучения R_{Σ}/A диполей с разной ориентацией относительно прямоугольного экрана при $h/\lambda = 0,1$ (слева) и $h/\lambda = 0,25$ (справа) в системе координат $(W/L, L)$

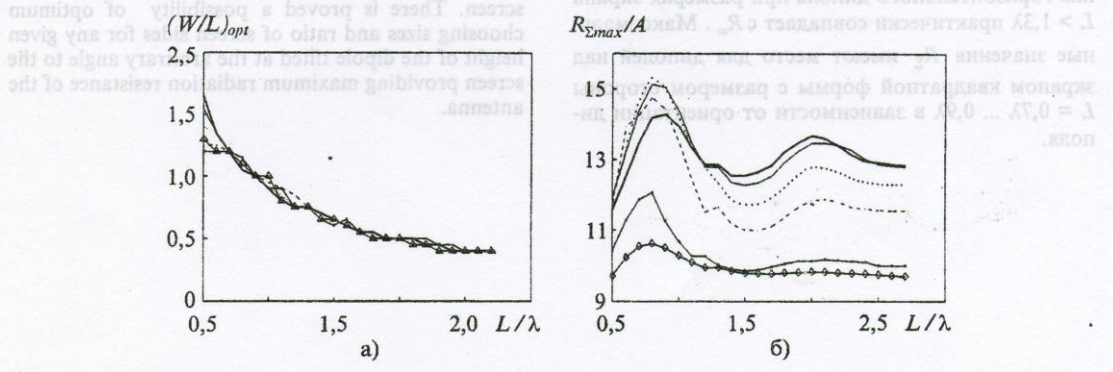


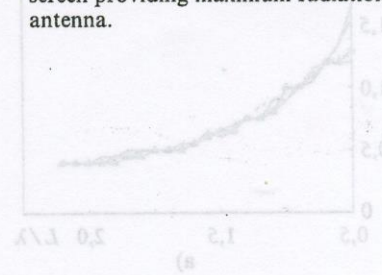
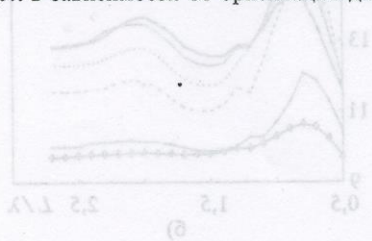
Рис. 4. Зависимости оптимальных отношений сторон экрана $(W/L)_{opt}$ (а) и соответствующих им максимальных значений $R_{\Sigma max}/A$ (б) при $h/\lambda = 0,25$ от размера стороны экрана L для диполей, расположенных в плоскости ZOY под углом α к оси Z :
 $\alpha = 0^\circ$ (—), 15° (—), 30° (····), 45° (----), 75° (—●—), 90° (—○—)

Проведенные расчеты величин R_{Σ}/A в зависимости от W/L для диполей с разной ориентацией при различных h позволили получить зависимости максимальных значений $R_{\Sigma \max}/A$ и соответствующих им оптимальных отношений сторон экрана $(W/L)_{\text{opt}}$ от размера экрана L (рис. 4). Значения $(W/L)_{\text{opt}}$ не зависят от h и, как видно из рис. 4, а, практически совпадают для диполей с разной ориентацией. Величина $R_{\Sigma \max}/A$ существенно зависит от ориентации диполя, расстояния между ним и экраном, от размера экрана L (рис. 4, б). Максимальные значения $R_{\Sigma \max}$ имеют место в случаях $(W/L)_{\text{opt}} \approx 1$, при размере стороны экрана $L = 0,7\lambda \dots 0,9\lambda$ в зависимости от ориентации диполя. Наибольшее значение $R_{\Sigma \max}$ достигается, когда диполь наклонен к оси Z на угол 30° , а размер стороны экрана равен $0,8\lambda$.

4. Заключение

На основе метода равномерной геометрической теории дифракции разработаны эффективные алгоритмы расчета сопротивления излучения произвольно ориентированного электрического диполя, расположенного над прямоугольным металлическим экраном.

Показано, что величина R_{Σ} вертикального диполя в зависимости от размера стороны экрана L осциллирует относительно величины, соответствующей сопротивлению излучения диполя, расположенного над бесконечным экраном, R_{∞} . С увеличением размеров экрана относительное изменение R_{Σ} по сравнению с R_{∞} уменьшается, и в случае экрана квадратной формы со стороной $L = 3\lambda$ составляет 3%. Величина сопротивления излучения горизонтального диполя при размерах экрана $L > 1,3\lambda$ практически совпадает с R_{∞} . Максимальные значения R_{Σ} имеют место для диполей над экраном квадратной формы с размером стороны $L = 0,7\lambda \dots 0,9\lambda$ в зависимости от ориентации диполя.



Литература

1. Ю. В. Пименов, Д. А. Ходьков. Радиотехника. 1990, №11, с. 60-63.
2. Ю. В. Пименов, Д. А. Ходьков. Радиотехника. 1991, №7, с. 61-63.
3. Н. Н. Горобец, Н. П. Елисеева. Деп. в УкрИНТЭИ, №521. Ук-93. Деп.16.03.93, 52 с.
4. Н. П. Елисеева. В сб.: Материалы 6-ой Международной Крымской Микроволновой Конференции (КрыМуКо'96) "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". Севастополь, Изд-во Севастопольского государственного технического университета, 1996, с. 254-258.
5. Ю. В. Вандакуров. ЖЭТФ. 1954, 26, №1, с. 3-18.
6. И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. Москва. Изд-во физ. мат. лит-ры, 1963, 1097 с.

Radiation Resistance of Arbitrarily Oriented Electric Dipole over Plane Screen

N. P. Yeliseyeva

In frames of the method of the uniform geometrical theory of diffraction using the asymptotic solution of the three-dimensional problem of the diffraction of the electromagnetic radiation of the arbitrarily oriented dipole on an infinitely thin metallic screen of a rectangular form there have been worked out the fast-acting algorithms for calculating the radiation resistance of the dipole situated over a plane screen at the arbitrary angle. There has been carried out comprehensive computer analysis of the dependences of the radiation resistance of the dipoles with different orientations on the distance between the dipole and the screen and on the screen sizes and ratio of screen sides for any given length of the screen. There is proved a possibility of optimum choosing sizes and ratio of screen sides for any given height of the dipole tilted at the arbitrary angle to the screen providing maximum radiation resistance of the antenna.

Рис. 4. Зависимости оптимальных отношений сторон экрана $(W/L)_{\text{opt}}$ и соответствующих им максимальных значений $R_{\Sigma \max}/A$ от размера стороны экрана L для диполей, расположенных в плоскости YOZ над экраном ZOY к оси Z : а) $\alpha = 0^\circ$ (—), 30° (---), 45° (—•—), 75° (—•—), 90° (—•—); б) $\alpha = 0^\circ$ (—), 30° (---), 45° (—•—), 75° (—•—), 90° (—•—).