

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2022.6.1.002

УДК 621.396.67

Влияние радиуса идеально проводящего цилиндра на диаграмму направленности расположенной на нем патч-антенны

В. А. Чечеткин ✉, С. Н. Шабунин, А. Н. Коротков

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32

✉ v.a.chechetkin@urfu.ru

Аннотация

В работе рассматривается влияние кривизны проводящей поверхности со слоем диэлектрика, на которой расположена микрополосковая патч-антенна, на ее диаграмму направленности. Для расчета полевых характеристик используется математический аппарат тензорных функций Грина для плоских и цилиндрических слоистых металло-диэлектрических структур. Полученные результаты представляют интерес при проектировании конформных одиночных излучателей и антенных решеток, расположенных на криволинейных поверхностях, которые возможно аппроксимировать цилиндром, например фюзеляж малогабаритных летательных аппаратов или опоры для установки антенных систем. Показано, что кривизна поверхности основания для одиночного элемента слабо влияет на диаграмму направленности в пределах ширины главного лепестка, тем не менее увеличение радиуса используемого цилиндра значительно влияет на уровень заднего лепестка.

Ключевые слова

функции Грина, диаграмма направленности, математическое моделирование, конформные антенны

Для цитирования

Чечеткин В. А., Шабунин С. Н., Коротков А. Н. Влияние радиуса идеально проводящего цилиндра на диаграмму направленности расположенной на нем патч-антенны. *Ural Radio Engineering Journal*. 2022;6(1):54–66. DOI: 10.15826/urej.2022.6.1.002.

Influence of the radius of a perfectly conducting cylinder on the radiation pattern of a patch antenna

V. A. Chechetkin ✉, S. N. Shabunin, A. N. Korotkov

Ural Federal University named after first President of Russia B. N. Yeltsin, 32 Mira Str., Yekaterinburg, 620002, Russia

✉ v.a.chechetkin@urfu.ru

Abstract

In this paper, we consider the change in the directional pattern of a microstrip patch antenna located on a perfectly conducting plane and a cylinder covered with a dielectric layer. The mathematical apparatus

© Чечеткин В. А., Шабунин С. Н., Коротков А. Н., 2022

of the Green's tensor functions for flat and cylindrical layered metal-dielectric structures is used to calculate field characteristics. The obtained results are of special interest in the design of conformal single radiators and antenna arrays located on curved surfaces that can be approximated by a cylinder, for example, the fuselage of small-sized aircraft or supports for the installation of antenna systems. It is demonstrated that the curvature of the base surface for a single element has little effect on the radiation pattern within the width of the main lobe; nevertheless, the increase in the radius of the used cylinder influences the level of the back lobe significantly.

Keywords

green's functions, radiation pattern, mathematical modeling, conformal antennas

For citation

Chechetkin V. A., Shabunin S. N., Korotkov A. N. Influence of the radius of a perfectly conducting cylinder on the radiation pattern of a patch antenna. *Ural Radio Engineering Journal*. 2022;6(1):54–66. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2022.6.1.002.

Введение

Микрополосковые антенны получили широкое распространение благодаря таким своим преимуществам, как низкий профиль получаемой конструкции, конформность, возможность реализации различных видов поляризации на одном излучателе, размещение схем деления мощности в одной плоскости с антенной решеткой, составленной из таких излучателей. Данный тип антенн может быть реализован на диэлектрических подложках любого типа, от воздушных до керамических. Подавляющее большинство антенн и антенных решеток располагаются на плоских поверхностях, тем не менее интерес представляет возможность размещения излучателей на криволинейных поверхностях, таких как цилиндры [1–4]. Цилиндрами с различными диаметрами можно аппроксимировать многие возможные места установки антенн, такие как антенные башни, элементы летательных и плавательных аппаратов и т. д. В связи с этим актуальным становится вопрос применения различных моделей определения характеристик антенн. Моделирование криволинейных поверхностей связано с большей вычислительной сложностью, по сравнению с моделированием плоских поверхностей, поскольку для корректной аппроксимации поверхности зачастую требуется больше элементов разбиения. Для уменьшения времени моделирования антенн, расположенных на поверхностях с большими электрическими радиусами, используется аппарат тензорных функций Грина для слоистых цилиндрических структур [5]. В данной статье рассматрива-

ются диаграммы направленности антенн, расположенных на слое диэлектрика, когда основанием является плоскость или цилиндр. Исследуется изменение формы диаграммы направленности антенны в зависимости от радиуса несущего идеально проводящего цилиндра при продольной и азимутальной ориентации излучателя.

Диаграмма направленности патч-антенны на плоскости

Рассмотрим прямоугольную микрополосковую антенну, расположенную на слое диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ϵ , толщиной d . Антенна длиной L и шириной W ориентирована вдоль оси y , как показано на рис. 1.

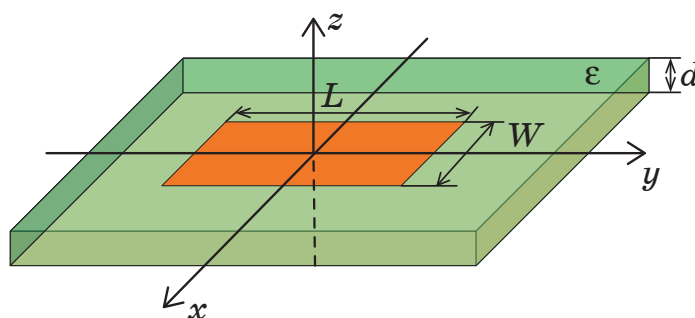


Рис. 1. Расположение микрополосковой антенны на плоской подложке

Fig. 1. Location of the microstrip antenna on the substrate

Строгое решение задачи излучения печатной антенны связано с нахождением функции распределения электрического тока на ее поверхности, например, на основе решения интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода [6]. Однако при первом резонансе в качестве токовой функции с высокой степенью достоверности для печатной антенны, расположенной на плоской подложке, можно использовать первую гармонику [7]:

$$J'_y = \frac{1}{W} \cos\left(\frac{\pi}{L} y'\right) \delta(z' - z_1). \quad (1)$$

Компоненты электрического поля определяются интегрированием соответствующих компонент функций Грина и поверхностного тока. С использованием представления поля при разложении по волнам типа E и H относительно нормали к поверхности (оси z) компоненты вектора напряженности электрического поля определяются следующим образом [8]:

$$E_x = \frac{j\omega\mu}{4\pi^2} \int_{S'} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{k_t^2} \left[\frac{1}{k^2} \frac{\partial^2 g(z, z')}{\partial z \partial z'} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y'} - f(z, z') \frac{\partial^2}{\partial x' \partial y} \right] \times \\ \times e^{-j\xi(x-x')} e^{-j\eta(y-y')} J'_y(x', y', z') d\xi d\eta dS', \quad (2)$$

$$E_y = \frac{j\omega\mu}{4\pi^2} \int_{S'} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{k_t^2} \left[\frac{1}{k^2} \frac{\partial^2 g(z, z')}{\partial z \partial z'} \frac{\partial^2}{\partial y \partial y'} + f(z, z') \frac{\partial^2}{\partial x \partial x'} \right] \times \\ \times e^{-j\xi(x-x')} e^{-j\eta(y-y')} J'_y d\xi d\eta dS', \quad (3)$$

$$E_z = \frac{j\omega\mu}{4\pi^2} \int_{S'} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{k^2} \frac{\partial g(z, z')}{\partial z'} \frac{\partial}{\partial y'} \cdot e^{-j\xi(x-x')} e^{-j\eta(y-y')} J'_y d\xi d\eta dS', \quad (4)$$

где $k_t^2 = \xi^2 + \eta^2$, ξ и η – волновые числа пространственных гармоник, $g(z, z')$ и $f(z, z')$ – характеристическая часть функции Грина.

Интегрирование проводится по области точек стороннего источника (поверхности прямоугольной антенны S'). Результат интегрирования:

$$\int_{-\frac{W}{2}}^{\frac{W}{2}} \frac{1}{W} e^{j\xi x'} dx' = \frac{\sin\left(\frac{W\xi}{2}\right)}{\frac{W\xi}{2}}, \quad (5)$$

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \cos\left(\frac{\pi}{L} y'\right) e^{j\eta y'} dy' = \frac{2L}{\pi} \frac{\cos\left(\frac{L\eta}{2}\right)}{1 - \left(\frac{L\eta}{\pi}\right)^2}.$$

Для случая структуры с одним слоем диэлектрика на проводящем экране характеристические функции Грина после дифференцирования и интегрирования по области точек стороннего источника записываются в следующем виде:

$$\frac{\partial^2 g(z, z')}{\partial z \partial z'} = \frac{k_0^2 \tilde{\gamma}_1 \tilde{\gamma}_2}{j\omega\mu_0 Y_0 (\tilde{\gamma}_1 - j\epsilon'_1 \tilde{\gamma}_2 \cot(\gamma_1 d))}, \\ \frac{\partial g(z, z')}{\partial z'} = \frac{j\tilde{\gamma}_1 \tilde{\gamma}_2}{j\omega\mu_0 Y_0 (\tilde{\gamma}_1 - j\epsilon'_1 \tilde{\gamma}_2 \cot(\gamma_1 d))}, \quad (6) \\ f(z, z') = \frac{1}{j\omega\mu_0 Y_0 (\tilde{\gamma}_2 - j\tilde{\gamma}_1 \cot(\gamma_1 d))}.$$

где $\tilde{\gamma}_n = \gamma_n / k_0$.

После перехода в сферическую систему координат и применения метода перевала получим следующие выражения для составляющих поля в дальней зоне:

$$E_x = \frac{jk_0\mu_0 L}{\pi^2} \frac{e^{-jk_0 R}}{R} e^{jk_0\tilde{\gamma}_2 d} \cos(\theta) A(\varphi, \theta) B(\varphi, \theta) \times \left[\frac{\sin(\varphi)\cos(\varphi)}{k_0^2 \varepsilon_2^2} \frac{k_0^2 \tilde{\gamma}_1 \tilde{\gamma}_2}{\mu_0 Y_0(\tilde{\gamma}_1 - j\varepsilon_1' \tilde{\gamma}_2 \cot(\gamma_1 d))} - \frac{-\sin(\varphi)\cos(\varphi)}{\mu_0 Y_0(\tilde{\gamma}_2 - j\tilde{\gamma}_1 \cot(\gamma_1 d))} \right], \quad (7)$$

$$E_y = \frac{jk_0\mu_0 L}{\pi^2} \frac{e^{-jk_0 R}}{R} e^{jk_0\tilde{\gamma}_2 d} \cos(\theta) A(\varphi, \theta) B(\varphi, \theta) \times \left[\frac{1}{k_0^2 \varepsilon_2^2} \sin^2(\varphi) \frac{k_0^2 \tilde{\gamma}_1 \tilde{\gamma}_2}{\mu_0 Y_0(\tilde{\gamma}_1 - j\varepsilon_1' \tilde{\gamma}_2 \cot(\gamma_1 d))} + \cos^2(\varphi) \frac{1}{\mu_0 Y_0(\tilde{\gamma}_2 - j\tilde{\gamma}_1 \cot(\gamma_1 d))} \right], \quad (8)$$

$$E_z = \frac{jk_0\mu_0 L}{\pi^2} \frac{e^{-jk_0 R}}{R} e^{jk_0\tilde{\gamma}_2 d} \cos(\theta) A(\varphi, \theta) B(\varphi, \theta) \times \left[\frac{1}{k_0^2 \varepsilon_2^2} \sin(\varphi)\sin(\theta) \frac{j\tilde{\gamma}_1 \tilde{\gamma}_2}{\mu_0 Y_0(\tilde{\gamma}_1 - j\varepsilon_1' \tilde{\gamma}_2 \cot(\gamma_1 d))} \right], \quad (9)$$

где

$$A(\varphi, \theta) = \frac{\sin\left(\frac{Wk_0}{2} \cos(\varphi) \sin(\theta)\right)}{\frac{Wk_0}{2} \cos(\varphi) \sin(\theta)},$$

$$B(\varphi, \theta) = \frac{\cos\left(\frac{Lk_0}{2} \sin(\varphi) \sin(\theta)\right)}{1 - \left(\frac{Lk_0}{\pi} \sin(\varphi) \sin(\theta)\right)^2}.$$

Выражения для компонент поля в сферической системе координат имеют следующий вид:

$$E_\theta = E_x \cos(\varphi) \cos(\theta) + E_y \sin(\varphi) \cos(\theta), \quad (10)$$

$$E_\varphi = -E_x \sin(\varphi) + E_y \cos(\varphi).$$

Диаграмма направленности для патча, расположенного на слое диэлектрика толщиной $0,02\lambda_0$ с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_r = 2,3$, показана на рис. 2. С учетом параметров диэлектрика были оценены линейные длина $L = 0,319\lambda_0$ антенн и ширина $W = 1,22L$ антенны.

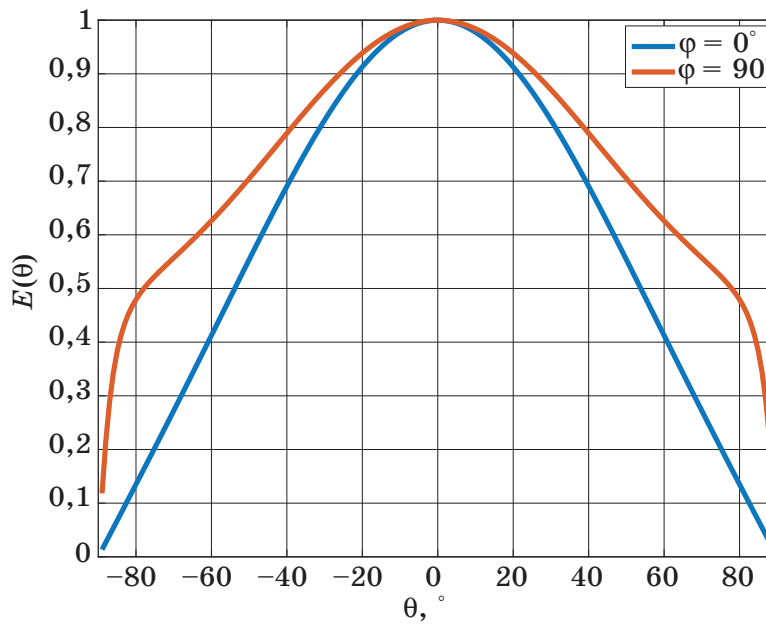


Рис. 2. Диаграмма направленности патч антенны, расположенной на плоской поверхности

Fig. 2. The radiation pattern of a patch antenna located on a flat surface

Диаграмма направленности патч-антенны на цилиндре

Рассмотрим излучение прямоугольной микрополосковой антенны, расположенной на идеально проводящем бесконечном цилиндре, порывтом диэлектриком толщиной d с диэлектрической проницаемостью ϵ , как показано на рис. 3.

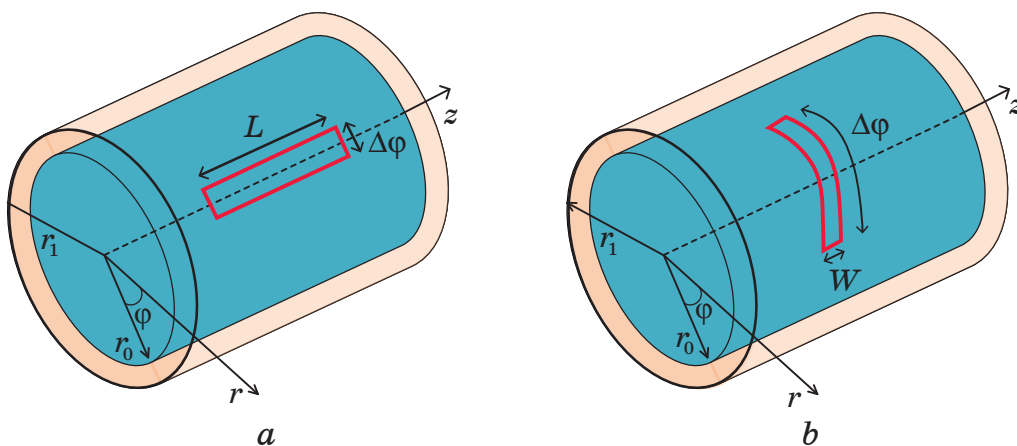


Рис. 3. Расположение патч-антенны на проводящем цилиндре с диэлектрическим покрытием, ориентированной (а) продольно, (б) азимутально

Fig. 3. The location of the patch antenna on a conducting cylinder with a dielectric coating, oriented (a) longitudinally, (b) azimuthally

Основную гармонику функции распределения плотности тока по поверхности антенны для данных случаев можно записать следующим образом:

$$\vec{J}_z^{\text{эсм.}} = \vec{z} \frac{I_0^{\text{э}}}{\Delta\varphi \cdot r_a} \cos\left(\frac{\pi}{L} z'\right) \delta(r' - r_1), \quad (11)$$

для антенны, ориентированной вдоль оси цилиндра и

$$\vec{J}_\varphi^{\text{эсм.}} = \vec{\varphi} \frac{I_0^{\text{э}}}{W \cdot r_a} \cos\left(\frac{\pi}{\Delta\varphi} \varphi'\right) \delta(r' - r_1). \quad (12)$$

для азимутально ориентированной антенны. Ширина продольного излучателя связана с угловым размером по формулу $W = \Delta\varphi \cdot r_1$. Длина азимутально ориентированной антенны связана с угловым размером по формуле $L = \Delta\varphi \cdot r_1$.

В дальней зоне поле излучения антенны, расположенной на идеально проводящем цилиндре со слоем диэлектрика, после применения метода перевала определяется следующими выражениями:

– для продольного излучателя:

$$J_z^{\text{э}} \neq 0,$$

$$E_z = -j \frac{I_0^{\text{э}} L k_0}{\pi^3} \frac{e^{-jkR}}{R} \sum_{m=-\infty}^{\infty} j^m e^{-jm\varphi} \left[\frac{\sin\left(\frac{\Delta\varphi}{2} m\right)}{\frac{\Delta\varphi}{2} m} \right] \times$$

$$\times \frac{\cos\left(\frac{Lk_0}{2} \cos\theta\right) T^V}{1 - \left(\frac{Lk_0}{\pi} \cos\theta\right)^2} \frac{1}{\vec{Y}_{1E}^+ H_m^{(2)}(k_0 r_1 \sin\theta)}, \quad (13)$$

$$H_z = E_z \vec{Y}_{2EH}^C.$$

– для азимутального излучателя:

$$J_\varphi^{\text{эсм}} \neq 0,$$

$$E_z = -j \frac{I_\varphi \Delta\varphi}{\pi^3} \frac{e^{-jkR}}{R} \sum_{m=-\infty}^{\infty} j^m e^{-jm\varphi} \left[\frac{\cos\left(\frac{\Delta\varphi}{2} m\right)}{1 - \left(\frac{\Delta\varphi}{\pi} m\right)^2} \right] \frac{\sin\left(\frac{Lk_0}{2} \cos\theta\right)}{\frac{Lk_0}{2} \cos\theta} \times$$

$$\times \left(\frac{m \cos\theta}{\beta_2^2} \frac{T^V}{\vec{Y}_{1E}^+} - \frac{T^I}{\vec{Z}_{1H}^+} \vec{Z}_{1H}^- \vec{Z}_{1EH}^C \right) \frac{1}{H_m^{(2)}(k_0 r_1 \sin\theta)}, \quad (14)$$

$$H_z = -j \frac{I_\varphi \Delta\varphi}{\pi^3} \frac{e^{-jkR}}{R} \sum_{m=-\infty}^{\infty} j^m e^{-jm\varphi} \left[\frac{\cos\left(\frac{\Delta\varphi}{2} m\right)}{1 - \left(\frac{\Delta\varphi}{\pi} m\right)^2} \right] \frac{\sin\left(\frac{Lk_0}{2} \cos\theta\right)}{\frac{Lk_0}{2} \cos\theta} \times \left(\frac{m \cos\theta}{\beta_2^2} \frac{T^V}{\bar{Y}_{1E}^+} \bar{Y}_{1EH}^C - \frac{T^I}{\bar{Z}_{1H}^+} \bar{Z}_{1H}^+ \right) \frac{1}{H_m^{(2)}(k_0 r_1 \sin\theta)}. \quad (14)$$

Выражения для компонент поля в сферической системе координат имеют следующий вид:

$$E_\theta = -\frac{E_z}{\sin(\theta)}, \quad E_\varphi = Z_0 \frac{H_z}{\sin(\theta)}. \quad (15)$$

Диаграммы направленности, полученные по расчетным формулам (10) и (15), показаны на рис. 4 и 5.

Из приведенных диаграмм направленности следует, что в пределах ширины главного лепестка, которую традиционно определяют по уровню -3 дБ, искривленность основания, на котором располагается излучающий элемент, не оказывает заметного влияния. Азимутально ориентированная антенна возбуждает азимутальные токи на поверхности проводящего цилиндра. Затекание этих токов на теневую сторону формирует относительно существенное излучение с противоположной стороны цилиндра по сравнению с продольно ориентированной антенной. Следует ожидать всплесков заднего излучения при резонансе азимутальных токов на поверхности цилиндра и избегать этого явления. Подобные токи заметно ослаблены для продольно ориентированной антенны.

Для выбранных радиусов цилиндра и параметров диэлектрической подложки в азимутальной плоскости увеличение диаметра проводящего цилиндра в 10 раз уменьшает уровень заднего лепестка на 10 дБ для азимутальной патч-антенны, а для продольной – на 44 дБ.

Оценим коэффициент направленного действия (КНД) для приведенных типов антенн. Расчет КНД основан на интегрировании плотности потока мощности по угловым координатам. Для плоского случая он составит $D \approx 5,47$. КНД для антенны, азимутально ориентированной на цилиндрической поверхности рассчитан с учетом нормировки кросс-поляризационной составляющей к ее же максимуму. Данное допущение связано с ограничением расчетного метода, поскольку при решении используется математическая модель бесконечного проводящего цилиндра. Такая структура способна поддерживать распространение вытекающих волн, имеющих значительную напряженность поля, что не позволяет корректно произвести расчет во всем диапазоне телесных углов. На рис. 6 показана зависимость КНД от радиуса несущего цилиндра.

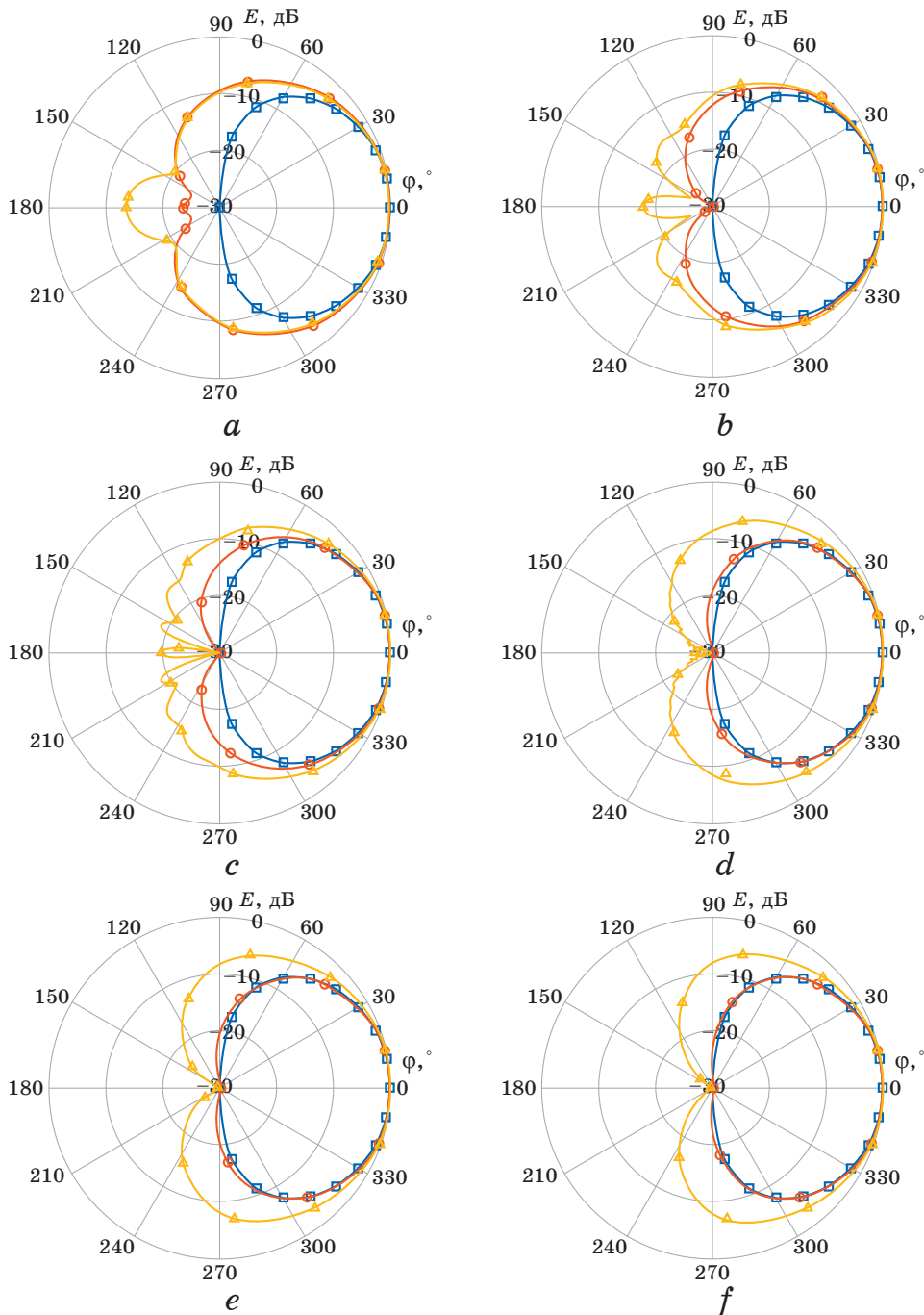


Рис. 4. Диаграммы направленности в азимутальной плоскости для патч-антенн (\square – плоской, \odot – продольной на цилиндре, \triangle – азимутальной на цилиндре), расположенных на идеально проводящих поверхностях с диэлектрической подложкой толщиной $0,02\lambda_0$ и проницаемостью $\varepsilon_r = 2,3$: a – радиус проводящего цилиндра $r = 0,25\lambda_0$; b – $r = 0,5\lambda_0$; c – $r = \lambda_0$; d – $r = 5\lambda_0$; e – $r = 10\lambda_0$; f – $r = 20\lambda_0$

Fig. 4. Radiation patterns in the azimuthal plane for patch antennas (\square – flat, \odot – longitudinal on cylinder, \triangle – azimuthal on cylinder) located on ideally conducting surfaces with the dielectric thickness $0,02\lambda_0$ and permeability $\varepsilon_r = 2,3$: a – radius of the conducting cylinder $r = 0,25\lambda_0$; b – $r = 0,5\lambda_0$; c – $r = \lambda_0$; d – $r = 5\lambda_0$; e – $r = 10\lambda_0$; f – $r = 20\lambda_0$

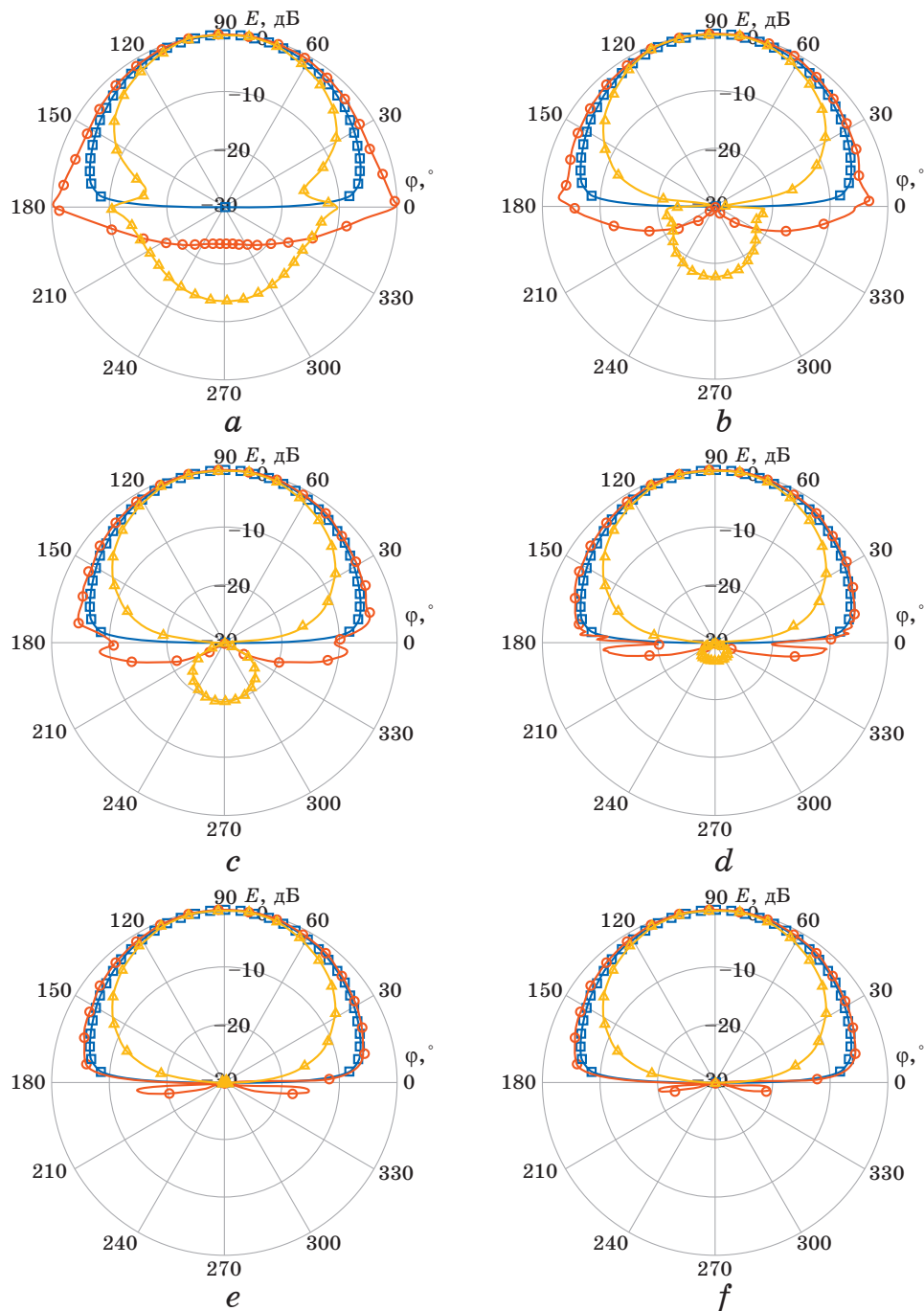


Рис. 5. Диаграммы направленности в угломерной плоскости для патч-антенн (— \square — — плоской, — \circ — — продольной на цилиндре, — \triangle — — азимутальной на цилиндре), расположенных на идеально проводящих поверхностях с диэлектрической подложкой толщиной $0,02\lambda_0$ и проницаемостью $\varepsilon_r = 2,3$: *a* — радиус проводящего цилиндра $r = 0,25\lambda_0$; *b* — $r = 0,5\lambda_0$; *c* — $r = \lambda_0$; *d* — $r = 5\lambda_0$; *e* — $r = 10\lambda_0$; *f* — $r = 20\lambda_0$

Fig. 5. Radiation patterns in the elevation plane for patch antennas (— \square — — flat, — \circ — — longitudinal on cylinder, — \triangle — — azimuthal on cylinder) located on ideally conducting surfaces with the dielectric thickness $0,02\lambda_0$ and permeability $\varepsilon_r = 2,3$: *a* — radius of the conducting cylinder $r = 0,25\lambda_0$; *b* — $r = 0,5\lambda_0$; *c* — $r = \lambda_0$; *d* — $r = 5\lambda_0$; *e* — $r = 10\lambda_0$; *f* — $r = 20\lambda_0$

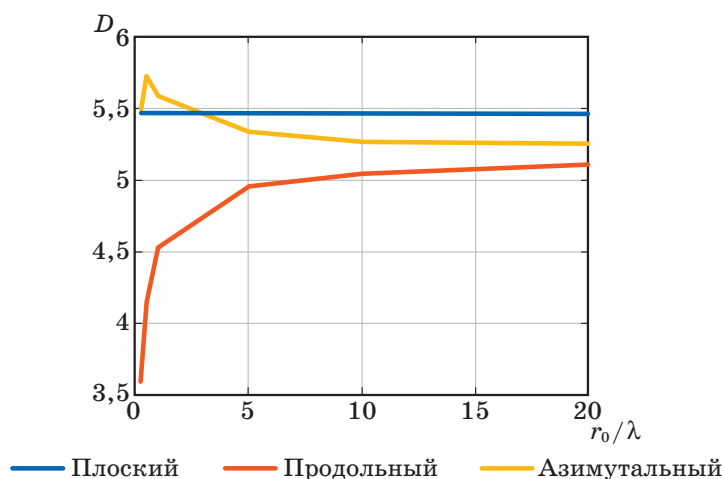


Рис. 6. Зависимость коэффициента направленного действия антенны от радиуса несущего идеально проводящего цилиндра

Fig. 6. Dependence of the antenna directivity on the radius of the carrying ideally conducting cylinder

Заключение

Показано применение тензорных функций Грина плоских и цилиндрических слоистых сред для анализа излучения антенн, расположенных на идеально проводящих поверхностях, покрытых слоем диэлектрика. Представленные аналитические выражения могут быть использованы в качестве первого приближения при расчете микрополосковых антенн различного назначения. Как видно на приведенных диаграммах направленности, использование криволинейной поверхности в качестве основания антенны не оказывает значительного влияния в направлении максимума диаграммы направленности излучателя. В то же время увеличение радиуса несущего цилиндра приводит к уменьшению излучения антенны в направлении задней полуплоскости пространства, что приводит к увеличению коэффициента направленного действия.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-11-2019-052 от 13.12.2019 с Научно-производственным объединением автоматики имени академика Н. А. Семихатова (АО «НПО автоматики») по комплексному проекту «Создание высокотехнологичного производства высокочастотного радара, предназначенного для использования в составе интеллектуальных систем помощи водителю, систем автоматического управления беспилотных транспортных средств и систем интеллектуального земледелия» при участии ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина» (ФГАОУ ВО «УрФУ») в части выполнения научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ.

Acknowledgments

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under agreement No. 075-11-2019-052 dated December 13, 2019 with the Scientific and Production Association of automatics named after academician N. A. Semikhatov in the complex project “Creation of a high-tech production of a high-frequency radar intended to be used as a part of intelligent driver assistance systems, automatic control systems for unmanned vehicles and intelligent farming systems” with the participation of the Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin in terms of the implementation of research, development and technological work.

Список литературы

1. Жаров А. О. Анализ характеристик цилиндрических антенных решеток с круговым сканированием. *Техника XXI века глазами молодых ученых и специалистов*. 2018;(17):244–249.
2. Клыгач Д. С., Вахитов М. Г., Хашимов А. Б. Особенности динамических диаграмм направленности цилиндрических фазированных антенных решеток. *Журнал радиоэлектроники*. 2020;(3):12. DOI: 10.30898/1684-1719.2020.3.12.
3. Alexopoulos N. G., Uslenghi P. L. E., Uzunoglu N. K. Microstrip dipoles on cylindrical structures. *Electromagnetics*. 1983;3(3):311–326.
4. Ashkenazy J., Shtrikman S., Treves D. Conformal microstrip antennas on cylinders. *IEEE Proceedings*. 1988;H135(2):132–134.
5. Chechetkin V., Knyazev S., Panchenko B., Shabunin S. Green's functions of layered structures in Cartesian, Spherical and Cylindrical Coordinates. In: *13th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2019*. Krakow; 2019.
6. Панченко Б. А., Князев С. Т., Шабунин С. Н. Характеристики излучения вибраторов и вибраторных антенных решеток, выполненных на базе полосковых линий. В: *Сборник научно-методических статей по прикладной электродинамике*. М.: Высшая школа; 1983. Вып. 6. С. 183–216.
7. Bhartia P., Inder Bahl, Garg R., Ittipiboon A. *Microstrip Antenna Design Handbook*. Artech House Publishers; 2000. 875 p.
8. Панченко Б. А., Нефедов Е. И. *Микрополосковые антенны*. М.: Радио и связь; 1986. 143 с.

References

1. Zharov A. O. Analysis of the characteristics of cylindrical antenna arrays with circular scanning. *Technology of the XXI century through the eyes of young scientists and specialists*. 2018;(17):244–249. (In Russ.)
2. Klygach D. S., Vakhitov M. G., Khashimov A. B. Features of dynamic directional patterns of cylindrical phased antenna arrays. *Journal of Radioelectronics*. 2020;(3):12. (In Russ.) DOI: 10.30898/1684-1719.2020.3.12
3. Alexopoulos N. G., Uslenghi P. L. E., Uzunoglu N. K. Microstrip dipoles on cylindrical structures. *Electromagnetics*. 1983;3(3):311–326.

4. Ashkenazy J., Shtrikman S., Treves D. Conformal microstrip antennas on cylinders. *IEEE Proceedings*. 1988;H135(2):132–134.

5. Chechetkin V., Knyazev S., Panchenko B., Shabunin S. Green's functions of layered structures in Cartesian, Spherical and Cylindrical Coordinates. In: 13th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2019. Krakow; 2019.

6. Panchenko B. A., Knyazev S. T., Shabunin S. N. Radiation characteristics of vibrators and vibrator antenna arrays made on the basis of strip lines. In: *Collection of scientific and methodological articles on applied electrodynamics*. Moscow: Vysshaya shkola; 1983. Iss. 6, pp. 183–216. (In Russ.)

7. Bhartia P., Inder Bahl, Garg R., Ittipiboon A. *Microstrip Antenna Design Handbook*. Artech House Publishers; 2000. 875 p.

8. Panchenko B. A., Nefedov E. I. *Microstrip antennas*. Moscow: Radio i svyaz; 1986. 143 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Чечеткин Виктор Алексеевич, младший научный сотрудник департамента радиоэлектроники и связи Института радиоэлектроники и информационных технологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Шабунин Сергей Николаевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Коротков Алексей Николаевич, старший преподаватель департамента радиоэлектроники и связи Института радиоэлектроники и информационных технологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Information about the authors

Victor A. Chechetkin, Junior Researcher, Department of Radioelectronics and Communications, Institute of Radioelectronics and Information Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Sergey N. Shabunin, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Radioelectronics and Telecommunications, Institute of Radioelectronics and Information Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Alexey N. Korotkov, Senior Lecturer, Department of Radioelectronics and Communications, Institute of Radioelectronics and Information Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Поступила / Received: 11.11.2021

Принята в печать / Accepted: 07.12.2021