УДК: 621.396.67.095 DOI: 10.26907/rwp29.2025.587-590

ИМПУЛЬСНЫЕ И ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ, ИЗЛУЧАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СИГНАЛЫ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО ДИАПАЗОНА

Е.А. Серегина, А.А. Кононов, Г.К. Усков

Воронежский государственный университет, 394018, г. Воронеж, Университетская пл., 1
E-mail: seregina@electrocom-v.ru, kononov@phys.vsu.ru, uskov@phys.vsu.ru

Аннотация. В работе исследовано влияние цилиндрической апертурной поверхности на спектральные характеристики излучаемого ею сигнал, при этом как расположение точки наблюдения в ближней зоне антенны, так и границы частотного диапазона могут быть произвольным. Приведены расчётные соотношения для первообразной импульсной характеристики и показано, как на её основе может быть рассчитан частотный коэффициент передачи. Даны конкретные примеры применения полученных выражений в типовых частных случаях.

Ключевые слова: анализ ближнего поля; апертурный излучатель; СШП антенны; импульсная характеристика; поляризационный множитель; распространение волн; цилиндрическая апертура

IMPULSE AND FREQUENCY RESPONSES OF A CYLINDRICAL SURFACE EMITTING ULTRAWIDEBAND ELECTROMAGNETIC SIGNALS

E.A. Seregina, A.A. Kononov, G.K. Uskov

Abstract. The influence of a cylindrical aperture surface on the spectral characteristics of the signal radiated by it is investigated, while both the observation point location in the near zone of the antenna and the frequency range boundaries may be arbitrary. The calculation relations for the primitive impulse response are given, and it is shown how the frequency transfer coefficient can be calculated on its basis. Particular examples of the application of the obtained expressions in typical special cases are given.

Keywords: near field analysis; aperture radiator; UWB antennas; impulse response; polarization factor; wave propagation, cylindrical aperture

Введение

Востребованность апертурных излучателей в современных радиотехнологиях обоснована их сравнительно высокой степенью приспособленности к формированию импульсных полей сверхширокополосного (СШП) диапазона [1–4]. В частности, для излучения сигналов в форме сверхкоротких импульсов (СКИ) может быть применена биконическая антенна, обладающая рядом благоприятных свойств, которые также допускают дальнейшее улучшение за счёт использования дополнительной вставки из неоднородного диэлектрика [4–6]. Если антенну описанного типа моделировать круговой цилиндрической апертурой, ограниченной по высоте, то становится возможным решение задач теоретического анализа создаваемого ею излучения с помощью метода расчёта импульсных характеристик (ИХ); заметим, что указанный подход в особенности актуален в приложении к СШП полям [7–9].

Начало исследованию пространственно-временной зависимости импульсного поля, являющегося откликом цилиндрической апертуры на сигнал в виде дельта-функции, было положено в работах [10, 11], представляющими собой по совместительству, фактически, первый конкретный пример применения методики расчёта ИХ (описанной и опробованной, в числе прочего, в [12–14] применительно к плоским апертурам) к поверхности с ненулевой кривизной. Впоследствии этот анализ дополнился и расширился: в [15] было учтено влияние, оказываемое поляризационным множителем, позволяющим более корректно описывать вклад каждого бесконечно малого участка апертуры в результирующую векторную величину поля. При этом, однако, целевой расчётной характеристикой по-прежнему оставалась именно зависимость во временной области; в то время как этого, разумеется, вполне достаточно для вычисления откликов апертуры на реальные входные сигналы, представляет отдельный интерес получение также и частотных характеристик исследуемого антенного устройства в СШП диапазоне. В данной работе будет показано, как они могут быть найдены на основе уже достигнутых ранее теоретических результатов.

Вычисление спектра апертуры на основе первообразной импульсной характеристики

Поставим себе целью проанализировать спектральные свойства апертуры в виде прямого кругового цилиндра радиусом R_c, ориентированного вдоль оси Oz и ограниченного по высоте интервалом $-L \le z \le L$. Основной расчётной величиной при этом будет являться «частотный коэффициент передачи» (ЧКП) $\dot{H}_z(\vec{r},\omega)$, связывающий входной сигнал с соответствующим полем в точки наблюдения $\vec{r}$ (точнее, со спектральной составляющей этого поля на частоте ω); здесь и далее по умолчанию всюду подразумевается главная (т. е. направленная вдоль Oz) векторная компонента. Сначала необходимо напомнить некоторые важнейшие положения, полученные в предшествующих исследованиях (и позволяющие найти временную зависимость, на основе которой $\dot{H}_z$, в сущности, вычисляется с помощью преобразования Фурье).

Как известно [9, 10], отклик апертуры S_a на входной сигнал $s(t)$ имеет вид свёртки

$$E_z(\vec{r},t) = \frac{d}{dt}\left(s(t) * H_z\right) = \frac{ds(t)}{dt} * H_z(\vec{r},t) = s(t) * \frac{dH_z(\vec{r},t)}{dt}, \tag{1}$$

где первообразная импульсной характеристики (ПИХ) определяется (с помощью поляризационного множителя $\vec{\alpha}(\vec{r},\vec{r}_a)$ и функции освещённости $q(\vec{r}_a)$, для простоты ниже полагаемой равной единице) как

$$H_z(\vec{r},t) = \frac{1}{2\pi c}\iint\limits_{S_a} \delta\left(t - \frac{R}{c}\right)\cdot\frac{q(\vec{r}_a)\vec{\alpha}(\vec{r},\vec{r}_a)}{R}\,dS_a, \quad R = \left|\vec{r}-\vec{r}_a\right|, \quad c \approx 3\cdot 10^8\ \frac{м}{c}, \tag{2}$$

В данном случае выражение (2) без учёта поляризационного множителя равно

$$H_z(\vec{r},t) = \sum_{n=1}^{2}\frac{R_c\cdot\left(\mathbf{F}\left(\frac{\Delta\varphi_{max}}{2},\kappa\right)-\mathbf{F}\left(\frac{\Delta\varphi_{min}}{2},\kappa\right)\right)}{\pi\sqrt{(ct)^2-(\rho-R_c)^2}}, \quad \kappa = \sqrt{\frac{4R_c\rho}{(ct)^2-(\rho-R_c)^2}}, \quad \rho = \sqrt{x^2+y^2}, \tag{3}$$

а при $\vec{\alpha}(\vec{r},\vec{r}_a) = \vec{e}_z - (\vec{e}_z,\vec{e}_R)\vec{e}_R$, $\vec{e}_R = \frac{\vec{r}-\vec{r}_a}{|\vec{r}-\vec{r}_a|}$ (см. [15]) приобретает поправку

$$\Delta H_z(\vec{r},t) = -\sum_{n=1}^{2}\frac{R_c\sqrt{(ct)^2-(\rho-R_c)^2}\cdot\left(\mathbf{E}\left(\frac{\Delta\varphi_{max}}{2},\kappa\right)-\mathbf{E}\left(\frac{\Delta\varphi_{min}}{2},\kappa\right)\right)}{\pi(ct)^2}, \tag{4}$$

где использованы обозначения для эллиптических интегралов 1-го и 2-го рода:

$$\mathbf{F}(\phi,\kappa) = \int_0^{\phi}\frac{d\theta}{\sqrt{1-\kappa^2\sin^2\theta}}, \quad \mathbf{E}(\phi,\kappa) = \int_0^{\phi}\sqrt{1-\kappa^2\sin^2\theta}\,d\theta, \tag{5}$$

а также для диапазонов углов интегрирования [10, 15]:

$$\Delta\varphi_{min} = \begin{cases} \arccos\dfrac{(L-\zeta_n)^2-(ct)^2+\rho^2+R_c^2}{2\rho R_c}, & t > \dfrac{\sqrt{(L-\zeta_n)^2+(\rho-R_c)^2}}{c}, \\ 0, & t < \dfrac{1}{c}\sqrt{(L-\zeta_n)^2+(\rho-R_c)^2}, \end{cases} \quad \zeta_n = (-1)^n z, \tag{6}$$

$$\Delta\varphi_{max} = \begin{cases} \arccos\dfrac{R_c^2+\rho^2-(ct)^2+(L+\zeta_n)^2\cdot\Theta(-L-\zeta_n)}{2\rho R_c}, & t < \dfrac{\sqrt{\rho^2-R_c^2+(L+\zeta_n)^2\cdot\Theta(-L-\zeta_n)}}{c}, \\ \arccos\dfrac{R_c}{\rho}, & t > \dfrac{\sqrt{\rho^2-R_c^2+(L+\zeta_n)^2\cdot\Theta(-L-\zeta_n)}}{c}. \end{cases} \tag{7}$$

С учётом соотношений (1) ясно, что вышеуказанным ЧКП оказывается величина

$$\dot{H}_z(\vec{r},\omega) = F_t\left[\frac{d}{dt}H_z(\vec{r},t)\right] = i\omega\cdot F_t\left[H_z(\vec{r},t)\right], \tag{8}$$

вычисляемая по формулам (3)–(7), причём преобразование Фурье по временной переменной (обозначенное в (8) как F_t) здесь относительно легко находится численно (ввиду того что ПИХ как функция времени финитна, то есть сосредоточена на конечном интервале). В следующем разделе это будет продемонстрировано на конкретных примерах.

Примеры применения полученных соотношений

На рис. 1–3 показаны графики ПИХ и модуля ЧКП цилиндрической апертуры, размеры которой заданы параметрами $R_c = 1.0\,м$ и $L = 0.5\,м$ для нескольких типичных вариантов расположения точки наблюдения (соответственно вблизи апертуры, на некотором расстоянии перед ней, а также вне прожекторного луча).

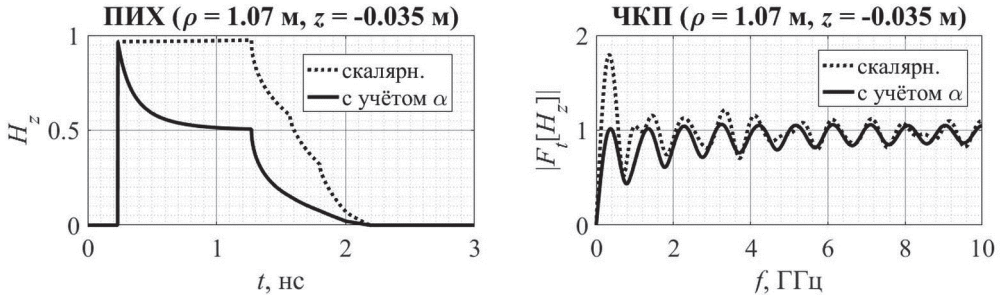

Рис. 1. Пример вычисления ПИХ и ЧКП для точки наблюдения вблизи апертуры

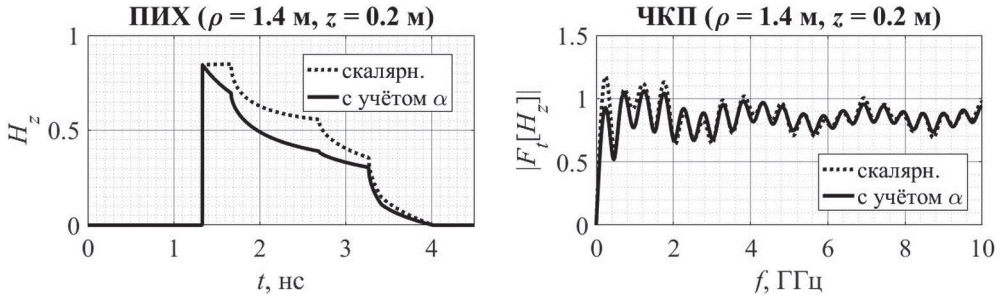

Рис. 2. Пример вычисления ПИХ и ЧКП для точки наблюдения перед апертурой

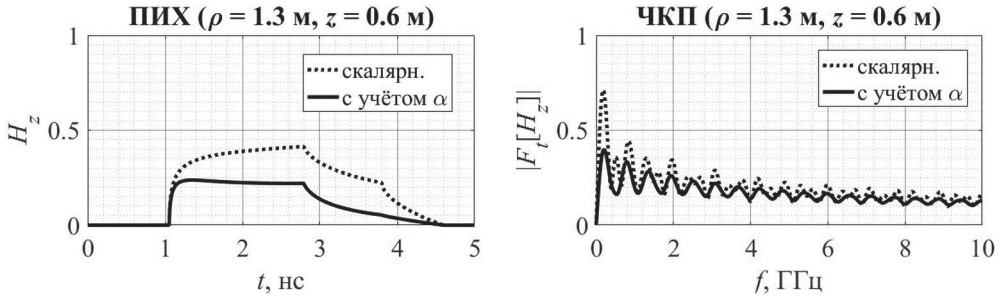

Рис. 3. Пример вычисления ПИХ и ЧКП для точки наблюдения вне прожекторного луча

Заключение

В работе проведено исследование спектральных характеристик цилиндрической апертуры с равномерной освещённостью. Даны формулы для вычисления частотного коэффициента передачи (при произвольном расположении точки наблюдения) на основе аналитически найденной первообразной импульсной характеристики. Показаны примеры типичного вида результатов расчёта по приведённым выражениям.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00891, https://rscf.ru/project/24-19-00891/. Для выполнения численных расчетов в работе использовалось оборудование учебно-научного дизайн-центра проектирования радиоэлектронных систем СВЧ, терагерцового и оптического диапазонов на отечественной электронной компонентной базе ФГБОУ ВО «ВГУ» в рамках реализации федерального проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности».

Список литературы

1. Liao X.J., Yang H.C., Han N., Li Y. Aperture UWB antenna with triple band-notched characteristics // Electronics Letters. – 2011. – Vol. 47, no. 2. – P. 77–79.
2. Lin Y.-C., Hung K.-J. Compact Ultrawideband Rectangular Aperture Antenna and Band-Notched Designs // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2006. – Vol. 54, no. 11. – P. 3075–3081.
3. Bobreshov A.M., Uskov G.K., Kretov P A., Sbitnev N.S. Ultrawideband TEM Horn with Inhomogeneous Dielectric Medium // Microwave and Optical Technology Letters. – 2020. – Vol. 63. – No. 2. – P. 581–586.
4. Bobreshov A.M., Zhabin A.S., Seregina E.A., Uskov G.K. Biconical antenna with inhomogeneous dielectric lens for UWB applications // Electronics Letters. – 2020. – Vol. 56. – No. 17. – P. 857–859.
5. Бобрешов А.М., Серегина Е. А., Смусева К. В., Усков Г. К. Влияние неоднородной диэлектрической структуры на частотный диапазон биконической антенны // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – Севастополь, 2020. – № 1-2. – С. 184–185.
6. Бобрешов А.М., Смусева К.В., Серегина Е.А., Усков Г.К. Методика уменьшения боковых лепестков диаграммы направленности биконической антенны // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – Севастополь, 2022. – № 4. – С. 108–109.
7. Bruton L. T., Premaratne S., Agathoklis P. On the Dynamical Response of the Ideal Paraboloidal Reflector // IEEE Access. 2022. – Vol. 10. – P. 6899–6908.
8. Ianconescu R., Heyman E. Pulsed field diffraction by a perfectly conducting wedge: a spectral theory of transients analysis // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1994. – Vol. 42. – No. 6. – P. 781–789.
9. Skulkin S.P., Lysenko N.A., Uskov G.K., Kascheev N.I. Transient Far Fields of Aperture Antennas // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2019. – Vol. 18. – No. 5. – P. 1036–1040.
10. Бобрешов А.М., Кононов А.А., Серегина Е.А., Смусева К.В., Усков Г.К., Скулкин С.П. Применение аналитического метода расчета импульсно-переходной характеристики для анализа импульсного поля, излученного цилиндрической апертурой // Сборник трудов XXIX Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь»: в 5 т. – Воронеж, 2023. – Т. 4. – С. 227–233.
11. Кононов А.А., Серегина Е.А., Смусева К.В., Усков Г.К., Скулкин С.П. Метод расчета первообразной импульсной характеристики для анализа импульсного поля цилиндрической апертуры // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – Севастополь, 2023. – № 5. – С. 81–82.
12. Лысенко Н.А., Бобрешов А.М., Копытин В.Е., Усков Г.К., Скулкин С.П. Поляризационные множители для анализа полей апертурных антенн во временной области методом импульсных характеристик // Сборник трудов XXVI Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь»: в 6 т. – Воронеж, 2020. – Т. 5. – С. 144–155.
13. Копытин В.Е., Лысенко Н.А., Усков Г.К., Скулкин С.П. Расчет монохроматического поля апертурной антенны в ближней зоне // Сборник трудов XXVII Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь»: в 4 т. – Воронеж, 2021. – Т. 3. – С. 398–405.
14. Baum C.E. Intermediate field of an impulse-radiating antenna // Ultra-Wideband Short-Pulse Electromagnetics 4 (IEEE Cat. No. 98EX112). – 1999. – P. 77–89.
15. Бобрешов А.М., Кононов А.А., Серегина Е.А., Усков Г.К. Вычисление первообразной импульсной характеристики цилиндрической апертуры с учетом влияния поляризационного множителя // Сборник трудов XXXI Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь»: в 6 т. – Воронеж, 2025. – Т. 4. – С. 238–245.