

МОДЕЛИРОВАНИЕ БИКОНИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ В ШИРОКОЙ ПОЛОСЕ ЧАСТОТ

В.А. Калошин, Е.С. Мартынов, Е.А. Скородумова
 Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
 vak@cplire.ru

Различными методами проведено исследование согласования и диаграмм направленности трех различных конструкций биконической антенны - с плоской вершиной, без вершины и со сферической вершиной в широкой полосе частот. При этом показано, что для моделирования коэффициента отражения оптимальным является метод конечных элементов, а для вычисления диаграммы направленности – метод интегральных уравнений и асимптотический метод. Асимптотический метод позволяет также дать оценку согласования во всей полосе частот, включая низкочастотную область. Проведен анализ влияния питающего кабеля на диаграмму направленности биконической антенны.

В связи с развитием сверхширокополосной связи и радиолокации актуальной задачей является исследование возможностей излучения в сверхширокой полосе частот [1]. Одним из сверхширокополосных излучателей является биконическая антенна. В силу осевой симметрии биконическая антенна имеет всенаправленную в горизонтальной плоскости диаграмму направленности и может обеспечить удовлетворительное согласование в полосе частот несколько октав. В угломестной плоскости эта антенна формирует однолепестковую диаграмму направленности, ширина луча которой зависит от частоты. На высоких частотах однолепестковый характер диаграммы направленности может нарушаться.

Исследованию биконических антенн посвящено большое количество работ, в каждой из которых, как правило, рассмотрена одна из конструкций и применяется один метод анализа (см., например, [2]). В данной работе анализируются три типа биконических антенн, которые представлены на рис. 1, и для их анализа используются три метода. Эти антенны исследованы в работе как с точки зрения их согласования со входом 50-Омной питающей линии, так и с точки зрения формирования однолепестковой диаграммы направленности в угломестной плоскости. Исследовано также влияние питающей коаксиальной линии на характеристики излучения.

Для анализа использованы асимптотический и два численных метода (конечных элементов и интегральных уравнений).

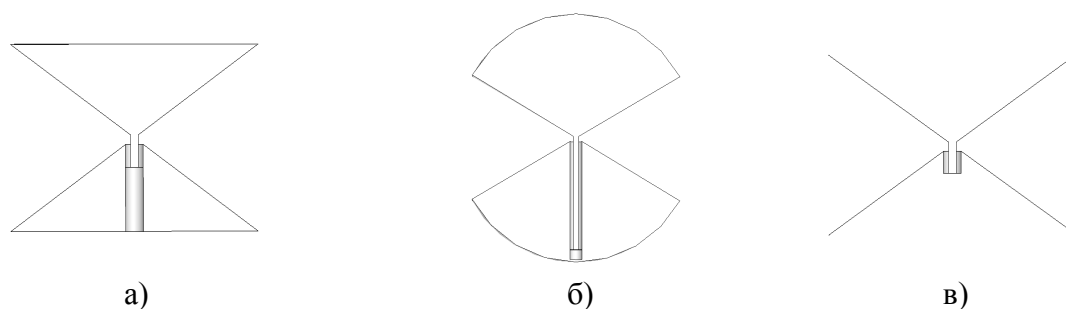


Рис. 1. Биконические антенны

Во всех исследованных в работе типах биконической антенны (рис. 1а, 1б, 1в) можно выделить три области: питающую коаксиальную линию, биконическую линию (далее биконус) и область между ними (возбудитель). Во всех случаях поле внутри биконуса может быть представлено в виде собственных волн (мод) биконуса. Если размеры возбудителя много меньше длины волны, то внутри биконуса возбуждается практически только основная мода. Азимутальную компоненту магнитного поля этой моды можно представить в виде [2]:

$$H_{\varphi} = \frac{H_0}{\sqrt{r}} H_{1/2}^{(2)}(kr), \quad \theta_0 \leq \theta \leq \pi - \theta_0, \quad (1)$$

где (r, θ, φ) – сферические координаты, ось которых совпадает с осью симметрии биконуса, k – волновое число свободного пространства, $H_{1/2}^{(2)}(kr)$ – цилиндрическая функция Ханкеля второго рода, θ_0 – угол между образующей биконуса и осью вращения. Отраженную моду можно записать в таком же виде с заменой функции Ханкеля второго рода на функцию Ханкеля первого рода.

Следует отметить, что при излучении могут возбуждаться отраженные моды высших порядков. Азимутальная компонента этих мод может быть представлена в виде:

$$H_\varphi = \frac{H_0}{\sqrt{r}} H_{n+1/2}^{(2)}(kr) \left(P_{\nu(n)}^1(\cos \theta) - P_{\nu(n)}^1(-\cos \theta) \right), \quad (2)$$

$$\theta_0 \leq \theta \leq \pi - \theta_0,$$

где $P_{\nu(n)}^1(x)$ – присоединенные функции Лежандра первого рода, а их индексы $\nu(n)$ определяются из дисперсионного уравнения:

$$P_{\nu(n)}^1(\cos \theta_0) - P_{\nu(n)}^1(-\cos \theta_0) = 0.$$

Поскольку эти моды не могут эффективно возбудить питающую линию, они отражаются от возбуждателя и излучаются.

Для асимптотического решения задачи возбуждения биконической антенны использована идея метода краевых волн [3]. Иными словами, решение для диаграммы направленности представлено в виде суммы приближения Кирхгофа и краевых волн, диаграммы которых представляют собой разность диаграмм направленности решения Зоммерфельда для краевой волны клина и соответствующего выражения в приближении Кирхгофа. В результате асимптотического вычисления интеграла Кирхгофа везде, кроме области вблизи оси, для диаграммы направленности нетрудно получить:

$$D(\varphi, \theta) = F(\sqrt{ka}S_a) - F(\sqrt{ka}S_b) + \frac{e^{ikaS_a^2 + i\frac{\pi}{2}}}{\sqrt{ka}} \left[\sqrt{\frac{\sin \theta_0}{2\sin \theta}} \cdot g(0, \pi - \theta + \theta_0) - \frac{1}{2S_a} \right] +$$

$$+ \frac{e^{ikaS_b^2 + i\frac{\pi}{2}}}{\sqrt{ka}} \left[\sqrt{\frac{\sin \theta_0}{2\sin \theta}} \cdot g(0, \theta + \theta_0) + \frac{1}{2S_b} \right] + \frac{1}{ka} \sqrt{\frac{\sin \theta_0}{\sin \theta}} \left[g(0, \pi + \theta + \theta_0) e^{ika \cos(\theta - \theta_0)} + g(0, 2\pi - \theta + \theta_0) e^{-ika \cos(\theta + \theta_0)} \right], \quad (3)$$

где

$$F(x) = \int_{-\infty}^x e^{it^2} dt, \quad g(x, y) = g^- + \varepsilon g^+, \quad ?$$

$$g^\pm = \frac{1}{c} \sin \frac{\pi}{c} \left(\cos \frac{\pi}{c} - \cos \frac{x \pm y}{c} \right)^{-1}$$

$$S_a = \sqrt{1 - \cos(\theta - \theta_0)}, \quad S_b = \sqrt{1 + \cos(\theta + \theta_0)},$$

a – длина образующей биконуса, а коэффициент c для излучателей, изображенных на рис. 1а, 1б и 1в, соответственно, равен $c_1 = \frac{3\pi/2 + \theta_0}{\pi}$, $c_2 = \frac{3}{2}$, $c_3 = 2$.

Используя полученную в работах [4,5] формулу и выражения для диаграмм краевых волн из выражения (3), нетрудно получить асимптотическое представление для коэффициента отражения от апертуры биконуса основной моды:

$$R_{00} = \frac{\sqrt{2\pi}}{2ka(\pi - 2\theta_0)} e^{-i\frac{\pi}{4} + 2ika} g(0, 0, c). \quad (4)$$

Если $\theta_0 = 66^\circ$, то входное сопротивление биконуса равно 50 Ом и отражение основной моды от апертуры антенны определяет полный коэффициент отражения в биконической антенне. Как уже отмечено выше, высшие моды вклад в коэффициент отражения не дают.

Зависимость коэффициента отражения от частоты, вычисленная с помощью метода конечных элементов (МКЭ), для первого, второго и третьего типа излучателей при $\theta_0 = 66^\circ$ представлена на рис. 2 кривыми 1, 2 и 3, соответственно. Четвертая кривая на рис. 2 получена для второго типа излучателей с использованием формулы (4). Как видно из рисунка, для всех вариантов излучателей коэффициент отражения меньше -10 дБ в широкой полосе частот, начиная примерно с $ka = 3$. Отметим, что второй излучатель имеет наименьшую частоту, при которой коэффициент отражения становится меньше -10 дБ. Отметим также, что нижняя граница полосы частот согласования достаточно хорошо описывается асимптотической формулой (4).

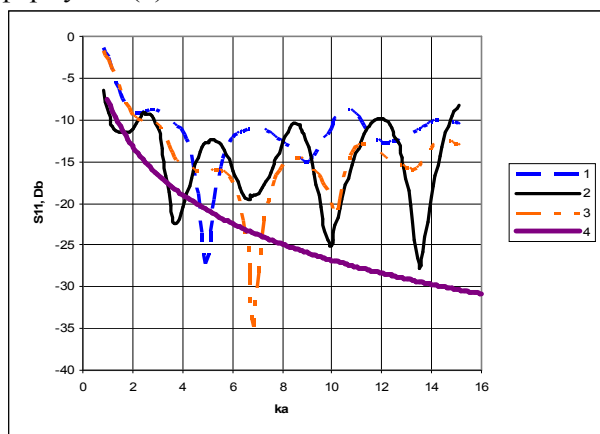


Рис. 2. Коэффициент отражения для различных типов биконических излучателей

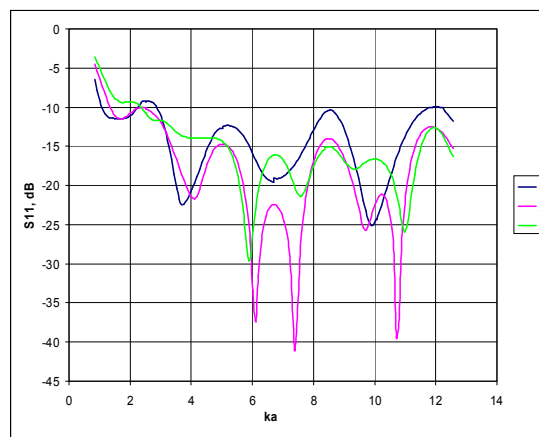


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения от частоты для различных углов между образующими биконической антенны второго типа

На рис. 3 показана частотная зависимость коэффициента отражения в зависимости от угла при вершине биконуса $2\theta_0$ для трех значений $\theta_0 = 60^\circ$ (кривая 1), $\theta_0 = 66^\circ$ (кривая 2) и $\theta_0 = 70^\circ$ (кривая 3). Из рисунка видно, что значение $\theta_0 = 66^\circ$ действительно является оптимальным с точки зрения согласования антенны по уровню -10 дБ.

Следует отметить, что было проведено вычисление коэффициента отражения от биконической антенны методом интегральных уравнений (МИУ) [6]. Однако сходимость этого метода для данной задачи оказалась хуже, чем при использовании МКЭ.

Диаграммы направленности поля биконической антенны второго типа вычислялись тремя методами (МКЭ, МИУ и асимптотическим) для двух значений ka : $ka = 6$ и $ka = 30$. Для $ka = 6$ диаграммы направленности, вычисленные с помощью МКЭ и МИУ, практически совпадают. Диаграммы направленности для $ka = 30$, вычисленные с помощью трех различных методов: асимптотического, МКЭ и МИУ, представлены на рис. 4. Как видно из рисунка, результаты вычисления диаграмм направленности асимптотическим методом и МИУ совпадают в области главного и боковых лепестков. Результаты, полученные с помощью МКЭ, достаточно хорошо совпадают с ними только в области главного лепестка. Следует отметить, что несовпадение результатов вычисления диаграммы направленности по асимптотической формуле и МИУ вблизи оси ($\theta = 0^\circ, 180^\circ$) объясняется неравномерностью асимптотических формул в этой области.

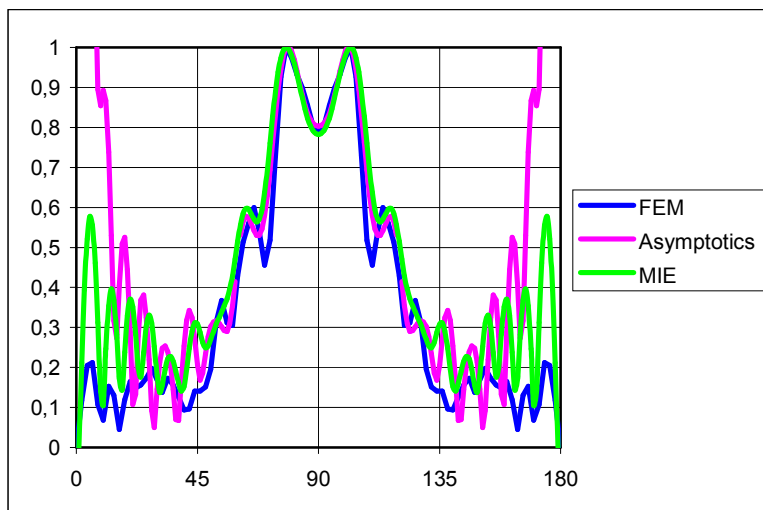


Рис. 4. Диаграммы направленности излучателя первого типа, вычисленные разными методами

Диаграммы направленности биконической антенны первого, второго и третьего типа, вычисленные с использованием МИУ, представлены на рис. 5а и 5б для значений $ka = 6$ и $ka = 30$, соответственно, кривыми 1, 2 и 3. Как видно из рисунка, диаграммы 1 и 3 на низких частотах совпадают в области главного лепестка (рис. 5а). На высоких частотах все три диаграммы совпадают практически везде, кроме области вблизи оси (см. рис.5б). Такой характер диаграмм направленности объясняется более сильным взаимодействием краевых волн кромок биконуса у антенн первого и третьего типа на низких частотах. У антенны второго типа взаимодействие ослабляется сферической вершиной. На высоких частотах это взаимодействие мало для всех рассмотренных типов биконических антенн.

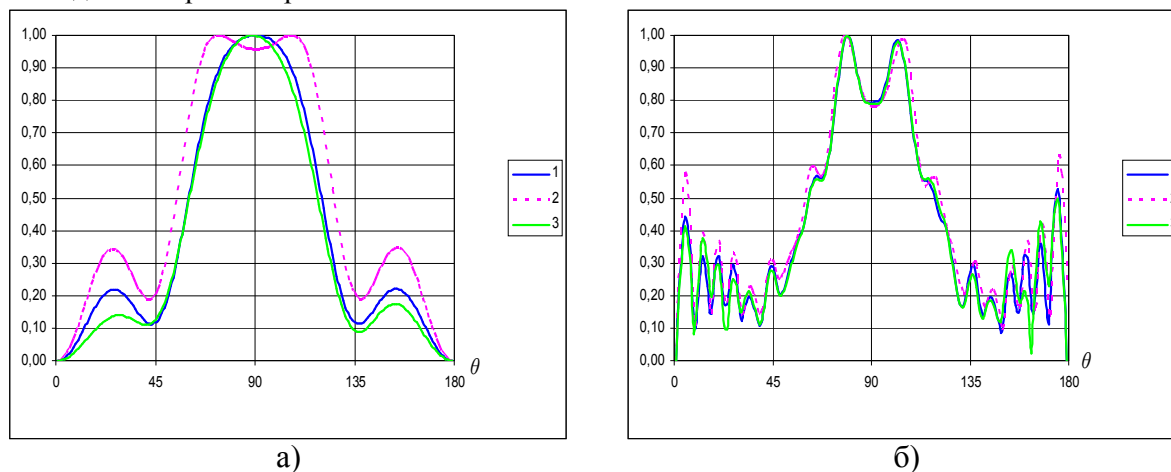
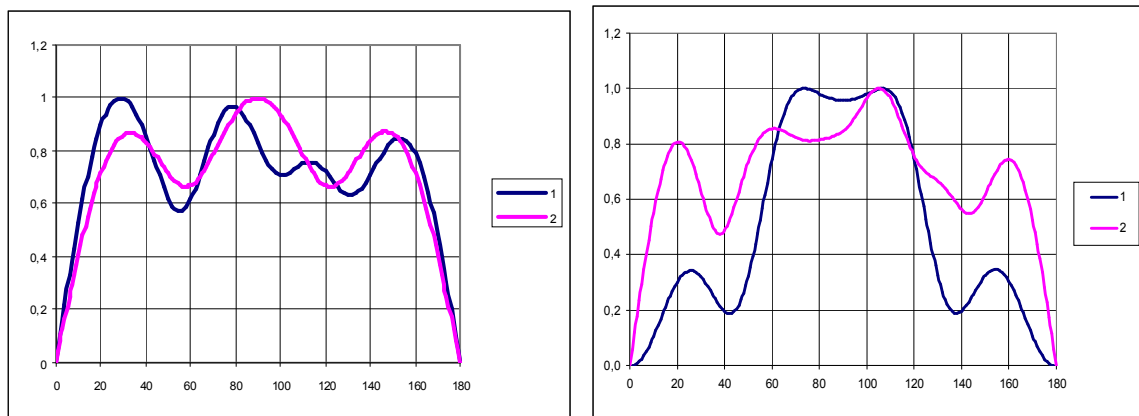


Рис. 5. Диаграммы направленности различных типов биконических излучателей: первого – кривая 1, второго – кривая 2 и третьего – кривая 3

На рис. 6 для двух частот кривыми 1, 2 показаны диаграммы направленности антенны второго типа, соответственно, при наличии и отсутствии выступающего вниз на величину радиуса a отрезка питающей коаксиальной линии. Как видно из рисунка, наличие выступающего за антенну отрезка коаксиальной линии приводит к значительному искажению диаграммы направленности на низких частотах.

Результаты расчетов диаграмм направленности на высоких частотах, которые здесь не приводятся, показывают, что этот эффект сохраняется, хотя и становится меньше.



а) $ka = 3$

б) $ka = 6$

Рис. 6. Диаграммы направленности биконической антенны с питающей линией

В заключение отметим:

1. Биконическая антенна при выборе параметра $\theta_0 = 66^\circ$ обеспечивает сверхширокополосное согласование по уровню -10 дБ. Нижняя частота согласования определяется размером антенны, и ее можно оценить из условия $ka \approx 3$.
2. Форма вершины влияет на нижнюю частоту согласования.
3. На высоких частотах в центре главного лепестка могут наблюдаться провалы до 2 дБ.
4. Питающий коаксиальный кабель приводит к сильным несимметричным искажениям диаграммы направленности в угломестной плоскости.
5. Для анализа согласования биконической антенны эффективнее использовать метод конечных элементов, а для вычисления диаграммы направленности – метод интегральных уравнений.
6. Развитая в работе асимптотическая теория дает количественную оценку нижней частоты согласования, а также формы диаграммы направленности везде, кроме области вблизи оси.

ЛИТЕРАТУРА

1. Carl E. Baum, Alexander P. Stone, J. Scott Tyo, Ultra-Wideband Short-Pulse Electromagnetics 8, Springer, 2007.
2. М.Н. Макурин, Н.П. Чубинский, Расчет характеристик биконической антенны методом частичных областей, Радиотехника и электроника, 2007, т. 52, №10, с. 1199–1208.
3. Р.Я. Ufimtsev, Theory of edge diffraction in electromagnetics, Encino, California: Tech Science Press, 2003.
4. V.A. Kaloshin, Short-wave electromagnetic asymptotics of open systems, Proceedings of the 12th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, pp. 216–221, June 2008.
5. V.A. Kaloshin, Scattering matrix for a junction of two horns, RJMP, 2009, v. 16, No. 2, pp. 246–250.
6. Давыдов А.Г., Пименов Ю.В., О возможностях новой версии программного комплекса EDEM. В кн.: Тезисы докладов и сообщений I Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов», Самара, 10 – 16 сентября 2001 г., т.1.