

УДК 621.396.674

В.П. Беличенко, А.С. Запасной

Электрически малые антенны: проблемы, сомнения, новые результаты

Изложены различные подходы к проблеме оценки добротности излучения электрически малой антенны. Отмечена необходимость уточнения ряда фундаментальных результатов, представленных в литературе.

Ключевые слова: запасенные электрическая и магнитная энергии, теорема Пойнтинга в комплексной и временной формах, добротность излучения, сферический излучатель, комбинированный излучатель.

В теории антенн более 60 лет назад были сформулированы [1–4] исключительно важные фундаментальные ограничения, касающиеся основных электродинамических характеристик электрически малых антенн. Они не подвергались какому бы то ни было недоверию вплоть до 1996 г. – года знаковой публикации [5], зародившей сомнения в непрерывности этих фундаментальных ограничений.

Эти сомнения разделили исследователей на два лагеря. Наиболее ярким представителем оптимистов является заслуженный профессор Пенсильванского университета D.M. Grimes [6, 7]. Он приводит, в частности, следующий довод: размеры атома, по крайней мере интуитивно, составляют примерно 0,1 нм, а длина волны его излучения равна 500 нм. Таким образом, отношение размера атома к длине волны равно 1:5000. Иными словами, это в 500 раз меньше, чем соответствующий параметр для реально созданных на настоящий момент антенн. Так не говорит ли это о том, что мы должны кардинальным образом пересмотреть систему представлений о физике излучения антенн малых электрических размеров и существующие подходы к проблемам расширения полосы пропускания таких антенн и улучшения их эффективности? Справедливости ради надо сказать, что D.M. Grimes не только высказывает абстрактные суждения, но и многое сделал в плане их содержательного наполнения.

Пессимисты же (R.E. Collin, R.C. Hansen и др.) [8, 9] утверждают, что ранее установленные фундаментальные пределы незыблемы. А все новации есть плоды либо непонимания, либо ошибок.

Одной из наиболее важных характеристик антенны, определяющей полосу рабочих частот, является ее добротность излучения. Классический подход к определению добротности произвольной антенны состоит в следующем: предполагается, что антенна целиком вмещается в гипотетическую сферу радиуса a . Рассчитываются запасенные вне указанной сферы электрическая W_e' и магнитная W_m' энергии, а также мощность излучения P антенны. Энергиями, запасенными внутри сферы и потерями в антенне, пренебрегают и расчет добротности Q проводят по формуле:

$$Q = \begin{cases} \frac{2\omega W_e'}{P}, & W_e' > W_m', \\ \frac{2\omega W_m'}{P}, & W_m' > W_e'. \end{cases}$$

Реализация такого подхода в работах [1, 2] позволила установить фундаментальное ограничение. Согласно ему Q не может превосходить значения

$$Q_{M1} = \left[\frac{1}{(ka)^3} + \frac{1}{ka} \right], \quad (1)$$

где ka – электрический радиус сферы.

Оказывается, что именно такую добротность излучения имеют элементарный электрический или магнитный диполи, помещенные в центре сферы. Если же в центре сферы совмещены параллельно или ортогонально ориентированные электрический и магнитный диполи, то ограничение (1) несколько видоизменяется:

$$Q_{M2} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{(ka)^3} + \frac{2}{ka} \right].$$

В фундаментальных работах [1–4] и в ряде последующих работ [5–8] не проанализированы эффекты, связанные с учетом запаса энергии внутри сферы. Это было сделано в работе [10] на основе обобщения метода лестничной эквивалентной схемы L.J. Chu, в [11] с использованием строгого электродинамического подхода, разработанного в [3], и в [12] на основе метода, развитого в [5]. Результаты этих работ являются более реалистичными с точки зрения адекватной оценки добротности имеющихся и создаваемых антенн. В частности, в [11] приведено следующее приближенное выражение для добротности излучения, уточняющее (1):

$$Q_{M3} \approx \frac{3}{2(ka)^3} + \frac{1}{\sqrt{2ka}}.$$

Авторы работ [6, 7] предъявляют серьезные претензии к теореме Пойнтинга в комплексной форме, полагая, что ее нельзя использовать при определении добротности излучения антенн, создающих многомодовое поле излучения. Они считают, что добротность излучения необходимо обязательно определять с использованием теоремы Пойнтинга во временной форме. Эти претензии, по-видимому, можно признать состоятельными в отношении результатов работ [4] и [13], поскольку они действительно не учитывают влияния фазовых соотношений между различными модами излучаемого поля на добротность антенны. Между тем учет фазовых соотношений возможен, по крайней мере, в случае определенной пространственной конфигурации элементов излучающей системы.

Чтобы продемонстрировать это, мы провели исследование влияния пространственного разнеса b и фазировки ортогонально ориентированных электрического и магнитного диполей (рис. 1) на добротность излучения такой системы.

При выводе аналитического представления для добротности излучения использовались общие соотношения для полей произвольной системы электрических и магнитных токов в сферической системе координат [14] и подход, изложенный в [5]. При этом предполагалось, что начальные фазы токов в электрическом и магнитном диполях соответственно равны φ_1 и φ_2 , а модули моментов токов связаны соотношением $|p_2| = Z_0 \alpha |p_1|$, где Z_0 – волновое сопротивление окружающего пространства.

Окончательное расчетное соотношение выглядит следующим образом:

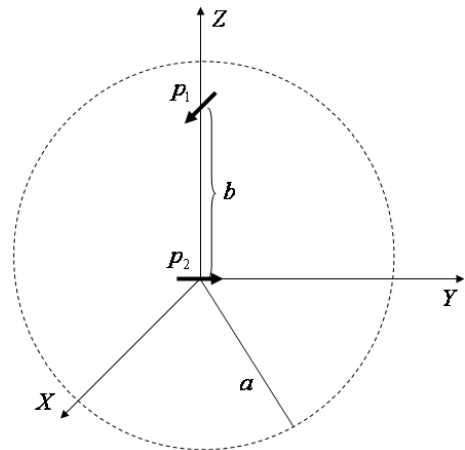


Рис. 1. К расчету добротности излучения электрического и магнитного диполей с моментами p_1 и p_2 соответственно

$$Q_R = \frac{1}{G} \left\{ \frac{1}{(kb)^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \left[\frac{d}{db} [bj_n(kb)] \right]^2 J_n^1 + \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) j_n^2(kb) J_n^2 - \alpha j_1(kb) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) J_1^2 + \frac{4}{3} \alpha^2 J_1^2 \right\}, \quad (2)$$

где

$$G = \frac{1}{(kb)^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \left[\frac{d}{db} [bj_n(kb)] \right]^2 + \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) j_n^2(kb) + \frac{4}{3} \alpha^2 - 4\alpha j_1(kb) \sin(\varphi_1 - \varphi_2), \quad (3)$$

$$J_n^1 = \int_a^{\infty} \left[n(n+1) |h_n^{(2)}(kr)|^2 + \left[\frac{d}{dr} [r h_n^{(2)}(kr)] \right]^2 - 1 \right] dr,$$

$$J_n^2 = \int_a^{\infty} \left[|h_n^{(2)}(kr)|^2 - \frac{1}{(kr)^2} \right] r^2 dr.$$

Здесь $j_n(kb)$, $h_n^{(2)}(kr)$ – соответственно сферические функции Бесселя и Ханкеля второго рода; kb – электрическое расстояние между диполями, а для интегралов J_n^1 и J_n^2 получены аналитические выражения, которые здесь не приводятся вследствие их громоздкости.

Расчет добротности проводился по формулам (2) и (3) при следующих значениях параметров: $ka=2$ и $0,1 < kb < 2$. При этом ставилась задача уменьшения значений Q_R в как можно большем интервале изменения kb . Исследование показало (рис. 2), что наиболее оптимальным является выбор весового коэффициента $\alpha=0,4$ и разности начальных фаз $\varphi_1 - \varphi_2 = -\pi/2$.

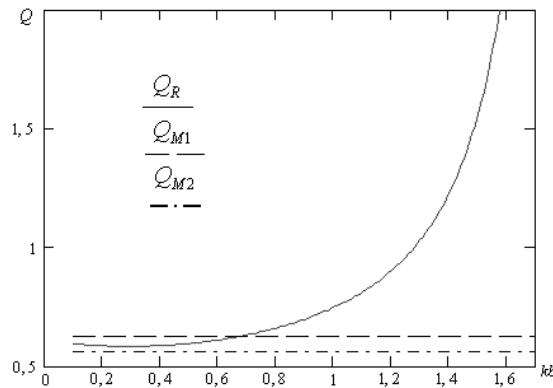


Рис. 2. Добротность излучения ортогонально ориентированных диполей

Как видно из графика, на интервале $0,1 < kb < 0,65$ значения Q_R оказываются меньшими, чем Q_{M1} , но большими, чем Q_{M2} . Дополнительный анализ показал, что основной причиной, определяющей подобную зависимость Q_R , является наличие специфического интерференционного потока энергии, особенности которого были проанализированы в работе [15].

Работа выполнена при поддержке российских программ АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы», мероприятие 2, проект № 2.1.2/12874, а также ФЦП в рамках мероприятий 1.1 (ГК № 14.740.11.0076), 1.2.2 (НК-104П/2) и 1.3.1 (НК-181П/6).

Литература

1. Chu L.J. Physical limitations of omni-directional antennas // J. Appl. Phys. – 1948. – Vol. 19. – P. 1163–1175.
2. Harrington R.F. Effect of antenna size on gain, bandwidth, and efficiency // J. Res. Nat. Bur. Stand. – 1960. – Vol. 64D, № 1. – P. 1–12.
3. Collin R.E. Evaluation of antenna Q / R.E. Collin, S. Rothschild // IEEE Trans. on Antennas and Propag. – 1964. – Vol. 12, № 1. – P. 23–27.
4. Fante R.L. Quality factor of general ideal antennas // IEEE Trans. on Antennas and Propag. – 1969. – Vol. 17, № 2. – P. 151–155.
5. McLean J.S. A re-examination of the fundamental limits on the radiation Q of electrically small antennas // IEEE Trans. on Antennas and Propag. – 1996. – Vol. 44, № 5. – P. 672–675.
6. Grimes D.M. Radiation Q of dipole-generated fields / D.M. Grimes, C.A. Grimes // Radio Sci. – 1999. – Vol. 34, № 2. – P. 281–296.
7. Grimes D.M. Minimum Q of electrically small antennas. A critical review / D.M. Grimes, C.A. Grimes // Microwave Opt. Tech. Lett. – 2001. – Vol. 28, № 2. – P. 172–177.
8. Collin R.E. Minimum Q of small antennas // J. Electromagn. Waves Applicat. – 1998. – Vol. 12, № 10. – P. 1369–1392.
9. Hansen R.C. Electrically small, superdirective, and superconducting antennas. – N.Y.: John Wiley and Sons: Spring, 2006.
10. Thal H.L. New radiation Q limits for spherical wire antennas // IEEE Trans. on Antennas and Propag. – 2006. – Vol. 54, № 10. – P. 2757–2763.

11. Hansen R.C. A new Chu formula for Q / R.C. Hansen, R.E. Collin // IEEE Antennas and Propagation Magazine – 2009. – Vol. 51, № 5. – P. 38–41.
 12. Запасной А.С. Добротность излучения сферического излучателя / А.С. Запасной, В.П. Беличенко // Доклады ТУСУРа. – № 2(22), ч. 2. – 2010. дек. – С. 54–57.
 13. Kwon Do-Hoon. Radiation Q and gain of TM and TE sources in phase-delayed rotated configurations // IEEE Trans. on Antennas and Propag. – 2008. – Vol. 56, № 8. – P. 2783–2786.
 14. Марков Г.Т. Возбуждение электромагнитных волн / Г.Т. Марков, А.Ф. Чаплин. – М.: Радио и связь, 1983. – 296 с.
 15. Беличенко В.П. Конкурирующие интерференционные потоки энергии в комбинированных антеннах и их влияние на полосу пропускания и мощность излучения / В.П. Беличенко, В.П. Якубов, А.С. Запасной // Известия вузов. Физика. – 2010. – Т. 53, № 9/2. – С. 110–111.
-

Беличенко Виктор Петрович

Д-р физ.-мат. наук, профессор каф. радиофизики радиофизического факультета
Национального исследовательского Томского государственного университета (РФФ НИТГУ)
Тел.: (382-2) 41-25-83
Эл. почта: bvp@elefot.tsu.ru

Запасной Андрей Сергеевич

Аспирант кафедры радиофизики РФФ НИТГУ
Тел.: 8-961-095-9697
Эл. почта: zas_rff@sibmail.com

Belichenko V.P., Zapasnoy A.S.

Electrically small antennas: problems, doubts and new results

The article presents different approaches to the problem of estimating the quality factor of electrically small antenna. The need to clarify a number of fundamental results presented in the literature is described.

Keywords: stored electric and magnetic energies, Poynting theorem in the complex and time forms, quality factor, spherical radiator, combine radiator.
