

АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ
СИСТЕМЫ

УДК 621.396.67

О ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ОГРАНИЧЕНИЯХ
СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ АНТЕНН© 2019 г. Ант. В. Уваров^{1, *}, М. Ю. Герасимов², Анд. В. Уваров¹¹Московский физико-технический институт (государственный университет),
Российская Федерация, 141700 Долгопрудный Московской обл., Институтский пер., 9²Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Российская Федерация, 125009 Москва, ул. Моховая, 7, корп. 11

*E-mail: anton.uvarov@phystech.edu

Поступила в редакцию 02.11.2017 г.

После доработки 11.03.2018 г.

Принята к публикации 18.03.2018 г.

Найдено электродинамическое ограничение на характеристики антенн с полубесконечным диапазоном, как предельным случаем сверхширокополосных (СШП) антенн, связывающее направленные свойства антенны, ее коэффициент направленного действия (КНД), коэффициент отражения по входу, нижнюю частоту рабочего диапазона, габаритный размер антенны и учитывает ее геометрическую форму. Получено выражение для оценки нижней частоты рабочего диапазона антенн с заданным размером и формой. Выведены выражения для оценки минимально достижимого размера и нижней частоты рабочего диапазона печатных СШП-антенн прямоугольной формы с линейной поляризацией.

DOI: 10.1134/S0033849419030185

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие не иссекает интерес к сверхширокополосным (СШП) антеннам [1–4]. Они могут использоваться как в сверхширокополосных, так и многодиапазонных многофункциональных системах. Разработка устройств ужесточает требования, предъявляемые к габаритным размерам антенн, и заставляет искать более компактные конфигурации, что вступает в конфликт с требованиями по ширине рабочей полосы частот. Цель работы — изучить подобные ограничения на характеристики СШП-антенн. Подробно рассмотрены печатные антенны, которые получили широкое распространение благодаря низкой себестоимости, небольшим размерам и высоким эксплуатационным свойствам.

1. ИСТОРИЯ ВОПРОСА

Взаимосвязь между характеристиками антенн и ограничения на эти соотношения ряд авторов называет фундаментальными ограничениями [5], в других работах используется термин физические ограничения антенн [6]. Знание фундаментальных ограничений, связывающих между собой ключевые характеристики антенн: электрический размер ka , коэффициент усиления G , и относительную ширину диапазона рабочих частот B позволяет инженерам оценить наименьший предельный размер для

антенны с заданными электрическими свойствами, а именно с заданным диапазоном рабочих частот, коэффициентом отражения по входу, поляризацией и коэффициентом усиления. Или, наоборот, определить предельные электрические характеристики, например, предельную ширину полосы, при заданном уровне коэффициента отражения по входу и геометрическом размере антенны.

В классической работе Чу сформулировано фундаментальное ограничение в терминах добротности, полученное через разложение поля антенны по сферическим модам, возбуждаемым вне сферы, окружающей антенну, которое в дальнейшем было уточнено в [7–10] и может быть представлено в следующем виде:

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

где k — волновое число для центральной частоты рабочего диапазона, M — число возбужденных мод различных типов низшего порядка, равное единице, если антенна возбуждает только TE -или только TM -моду, и равно двум, если антенна возбуждает оба типа мод, TE и TM (случай круговой поляризации). Отметим, что выражение (1) является ограничением “снизу” на добротность антенны и многие антенны, создаваемые на практике, далеки по своим характеристикам от этого предела [11, 12].

Позднее в работах [11–14] с использованием математического аппарата теории рассеяния было получено выражение для фундаментального ограничения с учетом геометрической формы антенны, учитываемой в тензоре поляризуемости:

$$\frac{D}{Q} \leq \frac{k^3}{2\pi} (\hat{p}_e^* \gamma_e \hat{p}_e + \hat{p}_m^* \gamma_m \hat{p}_m), \quad (2)$$

где k – волновое число для центральной частоты рабочего диапазона, γ_e , γ_m – тензоры электрической и магнитной поляризуемости формы антенны соответственно, которые используются для связи дипольного момента рассеянного излучения с вектором поляризации падающей волны [15, 16]. Результат Густафссона позволяет уточнить ограничение (1) за счет учета геометрической формы антенны и ответить на вопрос, насколько характеристики антенны заданной геометрической формы и размера отличаются от предела Чу. Также ограничение Густафссона может быть напрямую применимо для оценки предельных характеристик антенн различных типов и геометрических форм, что наиболее ценно с практической точки зрения.

Однако все упомянутые выше ограничения были сформулированы в терминах добротности и центральной частоты, что не очень удобно для случая СШП-антенн. Обобщение работы Чу на случай СШП-антенн с полубесконечным диапазоном частот были получены в работах [17, 18], в которых было выведено ограничение в терминах нижней частоты рабочего диапазона. Вывод в этих работах был также основан на подходе Чу, разложении поля антенны по сферическим модам вне описывающей антенну сферы минимального радиуса и пренебрежении энергией запасенной внутри сферы, которая может быть значительной для антенн с геометрической формой, занимающей лишь небольшую часть внутреннего объема описывающей антенну сферы. Поэтому достижимые на практике добротности и ширины полос рабочих частот реальных антенн, например печатных, могут значительно отличаться от значений ограничений [17, 18]. Для того чтобы оценить, насколько характеристики антенны приближаются к пределу, в работах [19, 20] был введен и использован коэффициент использования размера (КИР) антенны, характеризующий, насколько разработанная антенна близка по своим размерам к фундаментальному пределу Чу.

2. ФУНДАМЕНТАЛЬНОЕ ОГРАНИЧЕНИЕ ДЛЯ СШП-АНТЕНН

Используя подход предложенный в работе [11], вывод фундаментального электродинамического ограничения начнем с соотношения, связывающего полное сечение [15] с тензорами электрической и

магнитной поляризуемости геометрической формы антенны γ_e , γ_m , которое является следствием оптической теоремы теории рассеяния:

$$\int_0^\infty \sigma_{\text{ext}}(\lambda) d\lambda = \pi^2 \left(\hat{p}_e^* \gamma_e \hat{p}_e + \hat{p}_m^* \gamma_m \hat{p}_m \right). \quad (3)$$

В качестве предельного случая СШП-антенны рассмотрим антенну с полубесконечным диапазоном рабочих частот $(f_c; \infty)$ и, соответственно, диапазоном длин волн $(0; \lambda_c)$, где λ_c – наибольшая длина волны рабочего диапазона антенны. Представим интеграл в левой части выражения в виде суммы интегралов на разных промежутках интегрирования $\Lambda = (0; \lambda_c)$ и $\bar{\Lambda} = (\lambda_c; \infty)$ и выразим полное сечение через сечение поглощения σ_{abs} антенны

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \sigma_{\text{ext}}(\lambda) d\lambda &= \int_0^{\lambda_c} \sigma_{\text{ext}}(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda_c}^\infty \sigma_{\text{ext}}(\lambda) d\lambda = \\ &= \int_0^{\lambda_c} \frac{\sigma_a(\lambda)}{\eta(\lambda)} d\lambda + \int_{\lambda_c}^\infty \frac{\sigma_{\text{abs}}(\lambda)}{\eta(\lambda)} d\lambda, \end{aligned}$$

где $\eta(\lambda)$ – отношение спектрального сечения поглощения антенны к полному сечению. Из интегральной теоремы о среднем, используя

$$\eta_{\text{abs}} = \frac{\int_{\Lambda} \sigma_{\text{abs}}(\lambda) d\lambda}{\int_{\Lambda} \sigma_{\text{ext}}(\lambda) d\lambda},$$

получим

$$\int_0^\infty \sigma_{\text{ext}}(\lambda) d\lambda = \frac{1}{\eta_{\text{abs}}} \int_0^{\lambda_c} \sigma_{\text{abs}}(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda_c}^\infty \frac{\sigma_{\text{abs}}(\lambda)}{\eta(\lambda)} d\lambda.$$

Выразив сечение поглощения через сечение поглощения $\sigma_{\text{abs}0}$ идеально согласованной антенны, представляющее фактически эффективную площадь антенны и коэффициент отражения по входу Γ следующим образом:

$$\sigma_{\text{abs}}(\lambda) = (1 - |\Gamma(\lambda)|^2) \sigma_{\text{abs}0}(\lambda),$$

получим

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \sigma_{\text{ext}}(\lambda) d\lambda &= \frac{1}{\eta_{\text{abs}}} \int_0^{\lambda_c} (1 - |\Gamma(\lambda)|^2) \sigma_{\text{abs}0}(\lambda) d\lambda + \\ &+ \int_{\lambda_c}^\infty \frac{(1 - |\Gamma(\lambda)|^2) \sigma_{\text{abs}0}(\lambda)}{\eta(\lambda)} d\lambda. \end{aligned}$$

Так как вне рабочего диапазона длин волн, при $\lambda > \lambda_c$, $(1 - |\Gamma(\lambda)|^2) \approx 0$ и при этом не отрицатель-

но, то полное интегральное сечение может быть оценено снизу следующим образом:

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \sigma_{\text{ext}}(\lambda) d\lambda &\geq \frac{1}{\eta_{\text{abs}}} \int_0^{\lambda_c} (1 - |\Gamma(\lambda)|^2) \sigma_{\text{abs}0}(\lambda) d\lambda = \\ &= \frac{1}{4\pi\eta_{\text{abs}}} \int_0^{\lambda_c} (1 - |\Gamma(\lambda)|^2) D(\lambda) \lambda^2 d\lambda. \end{aligned} \quad (4)$$

Последнее преобразование получено с использованием известного соотношения, связывающего эффективную площадь антенны и КНД [21]:

$$D = 4\pi\sigma_{\text{abs}0}/\lambda^2.$$

Для вывода конечного расчетного выражения оценим снизу выражение $(1 - |\Gamma(\lambda)|^2) D(\lambda)$:

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \sigma_{\text{ext}}(\lambda) d\lambda &\geq \frac{\min_{\lambda \in \Lambda} [(1 - |\Gamma(\lambda)|^2) D(\lambda)]}{4\pi\eta_{\text{abs}}} \times \\ &\times \int_0^{\lambda_c} \lambda^2 d\lambda = \frac{(1 - \Gamma_{\text{max}}^2) D_{\text{min}}}{4\pi\eta_{\text{abs}}} \left(\frac{\lambda_c^3}{3} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

где $\Gamma_{\text{max}} = \max_{\lambda \in \Lambda} |\Gamma(\lambda)|$ и $D_{\text{min}} = \min_{\lambda \in \Lambda} D(\lambda)$.

Комбинируя выражения (3) и (5), учитывая, что $\eta_{\text{abs}} \leq 1$, и обозначая за $\gamma = (\hat{p}_e^* \gamma_e \hat{p}_e + \hat{p}_m^* \gamma_m \hat{p}_m)$, получим итоговое выражение для фундаментального ограничения на характеристики СШП-антенн, учитывающее их геометрическую форму и связывающее нижнюю частоту рабочего диапазона, коэффициент направленного действия и коэффициент отражения по входу:

$$\frac{(1 - \Gamma_{\text{max}}^2) D_{\text{min}}}{k_c^3} \leq \frac{3}{2} \gamma. \quad (6)$$

Наименьшее значение левой части выражения (6) достигается для случая ненаправленной антенны, $D = 1$, при этом, как правило, для СШП-антенны требуется значение коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) менее двух в полосе рабочих частот, что соответствует $|\Gamma_{\text{max}}|^2 < 0.1$. Тогда, выражение (6) может быть переписано в виде ограничения снизу на волновое число:

$$k_c^3 \geq 2/3\gamma, \quad (7)$$

что эквивалентно ограничению на нижнюю частоту рабочего диапазона.

Вместе с тем, если в (4) перейти к оценке сечения поглощения, которое для большинства антенн слабее зависит от частоты, чем КНД, то можно уточнить оценку предела. Предположим, что зависимость сечения поглощения от частоты слабая и приблизим его значением на нижней частоте. Это позволит найти итоговое соотношение через нижнюю частоту рабочего диапазона, по

анalogии с выводом соотношения (5). Получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \sigma_{\text{ext}}(\lambda) d\lambda &\geq \frac{1}{\eta_{\text{abs}}} \int_0^{\lambda_c} (1 - |\Gamma(\lambda)|^2) \sigma_{\text{abs}0}(\lambda) d\lambda \geq \\ &\geq \frac{\min_{\lambda \in \Lambda} [(1 - |\Gamma(\lambda)|^2) \sigma_{\text{abs}0}(\lambda)]}{\eta_{\text{abs}}} \int_0^{\lambda_c} d\lambda \geq \\ &\geq \frac{(1 - \Gamma_{\text{max}}^2) \min \sigma_{\text{abs}0}(\lambda)}{\eta_{\text{abs}}} \lambda_c \approx \frac{(1 - \Gamma_{\text{max}}^2) D_{\text{min}} \lambda_c^3}{4\pi\eta_{\text{abs}}}, \end{aligned} \quad (8)$$

где эффективная площадь антенны была оценена через КНД на нижней частоте f_c рабочего диапазона СШП-антенны. Используя соотношения (3) и (8), запишем следующее ограничение:

$$\frac{(1 - \Gamma_{\text{max}}^2) D_{\text{min}}}{k_c^3} \leq \frac{1}{2} \gamma. \quad (9)$$

Откуда может быть получено аналогичное (7) соотношение ограничения снизу на волновое число:

$$k_c^3 \geq 2/\gamma, \quad (10)$$

что эквивалентно ограничению на нижнюю частоту рабочего диапазона.

Напомним, что соотношения (9) и (10) были получены с использованием допущения слабой зависимости сечения поглощения от частоты и приближением его значением на нижней частоте, для того чтобы сформулировать ограничение в терминах нижней частоты диапазона. Несмотря на это, они качественно правильно описывают зависимость характеристик для большинства типов антенн, о чем свидетельствует проведенное далее сравнение характеристик целого ряда разрабатываемых и известных классических печатных антенн с ограничением (рис. 1).

3. ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕЧАТНЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ АНТЕНН ЛИНЕЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Применение полученного фундаментального ограничения в данной работе продемонстрировано на примере печатных антенн с линейной поляризацией. Для оценки предельных характеристик были использованы результаты численного расчета тензора поляризуемости прямоугольной геометрической формы [22] при различных соотношениях сторон. Рассчитанные пределы (6) и (9) приведены на рис. 1 в зависимости от различных значений отношения сторон прямоугольной формы печатной антенны. Ограничения на электрический размер ka антенны из (7) и (10) численно рассчитаны и приведены на рис. 2, также показано отличие от ограничения, полученного в приближении

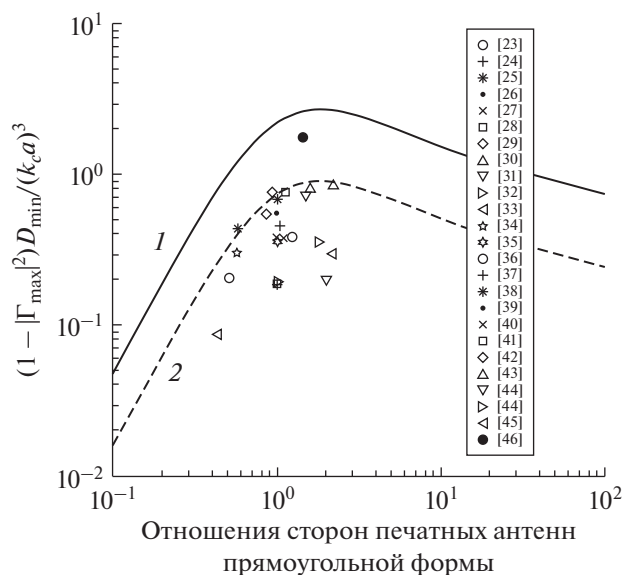


Рис. 1. Фундаментальные ограничения (пределы) для печатных СШП-антенн прямоугольной формы с линейной поляризацией, полученные по формуле (6) (кривая 1) и по формуле (9) (кривая 2). Точки — характеристики антенн по данным работ [23–46].

Чу, на примере печатных прямоугольных антенн при различном соотношении сторон.

Как видно из рис. 1 существует оптимальное соотношение сторон, для которого достигается наибольшее значение величины

$$\frac{(1 - \Gamma_{\max}^2) D_{\min}}{(k_c a)^3} \sim \frac{G}{(k_c a)^3} \sim \frac{G}{V_e},$$

физический смысл которого — отношение коэффициента усиления G к электрическому объему V_e сферы, описанной вокруг антенны. Численный анализ позволяет рассчитать оптимальное отношение сторон прямоугольной печатной антенны $l_1/l_2 = 1.85$ и соответствующее значение предела:

$$\frac{(1 - \Gamma_{\max}^2) D_{\min}}{(k_c a)^3} \leq 2.7, \quad (11)$$

что в семь раз ниже предельного значения, полученного с использованием тензора поляризуемости сферы, равного 6π . В этом случае, как показано в [11], предел Густафссона (2) становится эквивалентным пределу Чу (1). Из (11) может быть получено полезное выражение для определения минимального достижимого размера антенны при заданном коэффициенте направленного действия $D_{\min}$ и коэффициенте отражения $\Gamma_{\max}$

$$a_{\min} = 0.72 \sqrt[3]{\frac{(1 - \Gamma_{\max}^2) D_{\min}}{k_c}}, \quad (12)$$

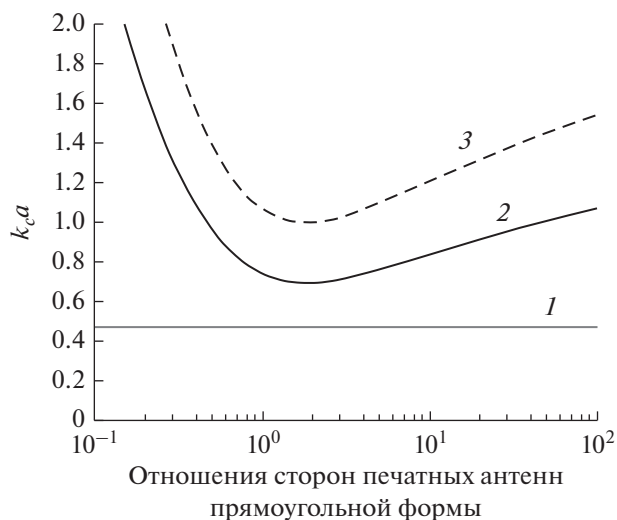


Рис. 2. Сравнение фундаментального ограничения Чу (1) (кривая 1) с пределами, полученными в данной работе по формуле (6) (кривая 2) и по формуле (9) (кривая 3).

что в 1.9 раза больше предельного радиуса сферы Чу и, следовательно, соответствует коэффициенту использования размера [17, 18] КИР = $1/1.9 = 0.52$. При этом следует отметить, что площадь такой печатной антенны с оптимальным соотношением сторон не будет минимально возможной. Поскольку у зависимости площади печатной антенны от отношения сторон не существует экстремума, так как площадь может принимать сколь угодно малые значения при приближении отношения l_1/l_2 к бесконечности, другими словами, в случае антенны, близкой по форме к проволочному диполю.

Второе важное практическое применение фундаментального электродинамического ограничения заключается в возможности оценки нижней частоты f_c рабочего диапазона СШП-антенны для антенны заданной формы и размера с помощью численного расчета [22] или из графика, представленного на рис. 1. Выразим соотношение для f_c , используя (11):

$$f_c \geq 0.72 \frac{c}{2\pi a} \sqrt[3]{(1 - \Gamma_{\max}^2) D_{\min}}. \quad (13)$$

Итоговое упрощенное соотношение выведено для оптимального отношения сторон прямоугольной печатной антенны линейной поляризации.

На рис. 1 приведены значения характеристик более двадцати различных печатных СШП-антенн линейной поляризации в зависимости от отношения сторон печатной платы, которые можно классифицировать по четырем наиболее распространенным типам: антенны типа “монополь” [23–32], лог-периодические [33–36], антенны “Вивальди” [37–43] и дипольные антенны “ба-

бочки” [44, 45]. С учетом точности измерения характеристик, основная масса рассмотренных печатных СШП-антенн лежит ниже полученного приближенного предела (9), только антенна [46] его превосходит, но все антенны лежат строго ниже точного предела (6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выведено фундаментальное электродинамическое ограничение (6) на характеристики СШП-антенн с полубесконечным диапазоном учитывающее геометрическую форму и связывающее нижнюю частоту рабочего диапазона, коэффициент направленного действия, коэффициент отражения по входу. Также получено выражение для ограничения снизу на волновое число, которое эквивалентно ограничению на нижнюю частоту рабочего диапазона. Сопоставление характеристик печатных прямоугольных антенн линейной поляризации с разным отношением длин сторон с полученным фундаментальным ограничением показало, что антенны лежат строго ниже точного предела (6). Выведены удобные выражения для оценки минимально достижимого размера и нижней частоты рабочего диапазона печатных прямоугольных СШП-антенн с линейной поляризацией. Для таких антенн показано, что минимально достижимый размер антенны в 1.9 раза больше предельного диаметра сферы Чу, что соответствует КИР = 0.52.

Авторы благодарят В.А. Калошина за плодотворные дискуссии при подготовке статьи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-00084).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богатых Н.А., Грачев Г.Г., Калошин В.А. // РЭ. 2019. Т. 64. № 1. С. 28.
2. Калошин В.А., Нгуен К.З. // Антенны. 2016. № 8. С. 67.
3. Ray K.P. // Int. J. Anten. Propag. 2008. P. 2.
4. Azenui N.C., Yang H.Y.D. // IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett. 2007. V. 6. P. 113.
5. Wheeler H.A. // Proc. IRE. 1947. V. 35. № 12. P. 1479.
6. Chu L.J. // J. Appl. Phys. 1948. V. 19. P. 1163.
7. Harrington R.F. // J. Res. Nat. Bureau Stand. 1960. V. 64. № 1. P. 1.
8. Fante R.L. // IEEE Trans. 1969. V. AP-17. № 2. P. 151.
9. Collin R.E., Rothschild S. // IEEE Trans. 1964. V. AP-12. № 1. P. 23.
10. McLean J.S. // IEEE Trans. 1996. V. AP-44. № 5. P. 672.
11. Gustafsson M., Sohl C., Kristensson G. // Proc. Royal Soc. A. 2007. V. 463. № 2086. P. 2589.
12. Gustafsson M., Tayli D., Cismasu M. // Handbook Antenna Technol. 2015. P. 1.
13. Gustafsson M., Cismasu M., Jonsson B.L.G. // IEEE Trans. 2013. V. AP-60. № 6. P. 2672.
14. Cismasu M., Gustafsson M. // IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett. 2014. V. 13. P. 646.
15. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Физматлит, 2005. С. 562.
16. Kleinman R.E., Senior T.B.A. Low and High Frequency Asymptotic / Eds. by Varadan V.K., Varadan V.V. Mechanics and Mathematical Methods. Third Series Acoustic, Electromagnetics and Elastic Wave Scattering. V. 2. P. 1. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1986.
17. Коган Б.Л. // Сб. научно-метод. статей по прикладной электродинамике. М.: Высшая школа, 1980. Вып. 3. С. 162.
18. Kramer B.A., Chen C.C., Lee M., Volakis L. // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2009. V. 51. P. 57.
19. Калошин В.А., Мартынов Е.С., Скородумова Е.А. // РЭ. 2011. Т. 56. № 9. С. 1094.
20. Ефимова Н.А., Калошин В.А. // РЭ. 2014. Т. 59. № 1. С. 60.
21. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны. 2-е изд. М.: Энергия, 1975.
22. Gustafsson M. Antenna Q – MATLAB script that computes physical bounds on Q and D/Q // 2010. <http://www.mathworks.se/matlabcentral/fileexchange/26806-antennaq>.
23. Уваров А.В. // Успехи современ. радиоэлектрон. 2013. № 3. С. 103.
24. Kshetrimayum R.S., Pillalamarri R. // IEICE Electronics Express. 2008. V. 5. № 8. P. 242.
25. Wu Q., Jin R., Geng J., Ding M. // IEEE Trans. 2007. V. AP-55. № 10. P. 2866.
26. Ahmed O., Sebak A.R. // IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett. 2008. V. 7. P. 411.
27. Liang J., Chiau C.C., Chen X., Parini C.G. // IEEE Trans. 2005. V. AP-53. № 2. P. 3500.
28. Ahmed O., Abumazwed A.A., Sebak A.R. // EuCAP. Berlin. Germany. 2009.
29. Deng H., He X., Yao B., Zhou Y. // Proc. Int. Conf. Microwave and Millimeter Wave Technol., Nanjin. China. 2008. 21–24 Apr. 2008. N.Y.: IEEE, 2018. V. 4. P. 1644.
30. Yang Z., Li L., Wang H. // Proc. Int. Conf. Microwave and Millimeter Wave Technology, Nanjin. 21–24 Apr. 2008. N.Y.: IEEE, 2018. V. 4. P. 1858.
31. Chan K.C.L., Huang Y. // Proc. IEE Conf. Wideband and Multi-band Antennas and Arrays, Birmingham. 7 Sept. 2005. N.Y.: IEEE, 2005. P. 47.
32. John M., Ammann M.J. // Microwave and Opt. Technol. Lett. 2005. V. 47. № 2. P. 153.
33. Gheethan A.A., Anagnostou D.E. // PIERS. 2008. V. 4. № 8. P. 811.
34. Pawar S.S., Shandilya M. // Int. J. Computer Appl. 2016. V. 136. № 10. P. 18.

35. *Klempa O., Eul. H.* // Proc. 2nd Workshop on Positioning, Navigation and Communication. 2005 (WPNC'05). P. 183.
36. *Casula G.A., Maxia P., Mazzarella G., Montisci G.* // Progress in Electromagnetics Research. 2013. V. 38. P. 15.
37. *Hood A.Z., Karacolak T., Topsakal E.* // IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett. 2008. V. 7. P. 656.
38. *Safatly L., Al-Husseini M., El-Hajj A., Kabalan K.Y.* // Proc. PIERS. Moscow. 19-23 Aug. 2012. P. 220.
39. *Ma K., Zhao Z.Q., Wu J.N. et al.* // Progress in Electromagnetics Research. 2014. V. 148. P. 63.
40. *Zhu F.G., Gao S.* // Radioengineering. 2013. V. 22. № 1. P. 276.
41. *Perdana M.Y., Hariyadi T., Wahyu Y.* // Proc. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Bandung. Indonesia. 2016. V. 180. № 1. P. 180
42. *Yao L., Xiao J., Zhu H. et al.* // Proc. 9th Int. Conf. Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT 2016), Beijing. 5–8 Jun. N.Y.: IEEE, 2016. V. 2. P. 820.
43. *Gopikrishna M., Krishna D.D., Aanandan C.K. et al.* // Electron. Lett. 2008. V. 44. № 20. P. 1174.
44. *Kaur B., Solanki L.S.* // Proc. Nat. Conf. Commun. And Networking 2012. Longowal: SLIET, 2012. P. 3.
45. *Mehdipour A., Mohammadpour-Aghdam K., Faraji-Dana R., Sebak A.R.* // Microwave and Optical Technology Lett. 2008. V. 50. № 2. P. 429.
46. *Reza Z., Abdolali A.* // IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett. 2010. V. 9. P. 471.