

## Современные тенденции миниатюризации СШП антенн мобильных устройств

А. В. Уваров<sup>1,2</sup>, А. В. Уваров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН  
Россия, Москва, anton.uvarov@phystech.edu

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)»  
Россия, Москва

*Сегодня существует значительный интерес к области электрически малых антенн, которые обладают достаточно широким диапазоном рабочих частот. При проектировании, важно понимать, насколько малой можно сделать антенну удовлетворяющую требованиям рабочего диапазона частот. Статья посвящена современным тенденциям миниатюризации широкополосных и СШП антенн мобильных устройств.*

*Today, there is considerable interest in the field of electrically small antennas that have a fairly wide range of operating frequencies. For the radiophysics engineer, it is important to understand how the antenna can be miniaturized to achieve the desired requirements of its operating bandwidth. The article is consecrated on modern trends of miniaturization of broadband and UWB antennas for mobile devices.*

### Введение

Сегодня существует значительный интерес к области изучения свойств и характеристик электрически малых антенн, которые обладают широким и сверх-широким диапазоном рабочих частот [1]. Интересенно к таким антеннам обеспечен стремительным развитием систем связи, для которых необходима реализация ряда специальных конструктивных требований. Во-первых, необходимость обеспечить достаточную ширину полосы для покрытия, требуемого рабочего диапазона частот, часто с отношением граничных частот рабочего диапазона от 10:1 до 100:1. Во-вторых, достижение малых габаритных размеров антенной конструкции для размещения на одной плате с приёмо-передающим модулем и экономии использованного пространства. В-третьих, обеспечение электромагнитной совместимости.

В этой статье будут рассмотрены современные тенденции и подходы к миниатюризации антенн, позволяющие произвести настройку конструкций предъявляемым требованиям в рамках фундаментальных физических ограничений характеристик антенн.

### 1. Фундаментальные физические ограничения

Понятие электрически малых антенн было введено ещё Вилером в 1946 году в работе [2], где он предложил понимать антенны, для которых  $ka < 1$  – электрически малыми, где  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число,  $\lambda$  – длина волны,  $a$  – радиус сферы, охватывающей максимальный размер антенны. Как показано в работе [3], фундаментальные ограничения антенны определяются физическими характеристиками набора ортогональных ТЕ и ТМ сферических мод, которые могут быть использованы для представления поля создаваемого антенной. Чу [3] предложили использовать понятие добротности  $Q$ , для определения отсечки для каждой сферической моды. Чем меньше  $Q$ , тем быстрее рассеивается энергия колебаний и, следовательно, антенна эффективнее излучает энергию. Чу определил нижнюю границу добротности антенны рассчитав  $Q$  для каждой моды, при условии, что энергия не сохраняется внутри радианной сферы построенной вокруг источника её возмущения. Чу показал, что наименьшее значение

излучательной добротности  $Q$  может быть получено, при возбуждении только сферических мод низшего порядка ( $TE_{01}$  и  $TM_{01}$ ). В дальнейшем Харрингтон уточнил, что абсолютное минимально возможное значение  $Q$  будет получено при одновременных и равных возбуждениях мод  $TM_{01}$  и  $TE_{01}$ [4].

Точное уравнение для предельно-минимальной добротности  $Q$ , полученное Фанте (при произвольном количестве мод) представлено в работе[5]. В случае возбуждения только мод низшего порядка ( $TM_{01}$  и  $TE_{01}$ ) выражение для предельной добротности  $Q$  согласно [10] может быть записано в упрощенном виде:

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

где  $M = 1$  означает возбуждение либо  $TE_{01}$  или  $TM_{01}$  мод (линейно поляризованного поля),

$M = 2$  – равное возбуждение обоих  $TE_{01}$  и  $TM_{01}$  мод (поле может обладать или круговой, или линейной поляризацией).

При  $M = 2$ , уравнение (3) обеспечивает минимально низкую добротность  $Q$ , для антенны заданного размера.

Ширина рабочей полосы антенны  $B$  обратно-пропорциональна добротности и для случая узкополосных и широкополосных антенн приближенно может быть записана в следующем виде:

$$B \approx \frac{1}{Q} \left( \frac{VSWR - 1}{\sqrt{VSWR}} \right) \quad (4)$$

Выражение (3) позволяет сделать вывод о том, какие минимальная добротность и, соответственно ширина полосы, связанная с добротностью соотношением (4), достижимы при заданном электрическом размере  $ka$  антенны. Или наоборот, антенна с заданной добротностью или шириной рабочей полосы, какие минимальные размеры может иметь. При этом очевидно, что миниатюризовать ШП и СШП антенну будет гораздо сложнее и ее минимальный размер будет больше, чем для случая узкополосной (резонансной) антенны.

## 2. Практическое достижение фундаментальных ограничений

В статье [6] были проанализированы экспериментальные характеристики значительного числа работ опубликованных в IEEE Transaction on Antennas and Propagation до конца 2010 года соответствующие ключевым словам «малая» и «антенна». Всего было проанализировано 7484 различных статей, из которых, после первичного анализа и очистки данных, было выделено 763 работы удовлетворяющих критериям анализа. По результатам статистического анализа фундаментальный предел Вилера-Чу для электрически малых антенны был подтвержден всеми экспериментальными данными работ (см. Рис. 1).

## 3. Современные подходы к миниатюризации антенн

Существует два концептуально различающихся подхода к конструированию электрически малых антенн. Первый подход заключается в поиске новые конструкций антенн, имеющих минимальную добротность и максимально использующих внутренний объем радианной сферы для возбуждения мод свободного пространства низших порядков. Вилер[7] показал, что наилучшим и очевидным примером подобной антенны будет дипольная емкостная антенна со сферическими крышками (см. Рис. 2а). Лопес в [8], показал, что минимально низкую добротность  $Q$  такой антенны можно достигнуть, когда область сферических крышек составляет 0,444 от всей сферической области, что обеспечивает  $QR = Q/Q_{Chu} = 1,75$ .

Другим примером является работа [9], в которой изучены свойства изогнутой сферической спиральной антенны (см. Рис. 2б). Антенна электрически малая и при

электрическом размере  $ka \cong 0,38$ , что соответствует высоте  $\sim 0,06\lambda$ , антенна имеет  $\sim 50$ -Омное согласование по входному импедансу и КПД порядка 90%. Кроме того, на резонансной частоте антенна обладает добротностью  $Q$ , приближающейся к фундаментальному пределу  $QR = Q/Q_{Chu} = 1,5$ .

Характерной особенностью таких конструкций является то, что они занимают значительную часть объема радианной сферы, что затрудняет их использование в конструкциях мобильных устройств, где требуются конформные или низкопрофильных антенны.

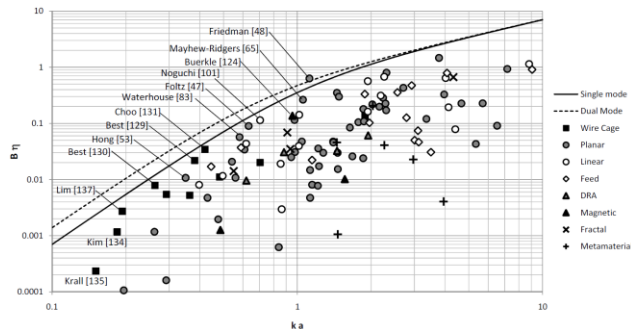


Рис. 1. [6] Сравнение зависимости эффективности использования рабочей полосы  $B$  от электрического размера антенны  $ka$  опубликованных работ с фундаментальным пределом.

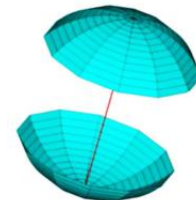


Рис. 2а. Дипольная антенна со сферическими крышками.



Рис. 2б. Изогнутая сферическая спиральная антенна

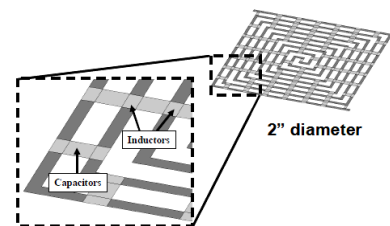


Рис. 4. [14] Нагрузка спиральной антенной структуры точечными элементами – чип-индуктивностями и чип-емкостями

Второй подход заключается в миниатюризации уже существующих конструкций антенн с целью снижения их добротности на частотах, где они являются электрически малыми. Метод миниатюризации антенн, предложенный Крамером в [10], предполагает сокращение фазовой скорости волны возбуждаемой в антенной структуре. Для иллюстрации он использует аналогию между антенной и волноведущей линией. Для которой, хорошо известно, что фазовая скорость и характеристический импеданс  $Z_0$ , могут быть записаны в виде:

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}, \quad (5)$$

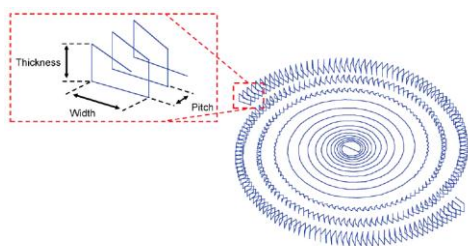
$$Z_0 = G \sqrt{\frac{L}{C}} = G \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}, \quad (6)$$

где  $L$  является последовательной погонной индуктивностью, а  $C$  – шунтирующая погонная ёмкость, а  $G$  – геометрический фактор. Откуда видно, что корректировать фазовую скорость можно за счет изменения погонных индуктивности и ёмкости. Таким образом, может быть создана необходимая электрическая задержка для получения резонанса на требуемой частоте (для узкополосных – резонансных антенн) или для расширения рабочей полосы частот СШП антенн. Изменения индуктивности и ёмкости, а следовательно, и импеданса антенны можно осуществить различными способами:

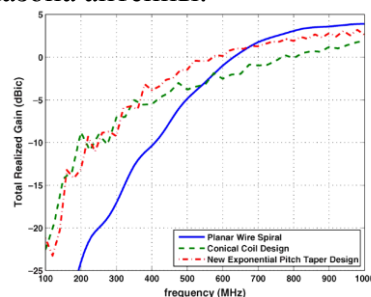
**А)** за счет изменения свойств среды; **Б)** за счет изменения геометрии антенны и создания распределенной емкостной или реактивной нагрузки антенны; **В)** за счет нагрузки антенной точечными дискретными элементами – индуктивностями и емкостями. Рассмотрим все эти способы детально.

Изменения диэлектрической проницаемости или магнитной восприимчивости окружающей антенну среды, которое может быть реализовано путем нагрузки антенны материалами с высоким  $\mu$  и  $\epsilon$  или за счет использования такие материалы в качестве подложки, позволяет замедлить фазовую скорость волны возбуждаемой в антенной структуре и, соответственно, понизить рабочую частоту. Это наиболее общий подход, что делает его применимым к любой конструкции антенны. Однако плотность материала может сделать этот подход неприемлемым для применений, требующих легких антенн. Кроме того, потери в веществе могут играть существенную роль в применимости таких материалов. Например, частотно-зависимые потери характерные существующим современным магнитным или магнито-диэлектрическим материалам не позволяют применять их в СВЧ-диапазоне. Стоит отметить, что для случая ШП и СШП антенн данный способ имеет свои ограничения, продемонстрированные в работе [11] на примере спиральной антенны: улучшение КПД антенны за счет диэлектрической нагрузки на нижней частоте диапазона сопровождалось его ухудшением в верхней части частотного диапазона.

Нагрузка антенны реактивными распределенными элементами используется достаточно давно с целью снижения ее добротности и соответственно расширения рабочей полосы. Так широко известны monopольная антенна нагруженная диском и являющиеся дальнейшим ее развитием диско-конусные антенны, опубликованные во многих классических учебниках [12]. Наиболее интересны для представления современные работы, касающиеся миниатюризации печатных антенн. Один из широко используемых подходов миниатюризации печатных антенн (в том числе дипольных, monopольных, спиральных) заключается в физическом удлинении полосковых линий антенной структуры и использовании структур типа «меандр». Отдельно остановимся на результатах миниатюризации спиральной антенны [13] из-за ее сверхширокополосных свойств. Индуктивная нагрузка плечей спирали представляет собой катушку, реализованную с помощью полосков и переходных отверстий на печатной плате (см. Рис. 3а). Как видно из Рис. 3б индуктивная нагрузка позволяет поднять КПД спиральной антенны на частотах  $\sim 300$  МГц на порядок или иными словами сдвинуть нижнюю границу рабочего диапазона антенны.



**Рис. 3а. [13] Индуктивная нагрузка плечей спиральной антенны.**



**Рис. 3б. [13] Сравнение КПД спиральной антенны до и после миниатюризации**

В работе [14] был показан метод миниатюризации спиральной антенной, упоминающийся выше, с помощью LC-нагрузки (см. Рис. 4). Уменьшение фазовой скорости распространения волны было достигнуто путём повышения индуктивности и ёмкости структуры антенны. В работе [14] продемонстрировано, что такой подход можно реализовать с помощью монтажа дискретных элементов: индуктивностей,

включенных последовательно в рукава спирали, и конденсаторов, включенных параллельно в соседние рукава спирали. Отметим, что этот подход хорошо работает до тех пор, пока число дискретных элементов не велико и, соответственно, пока потерями, связанными с омическими потерями в контактах и в самих LC-элементах можно пренебречь.

### **Заключение**

В работе представлен краткий обзор способов снижения добротности антенны с целью достижения предельного значения, описанного Чу, а так же рассмотрены и проанализированы современные подходы к миниатюризации антенн, с особым акцентом на печатные ШП и СШП антенны.

### **Литература**

- [1]. А. С. Дмитриев, А.В. Клецов, А.М. Лактюшкин, А.И. Панас, В. ЮСинякин, Сверхширокополосная СВЧ приемопередающая платформа на основе хаотических сигналов, Радиотехника, 2007, №1.
- [2]. Wheeler, H. A. Fundamental limitations of small antennas, Proceedings of the IRE, Dec. 1947, pp. 1479–1488.
- [3]. L. J. Chu, Physical Limitations of Antenna Q, Journal of Applied Physics, 19, December 1948, pp. 1163-1175.
- [4]. R. F. Harrington, "Effect of Antenna Size on Gain, Bandwidth, and Efficiency," J. Res. Nat. Bureau Stand., 64D, January 1960, pp. 1-12.
- [5]. R. L. Fante, "Quality Factor of General Ideal Antennas," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, AP-17, March 1969, pp. 151-155.
- [6]. Daniel Sievenpiper, David Dawson, Minu Jacob, TumayKanar, Sanghoon Kim, Jiang Long, Ryan Quarfoth, Experimental Validation of Performance Limits and Design Guidelines for Small Antennas, Antennas and Propagation, IEEE Transactions (Volume:60 , Issue: 1), January 2012, pp. 8 – 19.
- [7]. H.A. Wheeler, "Antenna Topics in My Experience", IEEE Transactions on Antennas Propagation, AP-33, February 1986, pp. 144-151.
- [8]. A. R. Lopez, Fundamental Limitations of Small Antennas: Validation of Wheeler's Formulas, IEEE Antennas and Propagation Magazine, 48, August 2006, pp. 28-36.
- [9]. Best, S.R., The performance properties of an electrically small folded spherical helix antenna, Antennas and Propagation Society International Symposium, 2002. IEEE (Volume:4 ), pp. 18 – 21.
- [10]. Kramer, B.A., Chen, C.C., Volakis, J.L., Some basic guidelines for miniaturizing UWB antennas, Antennas and Propagation Society International Symposium, 2008. AP-S 2008. IEEE, July 2008, pp. 1-4.
- [11]. Kramer, B.A., Ming Lee, Chi-Chih Chen, Volakis, J.L., Miniature UWB Antenna with Embedded Inductive Loading, Antenna Technology Small Antennas and Novel Metamaterials, 2006 IEEE International Workshop, pp. 289-292.
- [12]. T. A. Milligan, Modern Antenna Design, IEEE PRESS, A John Wiley & Sons, INC., Publication, 2005.
- [13]. Kramer, B.A., Chen, C.C., Volakis, J.L., Size Reduction of a Low-Profile Spiral Antenna Using Inductive and Dielectric Loading, Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE (Volume: 7), 2008, pp. 22 – 25.
- [14]. Lee M., Kramer, B.A., Chen, C.C., Volakis, J.L., Distributed Lumped Loads and Lossy Transmission Line Model for Wideband Spiral Antenna Miniaturization and Characterization, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 55, №10, October 2007, pp. 2671-2678.