

ОПТИМИЗАЦИЯ И СОПОСТАВЛЕНИЕ МАЛОГАБАРИТНЫХ ПЕЧАТНЫХ АНТЕНН ПО СОВОКУПНОСТИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА

С.Е. Банков, К.Б. Папилов

Рассмотрена задача оптимизации параметров малогабаритных печатных антенн по совокупности показателей качества с целью определения их потенциально достижимых технических характеристик. Исследованы полуволновый, четвертьволновый, полуволновый свернутый и четвертьволновый свернутый излучатели с линейной поляризацией. С помощью электродинамического моделирования для них получены множества допустимых решений в пространствах показателей качества: добротность – габаритные размеры, добротность – объем, добротность – площадь излучателя. С помощью безусловного критерия предпочтения найдены множества нехудших решений. Получены множества параметров нехудших антенн. Представлены результаты сравнения разных конструкций малогабаритных печатных антенн в пространстве показателей качества.

1. Постановка задачи

Печатные антенны (ПА), получившие в англоязычной литературе название patch антенн активно исследуются, начиная с пятидесятых годов XX века [1]. Поэтому их можно обоснованно отнести к числу наиболее хорошо изученных СВЧ антенн. В последнее время большую актуальность приобрела задача их миниатюризации [2]. Это связано с интенсивным развитием техники персональных радиоэлектронных систем, функционирующих в СВЧ диапазоне: мобильных телефонов, персональных навигаторов, систем беспроводного доступа в Интернет и т.д. Эти системы работают на частотах 1-2 ГГц.

Классические решения в области ПА, к которым относится, в первую очередь, полуволновая ПА имеют максимальный габаритный размер a , приближенно определяемый следующим соотношением [3]:

$$a \approx \lambda / 2\sqrt{\varepsilon}, \quad (1)$$

где λ - длина волны на рабочей частоте, ε - относительная диэлектрическая проницаемость материала, из которого выполнена ПА. Соотношение (1) показывает один из возможных путей миниатюризации ПА, который состоит в увеличении ε .

Другое направление миниатюризации ПА заключается в их «сворачивании». Сворачивание сводится к удлинению пути протекания токов, в данном случае оно достигается за счет увеличения слоев, на которых расположены печатные проводники. Соотношение аналогичное (1) теперь имеет следующий вид:

$$(a + h)n = \lambda / 2\sqrt{\varepsilon}, \quad (2)$$

где h - толщина слоя, n - число слоев.

Как следует из формулы (2) в свернутых конструкциях увеличение диэлектрической проницаемости не является необходимым условием уменьшения габаритов ПА, так как миниатюризация обеспечивается исключительно геометрической структурой антенны.

Известно, что уменьшение размеров антенны сопровождается ростом ее добротности Q [4]. Таким образом, мы имеем техническое противоречие между показателями качества (ПК) антенны. Одна группа ПК, описывающих размеры антенны, вступает в противоречие с ПК, характеризующими ее полосу рабочих частот. Одна из целей данной работы состоит в исследовании противоречия между ПК для определенного класса малогабаритных ПА. Достижение данной цели является первым этапом нашего исследования, который должен быть продолжен сравнением ПК антенн разного типа. Такое сравнение дает ответ на вопрос о том какая ПА и в каких случаях лучше другой.

Сравнение ПА, а в общем случае сравнение любых технических объектов, производится в пространстве их ПК. Эти ПК зависят от параметров устройства. Поэтому сравнивать надо не любые значения ПК, полученные для произвольно выбранных параметров, а наилучшие значения, которые являются результатом оптимизации устройства. Оптимизация в данном случае является

синонимом синтеза, так как она дает ответ на вопрос о том какие параметры реализуют оптимальные ПК.

Важной особенностью нашей постановки оптимизационной задачи является ее многокритериальность. При оптимизации ПА мы должны одновременно улучшать все выбранные ПК, а не какой-либо один из них. Такая постановка в литературе получила название многокритериальной или векторной оптимизации (ВО) [5].

Оптимизация по одному ПК, если она выполняется на конечном множестве параметров, всегда дает единственное решение, которое является оптимальным. Особенность процедуры ВО состоит в том, что она дает в пространстве ПК не одно оптимальное решение, а множество оптимальных решений, которое получило название множества нехудших (МНХ) решений. При этом МНХ является частью полного множества строго допустимых (МСД) решений. В работе [6] отмечается, что ПК устройств, принадлежащих МНХ находятся в противоречии и одновременно являются наилучшими ПК для устройств из данного МСД. Поэтому, возвращаясь к задаче оптимизации ПА, можно сказать, что МНХ антенны является искомой количественной характеристикой технического противоречия между ее наилучшими ПК. Определение МНХ для конкретных конструкций ПА позволит нам решить первую из поставленных выше задач данной работы. Решение второй задачи о сопоставлении разных конструкций ПА может быть получено путем сравнения их МНХ.

2. Математическая модель ПА и построение МСД

В работе исследуются следующие конструкции ПА: полуволновая, четвертьволновая, полуволновая свернутая и четвертьволновая свернутая. Они показаны соответственно на рис. 1 а-г. На рис. 1 а,б показан также элемент возбуждения ПА в виде коаксиальной линии, подключенной к металлическим полосковым проводникам.

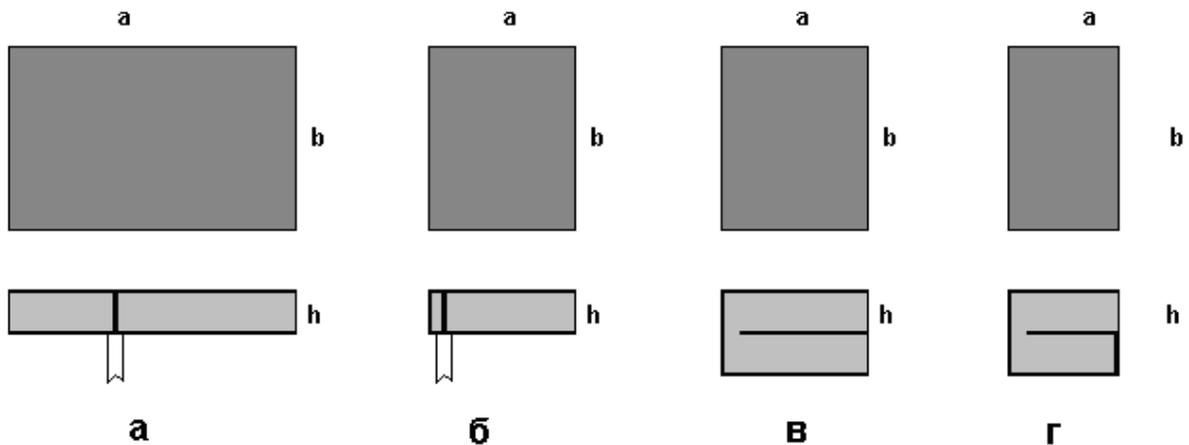


Рис. 1 Исследованные печатные антенны

Численное моделирование ПА осуществлялось в системе Microwave Studio (MWS), которая использует для решения электродинамической задачи схему FDTD. Все исследованные ПА предварительно настраивались так, чтобы ПА на частоте 1.6 ГГц имела нулевой коэффициент отражения S_{11} . Полосу рабочих частот ПА принято определять из условия равенства модуля коэффициента отражения величине 0.5. Этому условию соответствует полоса $\Delta f_{0.5}$. Она отличается от полосы по уровню 0.707 - $\Delta f_{0.707}$, который принят в теории резонансных контуров для определения добротности контура. Допустимо использование обоих параметров, которые вне зависимости от конструкции ПА связаны следующим соотношением:

$$\Delta f_{0.707} = 1.625 \Delta f_{0.5} . \quad (3)$$

Мы остановили свой выбор на полосе $\Delta f_{0.707}$, поскольку с ее помощью определяется добротность ПА Q :

$$Q = 1/\Delta f_{0.707} . \quad (4)$$

К выбору ПК антенны предъявляются стандартные требования [5]: ПК должен быть неотрицательной величиной, которая монотонно уменьшается при улучшении качества ПА. Поэтому в качестве первого ПК, характеризующего диапазонные свойства ПА - K_1 целесообразно выбрать ее добротность Q . Размеры ПА могут быть описаны разным образом. Мы рассмотрели три различные формулировки второго ПК - K_2 .

Первый вариант – максимальный габаритный размер:

$$K_{2,1} = \max(a, b, nh), \quad (5)$$

где смысл размеров a, b, h поясняется на рис. 1, n - число слоев в конструкции ПА. По второму варианту ПК K_2 определяется как объем ПА:

$$K_{2,2} = abnh. \quad (6)$$

В третьей постановке в качестве ПК K_2 взята площадь ПА S :

$$K_{2,3} = ab. \quad (7)$$

Рассматриваемые ПА имеют следующую совокупность параметров, которую также называют вектором параметров \vec{X} : x_1 - ширина ПА b , x_2 - ее высота, равная nh , x_3 - относительная диэлектрическая проницаемость материала подложки ПА ε , x_4 - длина ПА a . Параметр x_4 определялся из условия настройки ПА на частоту f_0 . Остальные параметры менялись в заданных диапазонах:

$$x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (8)$$

Первый этап ВО – это поиск МСД. Данная задача решается путем определения ПК антенн выбранных типов для совокупности дискретных значений параметров, удовлетворяющих неравенствам (8). Для расчета ПК в промежуточных точках использовалась процедура аппроксимации функций $K_{1,2}(x_1, x_2, x_3)$ кубическими сплайнами. На рис. 2 показана зависимость добротности полуволновой ПА от толщины подложки h , полученная для $\varepsilon = 1$. Кривые 1-3 соответствуют $b = 10, 15, 30$. Все размеры здесь и далее даны в миллиметрах.

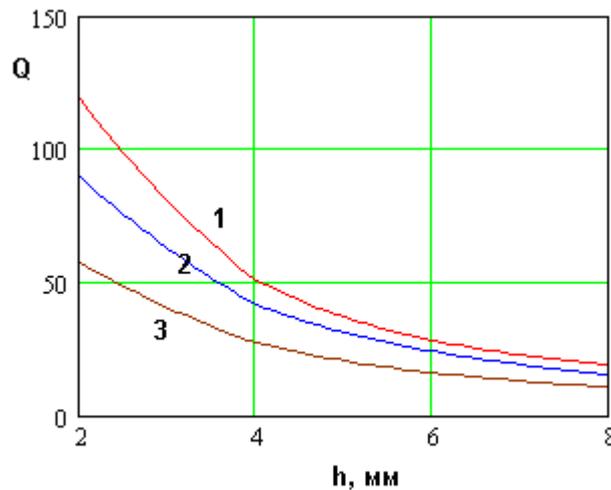


Рис. 2 Зависимость добротности полуволновой ПА от толщины подложки

На следующем этапе МСД подвергалось вторичной дискретизации с более мелким шагом. Число точек по каждому параметру $M_i, i=1,2,3$ было взято равным десяти. Таким образом, общее число точек, входящих в МСД для одной ПА равно тысяче.

3. Построение МНХ

Построение МНХ связано с использованием безусловного критерия предпочтения (БКП). Сформулируем его в явном виде. Пусть мы имеем две ПА, характеризующиеся ПК $K_{1,2}^{1,2}$. Верхний индекс соответствует номеру ПА. Тогда БКП утверждает следующее:

ПА 1 лучше ПА 2, если, по крайней мере, один ПК у нее меньше аналогичного ПК ПА 2, а другой ПК ПА 1 меньше или равен аналогичному ПК ПА 2;

ПА 1 хуже ПА 2, если, по крайней мере, один ПК у нее больше аналогичного ПК ПА 2, а другой ПК ПА 1 больше или равен аналогичному ПК ПА 2;

ПА 1 и ПА 2 эквивалентны, если $K_{1,2}^1 = K_{1,2}^2$;

ПА 1 и ПА 2 несравнимы, если один ПК ПА 1 больше того же ПК ПА 2, а другой меньше.

В традиционной постановке оптимизационной задачи, когда используется один ПК (целевая функция), сравнение двух устройств всегда позволяет выделить из них лучшее и худшее. При этом мы исключаем вырожденный случай эквивалентных устройств, имеющих одинаковые ПК. В случае ВО появляется третий класс устройств – нехудшие. Их поиск является целью ВО.

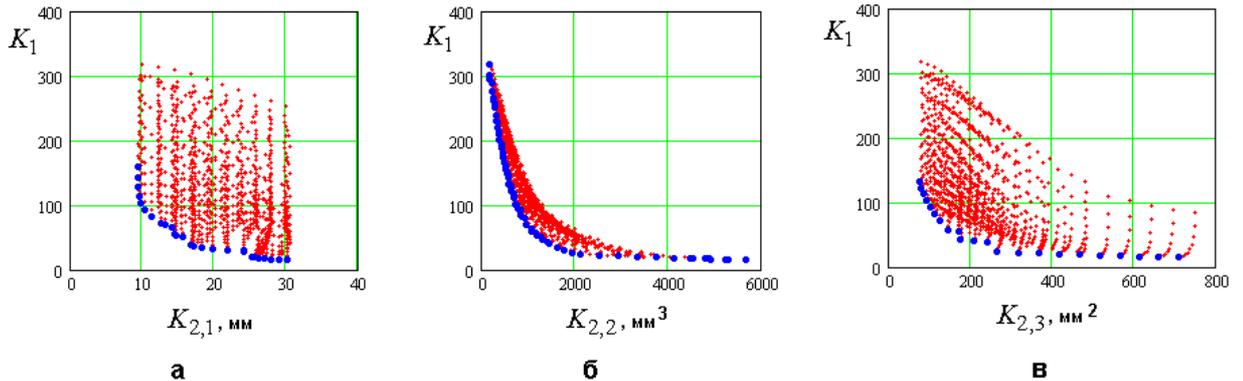


Рис. 3 МСД и МНХ четвертьволновой свернутой печатной антенны при разных формулировках показателя качества

Для поиска МНХ известны различные методы, позволяющие минимизировать вычислительные затраты [6]. Мы не стали прибегать к их использованию, а применили к МСД непосредственно БКП. Это стало возможным благодаря относительно небольшой размерности МСД. На рис. 3 показаны полученные МСД и МНХ для четвертьволновой свернутой ПА. Рисунки а-в соответствуют разным формулировкам ПК K_2 (см. формулы (5) – (7)). Точками меньшего размера изображено МСД. Крупные точки показывают МНХ.

Видно, что МНХ является левой нижней границей МСД. Это находится в соответствии с работой [5]. Форма МНХ является важной характеристикой глубины технического противоречия [6]. Для полуволновой и четвертьволновой ПА отметим характерное поведение МНХ, имеющего выраженные участки, которые можно условно назвать вертикальным, горизонтальным и вершиной. Вертикальный и горизонтальный участки характеризуются быстрым изменением одного ПК при слабом изменении другого. На вертикальном участке быстро меняется ПК K_1 , а на горизонтальном K_2 . В области вершины МНХ наблюдается изменение обоих ПК. В работе [7] утверждается, что движение на горизонтальном и вертикальном участках МНХ приводит к резкому проигрышу по одному ПК при незначительном выигрыше по другому. Поэтому ПА, соответствующие вершине МНХ являются удачным компромиссом, который обеспечивает приемлемые значения обоих ПК.

4. Сравнение разных типов ПА

Полученные в разделе 3 МНХ для четырех конструкций ПА решают первую часть поставленной выше задачи. Эти множества можно рассматривать как количественную характеристику потенциально достижимых значений ПК на заданной ограниченной совокупности параметров. Далее рассмотрим сопоставление разных типов ПА в пространствах ПК $K_1 - K_{2,j}$, $j=1,2,3$.

Сопоставлять разные типы ПА удобно графически, показывая на одном графике МНХ, соответствующие одинаковым ПК и разным ПА. На рис. 4 представлены результаты такого сопоставления. Кривые 1-4 на рис. 4 соответствуют разным типам ПА: полуволновой, четвертьволновой, полуволновой свернутой и четвертьволновой свернутой. На рис.4 показаны

МНХ в пространствах $K_1 - K_{2,j}, j=1,2,3$ соответственно. Для удобства анализа на рис. 4 вместо исходных ПК $K_{2,2}$ использованы модифицированные ПК $\tilde{K}_{2,2}$:

$$\tilde{K}_{2,2} = \sqrt[3]{K_{2,2}} \quad (9)$$

Функциональные преобразования (9) допускаются теорией ВО [5], так как они не влияют на результаты сравнительного анализа. Удобство их использования состоит в том, что они теперь имеют такую же размерность и порядок величин, как и ПК $K_{2,1}$.

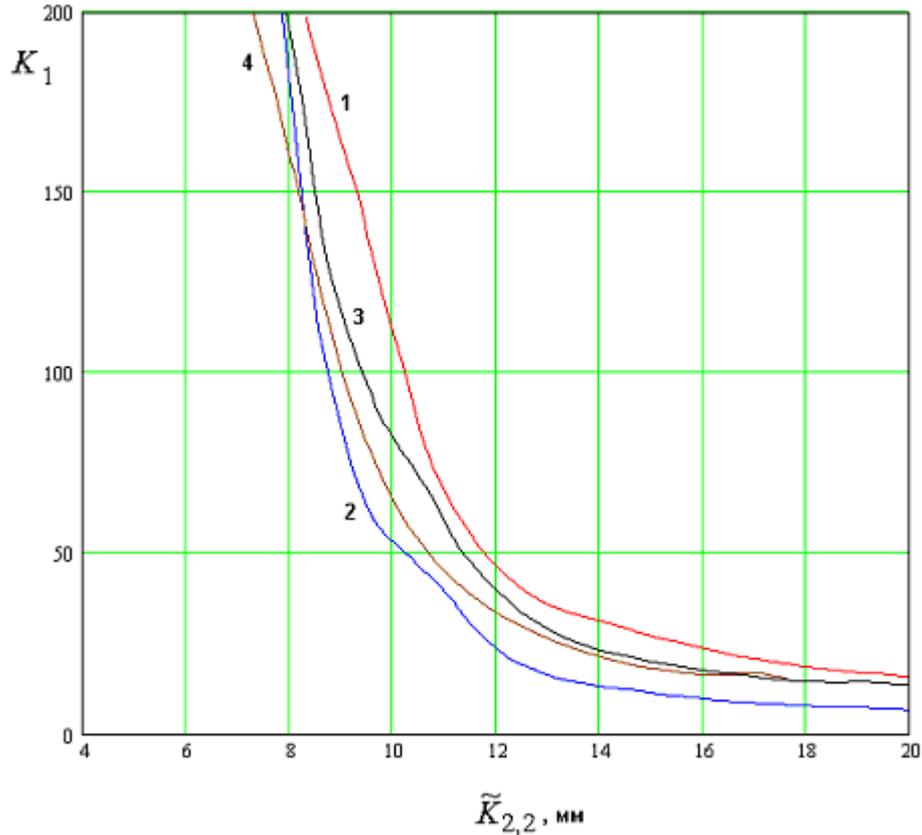


Рис.4 Множества нехудших разных типов печатных антенны при третьей формулировке показателя качества

С математической точки зрения сравнение разных ПА сводится к применению БКП к новому МСД, которое получается сложением МНХ для всех типов ПА. Однако благодаря тому, что сопоставление ведется в пространстве двух ПК определение нового МНХ, которое является левой нижней границей МСД, может быть легко осуществлено графически.

Анализ результатов позволяет сделать общие выводы для всех формулировок ПК K_2 , характеризующего размеры ПА. Полуволновая и полуволновая свернутая ПА оказались безусловно хуже четвертьволновых ПА. Четвертьволновая и четвертьволновая свернутая антенны конкурируют друг с другом, что следует из наличия точки пересечения их МНХ (см. рис. 4). Таким образом, четвертьволновую свернутую ПА целесообразно использовать в тех случаях, когда необходимо получить предельно малые размеры при достаточно большой добротности. В противоположном случае предпочтение следует отдать четвертьволновой ПА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lo Y.T., Solomon D., Richards W.F. // IEEE Trans. AP. 1979. V.27. N2. P.137.
2. Wong K.L. Compact and broadband microstrip antennas // NY. John Wiley & Sons. 2002.
3. Панченко Б.А., Нефедов Е.И. Микрополосковые антенны // М.: Радио и связь. 1986.
4. Chu L. J. // Journal of Applied Physics. 1948. V.19. N12. P.1163.

5. Гуткин Л.С. Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества. М.: Сов. Радио 1975.
6. Гуткин Л.С. Проектирование радиосистем и радиоустройств. М.: Радио и связь. 1986.