

5. *Зелкин Е.Г., Кравченко В.Ф.* Синтез антенн на основе атомарных функций. Кн.2. – М.: ИПРЖР, 2003. – 72 с.
6. *Бахрах Л.Д., Кременецкий С.Д.* Синтез излучающих систем. Теория и методы расчета. – М.: Сов. радио, 1974.
7. *Васильев Е.Н.* Возбуждение тел вращения. – М.: Радио и связь, 1987. – 272 с.
8. *Гантмахер Ф.Р.* Теория матриц. – 4-изд. – М.: Наука. гл. ред. физ.-мат. лит., 1988.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Д.В. Семенихина.

**Бобков Николай Иванович** – Открытое акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт «Градиент» (ОАО «ВНИИ «Градиент»); e-mail: gradient@aanet.ru; 344010, г. Ростов-на-Дону, пр. Соколова, 96; тел.: 88632348900, 88634131563; начальник сектора

**Пархоменко Николай Григорьевич** – тел.: 88632324770; генеральный директор.

**Габриэлян Дмитрий Давидович** – ФГУП «Федеральный научно-производственный центр РНИИРС»; 344038, г. Ростов-на-Дону, ул. Нансена 130; тел.: 88632508985, 88632956702; д.т.н.; профессор; зам. начальника НТК по науке.

**Bobkov Nikolay Ivanovich** – Joint Stock Company “All-Russian Scientific Research Institute “Gradient” (JSC “VNI“Gradient”); e-mail: gradient@aanet.ru; 96, Sokolov street, Rostov-on-Don, 344010, Russia; phones: +78632348900, +78634131563; the chief of research laboratory.

**Parkhomenko Nikolay Grigor’evich** – phone: +78632324770; director general.

**Gabrieljan Dmitriy Davidovich** – FSUE «Federal research and production center RNIIRS»; 130, Nansena street, Rostov-on-Don, 344038, Russia; phone: +78632508985, +78632956702; dr. of eng. sc.; professor; the science assistant of the head of department.

УДК 629.7.028.6

**Н.Н. Кисель, С.Г. Грищенко, Д.А. Кардос**

### **ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КОМБИНИРОВАННОЙ МИКРОПОЛОСКОВОЙ АНТЕННЫ**

*В последнее время разработка микрополосковых антенн проводится в направлении миниатюризации их конструкции. В работе представлена двухрезонансная антенна, состоящая из нескольких сегментов, одна часть антенны обеспечивает работу в нижнем поддиапазоне, другая – в верхнем. Исследование антенны выполнено в программной среде трехмерного электромагнитного моделирования FEKO (ядро OPTFEKO). В работе при решении задачи расширения рабочего диапазона конструкция антенны оптимизирована с использованием Simplex метода. Для поиска целевой функции применен метод моментов. В результате оптимизации достигнуты значения КСВ антенны ниже 2 во всем рабочем диапазоне за счет выбора точки питания без изменения ее габаритов. Частотные зависимости КСВ и входного сопротивления антенны представлены на графиках.*

*Микрополосковая антенна; коэффициент стоячей волны (КСВ); оптимизация.*

**N.N. Kisel', S.G. Grishchenko, D.A. Kardos**

### **OPTIMISATION DUAL-RESONANT PATCH ANTENNA**

*Development of small antennas has received a lot of attention during the last years due to size reduction of the devices. The antenna is based on the dual-resonant antenna structure reported. The studied antenna consists of three shorted patches, one for the lower band and two for the upper band. The antenna is fed by a probe. The antenna structure was designed and theoretically studied using FEKO (kernel OPTFEKO) based 3D electromagnetic simulation program. This*

work presents the optimisation of dual-band patch antenna in order to achieve a large bandwidth in the 1,8 GHz band, using an optimisation technique based Simplex method. During the optimisation process, the different antenna models have been evaluated using method of moment (MoM). As a result of this optimisation, antenna was obtained the values of VSWR not exceeding two in the working frequency bands it was achieved with dual-band patch antenna with the same overall dimensions due to new point of feed. Graphs of VSWR and the real and imaginary impedance for various frequencies are shown.

*Patch antenna; standing wave ratio (VSWR); optimization.*

**Введение.** В настоящее время в мобильных телефонах, как правило, используются различные модификации микрополосковых антенн (МПА). МПА, изготовляемые по технологии интегральных схем, обеспечивают высокую повторяемость размеров, низкую стоимость, габаритные размеры, массу [1–4]. Использование диэлектриков в конструкции антенны позволяет дополнительно уменьшить размеры антенны. Несмотря на простоту конструкции, в МПА возможно возникновение поверхностных волн (например, при наличии диэлектрика), учет которых требует применения строгих методов решения. Кроме того, для уменьшения размеров используют дополнительные реактивные нагрузки, которыми можно расширить диапазон работы антенны.

Плоская МПА имеет несколько степеней свободы в своей конструкции (вариация геометрических параметров) и возможность выбора электрофизических параметров (например, диэлектрика).

**Численное исследование.** Целью данной работы является оптимизация параметров микрополосковой антенны по месту подключения питающей линии для получения минимального коэффициента стоячей волны. Исследуемая антенна представляет собой комбинацию PIFA-антенны и пассивной PILA-антенны [3].

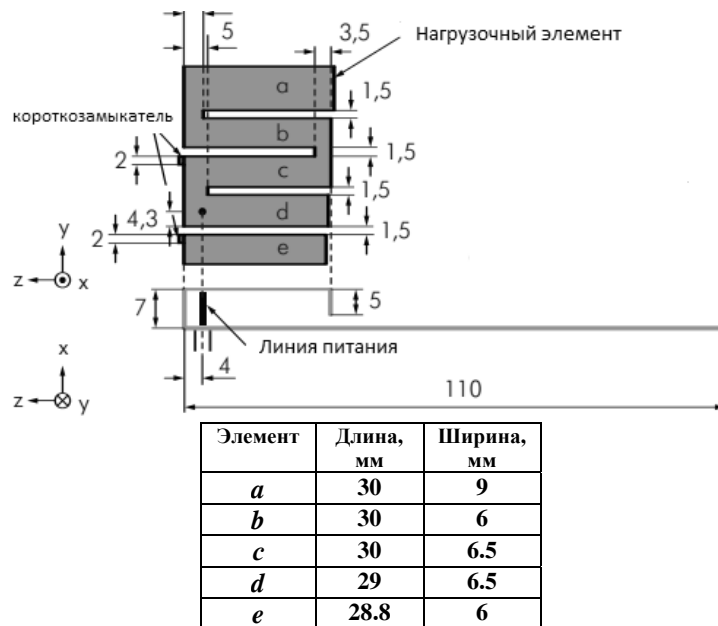


Рис. 1. Комбинация PIFA- и пассивной PILA-антенны [3]

На рис. 1 показана двухдиапазонная МПА. Она состоит из трех областей, одна из которых предназначена для диапазона более низких частот (сегменты *a*–*c* на рис. 1), а другие две (сегменты *d*) – для более высоких. Сегменты объединены в форме двухдиапазонного элемента в виде меандра с одной закорачивающей пла-

стиной и питающим фидером. Сегмент  $e$  предназначен для расширения рабочей полосы в области верхних частот. Антенна возбуждается фидером. Диэлектрик между излучающими пластинами и экраном отсутствует, излучающие пластины фиксируются к экрану короткозамыкающими пластинами и питающим фидером.

Оптимизацию конструкции исследуемой антенны по критерию обеспечения минимального коэффициента стоячей волны проведем с использованием пакета трехмерного электромагнитного моделирования FEKO, успешно примененного авторами для решения ряда актуальных прикладных задач [5, 6].

Этапы моделирования в пакете FEKO приведены на рис. 2.

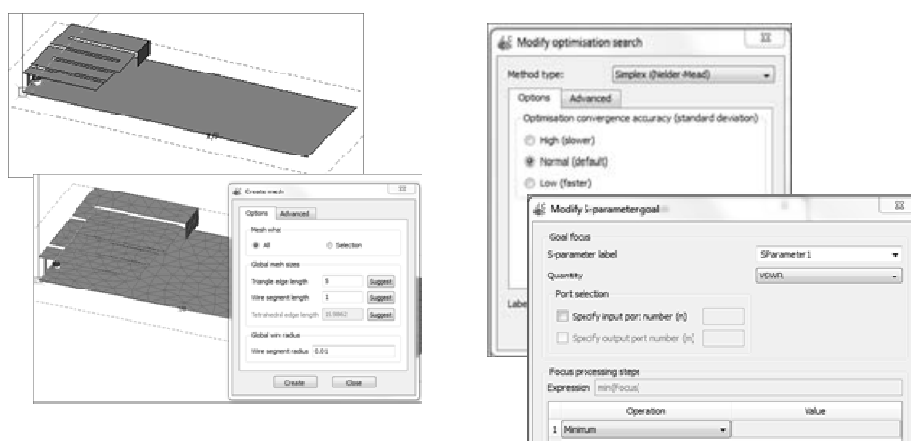


Рис. 2. Этапы моделирования комбинированной антенны в пакете FEKO

Для определения места подключения антенны питающего фидера использовался метод *Simplex (Nelder-Mead)* – метод Нелдера-Мида, также известный как метод деформируемого многогранника или симплекс-метод. При реализации этого метода не используются производные целевой функции, что позволяет применять его к негладким и/или зашумлённым функциям. Суть метода заключается в последовательном перемещении и деформировании треугольника («симплекса») вокруг точки экстремума.

В качестве целевой функции рассматривается оптимизация по элементам матрицы рассеяния *S-parameter Goal* – задается минимум *KCB (VSWR)* на заданной частоте

$$KCB = VSWR = \frac{1 + |S_{nn}|}{1 - |S_{nn}|}.$$

Алгоритм метода заключается в следующем. Предположим, имеется целевая функция  $n$ -переменных  $VSWR(x, y)$ . Функция определена во всех встречающихся точках  $x, y$  (координаты питающего фидера). Параметры метода задаются по умолчанию:

- ◆ коэффициент отражения  $\alpha > 0$ , обычно выбирается равным 1;
  - ◆ коэффициент сжатия  $\beta > 0$ , обычно выбирается равным 0,5;
  - ◆ коэффициент растяжения  $\gamma > 0$ , обычно выбирается равным 2.
- Далее алгоритм реализуется в следующей последовательности.

1. Задается  $n + 1$  точка  $p_i = p(x_i, y_i)$ ,  $i = 1 \dots n + 1$ , образующие симплекс  $n$ -мерного пространства. В этих точках вычисляются значения функции:  $VSWR_i = VSWR(x_i, y_i)$ .

2. Выполняется «сортировка», из вершин симплекса выбираем три точки:  $p_h$  с наибольшим (из выбранных) значением функции  $VSWR_h$ ,  $p_g$  со следующим по величине значением  $VSWR_g$  и  $p_l$  с наименьшим значением функции  $VSWR_l$ . Целью дальнейших манипуляций будет уменьшение  $VSWR_h$ .

3. Определяется центр тяжести всех точек

$$p_c = \frac{1}{n} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq h}}^{m+1} p_i.$$

4. Находится «отражение» точки  $p_h$  относительно  $p_c$  с коэффициентом  $\alpha$  (при  $\alpha = 1$  это соответствует центральной симметрии), в полученной точке  $p_r$  вычисляется значение целевой функции  $VSWR_r$ . Координаты новой точки вычисляются по формуле

$$p_r = (1 + \alpha)p_c - \alpha * p_h.$$

5. Производится сравнение  $VSWR_r$  со значениями КСВ  $VSWR_h$ ,  $VSWR_g$ ,  $VSWR_l$  и проверка возможных условий:

- ◆ если  $VSWR_r < VSWR_l$ , то направление выбрано удачно, и можно увеличить шаг «растяжения», новая точка  $p_e = (1 + \gamma)p_c - \gamma p_r$ ;
- ◆ если  $VSWR_e < VSWR_l$ , то можно расширить симплекс до этой точки: точке  $p_h$  присваивается значение  $p_e$  и прерывается итерация;
- ◆ если  $VSWR_e > VSWR_l$ , то перемещение слишком далеко: точке  $p_h$  присваивается значение  $p_r$ , заканчивается итерация и проверяется выполнение критерия сходимости;
- ◆ если  $VSWR_l < VSWR_r < VSWR_g$ , то выбор точки неплохой (новая точка лучше двух прежних): точке  $p_h$  присваивается значение  $p_r$  и проверяется выполнение критерия сходимости;
- ◆ если  $VSWR_h < VSWR_r < VSWR_g$ , то меняются местами значения  $p_r$  и  $p_h$ , после чего выполняется операция «сжатия»;
- ◆ если  $VSWR_r > VSWR_h$ , выполняется операция «сжатия».

После преобразования получим  $VSWR_r > VSWR_h > VSWR_g > VSWR_l$ .

6. Выполняется операция «сжатия», строится точка  $p_s = \beta p_h + (1 - \beta)p_c$  и производится одно из следующих действий:

- ◆ если  $VSWR_s < VSWR_h$ , то присваиваем точке  $p_h$  значение  $p_s$  и проверяется выполнение критерия сходимости;
- ◆ если  $VSWR_s > VSWR_h$ , то первоначальные точки оказались самыми удачными.

7. Выполняется «глобальное сжатие» симплекса к точке с наименьшим значением  $p_l$ :

$$p_i = p_l + (p_i - p_l) / 2, \quad i \neq l.$$

8. Проверяется сходимость, заключающаяся в проверке взаимной близости полученных вершин симплекса.

Начальное положение питающего фидера взято из [3] и соответствует точке

$$p_{start} = p(x = 4.3, y = 11.8).$$

После выполнения процедуры оптимизации положение точки питания сместилось ближе к пассивной PILA-антенне

$$p_{opt} = p(x = 1.873899046, y = 8.041757384).$$

На рис. 3 приведены зависимости целевой функции  $VSWR(n)$  и параметров оптимизации  $x(n)$  и  $y(n)$  (место подключения питающего фидера) от номера итерации.

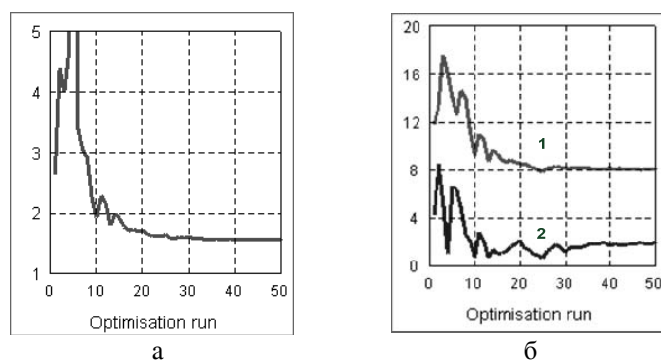


Рис. 3. Целевая функция  $VSWR(n)$  (а) и параметры оптимизации  $x(n)$  (кривая 2) и  $y(n)$  (кривая 1) (б),  $n$  - номер итерации

На рис. 4 приведена частотная зависимость КСВ для исходной антенны и антенны после оптимизации. Как видно из графика, исходная антенна (кривая 1) имела КСВ меньше 2 для частот  $f=880$  МГц, 1,7 ГГц, 1,95 ГГц, 2,4 ГГц. На частоте 1,8 ГГц наблюдался значительный рост КСВ до 4. После оптимизации (кривая 2) в диапазоне 1,75 ГГц – 1,95 ГГц КСВ меньше 2. Изменение положения питающего фидера практически не изменило КСВ для нижней и верхней частоты рабочего диапазона. На рис. 5, 6 приведены активное и реактивное входное сопротивление антенны до (кривая 1) и после (кривая 2) оптимизации.

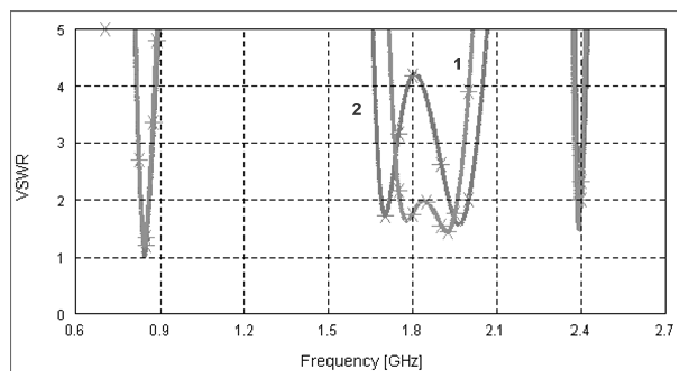


Рис. 4. Частотная зависимость КСВ исходной (кривая 1) и оптимизированной (кривая 2) антенны

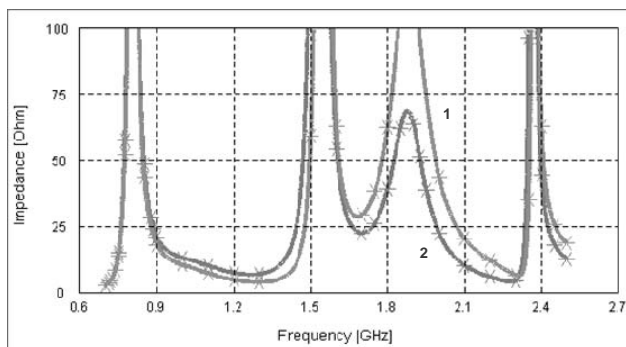


Рис. 5. Активная составляющая входного сопротивления антенны

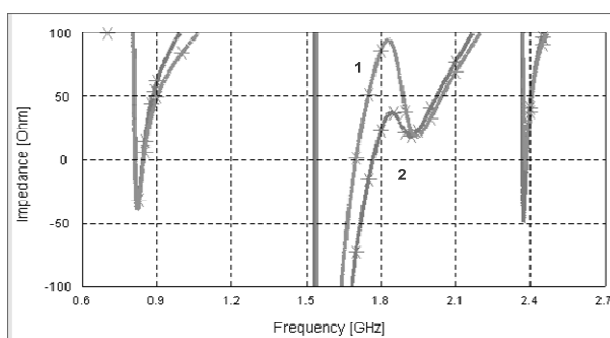


Рис. 6. Реактивная составляющая входного сопротивления антенны

**Выводы.** Таким образом, в работе проведена оптимизация конструкции микрополосковой антенны по критерию обеспечения минимального коэффициента стоячей волны. Показаны широкие возможности улучшения характеристик современных антенн и расширения рабочего диапазона частот при минимальных конструктивных изменениях путем оптимизации параметров антенны.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Панченко Б.А., Нефёдов Н.И. Микрополосковые антенны. – М.: Радио и связь, 1988. – 144 с.
2. Слюсар В.И. Многодиапазонные антенны мобильных средств связи // Электроника. – 2006. – № 8.
3. Ollikainen, O. Kivekäs, A. Toropainen, P. Vainikainen Internal Dual-Band Patch Antenna for Mobile Phones//Proceedings of the AP2000 Millennium Conference on Antennas & Propagation. Davos, Switzerland, 2000.
4. Pinho P., Pereira J.F. Rocha. Optimisation of a PIFA Antenna Using Genetic Algorithms. – In: 3rd Conference on Telecommunications (ConfTele 2001). – April 23–24, 2001.
5. Кисель Н.Н., Грищенко С.Г. Численное моделирование системы антенна-обтекатель // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 5 (130). – С. 104-108.
6. Кисель Н.Н. Электродинамическое моделирование антенн и устройств СВЧ в пакете FEKO: Учеб. пособие. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – 263 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Л.А. Зинченко.

**Кисель Наталья Николаевна** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: dekanat-rtf@tti.sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, ГСП-17А; тел.: 88634371634; кафедра антенн и радиопередающих устройств; профессор; к.т.н.; доцент.

**Грищенко Сергей Григорьевич** – радиотехнический факультет; декан; к.т.н.; доцент.

**Кардос Денис Александрович** – радиотехнический факультет, магистрант

**Kisel' Natalia Nikolayevna** – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University” e-mail: dekanat-rtf@tti.sfedu.ru; GSP-17A, 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371634; the department of antennas and radio transmitters; professor; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Grishchenko Sergey Grigorievich** – the college of radio engineering; dean; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Kardos Denis Alexandrovich** – the college of radio engineering, Master's Degree student.

УДК 621.396.98

**А.И. Панычев**

### **АЛГОРИТМ ТРЕХМЕРНОЙ ТРАССИРОВКИ РАДИОВОЛН ЛОКАЛЬНОЙ БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ**

*Для модели многолучевого распространения сигналов локальной беспроводной сети внутри помещения предложен алгоритм трехмерной трассировки лучей, основанный на детерминистском подходе и базирующийся на методах геометрической оптики, геометрической теории дифракции и зеркального изображения. Алгоритм предусматривает представление помещения в виде набора модулей, каждый из которых является кластером, объединяющим типичные элементы конструкции зданий. В каждом модуле производится предварительное описание условий, формирующих области тени для лучей различной структуры. Это позволяет без расчета траектории луча дать ответ на вопрос о его существовании в выбранной точке объема помещения и тем самым существенно сократить вычислительные ресурсы, как на этапе трассировки, так и при расчете энергетических характеристик лучей.*

*Представлены результаты трехмерной трассировки в помещении с препятствием в виде прямоугольной колонны. Проведено сравнение распределений ослабления сигналов, рассчитанных разными способами. При сопоставимых качественных и количественных характеристиках полученных результатов выигрыш по времени в сравнении с типичной программой моделирования радиотрассы внутри здания составил приблизительно 5 раз.*

*Алгоритм; многолучевое распространение; трассировка лучей; метод геометрической оптики; геометрическая теория дифракции; метод зеркального изображения.*

**A.I. Panychev**

### **THE ALGORITHM OF THREE-DIMENSIONAL TRACE RADIO WAVES WIRELESS LAN**

*An algorithm for the three-dimensional ray tracing for the model of multipath propagation of signals the wireless local area network system indoor is proposed. It is based on deterministic approach and used the methods of geometrical optics, geometrical theory of diffraction and mirror image. The algorithm provides for the representation of space in the form of a set of modules, each of which is a cluster of uniting typical structural elements of buildings. Each module is made preliminary description of the shadow formation conditions for the rays of different structures. This allows without formation of the beam path to give an answer to the question about its existence in the selected point of the room volume and thus strongly reduce computing resources as at the stage of the trace, so when calculating the energy characteristics of radiation.*