

УДК 621.396.67+303.732.4

doi: 10.26907/2541-7746.2019.2.301-314

РЕЗОНАНСНЫЕ ЧАСТОТЫ СИММЕТРИЧНОЙ ЧЕТЫРЕХ-ГРЕБЕНЧАТОЙ МОНОПОЛЬНОЙ МИКРОПОЛОСКОВОЙ АНТЕННЫ

А.Г. Маркина

Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия

Аннотация

Рассмотрена монополярная микрополосковая антенна с симметричным четырех-гребенчатым излучателем. Проанализирована зависимость значений трёх старших резонансных частот от геометрии излучателя. Показано, что изменение длины и ширины излучателя по-разному влияет на значения резонансных частот. Например, установлено, что глубина прямоугольных вырезов на излучателе не изменяет третью резонансную частоту и мало уменьшает значения второго резонанса. Исследовано также влияние ряда других геометрических параметров антенны на резонансные частоты. Показано незначительное влияние ширины линии запитки, толщины подложки и размеров земли на резонансные частоты.

Проведен регрессионный анализ и построены математические модели, описывающие связь резонансных частот с параметрами излучателя. С меньшей погрешностью построены регрессионные модели для длин волн, соответствующим резонансным частотам. Для всех моделей вычислены среднеквадратичная и абсолютная ошибки. Полученные формулы могут быть использованы в проектировании многодиапазонной антенны с заданными резонансными частотами.

Ключевые слова: резонансные частоты, монополярная микрополосковая антенна, четырех-гребенчатый излучатель, регрессионный анализ

Введение

Беспроводные технологии глубоко вошли в повседневную жизнь людей и играют значительную роль как средство связи. Основным элементом такой технологии является антенна. На сегодняшний день одними из самых распространенных и широко используемых типов антенн являются микрополосковые антенны [1, 2]. Связано это прежде всего с рядом их достоинств, таких как компактность в размерах, легкий вес и простота в изготовлении, а также возможности работы антенны на нескольких диапазонах [3].

При проектировании антенн для различных приложений применяют множество способов [4, 5]. Используют различные методы запитки [6] и материалы подложки [7], добавляют слоты в излучателе [8–10] или изменяют геометрию самого излучателя [11], также последовательно корректируют размеры слотов до тех пор, пока антенна не будет настроена на нужные рабочие диапазоны частот и не будет хорошо согласованной в этих диапазонах. Например, в [12] приведена конструкция компактной широкополосной микрополосковой антенны для беспроводных систем связи с тремя рабочими диапазонами. Форма излучателя этой антенны выполнена в крестообразном виде. Чаще всего, в качестве начальной геометрией излучателя выбирают прямоугольник [10, 13] или круг [14].

Однако заметим, что процесс проектирования любой антенны, обладающей определенными электродинамическими характеристиками, является достаточно длительным, трудоемким и требует сложных вычислительных затрат. Настоящая работа является продолжением выполненных ранее исследований, посвященных установлению связи между резонансными частотами и геометрией излучателя. Например, в работах [15–17] для микрополосковых антенн с излучателем симметричной гребенчатой формы выявлены зависимости электродинамических характеристик от геометрии излучателя и на основе корреляционно-регрессионного анализа построены математические модели [18]. С помощью этих моделей были успешно спроектированы хорошо согласованные двухдиапазонная [19] и однодиапазонная [20] гребенчатые антенны.

Первым шагом в проектировании антенны является прежде всего определение допустимых размеров излучателя. Здесь могут быть использованы регрессионные модели для резонансных частот. Далее, изменяя как габариты излучателя, так и отдельные слоты, можно корректировать значения частот и другие электродинамические характеристики антенны [19, 20]: согласование, ширину полосы пропускания и т. д. Точность первого шага (погрешность регрессионных моделей для резонансных частот) влияет на скорость проектирования антенны. Очевидно также, что для успешного проектирования хорошо согласованной антенны необходимо, чтобы антенна, полученная на первом шаге, имела «неплохое согласование».

Монопольные микрополосковые антенны с симметричным четырех-гребенчатым излучателем имеют согласование, удовлетворяющее критерию успешного проектирования [21]. Такие антенны рассмотрены в настоящей работе. Показано влияние геометрии излучателя на значения резонансных частот и на длины волн на этих частотах. Построено несколько регрессионных моделей. Первые три модели описывают связь первых трех резонансных частот антенны с геометрическими параметрами излучателя с погрешностью порядка 1–2%. Следующие три модели описывают зависимость длины волны на каждой частоте от тех же параметров излучателя с погрешностью порядка 3%. Получены графики зависимостей резонансных частот и длин волн от глубины вырезов.

1. Постановка задачи

Рассмотрим показанную на рис. 1 монопольную микрополосковую антенну с излучателем симметричной четырех-гребенчатой формы. На передней стороне подложки расположен излучатель в виде металлической пластины шириной a_R и длиной b_R с прямой линией запитки. Габариты линии запитки задаются через параметры w_F и l_F , равные 1 и 15 мм соответственно. Питание излучателя происходит через коаксиальный кабель от источника тока с сопротивлением в 50Ω . На обратной стороне подложки расположена металлическая пластина (земля), обозначенная заштрихованной областью на рис. 1, длиной b_G и шириной, равной ширине диэлектрика, причем $b_G = l_F$. Толщина подложки составляет 1 мм, а размеры антенны a_S и b_S равны 30 и 75 мм соответственно. Диэлектрическая проницаемость подложки составляет $\epsilon_r = 4.5$, плотность материала (диэлектрика) – 1000 кг/м^3 , а $\text{tg } \delta = 0$, где δ – угол диэлектрических потерь.

На длинных боковых сторонах излучателя находятся симметричные прямоугольные вырезы глубиной d_R ; ширина гребня излучателя c_R вычисляется по формуле $c_R = b_R/3$.

Перейдем к исследованию влияния геометрических параметров излучателя на резонансные частоты (f_2 , f_3) и длину волны (λ_2 , λ_3) на этих частотах. Ниже представим результаты численных экспериментов, проведенных с помощью про-

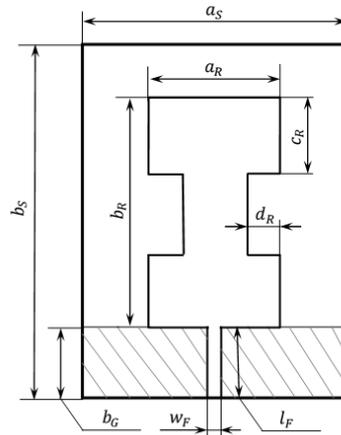


Рис. 1. Симметричная четырех-гребенчатая монополярная микрополосковая антенна. Вид сверху

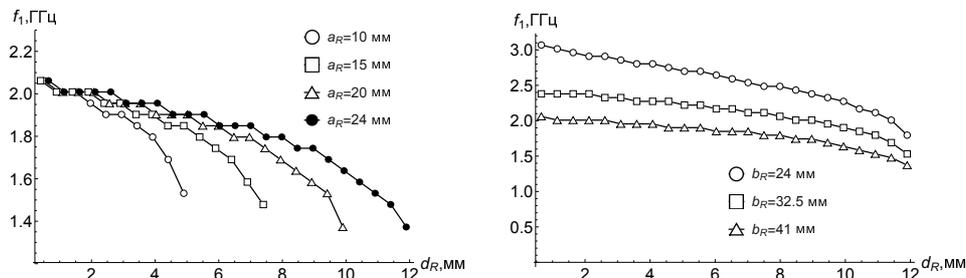


Рис. 2. Зависимость первой частоты f_1 от глубины вырезов d_R для разной ширины излучателя a_R при $b_R = 41$ мм (слева) и для разной длины излучателя b_R при $a_R = 24$ мм (справа)

граммы FEKO¹, и выполним анализ этих результатов. В экспериментах значения b_R длины излучателя будем изменять от 24 до 41 мм, значения a_R ширины излучателя – от 10 до 24 мм, а значения глубины вырезов – от 0.5 до 11.9 мм, причем $0.5 \leq d_R \leq a_R/2 - 0.1$. Общее число рассмотренных антенн составило 204.

2. Анализ влияния геометрии излучателя на резонансные частоты и длину волны на этих частотах

2.1. Первая резонансная частота. Сначала изучим подробнее влияние параметров излучателя на первую резонансную частоту. На рис. 2 представлена динамика изменения значений частоты при фиксированных длине $b_R = 41$ мм и ширине $a_R = 24$ мм.

Из приведенных графиков видно, что значения основной частоты уменьшаются с ростом глубины вырезов, длины и ширины излучателя. Однако наиболее ярко выражено изменение поведения первой частоты при варьировании длины излучателя.

Рассмотрим теперь зависимость длины волны на основной частоте от глубины вырезов. На рис. 3 показана динамика изменения длины волны при фиксированных

¹ <https://altairhyperworks.com/product/FEKO/>.

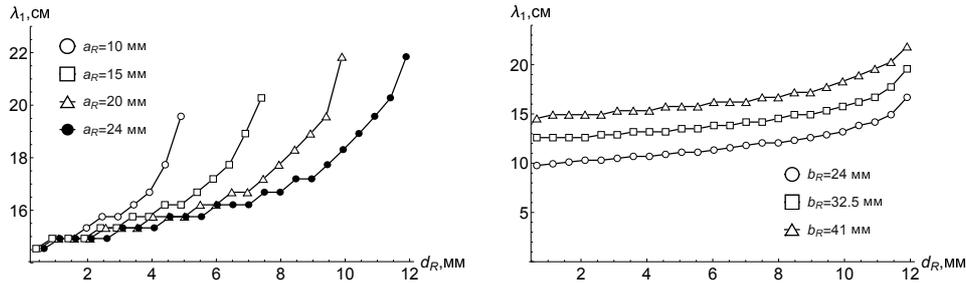


Рис. 3. Зависимость длины волны на первой частоте λ_1 от глубины вырезов d_R для разной ширины излучателя a_R при $b_R = 41$ мм (слева) и для разной длины излучателя b_R при $a_R = 24$ мм (справа)

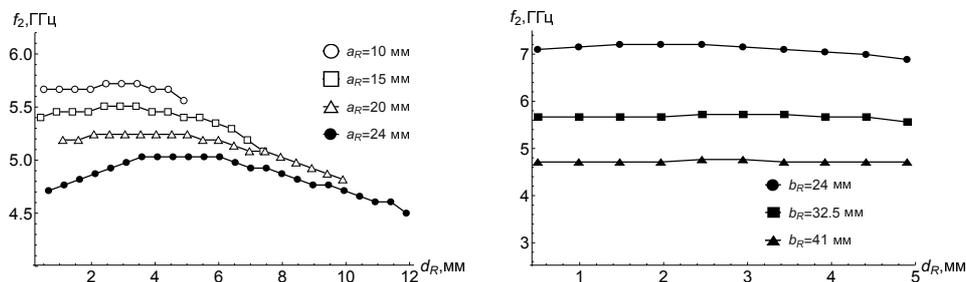


Рис. 4. Зависимость второй частоты f_2 от глубины вырезов d_R для разной ширины излучателя a_R при $b_R = 32.5$ мм (слева) и для разной длины излучателя b_R при $a_R = 10$ мм (справа)

длине $b_R = 41$ мм и ширине $a_R = 24$ мм излучателя. Проанализируем представленные графики.

При фиксированной длине излучателя наблюдалось быстрое увеличение длины волны с ростом глубины вырезов. Наиболее широкий излучатель имеет немного большие значения λ_1 . Аналогично, при фиксированной ширине $a_R = 24$ мм наблюдается увеличение λ_1 , и для вытянутого излучателя характерна большая длина волны на первой резонансной частоте.

2.2. Вторая резонансная частота. Проанализируем приведенную на рис. 4 зависимость второй резонансной частоты микрополосковой антенны от глубины вырезов при фиксированных длине $b_R = 32.5$ мм и ширине $a_R = 10$ мм излучателя.

Из анализа графиков на рис. 4 следует, что значения второй резонансной частоты немного уменьшаются с ростом размера вырезов. Увеличение длины и ширины излучателя также вызывает уменьшение значений второй частоты. Такую связь можно объяснить тем, что ток вдоль боковых стенок излучателя проходит больший путь. Отсюда следует, что излучателям с наибольшим периметром соответствуют меньшие значения частоты. Стоит отметить, что вторая резонансная частота характерна только для излучателей вытянутой формы, причем соотношение b_R/a_R должно быть большим 2. Например, для излучателя с габаритами 15 мм × 24 мм, 20 мм × 24 мм, 24 мм × 24 мм эта частота отсутствует.

Рассмотрим теперь влияние параметров излучателя на длину волны на второй частоте. На рис. 5 (слева) при фиксированной длине излучателя $b_R = 32.5$ мм и на рис. 5 (справа) при фиксированной ширине $a_R = 10$ мм показаны зависимости длины волны λ_2 на второй частоте от d_R .

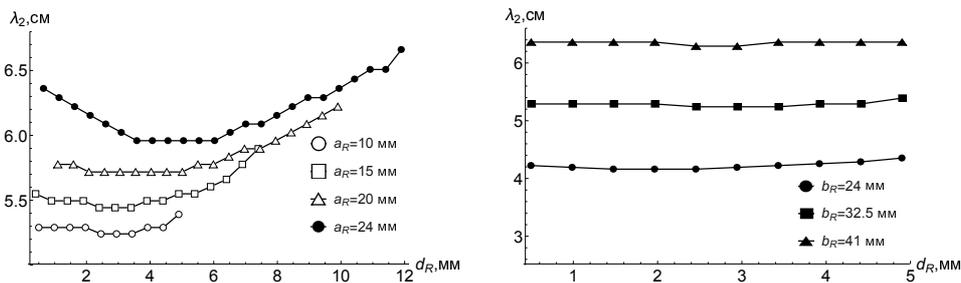


Рис. 5. Зависимость длины волны на второй частоте λ_2 от глубины вырезов d_R для разной ширины излучателя a_R при $b_R = 32.5$ мм (слева) для разной длины излучателя b_R при $a_R = 10$ мм (справа)

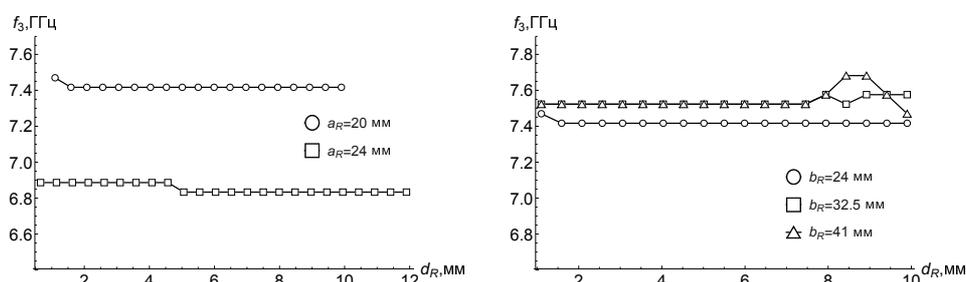


Рис. 6. Зависимость третьей частоты f_3 от глубины вырезов d_R для разной ширины излучателя a_R при $b_R = 24$ мм (слева) и для разной длины излучателя b_R при $a_R = 20$ мм (справа)

Известно, что значение резонансной частоты обратно пропорционально длине волны, поэтому на данных графиках имеем небольшое увеличение значений длины волны с ростом глубины вырезов. Подобное изменение длины волны происходит и с увеличением длины и ширины излучателя.

2.3. Третья резонансная частота. Теперь рассмотрим приведенные на рис. 6 зависимости третьей частоты от d_R при длине $b_R = 24$ мм и при ширине $a_R = 20$ мм излучателя.

Как видно из рисунка, третья резонансная частота не зависит от глубины вырезов на излучателе. Однако она уменьшается при увеличении ширины излучателя a_R и немного изменяется при варьировании длины излучателя b_R . Отметим, что третья частота отчетливо наблюдается в случае, когда форма излучателя близка к квадратной (в нашем случае при $b_R = 24$ мм и $a_R = 20$ и 24 мм).

На рис. 7 представлены графики зависимостей длины волны на третьей частоте от параметров излучателя. Как видим, динамика изменения значений λ_3 наблюдается при изменении ширины излучателя. При большей ширине имеем большие значения длины волны.

Для второй частоты и длины волны при фиксированной длине излучателя соответствующие кривые на рис. 4 и 5 (слева) характеризуются видимой скоростью изменения значений на концах кривых. Заметим, что такие зависимости можно аппроксимировать функцией квадратного корня и экспоненциальной функцией соответственно. Зависимости значений третьей частоты от длины волны (соответствующие кривые на левых рис. 6 и 7) лучше аппроксимировать простой аффинной функцией.

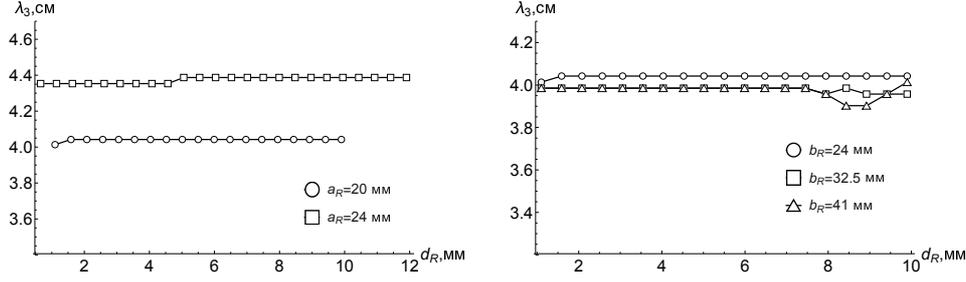


Рис. 7. Зависимость длины волны на третьей частоте λ_3 от глубины вырезов d_R для разной ширины излучателя a_R при $b_R = 24$ мм (слева) и для разной длины излучателя b_R при $a_R = 20$ мм (справа)

3. Регрессионный анализ для резонансных частот и длин волны на этих частотах

Построим функциональную зависимость резонансных частот от геометрических параметров излучателя для антенны с излучателем симметричной четырехгребенчатой формы. Проведем регрессионный анализ для трех параметров излучателя a_R , b_R и d_R . Будем искать для второй и третьей частоты регрессионную модель в следующем виде:

$$f_n(a_R, b_R, d_R) = c_1 \frac{b_R}{a_R} + c_2 \left(\frac{b_R}{a_R} \right)^2 + c_3 \sqrt{a_R - d_R} + \frac{c_4 b_R \sqrt{a_R - d_R}}{a_R} + \frac{c_5 \sqrt{a_R - d_R}}{a_R + b_R}, \quad n = 2, 3, \quad (1)$$

где f_n измеряется в ГГц, длина излучателя b_R , ширина излучателя a_R и глубина вырезов d_R измеряются в мм, а коэффициенты c_i , $i = 1, 2, \dots, 5$ полагаем неизвестными. Методом наименьших квадратов определяем неизвестные параметры в (1) для каждой резонансной частоты:

$$f_2(a_R, b_R, d_R) = \frac{2.77238b_R}{a_R} - \frac{0.319247b_R^2}{a_R^2} - 0.179636\sqrt{a_R - d_R} - \frac{0.377541b_R\sqrt{a_R - d_R}}{a_R} + \frac{62.4224\sqrt{a_R - d_R}}{a_R + b_R}, \quad (2)$$

$$f_3(a_R, b_R, d_R) = \frac{6.28316b_R}{a_R} - \frac{0.983717b_R^2}{a_R^2} - 0.058045\sqrt{a_R - d_R} - \frac{0.472579b_R\sqrt{a_R - d_R}}{a_R} + \frac{42.6896\sqrt{a_R - d_R}}{a_R + b_R}. \quad (3)$$

Вычислим среднеквадратичную ошибку [22]

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (4)$$

и относительную ошибку

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{(Y_i - \hat{Y}_i)^2}{Y_i} \right|. \quad (5)$$

Для регрессионной модели (2) второй резонансной частоты $\varepsilon = 0.149$ ГГц, $\delta = 2.26\%$, а для модели (3) третьей частоты имеем $\varepsilon = 0.097$ ГГц, $\delta = 1.05\%$.

Для улучшения точности формулы из работы [16] для первой резонансной частоты используем регрессионную модель (1). Найдя в этой формуле значения неопределенных коэффициентов, получим

$$f_1(a_R, b_R, d_R) = \frac{0.0442497b_R}{a_R} + \frac{0.0121281b_R^2}{a_R^2} - 0.153526\sqrt{a_R - d_R} + \frac{0.00382842b_R\sqrt{a_R - d_R}}{a_R} + \frac{35.8326\sqrt{a_R - d_R}}{a_R + b_R}. \quad (6)$$

Ошибки формулы (6) составляют $\varepsilon = 0.068$ ГГц и $\delta = 2.32\%$. Отметим, что полученная формула для первой резонансной частоты (6) имеет меньшую погрешность, чем в работе [16], где среднеквадратичная ошибка составляла 0.0876 ГГц, а относительная была 3.16%, число неопределенных коэффициентов равнялось шести.

Построим теперь функциональную зависимость длины волны λ_2 и λ_3 от геометрических параметров излучателя на второй и третьей частотах. Проведем также регрессионный анализ и построим модель в том же виде, как и в [16]:

$$\lambda_n(a_R, b_R, d_R) = c_1\sqrt{b_R} + c_2\sqrt{\varepsilon_r}b_R + c_3d_R \exp\left[\frac{c_4d_R}{(a_R - d_R)^2}\right], \quad n = 2, 3, \quad (7)$$

где λ_n , длина b_R и ширина a_R излучателя, глубина вырезов d_R измерялись в мм, а коэффициенты c_i , $i = 1, 2, 3, 4$, полагались неизвестными. Аналогично, с помощью метода наименьших квадратов определим неизвестные параметры в (7) и получим функциональные зависимости для длины волны на второй частоте в виде

$$\lambda_2(a_R, b_R, d_R) = 7.4901\sqrt{b_R} + 0.1531\sqrt{\varepsilon_r}b_R + 1.1552d_R \exp\left[-\frac{8.42901d_R}{(a_R - d_R)^2}\right], \quad (8)$$

а для длины волны на третьей частоте в виде

$$\lambda_3(a_R, b_R, d_R) = 14.7302\sqrt{b_R} - 0.6322\sqrt{\varepsilon_r}b_R + 0.7883d_R \exp\left[-\frac{24.9164d_R}{(a_R - d_R)^2}\right]. \quad (9)$$

Полученные модели (8) и (9) имеют ошибки $\varepsilon = 2.48$ мм, $\delta = 3.28\%$ и $\varepsilon = 1.6$ мм, $\delta = 3.40\%$ соответственно. Причем если судить по относительной ошибке, то функциональная зависимость для второй и третьей резонансных частот является более точной, чем для длины волны на этих частотах. К тому же при $d_R = 0$ излучатель (см. рис. 1) имеет прямоугольную форму, при этом справедливо соотношение

$$b_R \approx C \frac{\lambda}{2\sqrt{\varepsilon_r}},$$

описывающее связь длины волны на резонансной частоте с длиной прямоугольного излучателя, где C – некоторая постоянная. В нашем случае при $d_R = 0$ из выражения (7) получим формулы, отличающиеся от (8) и (9), но более точные.

4. Влияние основных параметров антенны на вторую резонансную частоту

Перейдем к исследованию влияния других геометрических параметров антенны, таких как длина земли, габариты излучателя, толщина подложки, ширина линии запитки на первую и вторую резонансные частоты четырех-гребенчатой

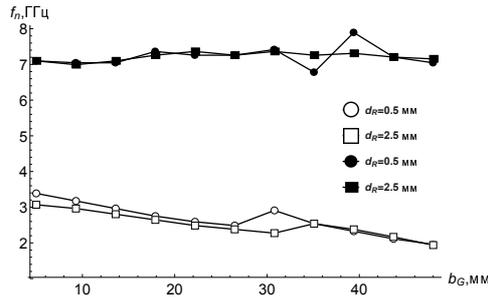


Рис. 8. Зависимость первой (белые фигуры) и второй частоты (черные фигуры) от длины земли b_G при разной глубине вырезов d_R

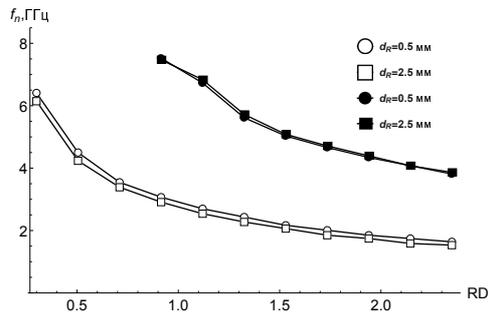


Рис. 9. Зависимость первой (белые фигуры) и второй частоты (черные фигуры) от масштаба излучателя RD при разной глубине вырезов d_R

микрорешетчатой антенны (рис. 1). Рассмотрим антенну с габаритом излучателя $10 \text{ мм} \times 24 \text{ мм}$ и глубиной вырезов 0.5 и 2.5 мм.

Сначала рассмотрим влияние размера земли на первую f_1 и вторую f_2 резонансные частоты (см. рис. 8). Размер земли будем изменять варьированием ее высоты b_G .

Из анализа графиков можем заключить, что длина земли мало изменяет значения второго резонанса, приводит, однако, к уменьшению значений первого. Заметим, что увеличение высоты земли приводит к появлению небольшого увеличения первой и второй частот при величинах около $b_G = 30 \div 35$ мм и $35 \div 40$ мм соответственно. Это можно объяснить тем, что земле также соответствует резонансная частота, значение которой уменьшается с ростом длины земли, так как ток по земле проходит больший путь.

Рассмотрим влияние масштаба излучателя (RD) на первые две резонансные частоты на рис. 9. Для малого масштаба излучателя ($RD \leq 0.4$ мм) имеются большие значения первой частоты и, к тому же эти значения сильно изменяются для RD от 0.1 до 1.25 мм, а затем уменьшаются более плавно. Вторая частота появляется при $RD \geq 0.9$ мм и быстро уменьшается с 7.5 до 4 ГГц при увеличении масштаба излучателя.

Рассмотрим теперь на рис. 10 влияние толщины подложки (TS) на резонансные частоты. Имеем, что увеличение толщины подложки с 0.6 до 5 мм приводит к монотонному незначительному уменьшению первой частоты с 2.7 до 2.5 ГГц и второй частоты с 7.5 до 6 ГГц. При этом значения частот, соответствующие разному размеру вырезов, имеют очень схожее поведение и являются близкими.

Исследуем влияние ширины линии запитки на первую и вторую частоту путём анализа данных на рис. 11. На основе анализа графика мы можем сделать

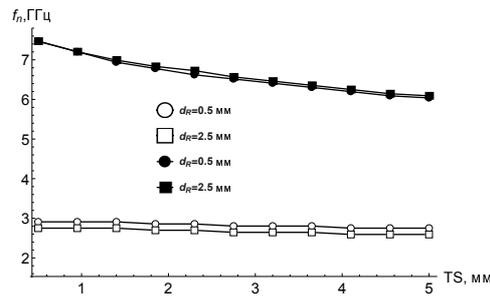


Рис. 10. Зависимость первой (белые фигуры) и второй частоты (черные фигуры) от толщины подложки TS при разной глубине вырезов d_R

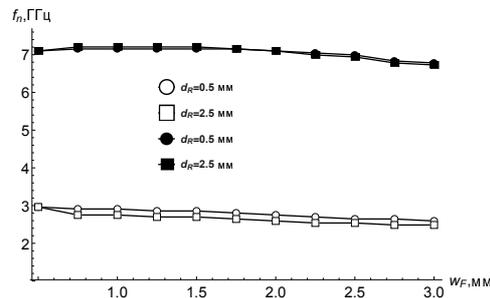


Рис. 11. Зависимость первой (белые фигуры) и второй частоты (черные фигуры) от ширины линии запитки w_F при разной глубине вырезов d_R

вывод, что значения f_1 и f_2 монотонно уменьшаются с увеличением ширины линии запитки. Разница между значениями частот для антенн с различными вырезами остается примерно одинаковой. Это позволяет предположить, что изменением ширины линии запитки можно корректировать резонансные частоты.

Заключение

Рассмотрена микрополосковая антенна с излучателем симметричной четырехгребенчатой формы. Проведено исследование влияния геометрии излучателя на первые три резонансные частоты. В ходе анализа было установлено, что первая резонансная частота уменьшается с ростом длины излучателя и глубины вырезов. Значения второй частоты и длины волны на этой частоте немного изменяются при варьировании размера вырезов. Наиболее сильное влияние оказывает длина излучателя. Поведение третьей резонансной частоты не зависит глубины вырезов и длины излучателя, однако её значения уменьшаются при увеличении ширины. Изменение длины волны на этой частоте аналогичным образом происходит только при увеличении ширины излучателя. Показано, что влияние длины земли, толщины подложки, ширины линии запитки на первые две резонансные частоты оказывается незначительным, в отличие от масштаба излучателя антенны.

Для исследованных зависимостей первой, второй и третьей резонансных частот и длины волны на этих частотах были построены регрессионные модели с высокой точностью как функции от ширины и длины излучателя, глубины вырезов. Причем формулы для резонансных частот имеют меньшую погрешность, чем для длины волны.

Отметим, что полученные модели с учетом того, что основная и последующие резонансные частоты имеют различные зависимости от параметров излучателя

и подложки, могут быть использованы при проектировании для различных двухдиапазонных или трехдиапазонных режимов.

Благодарности. Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

Литература

1. *Balanis C.A.* Antenna Theory: Analysis and Design. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2016. – 1095 p.
2. *Guha D., Antar Y.M.M.* Microstrip and Printed Antennas: New Trends, Techniques and Applications. – John Wiley & Sons, 2011. – 309 p.
3. *Chen J., Fan S.T., Hu W., Liang C.H.* Design of tri-band printed monopole antenna for WLAN and WIMAX applications // Progress in Electromagnetics Research C. – 2011. – V. 23. – P. 265–275. – doi: 10.2528/PIERC11080905.
4. *Jose J.V., Rekh A.S.* Emerging trends in high gain antennas for wireless communication // Proc. IEEE Int. Conf. on Innovations in Electrical, Electronics, Instrumentation and Media Technology, ICIEEIMT 17. – IEEE, 2017. – P. 334–336. – doi: 10.1109/ICIEEIMT.2017.8116861.
5. *Kaur N., Malhotra S.* A review on significance of design parameters of microstrip patch antennas // Proc. 5th Int. Conf. on Wireless Networks and Embedded Systems (WECON'16). – IEEE, 2016. – P. 1–6. – doi: 10.1109/WECON.2016.7993491.
6. *Manohar M., Kshetrimayum R.S., Gogoi A.K.* Printed monopole antenna with tapered feed line, feed region and patch for super wideband applications // IET Microwaves, Antennas & Propag. – 2014. – V. 8, No 1. – P. 39–45. – doi: 10.1049/iet-map.2013.0094.
7. *Yang J., Wang H., Lv Z., Wang H.* Design of miniaturized dual-band microstrip antenna for WLAN application // Sensors. – 2016. – V. 6, No 7. – Art. 983, P. 1–15. – doi: 10.3390/s16070983.
8. *Sundaravel M.E., Vallikannu A.L., Sheker H.* Compact printed slot UWB monopole antenna with ground plane slit // IOSR J. Electronics and Communication Engineering. – 2013. – V. 8, No 3. – P. 25–30. – doi: 10.9790/2834-0832530.
9. *Jangid K.G., Jain P.K., Sharma B.R., Saxena V.K., Kulhar V.S., Bhatnagar D.* Ring slotted circularly polarized U-shaped printed monopole antenna for various wireless applications // Adv. Electromagn. – 2017. – V. 6, No 1. – P. 70–76. – doi: 10.7716/aem.v6i1.460.
10. *Ma L., Edwards R.M., Whittow W.G.* A multi-band printed monopole antenna // 3rd Eur. Conf. on Antennas and Propagation. – IEEE, 2009. – P. 962–964.
11. *Thakare Y.B.* Design of printed monopole antenna for microwave communication // Int. J. Microwave Eng. – 2016. – V. 1, No 4. – P. 45–75. – doi: 10.5121/Jmicro.2016.1405.
12. *Mondal K., Sarkar P.P.* A compact broadband microstrip patch antenna for WiMAX/LAN/Wi-Fi/WLAN applications // Indian J. Pure Appl. Phys. – 2016. – V. 54. – P. 727–732.
13. *Agarwal A., Singhal P.K., Ojha S.S., Gupta A.K.* Design of CPW-fed printed rectangular monopole antenna for wideband dual-frequency applications // Int. J. Innovation Appl. Stud. – 2013. – V. 3, No 3. – P. 758–764.

14. *Ray K.P.* Design aspects of printed monopole antennas for ultra-wide band applications // *Int. J. Antennas Propag.* – 2008. – V. 2008. – Art. 713858, P. 1–8. – doi: 10.1155/2008/713858.
15. *Markina A.G., Tumakov D.N., Pleshchinskii N.B.* On electrical characteristics of comb-shaped microstrip antennas // 2017 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). – IEEE, 2017. – P. 179–183. – doi: 10.1109/EIConRus.2017.7910523.
16. *Markina A.G., Tumakov D.N., Pleshchinskii N.B.* On base frequency for the symmetrical four comb-tooth-shaped microstrip antenna // *J. Fundam. Appl. Sci.* – 2017. – V. 9, No 1S. – P. 1534–1547.
17. *Markina A.G., Tumakov D.N., Pleshchinskii N.B.* Bandwidth enhancement of symmetrical fourth-teeth-shaped microstrip antenna // *Helix.* – 2018. – V. 8, No 1. – P. 2275–2283. – doi: 10.29042/2018-2275-2283.
18. *Abgaryan G.V., Markina A.G., Tumakov D.N.* Application of correlation and regression analysis to designing antennas // *Revista Publicando.* – 2017. – V. 4, No 13. – P. Pr1–Pr13.
19. *Markina A.G., Tumakov D.N., Pleshchinskii N.B.* Designing a symmetrical eight-teeth-shaped microstrip antenna for Wi-Fi applications // 2018 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). – IEEE, 2018. – P. 491–495. – doi: 10.1109/EWDTS.2018.8524698.
20. *Tumakov D.N., Markina A.G., Badriev I.B.* Fast method for designing a well-matched symmetrical four-tooth-shaped microstrip antenna for Wi-Fi applications // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2019. – V. 1158, No 4. – Art. 042029, P. 1–7. – doi: 10.1088/1742-6596/1158/4/042029.
21. *Tumakov D., Markina A., Pleshchinskii N.* Model of resistance for a symmetrical four-tooth-shaped microstrip antenna // *J. Adv. Res. Dyn. Control Syst.* – 2018. – V. 10, No. 10. – P. 1716–1722.
22. *Rawlings J.O., Pantula S.G., Dickey D.A.* Applied Regression Analysis: A Research Tool. – Springer, 2001. – 659 p.

Поступила в редакцию
15.03.19

Маркина Ангелина Геннадьевна, аспирант Института вычислительной математики и информационных технологий

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *m8angelina@gmail.com*

doi: 10.26907/2541-7746.2019.2.301-314

Resonance Frequencies of a Symmetrical Four-Tooth-Shaped Microstrip Antenna

A. G. Markina

Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia

E-mail: m8angelina@gmail.com

Received March 15, 2019

Abstract

The monopole microstrip antenna with a symmetrical four-tooth-shaped radiator was considered. The dependence of the values of the three highest resonance frequencies on the radiator geometry was analyzed. It was shown that changes in the length and width of the radiator affect differently the values of the resonance frequencies. For example, the depth of the rectangular cutouts on the radiator does not change the third resonance frequency and slightly reduces the values of the second resonance. The effect of other geometric parameters of the antenna on the resonance frequencies was also investigated. An insignificant effect of the width of the feedline, the thickness of the substrate, and the dimensions of the ground plane on the resonance frequencies was shown.

A regression analysis was carried out and mathematical models that describe the relationship of resonance frequencies with radiator parameters were constructed. The regression models for wavelengths corresponding to the resonance frequencies were constructed with less error. For all models, the root-mean-square and absolute errors were calculated. The obtained formulas can be used in designing a multi-band antenna with given resonance frequencies.

Keywords: resonance frequencies, monopole microstrip antenna, four-tooth-shaped radiator, regression analysis

Acknowledgments. The work is performed according to the Russian Government Program of Competitive Growth of Kazan Federal University.

Figure Captions

Fig. 1. The symmetrical four-tooth-shaped monopole microstrip antenna. Top view.

Fig. 2. The dependence of the first frequency f_1 on the size of the cutouts d_R for different widths of the radiator a_R at $b_R = 41$ mm (on the left) and for different lengths of the radiator b_R at $a_R = 24$ mm (on the right).

Fig. 3. The dependence of the wave length at the first frequency λ_1 on the size of the cutouts d_R for different widths of the radiator a_R at $b_R = 41$ mm (on the left) and for different the lengths of the radiator b_R at $a_R = 24$ mm (on the right).

Fig. 4. The dependence of the second frequency f_2 on the size of the cutouts d_R for different widths of the radiator a_R at $b_R = 32.5$ mm (on the left) and for different lengths of the radiator b_R with $a_R = 10$ mm (on the right).

Fig. 5. The dependence of the wavelength at the second frequency λ_2 on the size of the cutouts d_R for different widths of the radiator a_R at $b_R = 32.5$ mm (on the left) for different lengths of the radiator b_R with $a_R = 10$ mm (on the right).

Fig. 6. The dependence of the third frequency f_3 on the size of the cutouts d_R for different widths of the radiator a_R at $b_R = 24$ mm (on the left) and for different lengths of the radiator b_R at $a_R = 20$ mm (on the right).

Fig. 7. The dependence of the wavelength at the third frequency λ_3 on the size of the cutouts d_R for different widths of the radiator a_R at $b_R = 24$ mm (on the left) and for different lengths of the radiator b_R at $a_R = 20$ mm (on the right).

Fig. 8. The dependence of the first (white figures) and the second frequency (black figures) on the length of the ground plane b_G with different depth of cutouts d_R .

Fig. 9. The dependence of the first (white figures) and second frequency (black figures) on the scale of the radiator RD with different depth of cutouts d_R .

Fig. 10. The dependence of the first (white figures) and second frequency (black figures) on the thickness of the substrate TS at different depth of cutouts d_R .

Fig. 11. The dependence of the first (white figures) and second frequency (black figures) on the width of the feedline w_F with different depth of the cutouts d_R .

References

1. Balanis C.A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. New Jersey, John Wiley & Sons, 2016. 1095 p.
2. Guha D., Antar Y.M.M. *Microstrip and Printed Antennas: New Trends, Techniques and Applications*. John Wiley & Sons, 2011. 309 p.
3. Chen J., Fan S.T., Hu W., Liang C.H. Design of tri-band printed monopole antenna for WLAN and WIMAX applications. *Prog. Electromagn. Res. C*, 2011, vol. 23, pp. 265–275. doi: 10.2528/PIERC11080905.
4. Jose J.V., Rekh A.S. Emerging trends in high gain antennas for wireless communication. *Proc. IEEE Int. Conf. on Innovations in Electrical, Electronics, Instrumentation and Media Technology, ICIEEIMT 17*. IEEE, 2017, pp. 334–336. doi: 10.1109/ICIEEIMT.2017.8116861.
5. Kaur N., Malhotra S. A review on significance of design parameters of microstrip patch antennas. *Proc. 5th Int. Conf. on Wireless Networks and Embedded Systems (WECON'16)*. IEEE, 2016, pp. 1–6. doi: 10.1109/WECON.2016.7993491.
6. Manohar M., Kshetrimayum R.S., Gogoi A.K. Printed monopole antenna with tapered feed line, feed region and patch for super wideband applications. *IET Microwaves, Antennas & Propag.*, 2014, vol. 8, no. 1, pp. 39–45. doi: 10.1049/iet-map.2013.0094.
7. Yang J., Wang H., Lv Z., Wang H. Design of miniaturized dual-band microstrip antenna for WLAN application. *Sensors*, 2016, vol. 6, no. 7, art. 983, pp. 1–15. doi: 10.3390/s16070983.
8. Sundaravel M.E., Vallikannu A.L., Sheker H. Compact printed slot UWB monopole antenna with ground plane slit. *IOSR J. Electron. Commun. Eng.*, 2013, vol. 8, no. 3, pp. 25–30. doi: 10.9790/2834-0832530.
9. Jangid K.G., Jain P.K., Sharma B.R., Saxena V.K., Kulhar V.S., Bhatnagar D. Ring slotted circularly polarized U-shaped printed monopole antenna for various wireless applications. *Adv. Electromagn.*, 2017, vol. 6, no. 1, pp. 70–76. doi: 10.7716/aem.v6i1.460.
10. Ma L., Edwards R.M., Whittow W.G. A multi-band printed monopole antenna. *Proc. 3rd Eur. Conf. on Antennas and Propagation*. IEEE, 2009, pp. 962–964.

11. Thakare Y.B. Design of printed monopole antenna for microwave communication. *Int. J. Microwave Eng.*, 2016, vol. 1, no. 4, pp. 45–55. doi: 10.5121/Jmicro.2016.1405.
12. Mondal K., Sarkar P.P. A compact broadband microstrip patch antenna for WiMAX/LAN/Wi-Fi/WLAN applications. *Indian J. Pure Appl. Phys.*, 2016, vol. 54, pp. 727–732.
13. Agarwal A., Singhal P.K., Ojha S.S., Gupta A.K. Design of CPW-fed printed rectangular monopole antenna for wideband dual-frequency applications. *Int. J. Innovation Appl. Stud.*, 2013, vol. 3, no. 3, pp. 758–764.
14. Ray K.P. Design aspects of printed monopole antennas for ultra-wide band applications. *Int. J. Antennas Propag.*, 2008, vol. 2008, art. 713858, pp. 1–8. doi: 10.1155/2008/713858.
15. Markina A.G., Tumakov D.N., Pleshchinskii N.B. On electrical characteristics of comb-shaped microstrip antennas. *Proc. 2017 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. IEEE, 2017, pp. 179–183. doi: 10.1109/EIConRus.2017.7910523.
16. Markina A.G., Tumakov D.N., Pleshchinskii N.B. On base frequency for the symmetrical four comb-tooth-shaped microstrip antenna. *J. Fundam. Appl. Sci.*, 2017, vol. 9, no. 1S, pp. 1534–1547.
17. Markina A.G., Tumakov D.N., Pleshchinskii N.B. Bandwidth enhancement of symmetrical fourth-teeth-shaped microstrip antenna. *Helix*, 2018, vol. 8, no. 1, pp. 2275–2283. doi: 10.29042/2018-2275-2283.
18. Abgaryan G.V., Markina A.G., Tumakov D.N. Application of correlation and regression analysis to designing antennas. *Revista Publicando*, 2017, vol. 4, no. 13, pp. Pr1–Pr13.
19. Markina A.G., Tumakov D.N., Pleshchinskii N.B. Designing a symmetrical eight-teeth-shaped microstrip antenna for Wi-Fi applications. *2018 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*. IEEE, 2018, pp. 491–495. doi: 10.1109/EWDTS.2018.8524698.
20. Tumakov D.N., Markina A.G., Badriev I.B. Fast method for designing a well-matched symmetrical four-tooth-shaped microstrip antenna for Wi-Fi applications. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1158, no. 4, art. 042029, pp. 1–7. doi: 10.1088/1742-6596/1158/4/042029.
21. Tumakov D., Markina A., Pleshchinskii N. Model of resistance for a symmetrical four-tooth-shaped microstrip antenna. *J. Adv. Res. Dyn. Control Syst.*, 2018, vol. 10, no. 10, pp. 1716–1722.
22. Rawlings J.O., Pantula S.G., Dickey D.A. *Applied Regression Analysis: A Research Tool*. Springer, 2001. 659 p.

⟨ **Для цитирования:** Маркина А.Г. Резонансные частоты симметричной четырех-гребенчатой монополярной микрополосковой антенны // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2019. – Т. 161, кн. 2. – С. 301–314. – doi: 10.26907/2541-7746.2019.2.301-314. ⟩

⟨ **For citation:** Markina A.G. Resonance frequencies of a symmetrical four-tooth-shaped microstrip antenna. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2019, vol. 161, no. 2, pp. 301–314. doi: 10.26907/2541-7746.2019.2.301-314. (In Russian) ⟩