

РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА И ДИАГРАММЫ РАССЕЙЯНИЯ СПИРАЛЬНЫХ СТРУКТУР

Р.М. Валиуллин, Д.П. Табаков

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, Россия

Обоснование. Структуры в виде спиральных элементов довольно-таки часто встречаются в радиотехнике. Данные структуры могут применяться как самостоятельные антенны, так и в составе антенных решеток. В настоящий момент интерес к спиральным элементам только усиливается, так как возникает острая необходимость в антеннах, которые работают в широкой полосе частот и имеют управляемую (электрически) поляризацию. Для данной цели с середины XX в. создаются различные модели спиральных антенн [1]. Наиболее точными считают модели, построенные с помощью интегральных уравнений. Спиральные элементы представляют практический интерес в качестве рассеивателей электромагнитных волн, данная функция необходима при разработке малоотражающих покрытий, хабов электромагнитной энергии и т. д. По этой причине необходимо решать задачи дифракции для спиральных элементов. Спиральные структуры являются киральными (киральность — это несовпадение объекта со своим отражением в плоском зеркале, т. е. асимметричность).

Цель — строгое электродинамическое решение задачи дифракции электромагнитных, плоскополяризованных волн для однозаходной и двухзаходной спиральных элементов представленных на рис. 1.

Методы. Для спиральных структур задача дифракции плоскополяризованных электромагнитных волн может быть решена с помощью интегральных представлений электромагнитного поля. Этот метод удобен для создания математической модели спиральной структуры с целью ее полного электродинамического анализа. Для построения требуемых математических моделей используем интегральные представления электромагнитного поля, приведенные в [2]:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{W_m}{ik} \int_V (\mathbf{j}(q)k^2 G - (\nabla_q \cdot \mathbf{j}(q))(\mathbf{r} - \mathbf{r}')B) dV,$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \int_V ((\mathbf{r} - \mathbf{r}') \times \mathbf{j}(q))B dV,$$

где \mathbf{j} — электрический ток, локализованный в объеме V ;

$$B = -\frac{ikR+1}{R^2}G, \quad G = \frac{\exp(-ikR)}{4\pi R}, \quad G \text{ — функция Грина};$$

$R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$ — расстояние между точкой наблюдения и точкой источника.

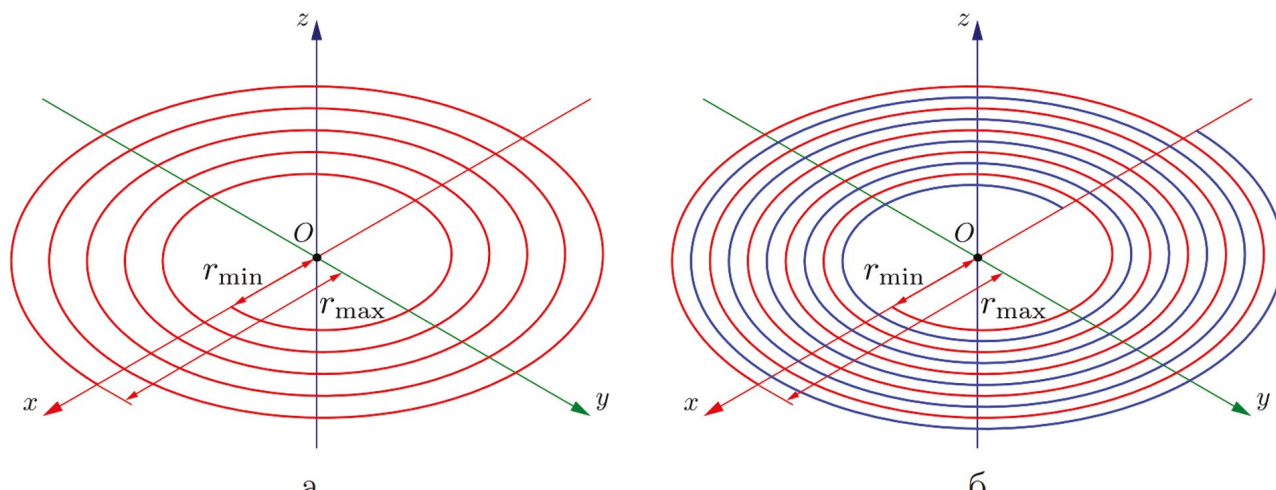


Рис. 1. Геометрия исследуемых структур: однозаходная (а) и двухзаходная (б)

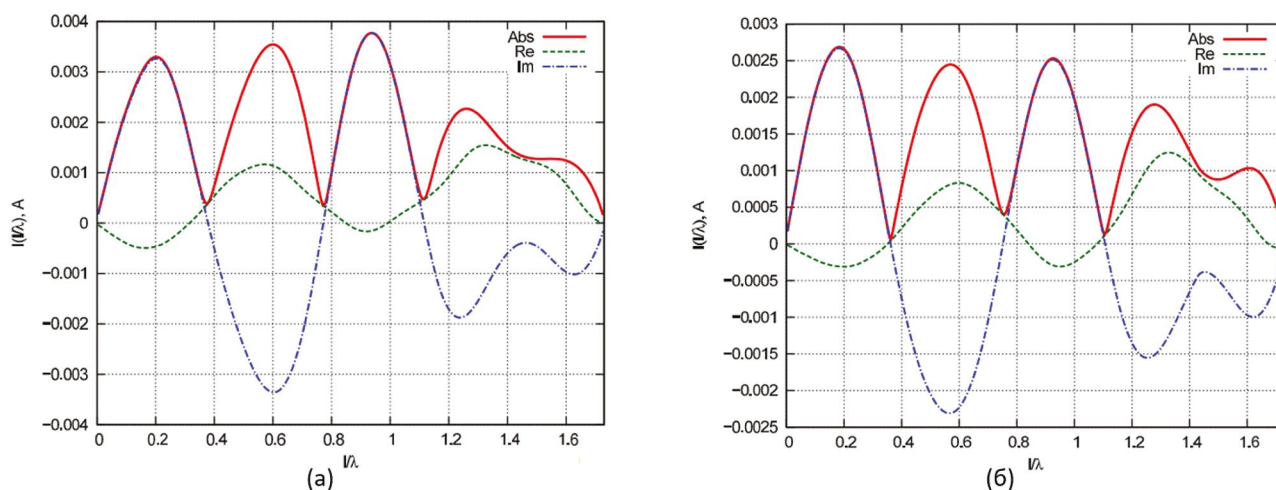


Рис. 2. Сравнение комплексных распределений тока на однозаходном (а) и двухзаходном (б) спиральных элементах

В приведенной формуле отсутствуют дифференциальные операторы, которые относятся к точке наблюдения. В работе [1] интегральное представление электромагнитного поля от тока $I(l')$, который локализован на образующей L тонкопроволочной структуре имеет вид:

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}) = \int_L I(l') \mathbf{K}_a^F(\mathbf{r}, \mathbf{r}(l')) dl', \quad F \equiv E, H.$$

В этом выражении $\mathbf{K}_a^E(\mathbf{r}, \mathbf{r}(l'))$ и $\mathbf{K}_a^H(\mathbf{r}, \mathbf{r}(l'))$ — это ядра интегрального представления. С учетом дискретизирования перепишем формулу следующим образом:

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}) = \sum_{k=1}^{Ns} I_k \mathbf{K}_a^{\Delta, F}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_k), \quad F \equiv E, H.$$

В данном выражении $\mathbf{K}_a^F(\mathbf{r}, \mathbf{r}(l'))$ — это элементарные ядра сегментов. Для упрощения запишем формулу в форме:

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}) = F_a^\Delta(\mathbf{r}; \mathbf{r}_k, I_k); \quad F \equiv E, H.$$

Выражение, которое основано на дискретизованных интегральных представлениях электромагнитного поля, позволяющее вычислять электромагнитное поле, которое создается N излучающими линейными элементами, спирали в итоге будет выглядеть так:

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{Ns_i} F_a^{\Delta_i}(\mathbf{r}; \mathbf{r}_{i,k_i}, I_{k_i}), \quad F \equiv E, H.$$

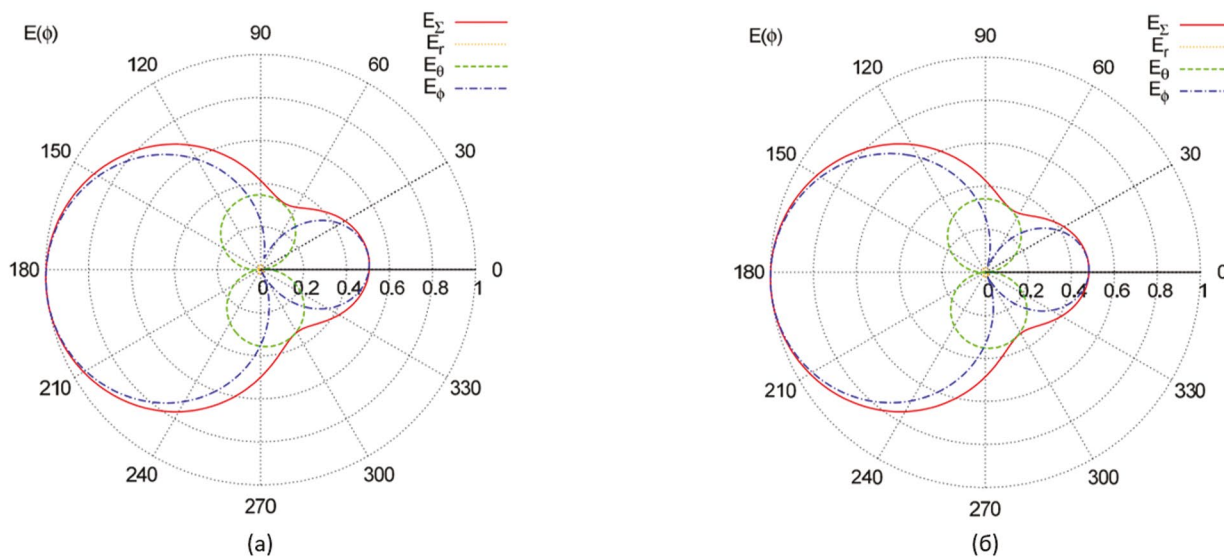


Рис. 3. Сравнение нормированных амплитудных диаграмм рассеяния в азимутальной плоскости на однозаходном (а) и двухзаходном (б) спиральных элементах

Чтобы использовать данное выражение для начала необходимо вычислить неизвестные амплитуды токов I_{k_j} . Через \mathbf{r}_{j,k_j}^* обозначим радиус-вектор, который проведен в центр k_j -го сегмента j -го элемента.

В итоге мы получаем систему линейных алгебраических выражений [3]:

$$-\hat{\mathbf{l}}(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{E}^{(in)}(\mathbf{r}) = \hat{\mathbf{l}}(\mathbf{r}) \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{Ns_j} F_a^{\Delta_i}(\mathbf{r}; \mathbf{r}_{k_i}, I_{k_i}); \quad (1)$$

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_{j,k_j}^*, \quad j = 1, \dots, N, \quad k_j = 1, \dots, N_{sj}.$$

Параметрическое уравнение для однозаходной спирали будет выглядеть следующим образом:

$$L: L_1 = \mathbf{r}_1(l, 0), \quad l \in [0, L]. \quad (2)$$

Для двухзаходной спирали запишем:

$$L: L_1 = \mathbf{r}_1(l, 0), \quad L_2 = \mathbf{r}_2(l, \pi), \quad l \in [0, L]. \quad (3)$$

Чтобы вычислить комплексное распределение токов на излучающих структурах используется система линейных алгебраических уравнений, которая является следствием подстановки (2) и (3) в формулу (1). После вычисления распределения токов можно проводить вычисление электрического, а затем и магнитного поля в любой точке пространства.

Результаты. Проводим вычисления распределений токов на рассматриваемых структурах. Результат при угле падения плоской электромагнитной волны $\theta_0 = 0$ представлен на рис. 2.

После вычисления распределений токов на спиральных элементах можно вычислять диаграмму рассеяния поля спиральными структурами (рис. 3).

Выводы. Рассмотрена задача рассеяния электромагнитных волн на однозаходной и двухзаходных спиральных частицах. Представлено распределение тока на рассматриваемых элементах, а также нормированные амплитудные диаграммы рассеяния в азимутальной плоскости.

Ключевые слова: спиральные элементы; дифракция плоских электромагнитных волн; распределение токов по структуре; диаграмма рассеяния.

Список литературы

1. Драбкин А.Л., Зуенко В.Л., Кислов А.Г. Антенно-фидерные устройства. 2-е изд, доп. и перераб. Москва: Советское радио, 1974. 536 с.
2. Капитонов В.А., Неганов В.А., Марсаков И.Ю., Табаков Д.П. Интегральное представление электромагнитного поля геометрически киральной структуры // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2012. Т. 15, № 4. С. 6–13.
3. Стрижков В.А. Математическое моделирование электродинамических процессов в сложных антенных системах // Математическое моделирование. 1989. Т. 1, № 8. С. 127–138.

Сведения об авторах:

Руслан Миндарович Валиуллин — магистрант, группа ИКТм-02, отдел магистратуры; Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, Россия. E-mail: koshki-tdr98@mail.ru@mail.ru

Дмитрий Петрович Табаков — научный руководитель, доктор физико-математических наук, профессор; профессор кафедры радиоэлектронных систем; Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, Россия. E-mail: illuminator84@yandex.ru