

Покровский Н.А., Седышев Э.Ю.
Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

Исследование планарной логарифмической спирали методом конформного преобразования

Работа посвящена исследованию планарных широкополосных логарифмических спиральных антенн методом конформного преобразования. Рассмотрены некоторые особенности работы логарифмической спиральной антенны при изменении положения точек питания. Доказано постоянство волнового сопротивления плоской логарифмической спиральной антенны при различных точках питания. Предложен новый способ питания плоских спиральных антенн.

Ключевые слова: спиральные антенны, планарные антенны, микрополосковые антенны, логарифмическая спиральная антенна, широкополосная антенна.

Возрастающий объем передаваемой информации телекоммуникационными системами с радиоканалами заставляет расширять рабочую полосу частот. Ключевым элементом широкополосных радиосистем является антенна. Самой широкополосной антенной на сегодняшний день является спиральная антенна.

Данный вид антенн имеет следующие отличительные особенности: широкая полоса частот, круговая (эллиптическая) поляризация, постоянство входного сопротивления, простота конструкции и небольшие габариты. Особое внимание стоит уделить планарным спиральным антеннам. В мобильных устройствах, при увеличении количества используемых диапазонов частот, увеличивается количество рабочих антенн, и усложняются условия электромагнитной совместимости, а одна спиральная антенна позволяет исключить все эти трудности.

Плоские логарифмические спиральные антенны, обладая широким диапазоном рабочих частот, позволяют заместить собой растущее количество используемых типов антенн для различных диапазонов, улучшая тем самым эргономичность мобильных устройств.

В современной литературе по спиральным планарным антеннам не затрагивается природа широкополосных свойств данных структур [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Были попытки в зарубежной литературе в 60-е годы рассмотреть подобные структуры, но не был получен конечный результат [8].

В работе [9] рассматривается переход от полосковой структуры к контурной модели с сохранением диапазонных характеристик.

При рассмотрении вышесказанного возникает логичный вопрос - как работает данная структура?

Исторически известно, что основные типы антенн, такие как диполь, V-антенна, биконусная антенна Щелкунова были получены преобразованием питающей линии передач, а именно двухпроводной линии (рис. 1). Трансформация заключена в создании нерегулярности двух типов: узкополосной резонансной и широкополосной нерезонансной. В самом простейшем случае (диполь) двухпроводная линия превращается в шлейф, так хорошо известный специалистам интегральной схемотехники, а в случае

антенны Щелкунова, вместо одночастотного шлейфа появляется нерегулярная линия переменного сечения.

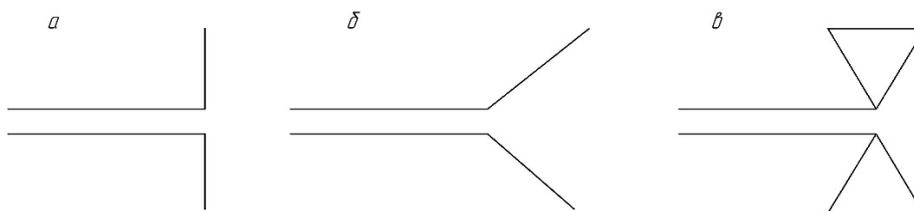


Рис. 1. а – диполь; б – V-антенна; в – биконусная антенна Щелкунова.

Все представленные виды антенн, за исключением диполя, имеют широкий рабочий диапазон частот. Также стоит отметить, что при переходе к V-антенне, стоит оперировать понятиями присущими антеннам бегущей волны. Спиральные антенны так же относятся к антеннам бегущей волны. Для получения спирали в продолжение логики рисунка 1 необходимо спроецировать биконус на плоскость и «завернуть» его по (против) часовой стрелки.

Рассмотрим планарную классическую спиральную антенну с точки зрения её точек питания, основным питанием логарифмической спирали является двухпроводная линия. Включение двухпроводной линии в структуру логарифмической спиральной антенны, в различных точках показано на рисунке 2.

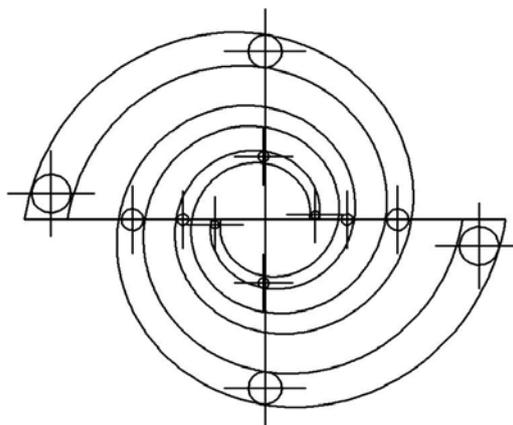


Рис. 2. Подключение двухпроводной линии в структуру логарифмической спирали

Если рассчитать волновое сопротивление в различных точках включения для соответствующей двухпроводной линии (с учетом изменяющегося диаметра проводников и расстояния между ними), то можно убедиться, что независимо от точки включения **волновое сопротивление питающей линии остается неизменным**. Возможность разных способов включения позволяет управлять диапазоном частот [11], при этом сохраняя согласованность структуры.

При исследовании логарифмической спирали возникает естественный вопрос, какая эквивалентная линия может соответствовать данному типу антенны. Введение понятия «спиральной линии» не позволяет определить её характеристики и свойства. Анализ линий передач сложной конфигурации возможен только с помощью математических преобразований: в частности, методом конформных преобразований.

Для упрощения расчета методом конформных преобразований, геометрию логарифмической спирали аппроксимируем дугами, описанными в прямоугольной системе

координат. Для этого возьмём геометрическую модель (рис. 3) логарифмической спиральной антенны, составленную по методике, представленной в [10,11], и аппроксимируем её контуры дугами.

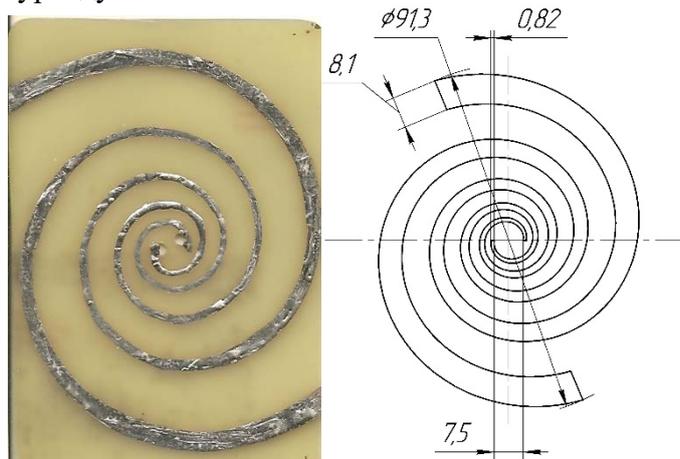


Рис. 3. Макет и эскиз логарифмической спирали

Модель, получаемая после аппроксимации, показана на рисунке 4.

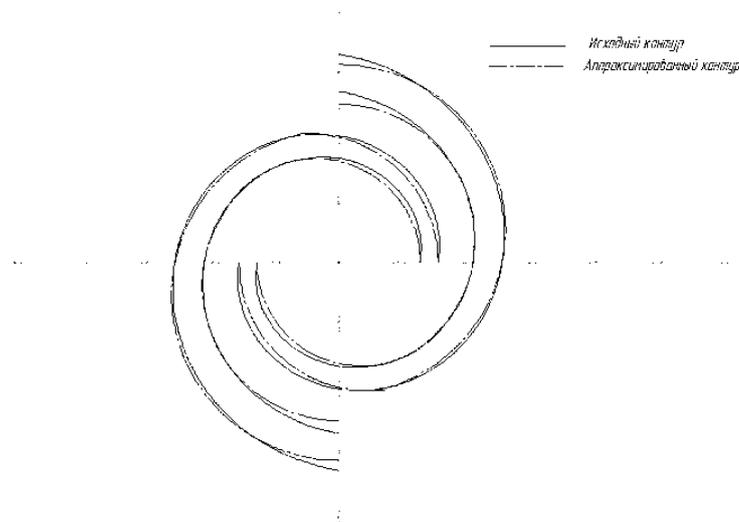


Рис. 4. Фрагмент аппроксимации спиральной структуры дугами

Как известно из литературы по теории функции комплексного переменного [12,13], для выполнения перехода от нелинейной структуры к линейной может быть использовано логарифмическое конформное преобразование, имеющее следующий вид:

$$w = Ln(z) = \ln(|z|) + i \operatorname{arctg}(z), \quad (1)$$

где $z = x + iy$ - комплексное число.

Структура, получаемая путем численного конформного преобразования, представлена на рисунке 5.

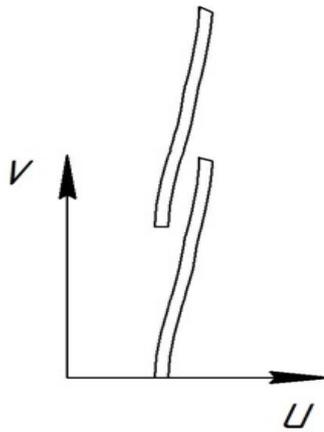


Рис. 5. Структура после численного конформного преобразования
(фрагмент для угла разворота спирали равного 2π)

Представленная на рисунке 5 структура имеет вид нерегулярной «ленточной» линии, с минимальным отклонением по ширине полоска и постоянным зазором между получившимися соседними полосками. При увеличении угла разворота спирали, длина перекрытия двух полосков в конформной плоскости увеличивается, образуя подобие щелевой линии. За счет преобразования структура обладает схожестью с развернутыми рукавами спирали одинаковой ширины.

В начальных точках питания логарифмической спирали происходит фазовая задержка, чему свидетельствует сдвиг одного полоска относительно другого. Взаимодействие между полосками происходит, начиная с угла поворота рукавов спирали на π рад, чему свидетельствует рисунок 5. Подобные геометрические особенности могут быть обнаружены при рассмотрении исходной структуры в точке питания.

Представленное расположение получившейся «ленточной» линии, говорит о том, что в такой структуре может распространяться волна ТЕМ, как в питающей линии. Оценочное волновое сопротивление представленной линии приблизительно равно 310 Ом.

Все вышесказанное позволяет предположить, что ключевым моментом в формировании характеристик плоской логарифмической спирали является её питание. Одним из способов питания плоской структуры может быть питание не через центр, а с внешней стороны спирали, как показано на рисунке 6.

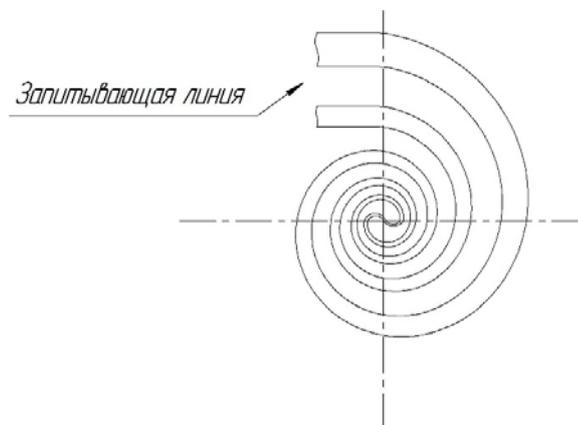


Рис. 6. Питание в плоскости спирали

Подводя итог исследования плоской логарифмической спиральной структуры был подтвержден факт постоянства волнового сопротивления антенны, несколькими аналитическими подходами. Рассмотрена возможность включения питающей линии к

спиральной логарифмической антенне в любом месте структуры без нарушения согласования.

Результаты исследования спиральных антенн методом конформного преобразования позволяют рассматривать данные структуры в новом ракурсе, а именно производить расчет антенны за счет пересчета параметров из конформного преобразования. В этом же ключе можно по-новому питать эти антенны.

Библиографический список

1. Юрцев О. А., Рунов А. В., Казарин А. Н. Спиральные антенны М.: Советское радио, 1974. — 224 с.
2. Balanis C. A. Antenna Theory: Analysis and Design Wiley, 2016. — 1096 p.
3. Volakis John L. Antenna Engineering Handbook McGraw-Hill, 2007. — 1755 p.
4. Fujimoto Kyohei, Morishita Hisashi. Modern Small Antennas Cambridge University Press, 2013. — 488 p.
5. Ротхаммель К. Антенны. 1998, — 635 с.
6. Michael McFadden, Waymond R. Scott Jr. Analysis of the Equiangular Spiral Antenna on a Dielectric Substrate // IEEE Transactions on antennas and propagation. 2007, vol. 55, no. 11. 3163-3171.
7. Dyson, John D. The equiangular spiral antenna, University of Illinois, 1957. — 322 p.
8. Сборник «Сверхширокополосные антенны»; под ред. Л С Бененсона М. Мир — 1964, 296-319 с.
9. Ахметов Р.Р., Седышев Э.Ю. Широкополосные контурные антенны для объемных интегральных схем СВЧ. Материалы международную научно-техническую и научно-методическую конференцию АПИНО. Санкт-Петербург, 2017.
10. Покровский Н. А., Седышев Э. Ю. Исследование планарной спирали в ОИС СВЧ. Материалы международную научно-техническую и научно-методическую конференцию АПИНО. Санкт-Петербург, 2017.
11. Покровский Н. А., Седышев Э. Ю. Инженерный метод расчета планарной спиральной антенны СВЧ. Электроника и микроэлектроника СВЧ. Санкт-Петербург, 2017.
12. Лаврик В.И. Справочник по конформным отображениям. Киев: Наукова думка, 1970. – 252 с.
13. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В.. Методы теории функций комплексного переменного. Наука, 1973 – 749с.