

УДК 621.396.6

ШИРОКОПОЛОСНОЕ СОГЛАСОВАНИЕ ЩЕЛЕВЫХ АНТЕНН С ПОМОЩЬЮ НЕОДНОРОДНЫХ ЛИНИЙ

¹Хаванова М.А., ¹Петров Р.В., ¹Татаренко А.С., ¹Бичурин М.И., ²Алексич С.Р.

¹ФГБОУ ВПО «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого»,
Великий Новгород, e-mail: Mirza.Bichurin@novsu.ru;

²Университет Ниша, Ниш, Сербия, e-mail: zlata.cvetkovic@elfak.ni.ac.rs

Проведен анализ задачи построения теории синтеза антенн с широкополосным излучением и согласования входных устройств радиосистем. В статье по известной записи уравнений плавной и ступенчатой неоднородных линий выводится единое интегральное уравнение для решения задачи синтеза щелевых антенн. Полученное уравнение позволяет исследовать одновременно плавную и ступенчатую линии, вывести общие закономерности для них и гораздо подробнее и полнее изучить проблему синтеза. Показано, что задачу синтеза ступенчатой неоднородной линии можно представить единой записью в виде интеграла Стильтьеса. А в случае, если функция ограниченной вариации будет представлена абсолютно-непрерывной функцией, интеграл Стильтьеса превращается в обычный Риманов интеграл. Решения таких задач важны для согласования криволинейных щелевых антенн, возбуждаемых полосковыми линиями в широкой полосе частот. Данную методику расчёта также предложено использовать при расчёте СВЧ-устройств с неоднородным или магнитоэлектрическим заполнением.

Ключевые слова: щелевая антенна, неоднородная линия передач, теория синтеза

SLOT ANTENNAS BROADBAND MATCHING BY MEANS OF NON-UNIFORM LINES

¹Khavanova M.A., ¹Petrov R.V., ¹Tatarenko A.S., ¹Bichurin M.I., ²Aleksich S.R.

¹Novgorod State University, Veliky Novgorod, e-mail: Mirza.Bichurin@novsu.ru;

²University of Niš, Niš, Serbia, e-mail: zlata.cvetkovic@elfak.ni.ac.rs

We have done an analysis of antennas synthesis with broadband radiation theory and matching of the radio system input devices. In this paper a common integral equation for the problem solution of slot antennas synthesis is deduced by a well-known recording of the equations for smooth and step non-uniform lines. The obtained equation allows to explore simultaneously both smooth line and step one, then to derive a common features of these lines and study the problem of synthesis in detail. It is shown that the problem of synthesis of the step non-uniform line can be represent as a single equation in the form of Stieltjes integral. But if the function of bounded variation will be presented as an absolutely continuous function, Stieltjes integral will transform into Riemann one. The solution of such tasks is important for the matching of curved slot antennas, excited by microstrip lines in a wide frequency band. This procedure also was suggested to use for calculation of the microwave devices with a non-uniform or magnetoelectric filling.

Keywords: slot antenna, nonuniform transmission line, theory of synthesis

Создание систем связи, работающих в различных диапазонах волн, потребовало в последние годы разработки широкополосных функциональных устройств, приемных и передающих антенн. Развитие широкополосных систем обусловлено повышением требований к помехозащищенности передачи информации и применением шумоподобных сигналов в технике связи и радиолокации. В связи с этим весьма актуальной является задача построения теории синтеза антенн с широкополосным излучением, согласованных с входными устройствами радиосистем. Такие задачи рассматривались лишь при работе антенны на заданной фиксированной частоте, а практически должны работать в диапазоне частот, чтобы передать необходимую информацию. Цель статьи заключается в нахождении по известной записи уравнений плавной и ступенчатой неоднородных линий единого интегрального уравнения для решения задачи синтеза щелевых антенн.

Задачи синтеза в широкополосном согласовании щелевых антенн с помощью неоднородных линий

Широкополосное согласование входного сопротивления щелевых антенн с фидером может быть выполнено с помощью плавных или ступенчатых неоднородных линий. Щелевые антенны, возбуждаемые системой симметричных полосковых линий для работы в широкополосном режиме должны аналогично возбуждаться такими же полосковыми неоднородными линиями [4].

При этом используется теория первого приближения, наиболее приемлемая для практики, т.к. коэффициент отражения в неоднородной линии Γ принимается достаточно малым ($\Gamma^2 \ll 1$), что обеспечивает существование в линии только волны T , а волны высших типов отсутствуют. Это обстоятельство было бы невыполнимо в случае использования точной теории неоднородных линий на основе уравнения Рикатти, которое (если бы удалось его найти)

не предполагает никаких ограничений на коэффициент отражения.

Далее предполагается, что неоднородная линия не имеет потерь, что достаточно хорошо согласуется с практикой в диапазонах СВЧ и КВЧ, а постоянная распространения $\gamma = \alpha + j\beta$ имеет только фазовую постоянную $j\beta$, не зависящую от координаты вдоль линии. Для практически осуществляемых неоднородных линий, окруженных однородным синтетическим диэлектриком, это допущение выполняется достаточно строго.

Для решения задачи синтеза в широкополосном согласовании щелевых антенн с помощью неоднородных линий требуется по заданному входному сопротивлению (или коэффициенту отражения $\Gamma_{\text{ш}}$) на одном из возбуждающих входов щелевой антенны отыскать необходимое волновое сопротивление полосковой линии. Для плавной неоднородной линии, как это было показано в [3], требуется решить следующее интегральное уравнение:

$$\Gamma_{\text{ш}}(\delta) = \int_{-A \leq \delta \leq A}^{\ell} N(t) e^{j\delta t} dt, \quad (1)$$

где $\Gamma_{\text{ш}}(\delta)$ – заданный коэффициент отражения на входе щелевой антенны, где δ – относительная расстройка в заданном диапазоне от $-A$ до A ; $N(t) = \frac{1}{2} \cdot \frac{d \ln \rho(t)}{dt}$ – функция внутренних отражений; t – координата вдоль линии, полная длина которой ℓ .

Функция $N(t)$ однозначно связана с волновым сопротивлением линии

$$\rho(t) = \rho(0) \cdot e^{2 \int_0^t N(t) dt}. \quad (2)$$

После решения задачи синтеза, т.е. нахождения функции $N(t)$, пользуясь выражением (2)? по известным формулам найдутся все геометрические размеры плавной неоднородной линии [1]. Таким образом, решается задача широкополосного построения щелевых антенн.

Заметим, что построенная в результате решения уравнения (1) неоднородная линия позволит получить при заданной длине ℓ в диапазоне частот коэффициент отражения $\Gamma = 0$ только для полосковой линии, имеющей волновое сопротивление $\rho(\ell)$. Поэтому, если требуется по каким-либо практическим соображениям иметь волновое сопротивление полосковой линии, отличное от $\rho(\ell)$, следует его согласовать в этом диапазоне с необходимым волновым сопротивлением. Но эта задача широкополосного согласования двух активных волновых со-

противлений достаточно широко разработана и здесь она не рассматривается.

Для решения задачи широкополосного согласования комплексного входного сопротивления щелевой антенны можно применить также ступенчатую полосковую неоднородную линию.

Аналогично можно рассмотреть задачу синтеза ступенчатой неоднородной линии. Тогда имеем следующее выражение для ее решения:

$$\Gamma_{\text{ш}}(\delta) = \sum_{k=1}^n \xi_k \cdot e^{j\delta t_k}, \quad (3)$$

где $\xi_k = \frac{\rho_{k+1} - \rho_k}{\rho_{k+1} + \rho_k}$ – коэффициент отражения k -й ступеньки, т.е. коэффициент отражения однородной линии с волновым сопротивлением ρ_{k+1} , нагруженной на активное сопротивление ρ_k .

Решение задачи синтеза ступенчатой неоднородной линии заключается в определении по заданному коэффициенту отражения на входе щелевой антенны $\Gamma_{\text{ш}}$ длины неоднородной линии $\ell = nk$, числа n , $k = 1, 2, 3, \dots, n$, и величины местных коэффициентов отражений в ступеньках ξ_k .

Такие записи уравнений плавной и ступенчатой неоднородных линий позволяют вывести единое интегральное уравнение для решения задачи синтеза.

Действительно, уравнения (1)–(3) могут быть представлены единой записью в виде интеграла Стильтеса [2]:

$$\Gamma_{\text{ш}}(\delta) = \int_0^{\ell} e^{j\delta t} d\Phi(t), \quad (4)$$

где $\Phi(t)$ – комплексно-значная функция ограниченной вариации, полная вариация которой принимает конечные значения

$$\text{var}_{0 \leq t \leq \ell} \Phi(t) < \infty.$$

Функция ограниченной вариации $\Phi(t)$ всегда может быть представлена в виде алгебраической суммы абсолютно непрерывной функции ограниченной вариации $\Phi_1(t)$ и чистой функцией скачков $\Phi_2(t)$ [3]:

$$\Phi(t) = \Phi_1(t) + \Phi_2(t), \quad (5)$$

причем одно из слагаемых может отсутствовать.

Здесь игнорируется возможность появления в сумме (5) третьего слагаемого – сингулярной функции $\Phi_3(t)$, т.к. совершенно ясно, что в нашем случае рассмотрения неоднородных линий сингулярная функция ограниченной вариации $\Phi_3(t)$ не имеет никакого физического смысла и, следовательно, должна отсутствовать.

В случае, если функция ограниченной вариации $\Phi(t)$ есть абсолютно-непрерывная функция, интеграл Стильтеса (4) превращается в обычный Риманов интеграл [2]:

$$\Gamma_{\text{ш}}(\delta) = \int_{-A \leq \delta \leq A}^{\ell} e^{j\delta t} \Phi_1'(t) dt. \quad (6)$$

Понимая производную абсолютно-непрерывной функции ограниченной вариации Φ_1' как функцию $N(t)$, получаем уравнение плавной неоднородной линии (1).

В случае, если функция ограниченной вариации $\Phi(t)$ есть чистая функция скачков $\Phi_2(t)$, то уравнение (4) вырождается в конечную сумму, характерную для ступенчатой неоднородной линии [2]:

$$\Gamma_{\text{ш}}(\delta) = \sum_{k=1}^{\ell} [\Phi_2(t_{k+1}) - \Phi_2(t_k)] e^{j\delta t_k}, \quad (7)$$

где $\Phi_2(t_{k+1}) - \Phi_2(t_k) = \xi_k$.

Следовательно, уравнение (4) является наиболее общей записью уравнения неоднородной линии для решения задачи синтеза. Оно позволяет исследовать одновременно плавную и ступенчатую линии, вывести общие закономерности для них и гораздо подробнее и полнее изучить проблему синтеза.

Кроме того, интегральное уравнение (4) дает возможность рассмотреть и более общий вариант неоднородной линии, представляющий собой гибридизацию плавной и ступенчатой линии.

В дальнейшем предполагается применить данную методику для расчёта устройств согласования и питания антенных трактов.

Заключение

В теории неоднородных линий большое практическое значение имеют задачи синтеза таких линий для широкополосного согласования. Особенно важны решения таких задач для согласования криволинейных щелевых антенн, возбуждаемых полосковыми линиями в широкой полосе частот. Такие антенны используются в задаче синтеза как заданная комплексная нагрузка, а сама задача синтеза заключается в отыскании переменного волнового сопротивления линии по заданному коэффициенту отражения нагрузки (антенны). Затем, зная функцию изменения волнового сопротивления, строится геометрия такой неоднородной линии. Щелевые антенны с системой возбуждения полосковыми линиями, особенно в при-

емном варианте, выполняются в микрополосковом исполнении, удобном для размещения на объекте любой формы (плоской, цилиндрической, сферической и др.). И поэтому теория синтеза в данном случае относится к задаче синтеза полосковых или микрополосковых неоднородных линий. Данную методику расчёта можно использовать при расчёте СВЧ устройств с неоднородным или магнитоэлектрическим заполнением [5].

Работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Список литературы

1. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. – М., «Гостехиздат», 1961. – 281 с.
2. Натансон И.П. Теория функций вещественной переменной. – М., ГИТЛ, 157. – 320 с.
3. Радциг Ю.Ю., Хаванова М.А. Синтез полосковых широкополосных щелевых антенн СВЧ и КВЧ // Вестник НовГУ. – Великий Новгород, 2010. – № 60. – С. 96–98.
4. Хаванова М.А. О свойствах функции возбуждения щелевых антенн. Деп. в ВИНТИ 25.06.99. – № 2041-B99-6с.
5. Electrodynamics analysis of strip line on magnetoelectric substrate / M.I. Bichurin, R.V. Petrov, V.M. Petrov, F.I. Bukashev, A.Yu. Smirnov // Proceedings of The Fourth Conference On Magnetoelectric International Phenomena In Crystals (MEIPIC-4), Ferroelectrics, 2002, Vol. 280, p. 203.

References

1. Lebedev I.V. Tekhnika i pribory SVC. M., «Gostehizdat», 1961, 281 p.
2. Natanson I.P. Teoria funktsii veschestvennoi peremennoi, M., GITL, 157, 320 p.
3. Radtsig Yu.Yu., Khavanova M.A. Sintez poloskovykh shirokopolosnykh schelevykh antenn SVC i KVC. «Vestnik NovGU», Veliky Novgorod, 2010. no. 60, pp. 96–98.
4. Khavanova M.A. O svoistvakh funktsii vzbuzhdeniya schelevykh antenn. Dep. v VINITI 25.06.99 no. 2041-B99-6 p.
5. Bichurin M.I., Petrov R.V., Petrov V.M., Bukashev F.I., Smirnov A.Yu. Electrodynamics analysis of strip line on magnetoelectric substrate // Proceedings of The Fourth Conference On Magnetoelectric International Phenomena In Crystals (MEIPIC-4), Ferroelectrics, 2002, Vol. 280, p. 203.

Рецензенты:

Захаров А.Ю., д.ф.-м.н., профессор, заведующий секцией кафедры общей и экспериментальной физики Института электронных и информационных систем НовГУ, г. Великий Новгород;

Корнышев Н.П., д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник НИИ ПТ «РАСТР», г. Великий Новгород.

Работа поступила в редакцию 12.12.2012.