

УДК 621.372.85

**ОБОБЩЕННЫЙ МЕТОД СИНТЕЗА И РАСЧЕТА СХЕМ
ПРОСТЕЙШИХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СОГЛАСУЮЩИХ ЦЕПЕЙ СВЧ**

© 2009 г.

Э.Л. Привер

Научно-производственное предприятие «Салют»

nti@salut.nnov.ru

Поступила в редакцию 16.03.2009

Предлагается обобщенный метод синтеза и расчета простейших (узкополосных) согласующих цепей СВЧ, выполняемых на элементах с распределенными электрическими параметрами, позволяющий получать ряд схемных решений с возможностью выбора наиболее подходящих для практической реализации и последующего параметрического синтеза. Цепи, построенные согласно данному методу, могут применяться как для согласования нагрузок (генераторов) с линиями передачи, так и для взаимного согласования генератора и нагрузки.

Ключевые слова: согласующие цепи СВЧ, синтез, Т-образный трансформатор импедансов, виртуальные отрезки линий передачи.

Введение

Согласующие цепи, выполняемые на элементах с распределенными параметрами, широко применяются в технике СВЧ. Определенный практический интерес представляет реализация простейших (узкополосных) цепей, поскольку они содержат минимальное число элементов и имеют приемлемые во многих случаях параметры.

Широко известны два типа таких цепей:

- а) шлейфные цепи согласования [1, с. 47–59; 2, с. 19–21, 141–176; 3, с. 149–155];
- б) цепи с трансформаторами импедансов [3, с. 149–155; 4, с. 141–144].

В шлейфных цепях согласование осуществляется за счет интерференции двух отраженных — от нагрузки и от шлейфа — волн. Координата точки подключения шлейфа к линии передачи и его проводимость определяются либо с помощью круговой диаграммы проводимостей [2, с. 19–21, 141–176], либо аналитически [5]. Такой метод достаточно прост и очевиден с физической точки зрения, однако он не позволяет получать множество вариантов реализации и тем самым не обеспечивает широкую возможность осуществления структурного и параметрического синтеза цепей. Цепи с трансформаторами импедансов содержат инвертирующий трансформатор сопротивлений и реактивный элемент, компенсирующий мнимую часть импеданса (z_n) или проводимости (y_n) нагрузки [2, с. 19–21, 141–176]. Указанный элемент может подключаться к нагрузке параллельно — в виде

шлейфа или последовательно. Техническая реализация шлейфов не вызывает затруднений во всем диапазоне СВЧ, а вот последовательный элемент, который должен представлять собой индуктивность или емкость [4, с. 141–144], легко реализуем лишь в длинноволновой части СВЧ-диапазона, что ограничивает применимость данного решения. Инвертирующий трансформатор сопротивлений может выполняться либо в виде четвертьволнового отрезка линии передачи, либо в виде шлейфного (Т- или П-образного) трансформатора, т.е. возможен многовариантный структурный и параметрический синтез цепей согласования. Эта схема в случае применения шлейфных трансформаторов имеет сходство со схемой шлейфного согласования, но при этом содержит в своем составе избыточные реактивные компенсирующие элементы.

Таким образом:

- схемы с инвертирующими трансформаторами более сложны по сравнению со схемами шлейфного согласования, а также имеют ограничения на реализацию при использовании последовательных компенсирующих элементов;
- отсутствует общий подход к синтезу, поскольку схема шлейфного согласования не является частным случаем схемы с инвертирующим трансформатором.

В данной работе предлагается обобщенный метод синтеза и расчета простейших согласующих цепей СВЧ, выполняемых на элементах с распределенными электрическими параметрами, позволяющий получать ряд схемотехниче-

ских вариантов с выбором наиболее подходящих для практической реализации.

Результаты и их обсуждение

Выберем в качестве базового элемента для синтеза инвертирующий Т-образный трансформатор импедансов и проанализируем его общую схему (рис. 1).

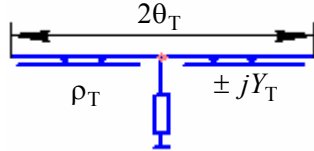


Рис. 1. Общая схема инвертирующего Т-трансформатора импедансов

Схема содержит отрезок линии передачи с волновым сопротивлением ρ_T и электрической длиной $2\theta_T$ (на центральной частоте полосы согласования f_0), к середине которого подключен шлейф с нормированной относительно ρ_T проводимостью $\pm jY_T$. Исходя из известных соотношений для инвертора [6]:

$$a_{11} = 0, z_T = \sqrt{\frac{a_{12}}{a_{21}}},$$

где z_T – характеристическое сопротивление инвертора, a_{11}, a_{12}, a_{21} – элементы его матрицы передачи, нетрудно вывести соотношения между параметрами Т-трансформатора:

– для емкостного шлейфа ($+jY_T$)

$$2\theta_T = \arctg \frac{2}{Y_T}; Z_T = \frac{z_T}{\rho_0} = \tg \theta_0; Y_T = 2\ctg 2\theta_T; \tag{1}$$

в данном случае $\theta_T < 45^\circ, Z_T < 1$.

– для индуктивного шлейфа ($-jY_T$)

$$2\theta_T = 180^\circ - \arctg \frac{2}{Y_T}; Z_T = \tg \theta_T > 1; 45^\circ < \theta_T < 90^\circ. \tag{2}$$

Далее решение поставленной задачи разобьем на три этапа.

Первый этап – согласование активных (диссипативных) нагрузок с линиями передачи.

Пусть импеданс нагрузки $z_n = r_n$, а волновое сопротивление линии передачи ρ_0 . Для согласования z_n с ρ_0 с помощью Т-трансформатора необходимо [3, с. 149–155]:

$$z_T = \sqrt{r_n \cdot \rho_0}$$

В частном случае $\rho_0 = \rho_0$ схема с Т-трансформатором становится идентичной схеме шлейфного согласования, и при этом для нор-

мированных величин импедансов $R_n = \frac{r_n}{\rho_0}$ и

$Z_T = \frac{z_T}{\rho_0}$ справедливы следующие соотношения:

$$\tg \theta_T = \sqrt{R_i}; Y_T = \frac{1}{\sqrt{R_i}} - \sqrt{R_i} = 2\ctg 2\theta_T,$$

эквивалентные соотношения для шлейфной цепи согласования, приведенным в [7]. Различие заключается лишь в том, что в состав Т-трансформатора, вследствие его симметрии, должен входить еще один отрезок линии с $\theta = \theta_T$, только этот отрезок в схеме шлейфного согласования «неразличим» (присутствует в неявном виде), поскольку является частью линии передачи. Однако в общем случае, когда $\rho_0 \neq \rho_0$, он «появляется».

Второй этап – согласование комплексной нагрузки ($z_n = r_n + jx_n$) с линией передачи.

Введем в схему с Т-трансформатором импедансов вместо элемента с сосредоточенными параметрами отрезок линии передачи, чтобы компенсация реактивной составляющей x_n производилась за счет его трансформирующих свойств (рис. 2). Пусть электрическая длина компенсирующего отрезка равна θ_1 , а его волновое сопротивление – ρ_1 . Пользуясь формулой для входного импеданса нагруженного отрезка линии [1, с. 47–59], можно найти выражение для действительной (R'_i) и мнимой (X'_i) частей его нормированного относительно ρ_1 импеданса Z_n

$$R'_i = \frac{R_i (1 + \tg^2 \theta_1)}{(1 - X_i \cdot \tg \theta_1)^2 + R_i^2 \tg^2 \theta_1}, \tag{3}$$

$$X'_i = \frac{X_i (R_i^2 + X_i^2 - 1) \cdot \tg \theta_1 - X_i \tg^2 \theta_1}{(1 - X_i \cdot \tg \theta_1)^2 + R_i^2 \cdot \tg^2 \theta_1}, \tag{4}$$

где $R_i = \frac{r_i}{\rho_1}, X_i = \frac{x_i}{\rho_1}$.

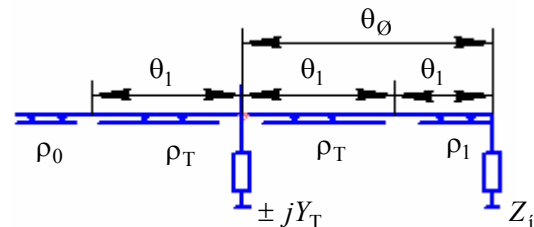


Рис. 2. Схема согласования комплексной нагрузки с линией передачи

Найдем величину θ_1 , при которой $X'_i = 0$ (условие компенсации):

$$\operatorname{tg}\theta_1 = \tilde{N} \pm \sqrt{\tilde{N}^2 + 1}, \quad (5)$$

$$\text{где } \tilde{N} = \frac{1 - |Z_i|^2}{2X_i}, \quad |Z_i|^2 = R_i^2 + X_i^2.$$

При подстановке (5) в (3) находим R'_i .

В частном случае $\rho_1 = \rho_T = \rho_0$, соответствующем схеме шлейфного согласования, можно осуществлять нормировку импедансов всех элементов схемы относительно ρ_0 , и тогда

$Z_T = \sqrt{R'_i}$. Величины θ_T и Y_T определяются по формулам (1), (2). Здесь также один из отрезков линии Т-трансформатора присутствует в неявном виде. Рассмотрим другой частный случай $\rho_1 = \rho_T \neq \rho_0$. Здесь нормировку импедансов нужно производить относительно ρ_1 , в том числе и нормировку волнового сопротивления

линии передачи $R_0 = \frac{\rho_0}{\rho_1}$, при этом

$$Z_0 = \sqrt{R_0 R'_i}. \quad (6)$$

Для вышеприведенных случаев вводится параметр $\theta_{\text{ш}} = \theta_1 + \theta_T$ – электрическая длина отрезка линии от нагрузки до шлейфа.

Чтобы реализовать максимально достижимую ширину полосы согласования (по заданному уровню коэффициента отражения), нужно минимизировать величину $\theta_{\text{ш}}$, а для этого необходимо выбирать соответствующие решения (5). Если в (5) $C < 0$, то знаку «+» соответствует положительное решение с минимальным значением $\theta_{\text{ш}}$, если же $C > 0$, то знаку «+» также соответствует положительное решение, но с большей величиной θ_1 . Поскольку нас интересует минимизация $\theta_{\text{ш}}$, то для ее осуществления предлагается использовать при $C > 0$ решение, соответствующее знаку «-»

$$\operatorname{tg}\theta_1 = C - \sqrt{\tilde{N}^2 + 1}, \quad (7)$$

при этом $-90^\circ < \theta_1 < 0$, т.е. в схему цепи согласования вводится виртуальный, физически не реализуемый, компенсирующий отрезок линии передачи с отрицательной электрической длиной $-\theta_1$, вычитаемой при расчете цепи из θ_T :

$$\theta_{\text{ш}} = \theta_T - \theta_1. \quad (8)$$

Аналогично, если задана величина нормированной проводимости нагрузки $Y_n = A_n + jB_n$, то

$$R'_i = \frac{\hat{A}_i (1 + \operatorname{tg}^2 \theta_1)}{\hat{A}_i^2 + (\hat{A}_i + \operatorname{tg} \theta_1)^2}, \quad (9)$$

$$\operatorname{tg}\theta_1 = D \pm \sqrt{\hat{A}^2 + 1}, \quad (10)$$

$$\text{где } D = \frac{1 - |Y_i|^2}{2\hat{A}_i}, \quad |Y_i|^2 = \hat{A}_i^2 + \hat{A}_i'^2.$$

Итак, приведенный метод дает ряд схемных решений, в частности при $\rho_1 = \rho_T = \rho_0$ – схему шлейфного согласования.

Третий этап – взаимное согласование генератора и нагрузки.

Пусть выходной импеданс генератора (источника сигнала) $z_r = r_r + jx_r$, а нагрузки – $z_n = r_n + jx_n$. Если генератор и нагрузка не находятся в непосредственной близости, то согласование обычно осуществляется за счет их подключения к соединительной линии передачи через согласующие цепи. Такое решение не всегда оптимально, т.к. число согласующих элементов может быть избыточным. Предлагается следующий подход – расширить область применения метода на данный случай в соответствии с рис. 3, т.е. включить Т-трансформатор (Т) между отрезками линий передачи с электрическими длинами θ_1 , θ_2 и волновыми сопротивлениями ρ_1 , ρ_2 , компенсирующими реактивные составляющие z_r и z_n . Величины θ_1 , θ_2 и параметры Т-трансформатора определяются по формулам (1)–(8). Если $\rho_1 = \rho_2 = \rho_T$, то нормировка импедансов производится относительно ρ_0 и

$$Z_T = \sqrt{R'_a \cdot R'_i}. \quad (11)$$

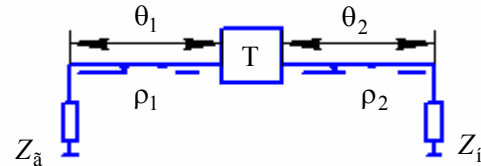


Рис. 3. Схема взаимного согласования нагрузки и генератора

Согласующая цепь здесь выполняет также роль соединительной линии между генератором и нагрузкой. Данный подход позволяет синтезировать схемы взаимного согласования z_r и z_n с минимальным числом элементов.

Приведем примеры синтеза и расчета схем цепей согласования.

Пример 1. Согласование нагрузки $z_n = (15 - j32)$ Ом (входной импеданс полевого транзистора СВЧ) с линией $\rho_0 = 50$ Ом.

Выбираем $\rho_1 = \rho_T = 71$ Ом, после нормировки – $Z_n = 0.211 - j0.454$, и, согласно вышеприведенным формулам, $\theta_1 = 24.8^\circ$, $\theta_T = 20.9^\circ$, $\theta_{\text{ш}} = 45.7^\circ$, $Y_T = j2.24$ (шлейф – емкостный). Эскиз полоскового проводника цепи приведен на рис. 4.

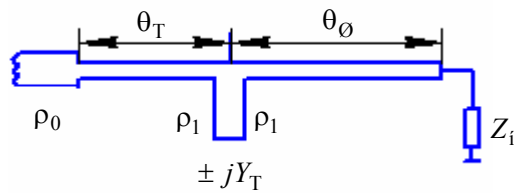


Рис. 4. Эскиз полоскового проводника синтезированной схемы согласования

Пример 2. Согласование генератора с $z_r = (150 - j50)$ Ом (выходной импеданс транзистора СВЧ) и нагрузки $z_n = (10 + j20)$ Ом (входной импеданс транзистора СВЧ).

Выбираем $\rho_1 = \rho_2 = \rho_0 = 50$ Ом, после нормировки $Z_r = 3 - j$, $Z_n = 0.2 + j0.4$. В этом случае $\theta_1 = -6.2^\circ$, $\theta_2 = -13.5^\circ$, θ_r (от генератора до шлейфа) = 31.4° ; θ_n (от шлейфа до нагрузки) = 21.4° ; $Y_T = j0.528$ (шлейф – емкостный).

Таким образом, сущность приведенного метода заключается в следующем:

1. Базовым элементом для синтеза согласующих цепей является инвертирующий Т-образный трансформатор сопротивлений, схема которого содержит два идентичных отрезка линии передачи и шлейф с индуктивной или емкостной проводимостью. Такой трансформатор не имеет ограничений на величину собственного характеристического импеданса.

2. В качестве элементов компенсации реактивной составляющей импеданса нагрузки (генератора) предлагается использовать отрезки линий передачи, за счет трансформирующих свойств которых компенсируется как индуктивная, так и емкостная составляющие импеданса. Отрезки могут быть как реальными, так и виртуальными, физически не реализуемыми – с отрицательной электрической длиной, которая в процессе синтеза схемы цепи вычитается из электрической длины отрезка линии, входящего в состав Т-трансформатора.

3. Взаимное согласование генератора и нагрузки осуществляется за счет включения Т-трансформатора между двумя отрезками линии, компенсирующими реактивные составляющие z_r и z_n .

Заключение

Приведенный метод позволяет осуществлять синтез и расчет простейших (узкополосных) согласующих цепей СВЧ, выполняемых на элементах с распределенными электрическими параметрами, предназначенных как для согласования нагрузок (генераторов) с линиями передачи, так и для взаимного согласования генератора и нагрузки. Показано, что известный метод шлейфного согласования является частным случаем данного метода.

Параметры элементов согласующих цепей, рассчитанные по приведенным формулам, могут являться первыми приближениями для последующего параметрического синтеза цепей.

Список литературы

1. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи с распределенными параметрами. М.: Высшая школа, 1980.
2. Фуско В. СВЧ-цепи. Анализ и автоматическое проектирование / Пер. с англ. А.А. Вольман, А.Д. Муравцова. Под ред. В.И. Вольмана. М.: Радио и связь, 1990.
3. Неганов В.А., Яровой Г.П. Теория и применение устройств СВЧ / Под ред. В.А. Неганова. М.: Радио и связь, 2006.
4. Маттей Г.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи: Пер. с англ. / Под ред. Л.В. Алексеева и Ф.В. Кушнира. Т. 2. М.: Связь, 1972.
5. Привер Э.Л. Об аналитическом решении задачи шлейфного согласования произвольной нагрузки с линией передачи // Труды научной конференции по радиофизике. ННГУ, 2005.
6. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р., Смирнов В.П. Справочник по элементам волноводной техники. М.: Сов.радио, 1967. 25 с.
7. Харкевич А.А. Теоретические основы радиосвязи. М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1957. 267 с.

GENERALIZED METHOD OF SYNTHESIS AND CALCULATION OF SIMPLEST DISTRIBUTED MATCHING MICROWAVE CIRCUITS

E.L. Priver

A method of synthesis and calculation of simplest (narrow-band) matching microwave circuits with distributed parameters has been proposed. Circuits realized according to this method can be used for matching generator loads with transmission lines and for generator-load mutual matching.

Keywords: distributed matching microwave circuits, T-transformer, virtual segments of transmission lines.