

УДК 621.372.54

Методика синтеза широкополосных согласующих устройств сверхвысоких частот на неоднородных шлейфах

**Куликов С.В.¹, Гудаев Р.А.^{1*}, Михалченков А.А.¹,
Зеленков А.В.², Викулова Ю.М.^{3**}**

¹*Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,
ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия*

²*Военная академия воздушно-космической обороны имени Г. К. Жукова
ул. Жигарева, 50, Тверь, 170000, Россия*

³*Группа компаний «РТИ»,
ул. 8-го Марта, 10, стр. 1, Москва, 127083, Россия*

**e-mail: mrgudaev@mail.ru*

***e-mail: yvikulova@oaorti.ru*

Аннотация

В статье на основе предложенного способа увеличения разрядки полос согласования, усовершенствована методика синтеза широкополосных согласующих устройств СВЧ для комплексных нагрузок, позволяющая обеспечить максимальную разрядку полос согласования за счёт применения неоднородных ступенчатых шлейфов.

Ключевые слова: согласующее устройство, шлейф.

Введение

Для решения задачи синтеза широкополосных согласующих устройств сверхвысоких частот (ШСУ СВЧ) с увеличенной разрядкой полос согласования предлагается использовать компенсационный метод подавления паразитных полос пропускания фильтров СВЧ, основанный на спектральном подходе к синтезу неоднородных линий.

Идея компенсационного метода подавления паразитных полос согласования представлена на рисунке 1, где изображено распределение резонансных ω_{pi} и противорезонансных ω_{ni} частот однородной и короткозамкнутой неоднородной линий, ω_0 – резонансная частота.

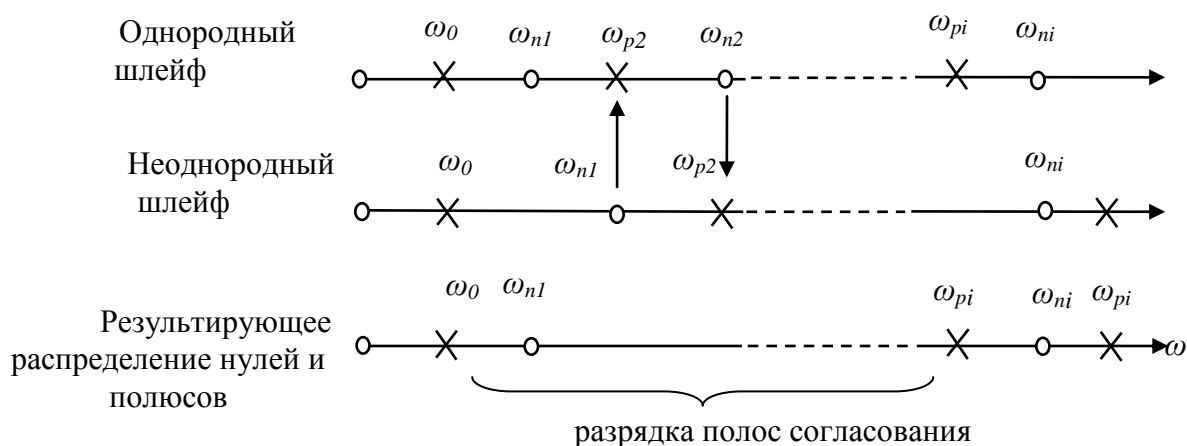


Рисунок 1 – Пояснение компенсационного метода.

Первый шлейф представляет собой резонатор на однородной линии, у которого распределение спектра имеет эквидистантный характер. Вторым шлейфом на неоднородной линии имеет одну степень свободы в выборе положения первого нуля ω_{n1} . Основным резонансом формируются первыми полюсами однородных и неоднородных линий ω_0 , а остальные взаимно компенсируются. Для улучшения избирательных свойств и уменьшения

перепада волновых сопротивлений неоднородных линий можно изменять положение нулей и полюсов на частотной оси, сдвигая их вправо или влево. Видно, что при таком распределении частот у согласующего устройства будут отсутствовать кратные полосы согласования.

Таким образом, если в качестве шлейфа подобрать неоднородную линию передачи с нужным спектром, то можно существенно увеличить разрядку паразитных полос согласования.

На основе предложенного способа увеличения разрядки полос согласования усовершенствована методика синтеза широкополосных согласующих устройств СВЧ на неоднородных шлейфах структурная схема, которой представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Структурная схема методики.

Новизна данной методики, выделена тёмным фоном на рисунке 2. В основу положен метод Кона, позволяющий рассчитать ШСУ для комплексных нагрузок на однородных шлейфах (этап 2). Универсальность заключается в том, что вместо данного метода может быть использован любой другой метод, позволяющий рассчитать согласующее устройство на однородных шлейфах.

Для увеличения разрядки полос согласования необходимо однородный шлейф заменить на неоднородную ступенчатую линию. Для этого требуется синтезировать неоднородную линию с необходимым количеством ступеней (этап 3). Количество ступеней определяется по формуле $n=(f_{\text{ПС}}/f_0-1)/2$, где $f_{\text{ПС}}/f_0$ – положение первой паразитной полосы согласования.

Для расчёта ступенчатой короткозамкнутой линии удобно воспользоваться процедурой Ричардса. Тогда входное сопротивление неоднородной линии можно представить в виде

$$Z_n^k(\lambda) = R \frac{\lambda \prod_{i=1}^{m1} (\lambda^2 + \delta_i^2)}{\prod_{i=1}^{m2} (\lambda^2 + \xi_i^2)}, \quad (1)$$

где, $\lambda = th \gamma l$, $\gamma l = th p t_3$ – частотная переменная Ричардса; $p = j\omega$ – комплексная частота; $t_3 = \pi/2\omega_{max}$ – время задержки волны отрезком линии, где ω_{max} – наибольшая частота рабочего диапазона; γ – постоянная распространения; l – длина отрезка линии без потерь; R – постоянный положительный коэффициент (нормирующий множитель); $\pm j\delta_i$, $\pm j\xi_i$ – нули и полюсы входного сопротивления в λ – плоскости, где δ_i и ξ_i определяются по формулам $\delta_i = tg(\omega_{ni}^0 t_3)$, $\xi_i = tg(\omega_{pi}^\infty t_3)$, $m1=m2=(n-1)/2$ определяет число сомножителей в

выражении (1), где n – число ступенек в линии, при $n = 3, 5, 7, \dots$, $m_1 = n/2$, $m_2 = m_1 - 1$ соответственно, при $n = 2, 4, 6$.

После того как получена неоднородная линия, обеспечивающая необходимую разрядку полос согласования, необходимо выполнить условие, при котором бы обеспечивалась эквивалентность замены неоднородной линии и однородного шлейфа на резонансной частоте ω_0 (этап 4). Для этого необходимо уравнивать параметры крутизны однородного и неоднородного шлейфов.

Для однородной четвертьволновой линии параметр крутизны b_i равен

$$b_i = \frac{\pi Y_i}{4}, \quad (2)$$

где Y_i – волновая проводимость i -ой линии.

Общее выражение для параметров крутизны короткозамкнутых b_k^{k3} неоднородных линий с произвольным числом ступенек имеет вид

$$b_n^{k3} = \frac{\Theta_0 (1 + \xi_1^2) \prod_{i=2}^m (\xi_i^2 - \xi_1^2)}{R \prod_{i=1}^m (\delta_i^2 - \xi_1^2)}, \quad \begin{matrix} n = 3, 5, \dots, m = \frac{n-1}{2} \\ n = 4, 6, \dots, m = \frac{n}{2} - 1. \end{matrix} \quad (3)$$

Из условия равенства параметров крутизны однородных и неоднородных линий следуют следующие равенства

$$b_i = b_n^{k3} = \frac{b_n}{R}, \quad R = \frac{b_n}{b_i}, \quad (4)$$

где b_n – параметр крутизны ступенчатой линии при $R=1$, а b_i определяется формулой (2) для соответствующего однородного резонатора.

Для исследования потенциальных характеристик ШСУ синтезированных по предложенной методике разработана математическая модель, в основе которой лежит метод последовательного пересчета входного сопротивления отрезков однородных и неоднородных линий.

Известно, что входное сопротивление отрезка однородной разомкнутой линии определяется по формуле

$$Z_{BX,XX} = W \frac{Z + jWtg\Theta}{W + jZtg\Theta}, \quad (5)$$

а короткозамкнутой линии по формуле

$$Z_{BX,KЗ} = jWtg\Theta, \quad (6)$$

где W и θ – волновое сопротивление и электрическая длина отрезка линии передачи соответственно, Z – сопротивление нагрузки.

Используя данную формулу, производится последовательный пересчет входного сопротивления от нагрузки к источнику сигнала. При этом выходное сопротивление очередного отрезка линии принимается за входное сопротивление предыдущего. Произведя данную операцию до конца, можно вычислить входное сопротивление всей линии.

В результате математического моделирования получены характеристики коэффициента стоячей волны (КСВ) напряжения в полосе согласования и характеристика затухания в полосе заграждения подтверждающие возможность увеличения разрядки полос согласования. Из рисунка видно, что в полосе согласования нет значительного превышения КСВ заданного при расчёте. В полосе заграждения осуществлёна разрядка полос согласования

1:5,1 по уровню затухания 20 дБ, что в 4,6 раза превышает разрядку полос согласования у согласующего устройства на однородных шлейфах.

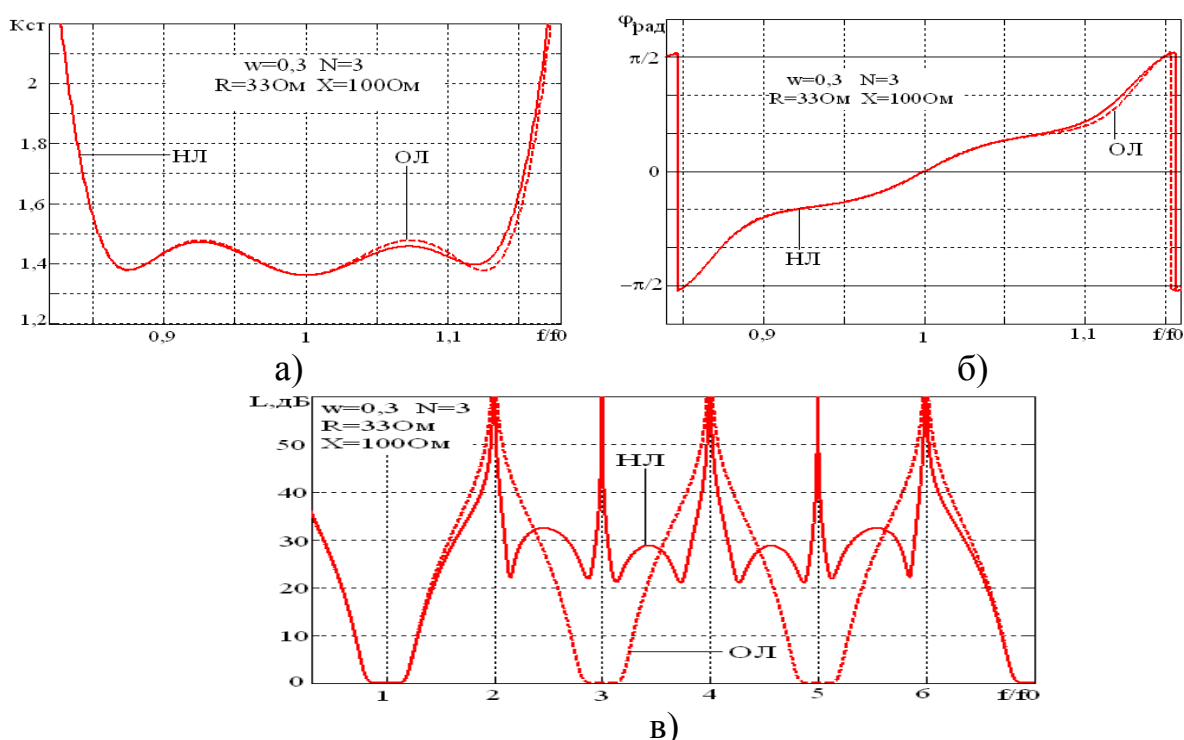


Рисунок 3 – Характеристики ШСУ на неоднородных шлейфах.

На основе полученных результатов исследования характеристик широкополосного согласующего устройства СВЧ на неоднородных шлейфах, проведённых на математической модели можно сделать следующие **выводы**:

1. Увеличение относительной ширины полосы согласования w приводит к снижению затухания в полосе заграждения.
2. Уменьшение КСВ в полосе согласования K_{CT} приводит к снижению затухания в полосе заграждения.
3. Увеличение количества шлейфов согласующего устройства способствует увеличению затухания в полосе заграждения. Причём увеличение числа шлейфов до нечётного количества позволяет увеличить затухание на

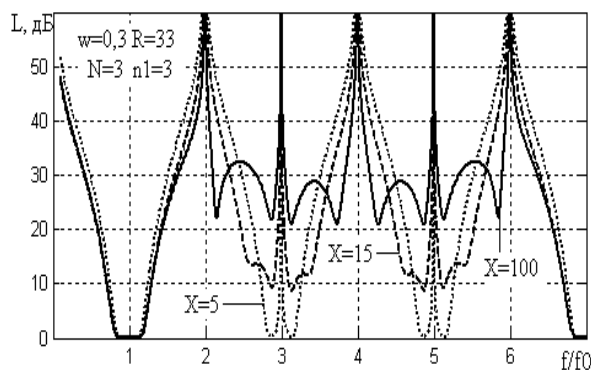
нечётных кратных полосах согласования, а до чётного количества - на чётных кратных полосах согласования.

4. При размещении неоднородного шлейфа рядом с источником сигнала затухание на нечётных кратных полосах согласования увеличивается, а на чётных - уменьшается. При этом КСВ на краю полосы согласования уменьшается. В случае, когда неоднородный шлейф включен рядом с нагрузкой, наблюдаются обратные зависимости.

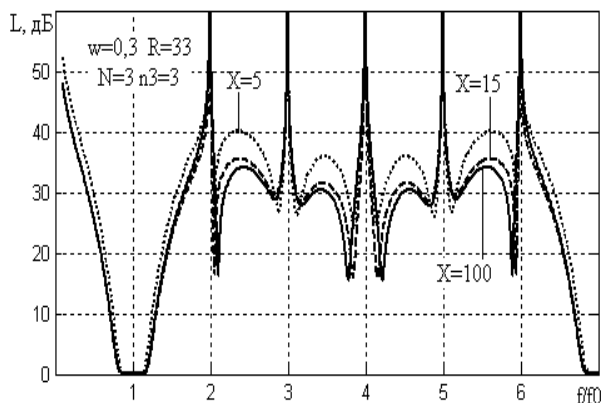
5. Увеличение относительной ширины полосы согласования w , уменьшение КСВ в полосе согласования, увеличение количества шлейфов ШСУ влияет на величину разрядки полос согласования, что выражается в её сокращении. В то же время изменение положения неоднородного шлейфа не влияет на разрядку полос согласования.

6. Применение пятиступенчатых шлейфов позволяет значительно улучшить характеристики в полосе заграждения, однако при этом ухудшаются характеристики в полосе согласования.

При исследовании характеристик согласующих устройств для комплексных нагрузок особый интерес представляет вопрос, как будет влиять комплексное сопротивление нагрузки на характеристики в полосе заграждения. Результаты математического моделирования при различных значениях реактивных (см. рисунок 4) и активных (см. рисунок 5) составляющих сопротивления нагрузки представлены на графиках.

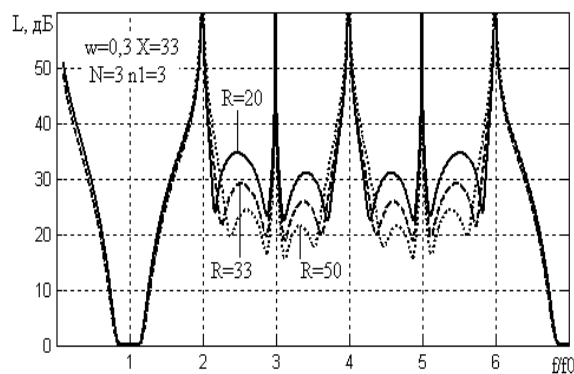


а)

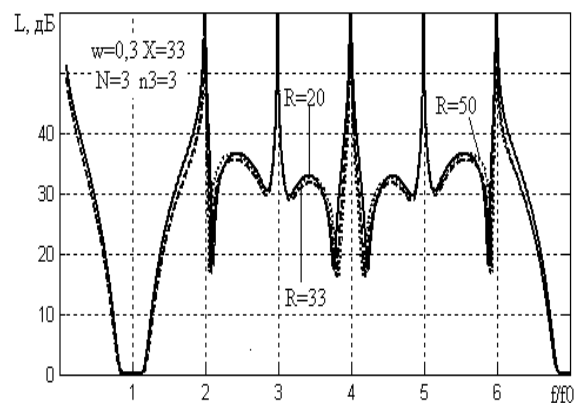


б)

Рисунок 4 – Характеристика затухания для изменения реактивного сопротивления нагрузки.



а)



б)

Рисунок 5 – Характеристика затухания для изменения активного сопротивления нагрузки.

Из полученных результатов следует, что наибольшее влияние реактивное сопротивление нагрузки оказывает, когда неоднородный шлейф включен рядом с нагрузкой. С увеличением реактивного сопротивления нагрузки до 100 Ом затухание увеличивается до 21 дБ. При включении неоднородной линии рядом с источником сигнала наблюдается та же зависимость, однако изменение величина затухания при этом намного меньше. Увеличение реактивной составляющей сопротивления нагрузки приводит к уменьшению разрядки паразитных полос согласования. Так по уровню 30 дБ, при $X=5$ Ом, разрядка полос согласования составляет 1:4,98, а при $X=100$ Ом разрядка полос согласования составляет 1:4,72.

В случае, когда неоднородный шлейф включен рядом с нагрузкой, с увеличением активного сопротивления нагрузки наблюдается уменьшение затухания на кратных гармониках с 22дБ до 12дБ. Если неоднородный шлейф включен рядом с источником сигнала, то при этом изменения затухания на кратных гармониках минимальные, порядка 2дБ. Что касается разрядки полос согласования, то увеличение активного сопротивления нагрузки приводит к её уменьшению.

Заключение

Результаты математического моделирования, синтезированных ШСУ на неоднородных шлейфах, подтвердили принципиальную возможность построения физически реализуемых согласующих устройств с увеличенной разрядкой паразитных полос согласования.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ

(№ НШ-6831.2016.8).

Библиографический список

1. Матей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. - М.: Связь, 1971. Т.1. – 439 с.
2. Филиппович Г.А. Широкополосное согласование сопротивлений. - Минск: Военная Академия РБ, 2004. - 175 с.
3. Литвиненко О.Н., Сошников В.И. Теория неоднородных линий и их применение в радиотехнике. - М: Советское Радио, 1964. – 535 с.

4. Литвиненко О.Н., Сошников В.И. Колебательные системы из отрезков неоднородных линий. - М: Советское радио, 1972. – 144 с.

5. Гусев В.Ю., Крапивенко А.В. Методика фильтрации периодических помех цифровых изображений // Труды МАИ. 2012. №50. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=28805>

6. Боде Г. Теория цепей и проектирование усилителей с обратной связью.- М.: Иностранная литература, 1948. – 641 с.

7. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / под ред. В.И. Вольмана. - М.: Радио и связь, 1982. – 328 с.