

Метод согласования антенны на двух значительно разнесенных частотах

В.А. Неганов¹, С.Б. Филиппов², Ю.Е. Ширманов², А.С. Мальцев²

¹ Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
443010, Российская Федерация, г. Самара
ул. Л. Толстого, 23

² ОАО «РКЦ «Прогресс»
443009, Российская Федерация, г. Самара
ул. Земеца, 18

В статье рассмотрен метод согласования антенны на двух значительно разнесенных частотах. Определены граничные условия использования данного метода и приведены примеры расчета длин согласующих трансформаторов и шлейфов холостого хода.

Ключевые слова: КСВ, фидерная линия, входное сопротивление, диаграмма Вольперта – Смита.

Введение

Максимальное значение мощности, поступающее в антенну, наблюдается в случае идеального согласования данной антенны с линией передачи, когда сопротивление антенны на конце линии передачи равно волновому сопротивлению данной линии. Это эквивалентно работе в режиме бегущей волны, т. е. при отсутствии отраженной волны. Согласование играет важную роль для обеспечения нормальной работы источников СВЧ-колебаний. [1]

Узкополосное согласование предусматривает достижение режима бегущей волны на одной расчетной частоте. Полоса частот, для которой КСВ не превышает допустимого значения, называется полосой частот согласования. В случае узкополосного согласования полосу частот не контролируют. [2]

На практике встречаются ситуации, когда требуется согласовать антенну на двух частотах, интервал между которыми значительно превышает полосу пропускания на заданном уровне КСВ. Для решения этой задачи согласования широко используются круговые диаграммы полных сопротивлений и проводимостей, которые позволяют заменить довольно трудоемкие методы расчета простыми графическими методами решения. В качестве согласующих элементов конструктивно используются элементы с распределенными параметрами – согласующие трансформаторы и шлейфы (короткозамкнутые

и разомкнутые линии передачи различной длины) [3].

Согласующие трансформаторы – это отрезки линий с определенным волновым сопротивлением (проводимостью) и длиной, включаемые последовательно с основной линией и образующие с ней единое целое. Шлейфы представляют собой отрезки линий передачи, с таким же волновым сопротивлением что и основная линия. Их подключают параллельно к основной линии в некотором (одном из возможных) ее сечении. [4]

Общий метод настройки антенны на двух разнесенных частотах

Рассмотрим методику настройки антенны на двух значительно разнесенных частотах в общем виде.

На рис. 1 даны точки «1» и «2» входных проводимостей антенны y_n и y_b в точке А кабеля l_{mp1} (рис. 2) на частотах f_n и f_b соответственно.

Согласование следует начинать с частоты, которая имеет более высокий КСВ. Допустим, что это частота f_b . Определим длину l_{mp1} (зная фазовый угол и волновое число K_b) и переместим точку «2» проводимости на окружность единичной проводимости в левой ее части (точка «3» на рис. 1). Этот же трансформатор переведет точку «1» проводимости y_n в точку «5». Затем следует скомпенсировать отрицательную реактивность y точки «3» посредством шлейфа $l_{шл1}$ (рис. 2), при этом точка «3» проводимости на частоте f_b переместится

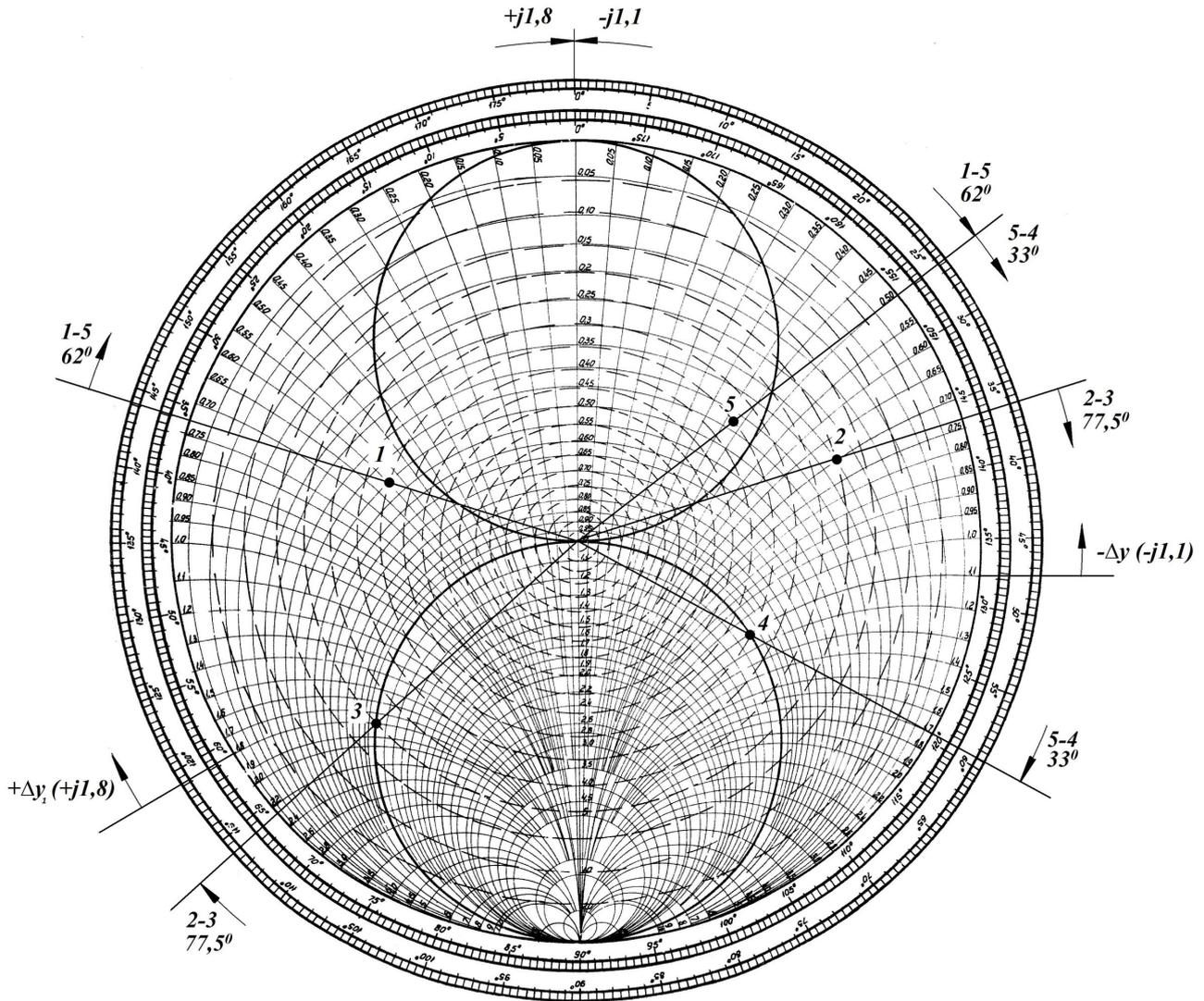


Рис. 1

в центр диаграммы. Однако этот шлейф переведет точку «5» y_n в область более высоких КСВ, поэтому необходимо принять меры, чтобы $l_{шл1}$ не влиял на входную проводимость точки «5». Для этого устанавливается $l_{шл2}$. Суммарная проводимость шлейфов $l_{шл2}$ и $l_{шл1}$ на частоте f_v должна быть $+\Delta y_1$, а на частоте f_n – равна нулю. В этом случае точка «3» переместится в центр диаграммы, а точка «5» останется на месте.

Определим длины шлейфов $l_{шл2}$ и $l_{шл1}$ (рис. 2), которые удовлетворяли бы поставленному условию – это шлейфы холостого хода (ХХ), реактивность которых меняется по закону тангенса в зависимости от длины

$$\begin{aligned} \varphi_{шл1} &= l_{шл1}K_v; \quad tg\varphi_{шл1} = tg(l_{шл1}K_v), \\ \varphi_{шл2} &= l_{шл2}K_v; \quad tg\varphi_{шл2} = tg(l_{шл2}K_v), \\ tg(l_{шл1}K_v) + tg(l_{шл2}K_v) &= \Delta y \end{aligned} \quad (1)$$

(алгебраическая сумма).

Следовательно, на частоте f_v сумма реактивностей этих шлейфов должна быть равна $+\Delta y$.

В то же время суммарная реактивность этих же шлейфов на частоте f_n должна быть равна нулю, чтобы шлейфы 1 и 2 не уводили входную проводимость на частоте f_n в область высоких КСВ. Это значит, что суммарная длина этих шлейфов должна быть равна $\lambda_{н\text{каб}} / 2$, то есть

$$l_{шл1} + l_{шл2} = \frac{180^\circ}{K_n}; \quad l_{шл2} = \frac{180^\circ}{K_n} - l_{шл1}. \quad (2)$$

Решая систему уравнений (1) и (2) получаем:

$$tg(l_{шл1}K_v) + tg\left(\frac{180^\circ}{K_n}K_v - l_{шл1}K_v\right) = \Delta y.$$

Обозначим углом

$$\alpha = \frac{180^\circ K_v}{K_n}, \quad \text{а углом } \beta = l_{шл1}K_v.$$

$$tg\beta + tg(\alpha - \beta) = \Delta y,$$

$$tg\beta + \frac{tg\alpha - tg\beta}{1 + tg\alpha tg\beta} = \Delta y,$$

$$tg\beta + tg^2\beta tg\alpha + tg\alpha - tg\beta - \Delta y - \Delta y tg\alpha tg\beta = 0.$$

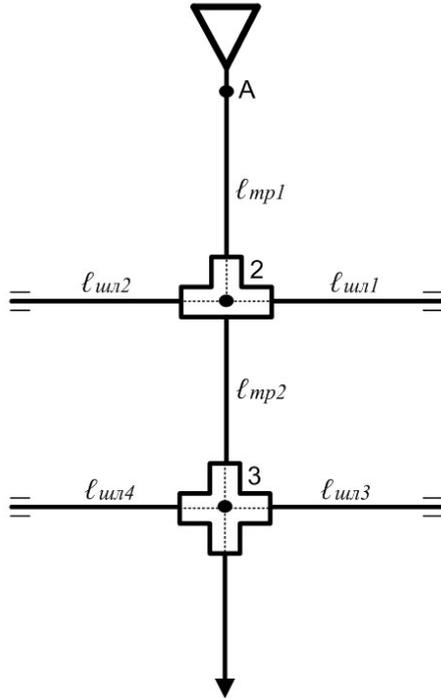


Рис. 2

Сократим $tg\beta$ и разделим выражение на tga :

$$tg^2\beta - \Delta y tg\beta + 1 - \frac{\Delta y}{tga} = 0.$$

Это квадратное уравнение.

$$tg\beta = \frac{\Delta y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\Delta y}{2}\right)^2 - 1 + \frac{\Delta y}{tga}} = \frac{\Delta y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\Delta y}{2}\right)^2 - 1 + \frac{\Delta y}{tg\left(\frac{180^\circ K_n}{K_g}\right)}} \quad (3)$$

$$\beta = \arctg\beta = l_{шл1}K_g,$$

$$l_{шл1} = \frac{\beta}{K_g}; \quad L_{шл2} = \frac{180^\circ}{K_n} - l_{шл1}.$$

Суммарная реактивность этих шлейфов на частоте f_g будет равна $+\Delta y$, а на частоте f_n равна нулю. Следовательно, точка «3» проводимости на частоте f_g переместится в центр, а точка «5» на частоте f_n останется на месте (рис. 1).

Для настройки антенны на частоте f_n определим длину трансформатора l_{mp2} (рис. 2). Этот трансформатор должен переместить точку проводимости «5» на частоте f_n на окружность единичной проводимости в правой ее части (точка «4» рис. 1). Затем следует скомпенсировать реактивность точки «4» посредством шлейфа $l_{шл3}$, имеющего отрицательную проводимость на частоте f_n . Однако этот же шлейф уведет уже настроенную точку проводимости на частоте f_g из центра диаграммы на ее периферию. Поэтому необходи-

мо принять меры, исключающие ухудшение согласования уже настроенной антенны на частоте f_g .

Для этой цели устанавливается шлейф $l_{шл4}$. Суммарная проводимость шлейфов $l_{шл3}$ и $l_{шл4}$ на частоте f_n должна быть $-\Delta y$, а на частоте f_g – равна нулю.

В этом случае на частоте f_n точка «4» переместится в центр диаграммы, а на частоте f_g останется в центре.

Для определения длин кабелей $l_{шл3}$ и $l_{шл4}$ воспользуемся формулой, которая выводится аналогично тому, как это делалось при определении длин $l_{шл1}$ и $l_{шл2}$

$$tg\beta = -\frac{\Delta y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\Delta y}{2}\right)^2 - 1 + \frac{\Delta y}{tg\left(\frac{180^\circ K_n}{K_g}\right)}},$$

Величина

$$tg\left(\frac{180^\circ K_n}{K_g}\right)$$

берется по модулю, т. к. знак учтен в процессе преобразования

$$\beta = \arctg\beta = l_{шл3}K_n$$

$$l_{шл3} = \frac{\arctg\beta}{K_n} = \frac{\beta}{K_n}$$

$$l_{шл4} = \frac{180^\circ}{K_g} - l_{шл3}.$$

Суммарная реактивность этих шлейфов на частоте f_n будет равна $-\Delta y$, а на частоте f_g – равна нулю. Таким образом, в точке «3» рис. 2 точка КСВ на частоте f_n переместится в центр, а на частоте f_g останется на месте. Значит, входные проводимости на частотах f_g и f_n находятся в центре диаграммы.

Рассмотрим методику настройки антенны на конкретном примере.

Исходные данные:

$$f_n = 200 \text{ МГц};$$

$$f_g = 250 \text{ МГц}.$$

Входная проводимость антенны в точке «А» (рис. 1):

$$y_n = 0,5 - j0,6 \text{ (точка «1» рис. 1);}$$

$$y_g = 0,3 + j0,7 \text{ (точка «2» рис. 1).}$$

Коэффициент укорочения в кабеле равен 1,4. Длина волны в кабеле:

$$\lambda_{нк} = 107 \text{ см};$$

$$\lambda_{гк} = 85,7 \text{ см}.$$

Волновое число:

$$K_n = \frac{360^\circ}{107 \text{ см}} = 3,36 \frac{^\circ}{\text{см}};$$

$$K_g = \frac{360^\circ}{85,7 \text{ см}} = 4,2 \frac{^\circ}{\text{см}}.$$

Настройку начинаем с частоты f_g , так как КСВ на этой частоте хуже, чем на частоте f_n , в противном случае несколько уменьшится КПД. Необходимо определить длину трансформатора l_{mp1} , которая переведет проводимость y_g (точка «2» рис. 1) на окружность единичной проводимости в левой ее части (точка «3» рис. 1). Длина l_{mp1} равна

$$l_{mp1} = \frac{77,5^\circ}{4,2 \frac{^\circ}{\text{см}}} = 18,45 \text{ см}.$$

Этот же трансформатор передвинет точку «1» на 62° в точку «5» ($3,36 \frac{^\circ}{\text{см}} \cdot 18,45 \text{ см} = 62^\circ$). Для определения длин шлейфов 1 и 2 (рис. 2) следует воспользоваться вышеприведенной формулой (3):

$$\text{tg}\beta = \frac{\Delta y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\Delta y}{2}\right)^2 - 1 + \frac{\Delta y}{\text{tg}\left(\frac{180^\circ K_g}{K_n}\right)}};$$

Для перевода точки «3» в центр диаграммы необходимо компенсировать реактивность $-j1,8$:

$$\begin{aligned} \text{tg}\beta &= 0,9 + \sqrt{0,81 - 1 + \frac{1,8}{\text{tg}\left(\frac{180^\circ \cdot 4,2}{3,36}\right)}} = \\ &= 0,9 + \sqrt{-0,19 + \frac{1,8}{\text{tg}225^\circ}} = 0,9 + \sqrt{-0,19 + \frac{1,8}{1}} = \\ &= 0,9 + \sqrt{1,61} = 0,9 + 1,269 = 2,168, \end{aligned}$$

$$\beta = 65,24^\circ = l_{шл1} K_g;$$

$$l_{шл1} = \frac{\beta}{K_g} = \frac{65,24^\circ}{4,2 \frac{^\circ}{\text{см}}} = 15,53 \text{ см}$$

– короткий шлейф.

$$\begin{aligned} l_{шл3} &= \frac{180^\circ}{K_n} - l_{шл1} = \frac{180^\circ}{3,36 \frac{^\circ}{\text{см}}} - 15,53 \text{ см} = \\ &= 53,57 \text{ см} - 15,53 \text{ см} = 38 \text{ см} \end{aligned}$$

– длинный шлейф.

Проверим расчет для частоты f_g :

$$\Phi_{шл2} = 38 \text{ см} \cdot 4,2 \frac{^\circ}{\text{см}} = 159,6^\circ,$$

$$y_{шл2} = \text{tg}159,6^\circ = -j0,372,$$

$$\Phi_{шл1} = 15,53 \text{ см} \cdot 4,2 \frac{^\circ}{\text{см}} = 65,2^\circ,$$

$$y_{шл1} = \text{tg}65,2^\circ = -j2,16.$$

Суммарная реактивность обоих шлейфов равна $2,16 - 0,372 = +j1,79$. Следовательно точка «3» проводимости на частоте f_g перемещается в центр диаграммы ($\text{КСВ} = 1,01$).

Проверим расчет для частоты f_n :

$$\Phi_{шл1} = 15,53 \text{ см} \cdot 3,36 \frac{^\circ}{\text{см}} = 52,18^\circ,$$

$$y_{шл1} = \text{tg}52,18^\circ = +j1,28,$$

$$\Phi_{шл2} = 38 \text{ см} \cdot 3,36 \frac{^\circ}{\text{см}} = 127,8^\circ,$$

$$y_{шл2} = \text{tg}127,8^\circ = -j1,28.$$

Следовательно, суммарная проводимость шлейфов 1 и 2 на частоте f_n равна нулю.

Теперь определим длину l_{mp2} (рис. 2), который переводит точку «5» в точку «4» (рис. 1).

Электрическая длина его 33° , а геометрическая

$$l_{mp2} = \frac{33^\circ}{K_n \frac{^\circ}{\text{см}}} = \frac{33^\circ}{3,36 \frac{^\circ}{\text{см}}} = 9,8 \text{ см}.$$

Для определения длин $l_{шл3}$ и $l_{шл4}$ воспользуемся формулой (4), которая выводится аналогично формуле (2):

$$\begin{aligned} \text{tg}\beta &= -\frac{\Delta y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\Delta y}{2}\right)^2 - 1 + \frac{(-\Delta y)}{\left(-\text{tg}\frac{180^\circ K_n}{K_g}\right)}} = \\ &= -\frac{\Delta y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\Delta y}{2}\right)^2 - 1 + \frac{\Delta y}{\text{tg}\frac{180^\circ K_n}{K_g}}}. \end{aligned}$$

Величина Δy должна быть $-j1,1$ т. к. точка «4» имеет реактивность $+j1,1$

$$\begin{aligned} \text{tg}\beta &= -0,55 + \sqrt{0,3 - 1 + \frac{1,1}{\text{tg}\left(\frac{180^\circ \cdot 3,36}{4,2}\right)}} = \\ &= -0,55 + \sqrt{-0,7 + \frac{1,1}{0,72}} = 0,36, \end{aligned}$$

$$\beta = 19,8^\circ,$$

$$l_{шл3} = \frac{\beta}{K_n} = \frac{19,8^\circ}{3,36 \frac{^\circ}{\text{см}}} = 5,9 \text{ см},$$

$$\begin{aligned} l_{шл4} &= \frac{180^\circ}{K_g \frac{^\circ}{\text{см}}} - l_{шл3} = \frac{180^\circ}{4,2 \frac{^\circ}{\text{см}}} - 5,9 \text{ см} = \\ &= 42,85 \text{ см} - 5,9 \text{ см} = 36,95 \text{ см}. \end{aligned}$$

Проверим расчет для частоты f_6 :

$$\varphi_{шл3} = 5,9 \text{ см} \cdot 4,2 \frac{\circ}{\text{см}} = 24,8^\circ,$$

$$y_{шл3} = tg24,8^\circ = j0,46,$$

$$\varphi_{шл4} = 36,95 \text{ см} \cdot 4,2 \frac{\circ}{\text{см}} = 155,2^\circ,$$

$$y_{шл4} = tg155,2^\circ = j0,46.$$

Суммарная реактивность $y_{шл3}$ и $y_{шл4}$ на частоте f_6 равна нулю.

Проверим расчет для частоты f_n :

$$\varphi_{шл3} = 5,9 \text{ см} \cdot 3,36 \frac{\circ}{\text{см}} = 19,8^\circ,$$

$$y_{шл3} = tg19,8^\circ = j0,36,$$

$$\varphi_{шл4} = 36,95 \text{ см} \cdot 3,36 \frac{\circ}{\text{см}} = 124^\circ,$$

$$y_{шл4} = tg124^\circ = -j1,47.$$

Суммарная реактивность $y_{шл3}$ и $y_{шл4}$ на частоте f_n составляет $j0,36 - j1,47 = -1,11$, т. е. точка «4» перемещается в центр диаграммы. Суммарная реактивность $-j1,08$, то есть точка «4» перемещается в центр.

Таким образом, антенна на обеих частотах f_n и f_6 настроена с высоким уровнем согласования.

Заключение

Используя графическое изображение диаграммы Вольперта – Смита и простые системы уравнений для расчета длин согласующих трансформаторов и шлейфов, решена задача согласования антенны на двух значительно разнесенных частотах.

Список литературы

1. Неганов В.А., Яровой Г.П. Теория и применение устройств СВЧ. М.: Радио и связь, 2006. С. 145.
2. Техника и полупроводниковая электроника СВЧ: учебное пособие / О.О. Дробахин [и др.]. Севастополь: Вебер, 2013. С. 59.
3. Ефимов И.Е. Радиочастотные линии передачи. М.: Связь, 1977. С. 77–82.
4. Смит Ф. Круговые диаграммы в радиоэлектронике. М.: Связь, 1976. С. 75–87.

Method of the coordination of the antenna on two it is considerable the spaced apart frequencies

V.A. Neganov, S.B. Filippov, U.E. Shirmanov, A.S. Maltsev

In article the method of the coordination of the antenna on two considerably spaced apart frequencies is considered. Edge conditions of usage of the given method are defined and examples of calculation of lengths of the matching transformer and idling loops are resulted.

Keywords: VSWR, a feeder line, input impedance, the chart of Volperta – Smita.
