

УДК 621.372.8.001.24

РАСШИРЕНИЕ РАБОЧЕЙ ПОЛОСЫ ЧАСТОТ H -ПЛОСКОСТНОГО МОДИФИЦИРОВАННОГО ДЕЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ

И. Г. Прохода, С. Г. Дмитрюк, В. И. Лозяной

Рассмотрен электродинамический расчет H -плоскостного модифицированного делителя мощности с учетом толщины общей стенки между волноводами. Приведены результаты расчетов на ЭВМ параметров делителя мощности в зависимости от длины области связи, толщины общей стенки и длины волны в свободном пространстве. Показана возможность использования волны H_{30} в области связи делителя мощности для расширения его рабочей полосы частот.

1. H -плоскостной модифицированный делитель мощности благодаря простоте конструкции, большой точности деления мощности и высокой электрической прочности находит широкое применение в различных устройствах СВЧ [1]. Однако авторам известна только одна работа [2], посвященная теоретическому анализу такого делителя. В ней делитель рассматривается в виде двух плоских неоднородностей, не взаимодействующих по высшим типам волн. Предполагается, что в области связи, представляющей собой участок волновода шириной $2(a+d)$ и длиной l , распространяется только основной тип волны, а высшие типы волн затухают достаточно быстро вблизи неоднородностей и их влиянием можно пренебречь. Ясно, что такая постановка задачи является неполной. Для преодоления указанных недостатков в настоящей работе рассматривается расчет модифицированного делителя мощности в полной электродинамической постановке задачи методом частичных пересекающихся областей с использованием аппарата функций Грина [3].

2. Для решения задачи дифракции электромагнитного поля в H -плоскостном модифицированном делителе мощности всю область определения поля разбиваем на четыре взаимно пересекающиеся области (рис. 1):

$$\text{I область: } \frac{a}{2} + d \leq x \leq \frac{3}{2}a + d, \quad -\infty < z \leq l;$$

$$\text{II область: } 0 \leq x \leq a, \quad 0 \leq z < \infty;$$

$$\text{III область: } a + 2d \leq x \leq 2(a + d), \quad 0 \leq z < \infty;$$

$$\text{IV область: } 0 \leq x \leq 2(a + d), \quad 0 \leq z \leq l.$$

В области I в точке $z = -\infty$ возбуждается основная волна H_{10} . Стенки делителя предполагаются идеально проводящими, входы волноводов полностью согласованными, среда однородной и изотропной. Зависимость от времени задается множителем $\exp(j\omega t)$.

Рассматриваемая волноводная система однородна относительно оси Oy , поэтому электромагнитное поле в ней будет полностью определяться E_y -компонентой этого поля [4], которая удовлетворяет двумерному уравнению Гельмгольца и граничному условию Дирихле. Для определения y -компоненты электрического поля $E_i(x, z)$ ($i=I, II, III, IV$) в отдельных областях делителя на основании второй теоремы Гри-

на и непрерывности E_i на границах областей можно записать следующую систему уравнений:

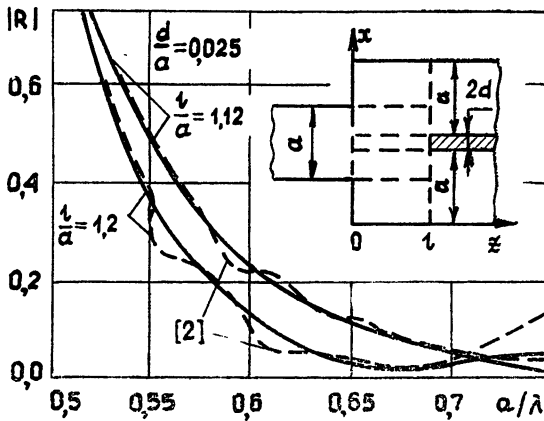


Рис. 1.

$$E_I(x, z) = E_{\text{стоп}}(x, z) + \int_0^l \left[E_{IV}(x', z') \frac{\partial G_I(x, z; x', z')}{\partial x'} \right]_{x'=a/2+d} dz' -$$

$$- \int_{a/2+d}^a \left[E_{II}(x', z') \frac{\partial G_I(x, z; x', z')}{\partial z'} \right]_{z'=l} dx' - \quad (1)$$

$$- \int_{a+2d}^{3/2a+d} \left[E_{III}(x', z') \frac{\partial G_I(x, z; x', z')}{\partial z'} \right]_{z'=l} dx' -$$

$$- \int_0^l \left[E_{IV}(x', z') \frac{\partial G_I(x, z; x', z')}{\partial x'} \right]_{x'=3/2a+d} dz';$$

$$E_{II}(x, z) = \int_{a/2+d}^a \left[E_I(x', z') \frac{\partial G_{II}(x, z; x', z')}{\partial z'} \right]_{z'=0} dx' - \quad (2)$$

$$- \int_0^l \left[E_{IV}(x', z') \frac{\partial G_{II}(x, z; x', z')}{\partial x'} \right]_{x'=a} dz';$$

$$E_{III}(x, z) = \int_{a+2d}^{3/2a+d} \left[E_I(x', z') \frac{\partial G_{III}(x, z; x', z')}{\partial z'} \right]_{z'=0} dx' + \quad (3)$$

$$+ \int_0^l \left[E_{IV}(x', z') \frac{\partial G_{III}(x, z; x', z')}{\partial x'} \right]_{x'=a+2d} dz';$$

$$E_{IV}(x', z') = \int_{a/2+d}^{3/2a+d} \left[E_I(x'', z'') \frac{\partial G_{IV}(x', z'; x'', z'')}{\partial z''} \right]_{z''=0} dx'' -$$

$$\begin{aligned}
 & - \int_0^a \left[E_{II}(x'', z'') \frac{\partial G_{IV}(x', z'; x'', z'')}{\partial z''} \right]_{z''=l} dx'' - \\
 & - \int_{a+2d}^{2(a+d)} \left[E_{III}(x'', z'') \frac{\partial G_{IV}(x', z'; x'', z'')}{\partial z''} \right]_{z''=l} dx''.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Функции Грина отдельных областей делителя мощности имеют вид

$$G_i(x, z; x', z') = \sum_{m=1}^{\infty} \varphi_m^{(i)}(x) \varphi_m^{(i)}(x') f_m^{(i)}(z, z') \quad (i = I, II, III, IV).$$

В качестве $\varphi_m^{(i)}(x)$ и $\varphi_m^{(i)}(x')$ выбираются ортонормированные системы поперечных собственных функций соответствующих волноводов:

$$\begin{aligned}
 \varphi_m^{(I)}(x) &= \left(\frac{2}{a} \right)^{1/2} \sin \frac{m\pi}{a} \left(x - \frac{a}{2} - d \right), \\
 \varphi_m^{(II)}(x) &= \left(\frac{2}{a} \right)^{1/2} \sin \frac{m\pi}{a} x, \\
 \varphi_m^{(III)}(x) &= \left(\frac{2}{a} \right)^{1/2} \sin \frac{m\pi}{a} (x - a - 2d), \\
 \varphi_m^{(IV)}(x) &= \left(\frac{1}{a+d} \right)^{1/2} \sin \frac{m\pi}{2(a+d)} x.
 \end{aligned}$$

Функции $f_m^{(i)}(z, z')$ для отдельных областей делителя равны:

$$\begin{aligned}
 f_m^{(I)}(z, z') &= \frac{1}{\gamma_m} \begin{cases} e^{\gamma_m(z-l)} \operatorname{sh} \gamma_m(l-z'), & z < z' \\ e^{\gamma_m(z'-l)} \operatorname{sh} \gamma_m(l-z), & z > z' \end{cases}; \\
 f_m^{(II)}(z, z') = f_m^{(III)}(z, z') &= \frac{1}{\gamma_m} \begin{cases} e^{-\gamma_m z'} \operatorname{sh} \gamma_m z, & z < z' \\ e^{-\gamma_m z} \operatorname{sh} \gamma_m z', & z > z' \end{cases}; \\
 f_m^{(IV)}(z, z') &= \frac{1}{\Gamma_m \operatorname{sh} \Gamma_m l} \begin{cases} \operatorname{sh} \Gamma_m(l-z') \operatorname{sh} \Gamma_m z, & z < z' \\ \operatorname{sh} \Gamma_m(l-z) \operatorname{sh} \Gamma_m z', & z > z' \end{cases}; \\
 \gamma_m^2 &= \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 - k^2, \quad k^2 = \omega^2 \epsilon \mu; \\
 \Gamma_m^2 &= \left[\frac{m\pi}{2(a+d)} \right]^2 - k^2 \quad (m = 1, 2, 3, \dots).
 \end{aligned}$$

Полученная система интегральных уравнений Фредгольма второго рода (1)–(4) позволяет по заданному внешнему полю $E_{\text{стор}}(x, z)$ и найденным функциям Грина определить поля в отдельных областях делителя мощности. Если в уравнениях (1)–(3) исключить с помощью (4) поле E_{IV} в области связи, то получится система интегральных уравнений, связывающая поля E_I , E_{II} и E_{III} в I, II и III областях. Согласно методике решения подобных уравнений (см., например, [5]) решение системы ищется в виде разложения в ряд по собственным функциям $\varphi_m^{(i)}(x)$ ($i = I, II, III$), а именно:

$$E_I(x, z) = E_{\text{стор}}(x, z) + \sum_{s=1}^{\infty} A_s \varphi_s^{(I)}(x) e^{\gamma_s(z-l)}, \tag{5}$$

$$E_{II}(x, z) = \sum_{s=1}^{\infty} B_s \varphi_s^{(II)}(x) e^{-\gamma_s z}, \quad E_{III}(x, z) = \sum_{s=1}^{\infty} C_s \varphi_s^{(III)}(x) e^{-\gamma_s z},$$

где A_s, B_s, C_s — искомые элементы многоволновой матрицы рассеяния. После подстановки (5) в систему указанных интегральных уравнений для полей E_I, E_{II} и E_{III} можно получить бесконечную систему линейных алгебраических уравнений для определения A_s, B_s и C_s .

3. Решение системы линейных алгебраических уравнений получено на ЭВМ М-222 методом редукции. В результате анализа зависимости решения задачи от количества учтенных типов колебаний в области связи учитывалось пятнадцать типов колебаний, а в малых волноводах — по четыре типа колебаний. Увеличение количества учитываемых типов колебаний не вызывало изменения трех знаков после запятой в решении системы уравнений. Был произведен расчет всех параметров делителя мощности в зависимости от длины области связи l/a , толщины стенки d/a и длины волны в свободном пространстве a/λ .

Сравнение данных, полученных в настоящей работе, с известными экспериментальными результатами [2] показано на рис. 1.

Учет толщины общей стенки между волноводами оказывает влияние на параметры делителя мощности. Увеличение толщины стенки влечет за собой ухудшение КСВ и сужение рабочей полосы (см. рис. 2, 3). Однако при определенном выборе параметров l/a и d/a наблюдается уменьшение КСВ и расширение рабочей полосы частот.

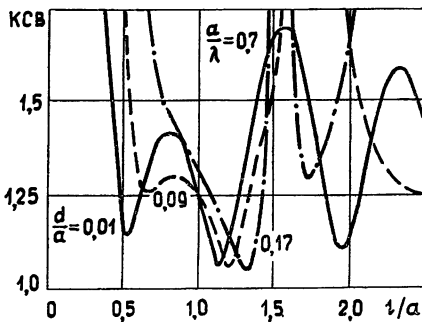


Рис. 2.

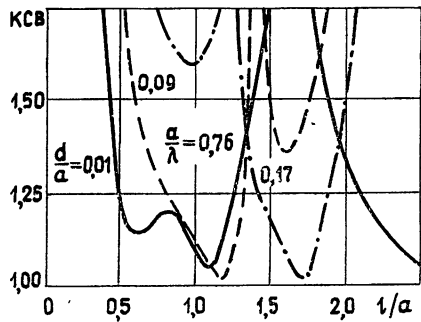


Рис. 3.

4. На основе анализа численного решения задачи дифракции электромагнитного поля рассматривается влияние размеров области связи на параметры делителя мощности в случае, когда в области связи существует распространяющаяся волна H_{30} . Как и в работе [6], волна H_{30} может быть использована для расширения рабочей полосы частот H -плоскостного модифицированного делителя мощности.

На рис. 3, 4 приведены теоретические зависимости КСВ делителя мощности от относительных длины области связи, толщины общей стенки и частоты. Как видно из рис. 3, в случае, когда в области связи существует распространяющаяся волна H_{30} (зависимости построены при $a/\lambda = 0,75$), график КСВ имеет ряд минимумов, положение которых изменяется при изменении толщины общей стенки.

При исследовании поведения КСВ в полосе частот (рис. 4) видно, что при длинах области связи от 1,1 до 1,2 ширины волновода полоса частот, в которой наблюдается хорошее КСВ для данной толщины общей стенки, расширяется. При этом в высокочастотной части рабочего диапазона ($0,743 < a/\lambda < 0,790$) в области связи существует распространяющаяся волна H_{30} , которая в данном случае является рабочей. При других значениях толщины общей стенки характер расширения рабочей полосы частот делителя аналогичен приведенному. Однако при

значительном увеличении толщины общей стенки КСВ делителя ухудшается, поэтому толщина общей стенки $2d$ не должна превышать 0,18—0,20 ширины волновода.

В работе [6] подробно рассмотрено использование волны H_{30} в области связи H -плоскостного щелевого направленного ответвителя. Физические процессы в области связи делителя мощности ничем не отличаются от описанных в работе [6] и поэтому здесь не рассматриваются.

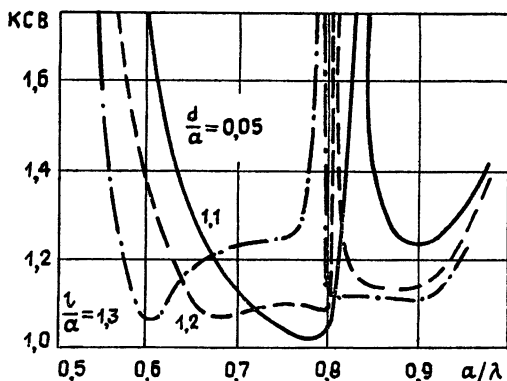


Рис. 4.

5. Таким образом, использование волны H_{30} в области связи делителя мощности, а также выбор оптимальной толщины общей стенки и длины области связи позволяют расширить рабочую полосу частот до 20—22% при КСВ не более 1,1 или до 25—28% при КСВ не более 1,2 без использования согласующих элементов.

В заключение следует отметить, что использование волны H_{30} в области связи возможно и для создания делителей, работающих в высокочастотной области рабочего диапазона волновода.

Результаты работы будут полезны при определении оптимальных размеров разрабатываемых H -плоскостных модифицированных делителей мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Микаэлян А. Л. Теория и применение ферритов на сверхвысоких частотах. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1963.
2. Анциферов В. А., Турин А. С., Ширяева Г. С. — Труды НИИ Радио, 1972, № 2, с. 27.
3. Прохода И. Г., Чумаченко В. П. — Изв. вузов — Радиофизика, 1973, 16, № 10, с. 1578.
4. Швингер Ю. — Зарубежная радиоэлектроника, 1970, № 3, с. 6.
5. Морс Ф. М., Фешбах Г. Методы теоретической физики — М.: ИЛ, 1958. — Т. 1; 1960. — Т. 2.
6. Прохода И. Г., Лозьяной В. И. — Изв. вузов — Радиофизика, 1978, 21, № 1, с. 100.

Днепропетровский государственный университет

Поступила в редакцию 10 апреля 1980 г.

THE OPERATION FREQUENCY BAND EXTENSION OF AN H -PLANE MODIFIED POWER DIVIDER'

I. G. Prokhoda, S. G. Dmitryuk, V. I. Lozyanoj

An electrodynamic calculation of an H -plane modified power divider with taking into account the thickness of a common wall between waveguides is considered. The results of computer calculation of modified power divider parameters as a function of the coupling region length, thickness of the common wall and the wavelength in a waveguide are presented. The possibility of using H_{30} -wave for extending the operation frequency band is shown.