

УДК 621.372.812

И.Л. Афонин<sup>1</sup>, П.А. Бугаёв<sup>1</sup>, А.И. Харланов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Севастопольский национальный технический университет, Севастополь

<sup>2</sup> Академии военно-морских сил имени П.С. Нахимова, Севастополь

## КОМБИНИРОВАННЫЙ ВОЛНОВОДНЫЙ НАПРАВЛЕННЫЙ ОТВЕТВИТЕЛЬ НА ОСНОВЕ ПЛОСКОГО МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА

В работе приведены результаты исследования комбинированного направленного ответвителя, каналы которого выполнены на разных типах волноводов: полом металлическом и плоском металлодиэлектрическом, разработанным авторами статьи для применения в сантиметровом диапазоне длин волн.

**Ключевые слова:** волновод, направленный ответвитель, плоский металлодиэлектрический волновод, комбинированный направленный ответвитель.

### Введение

Достаточно большое количество радиотехнического оборудования, которое используется ВС Украины, включает направленные ответвители, которые являются основными элементами антенно-волноводных трактов. Известные волноводные направленные ответвители (НО) имеют первичные и вторичные каналы, выполненные на основе одинаковых волноводов, в которых длины волн равны между собой [1].

В настоящее время разработан новый тип конструктивно простой и экономичной линии передачи микроволнового диапазона – плоский металлодиэлектрический волновод (ПМДВ) [2, 3], который является альтернативным стандартному полному металлическому волноводу (ПМВ). Разработка элементной базы на основе предложенного типа волновода требует создания измерительных устройств, предназначенных для экспериментальной отработки предлагаемых волноводных узлов. На первом этапе, пока эти узлы отсутствуют, можно воспользоваться измерителями, сочетающимися в своих структурных схемах комбинации элементов, построенных как на основе нового типа волновода, так и стандартного – полого металлического. Устройством, объединяющим эти два вида элементов, может стать комбинированный направленный ответвитель, каналы которого выполнены на разнотипных волноводах. В канал, построенный на основе ПМВ, включаются существующие необходимые измерительные элементы, а во второй – исследуемые устройства ПМДВ.

### Основная часть

На рис. 1 показаны схематическое изображение многодырочного комбинированного направленного ответвителя (КНО) и поле связи его каналов. Особенностью КНО является то, что длины волн в его волноводных каналах не одинаковы. Поэтому известные методики расчета многодырочных НО не

пригодны для КНО. В стандартных направленных ответвителях расстояние между центрами отверстий связи волноводных каналов равно четверти средней длины волны в волноводе. При этом фазовый сдвиг между ответвляемыми волнами двумя соседними отверстиями в обратное плечо НО равен 180° и волны взаимно компенсируются. В прямое плечо волны, ответвляемые всеми отверстиями связи синфазны, их амплитуды суммируются.

Отличия длин волн в волноводных каналах комбинированного направленного ответвителя и связанного с этим отличия фазовых сдвигов волн на равных расстояниях в каналах должны быть учтены при синтезе и анализе КНО.

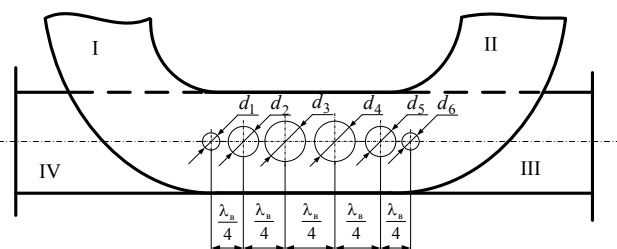


Рис. 1. Схематическое изображение многодырочного комбинированного направленного ответвителя

Для взаимной компенсации волн, возбуждаемых во вторичном канале ответвителя и распространяющихся в его обратное плечо, расстояние  $d$  между центрами соседних отверстий определяется из следующего соотношения

$$\frac{2\pi d}{\lambda_{в10}} + \frac{2\pi d}{\lambda_{в20}} = \pi, \quad (1)$$

где  $\lambda_{в10}$  – средняя длина волны в полом металлическом волноводе на средней частоте  $f_0$ ;  $\lambda_{в20}$  – средняя длина волны в плоском металлодиэлектрическом волноводе на средней частоте  $f_0$ .

Из (1) следует:

$$d = \frac{\lambda_{B10} \cdot \lambda_{B20}}{2(\lambda_{B10} + \lambda_{B20})}. \quad (2)$$

Для проведения расчетов комбинированного направленного ответвителя введем понятие усредненной длины волноводов НО и обозначим ее  $\lambda_B^{HO}$ . Она определяется следующим выражением

$$\lambda_B^{HO} = \frac{2\lambda_{B1} \lambda_{B2}}{\lambda_{B1} + \lambda_{B2}}, \quad (3)$$

где  $\lambda_{B1}$  и  $\lambda_{B2}$  – длины волн в волноводах каналов НО на текущей частоте  $f$  рабочего диапазона.

На средней частоте  $f_0$  усредненная длина волн направленного ответвителя  $\lambda_{B0}^{HO}$  равна

$$\lambda_{B0}^{HO} = \frac{2 \cdot \lambda_{B10} \cdot \lambda_{B20}}{\lambda_{B10} + \lambda_{B20}}. \quad (4)$$

Длина волны в полом металлическом волноводе прямоугольного сечения рассчитывается по [5]

$$\lambda_{B1} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda / (2a))^2}}, \quad (5)$$

где  $\lambda$  – длина волны в свободном пространстве;  $a$  – поперечный размер широкой стенки ПМВ.

Длина волны в плоском металлодиэлектрическом волноводе определяется соотношением [6]

$$\lambda_{B2} = \frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon \cdot \sin^2 \theta_x}}, \quad (6)$$

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость материала пластины;  $\theta_x$  – угол падения плоской парциальной волны на граничную плоскость раздела диэлектрик – воздух.

Совместное решение уравнений (2) и (4) позволяет выразить размер  $d$  через усредненную длину волны направленного ответвителя  $\lambda_{B0}^{HO}$

$$d = \frac{\lambda_{B0}^{HO}}{4}. \quad (7)$$

Фазовый сдвиг  $\phi_0$  между волнами, ответвляемыми соседними отверстиями связи на усредненной длине волн  $\lambda_{B0}^{HO}$ , учитывая (7), равен

$$\phi_0 = \frac{2\pi d}{\lambda_{B0}^{HO}} = \frac{\pi}{2}. \quad (8)$$

На других длинах волн  $\lambda_B^{HO}$  фазовый сдвиг  $\phi$  определяется как

$$\phi = \frac{2\pi d}{\lambda_B^{HO}} = \frac{2\pi \frac{\lambda_{B0}^{HO}}{4}}{\lambda_B^{HO}} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\lambda_{B10} \cdot \lambda_{B20}}{\lambda_{B1} \cdot \lambda_{B2}} \cdot \frac{\lambda_{B1} + \lambda_{B2}}{\lambda_{B10} + \lambda_{B20}}. \quad (9)$$

При проектировании многодырочных НО определяют размеры отверстий и нормированную

амплитуду волны  $a_{IV}$ , ответвляемую в обратном направлении вторичного волновода НО. Амплитуда  $a_{IV}$  однозначно связана с направленностью ответвителя. Нормированные амплитуды волн  $a_1, \dots, a_k$ , ответвляемые отверстиями связи, нормируются относительно амплитуды  $a_I$  волны на входе плеча I.

Волны, ответвляемые соседними отверстиями в обратном направлении, отличаются по фазе. Сдвиг фаз составляет  $2\phi$ . Для шестидырочного направленного ответвителя результирующая нормированная амплитуда волны, ответвляемая в плечо 4, равна

$$a_{IV} = a_1 e^{i5\phi} + a_2 e^{i3\phi} + a_3 e^{i\phi} + a_4 e^{-i\phi} + a_5 e^{-i3\phi} + a_6 e^{-i5\phi}. \quad (10)$$

При этом отсчет фазы ведётся от центральной плоскости.

Амплитуда волны  $a_{IV}$  зависит от частоты, так как фазовый сдвиг  $\phi$  является частотно зависимым. Эта зависимость определяется способом выбора нормированных комплексных амплитуд  $a_i$ , т.е.  $a_1, \dots, a_6$ . Одним из таких способов является биномиальное приближение. Амплитуды  $a_i$  выбираются пропорциональными коэффициентам разложения бинома Ньютона  $(a + b)^{n-1}$ . В этом случае величина  $a_{IV}$  равна нулю на частоте  $f_0$ . Кривая частотной зависимости имеет максимально – плоский вид. Коэффициенты разложения бинома находим с помощью треугольника Паскаля [4].

В нашем случае  $n = 6$ , следовательно, нормированные амплитуды волн  $a_i$  равны:

$$a_2 = a_5 = 5a_1, \quad a_3 = a_4 = 10a_1.$$

Нормированная амплитуда волны в четвёртом плече направленного ответвителя с шестью отверстиями (10) определяется выражением

$$a_{IV} = 32a_1 \cos^5 \phi. \quad (11)$$

Нормированная амплитуда волны  $a_{III}$ , ответвляемая в прямом направлении (то есть в плечо III) обычного НО равна

$$a_{III} = a_1 + 5a_1 + 10a_1 + 10a_1 + 5a_1 + a_1 = 32a_1,$$

откуда  $a_1 = a_{III} / 32$ . (12)

Если переходное ослабление  $S$  обычного направленного ответвителя равно 20 дБ, то  $a_{III} = 0,1$ ;  $a_1 = 0,00313$ ;  $a_2 = 0,0156$ ;  $a_3 = 0,0313$ .

В комбинированном направленном ответвителе фазовые сдвиги волн в каналах НО на участке размером  $d$  различны. Разность фазовых сдвигов при этом равна

$$\Delta\phi = \frac{2\pi d}{\lambda_{B2}} - \frac{2\pi d}{\lambda_{B1}} = 2\pi d \left( \frac{\lambda_{B1} - \lambda_{B2}}{\lambda_{B1} \lambda_{B2}} \right). \quad (13)$$

Модуль комплексной амплитуды  $a_3 = |a_3 + a_4|$  суммарной волны, ответвляемой совместно третьим и четвертым отверстиями, равен

$$a_{34} = \sqrt{a_3^2 + a_4^2 + 2a_3a_4 \cos \left( 2\pi d \left( \frac{\lambda_{B1} - \lambda_{B2}}{\lambda_{B1}\lambda_{B2}} \right) \right)}. \quad (14)$$

Тогда усредненной длине волны комбинированного направленного ответвителя

$$\lambda_{B0}^{HO} = \frac{2 \cdot \lambda_{B10} \cdot \lambda_{B20}}{\lambda_{B10} + \lambda_{B20}} \text{ при } d = \frac{\lambda_{B0}^{HO}}{4} \text{ выражение для } a_{34}$$

(14) имеет вид

$$a_{34} = \sqrt{a_3^2 + a_4^2 + 2a_3a_4 \cos \left( \pi \left( \frac{\lambda_{B10} - \lambda_{B20}}{\lambda_{B10} + \lambda_{B20}} \right) \right)}. \quad (15)$$

В обычном НО  $\lambda_{B10} = \lambda_{B20}$  и

$$a_{34} = \sqrt{a_3^2 + a_4^2 + 2a_3a_4} = a_3 + a_4.$$

Учитывая равенство  $a_3 = a_4$ , выражение (15)

представим в виде

$$\begin{aligned} a_{34} &= \sqrt{2a_3^2 \left( 1 + \cos \left( \pi \left( \frac{\lambda_{B10} - \lambda_{B20}}{\lambda_{B10} + \lambda_{B20}} \right) \right) \right)} = \\ &= \sqrt{4a_3^2 \cos^2 \left( \frac{\pi (\lambda_{B10} - \lambda_{B20})}{2 (\lambda_{B10} + \lambda_{B20})} \right)} = \\ &= 2a_3 \cos \left( \frac{\pi (\lambda_{B10} - \lambda_{B20})}{2 (\lambda_{B10} + \lambda_{B20})} \right). \end{aligned} \quad (16)$$

Основными эксплуатационными параметрами направленных ответвителей являются переходное затухание  $C$  (дБ) и направленность  $D$  (дБ). Они связаны с нормированными комплексными амплитудами волн в плечах НО следующими соотношениями

$$C = 20 \lg \left| \frac{1}{a_{III}} \right|; \quad D = 20 \lg \left| \frac{a_{III}}{a_{IV}} \right|. \quad (22)$$

В задании на разработку направленного ответвителя обычно указывается рабочий диапазон частот, то есть минимальная и максимальная частоты –  $f_{min}$  и  $f_{max}$ , в котором требуется получить необходимую величину направленности. Этим частотам соответствуют максимальная и минимальная длины волн в свободном пространстве –  $\lambda_{max}$ ,  $\lambda_{min}$ . Последним соответствуют максимальная и минимальная длины волн в волноводных каналах НО:  $\lambda_{B1min}$ ,  $\lambda_{B1max}$  и  $\lambda_{B2min}$ ,  $\lambda_{B2max}$ .

Так как  $a_3 = 10a_1$ , то суммарная амплитуда волны от двух центральных отверстий третьего и четвертого равна

$$a_{34} = 20a_1 \cos \left( \frac{\pi (\lambda_{B10} - \lambda_{B20})}{2 (\lambda_{B10} + \lambda_{B20})} \right). \quad (17)$$

Аналогично определяется суммарная амплитуда волн от второго и пятого отверстий, а также от первого и шестого. Расстояние между вторым и пятым отверстиями составляет  $3d$ , а между первым и шестым –  $5d$ . Учитывая эти расстояния, суммарные амплитуды волн  $a_{25}$  и  $a_{16}$  определяются соотношениями

$$a_{25} = 10a_1 \cos \left( \frac{3\pi (\lambda_{B10} - \lambda_{B20})}{2 (\lambda_{B10} + \lambda_{B20})} \right). \quad (18)$$

$$a_{16} = 2a_1 \cos \left( \frac{5\pi (\lambda_{B10} - \lambda_{B20})}{2 (\lambda_{B10} + \lambda_{B20})} \right). \quad (19)$$

Таким образом, амплитуда волны  $a_{III}$  в прямом плече КНО равна

$$\begin{aligned} a_{III} &= a_{34} + a_{25} + a_{16} = 20a_1 \times \\ &\times \cos \left( \frac{\pi (\lambda_{B10} - \lambda_{B20})}{2 (\lambda_{B10} + \lambda_{B20})} \right) + \cos \left( \frac{3\pi (\lambda_{B10} - \lambda_{B20})}{2 (\lambda_{B10} + \lambda_{B20})} \right) \times \\ &\times 10a_1 + 2a_1 \cos \left( \frac{5\pi (\lambda_{B10} - \lambda_{B20})}{2 (\lambda_{B10} + \lambda_{B20})} \right). \end{aligned} \quad (20)$$

Из уравнения (20) определяем амплитуду  $a_1 \dots$

$$a_1 = \frac{a_{III}}{20 \cos \left( \frac{\pi (\lambda_{B10} - \lambda_{B20})}{2 (\lambda_{B10} + \lambda_{B20})} \right) + 10 \cos \left( \frac{3\pi (\lambda_{B10} - \lambda_{B20})}{2 (\lambda_{B10} + \lambda_{B20})} \right) + 2 \cos \left( \frac{5\pi (\lambda_{B10} - \lambda_{B20})}{2 (\lambda_{B10} + \lambda_{B20})} \right)}. \quad (21)$$

Минимальная и максимальная частоты  $f_{min}$  и  $f_{max}$  выбраны равными, соответственно 8,2 и 12,4 ГГц. Для реализации заданной направленности НО и рассчитанных амплитуд волн требуется определить размеры отверстий связи. Диаметр отверстия можно определить, зная его переходное затухание или амплитуду ответвленной волны  $a_i$ . Для отверстия, прорезанного в общей широкой стенке волноводов, с центром, расположенным на оси волноводов, переходное затухание равно

$$C = 20 \lg \left( \frac{1}{a_i} \right) = 20 \lg \left( \frac{12a^2 a' b}{\pi d_i^3 F_m \sqrt{\lambda_{B10} \lambda_{B20}}} \right), \quad (23)$$

$$\text{откуда } a_i = \pi d_i^3 F_m \sqrt{\lambda_{B10} \lambda_{B20}} / (12a^2 a' b), \quad (24)$$

где  $a$ ,  $b$  – поперечные размеры ПМВ;  $a'$  – размер широкой стенки ПЛМДВ;  $d_i$  – диаметр  $i$ -го отвер-

стия;  $F_m$  – поправка за счет конечной толщины стенок. Нормированные амплитуды волн принимаем равными:

$$a_1 = 0,00313; a_2 = 0,0156; a_3 = 0,0313. \quad (25)$$

Эти величины получены при расчете обычного НО при его переходном затухании  $C$ , равном 20 дБ. Для КНО значение  $C$  меньше и его нужно будет определить по формулам (20, 22).

Из уравнения (24) определяем диаметры отверстий:  $d_1; d_2; d_3$ .

Диаметры отверстий зависят от амплитуд волн; от средних длин волн в волноводах, от размеров волноводов и от коэффициента  $F_m$ .

Величину этого коэффициента принимаем равным 0,8 [5]

$$d_1 = \sqrt[3]{\frac{12(23)^2 14,5 \cdot 10 \cdot 0,00313}{3,14 \cdot 0,8 \sqrt{38,3 \cdot 23,9}}} = 3,34 \text{ мм.},$$

$$d_2 = \sqrt[3]{\frac{12(23)^2 14,5 \cdot 10 \cdot 0,0156}{3,14 \cdot 0,8 \sqrt{38,3 \cdot 23,9}}} = 5,73 \text{ мм.},$$

$$d_3 = \sqrt[3]{\frac{12(23)^2 14,5 \cdot 10 \cdot 0,0313}{3,14 \cdot 0,8 \sqrt{38,3 \cdot 23,9}}} = 7,23 \text{ мм.}$$

Расстояние  $d$  между центрами соседних отверстий комбинированного направленного ответвителя

$$d = \frac{3,83 \cdot 2,39}{2(3,83 + 2,39)} = 0,74 \text{ см.}$$

Рассчитанная зависимость направленности направленного ответвителя от частоты приведена на рис. 2.

## Выводы

Таким образом, разработанный комбинированный направленный ответвитель, обладающий высокой направленностью, может быть использован как структурный элемент антенно-волноводных трактов современных радиоэлектронных систем, стоящих на вооружении в ВС Украины, а также как узел систем контроля и диагностики комплексных параметров радиотехнических трактов.

## КОМБІНОВАНИЙ ХВИЛЕВОДНИЙ НАПРАВЛЕНИЙ ВІДГАЛУЖУВАЧ НА ОСНОВІ ПЛОСКОГО МЕТАЛОДІЕЛЕКТРИЧНОГО ХВИЛЕВОДУ

І.Л. Афонін, П.О. Бугайов, О.І. Харланов

У роботі приведені результати дослідження комбінованого направлено відгалужувача, канали якого виконані на різних типах хвильоводів: підлогою металевому і плоскому металодіелектричному, розробленим авторами статті для вживання в сантиметровому діапазоні довжин хвиль.

**Ключові слова:** хвильовід, направлений відгалужувач, плоский металодіелектричний хвильовід, комбінований направлений відгалужувач.

## COMBINED WAVEGUIDE A DIRECTIONAL COUPLER A FLAT METAL-DIELECTRIC WAVEGUIDES

I.L. Afonin, P.A. Bugayov, A.I. Kharlanov

The paper presents the results of a study of the combined directional coupler, the channels of which are made on different types of waveguides: hollow metal and flat metal-dielectric, developed by the authors for use in the centimeter wavelength range.

**Keywords:** waveguide directional coupler, flat metal-dielectric waveguide directional coupler combination.

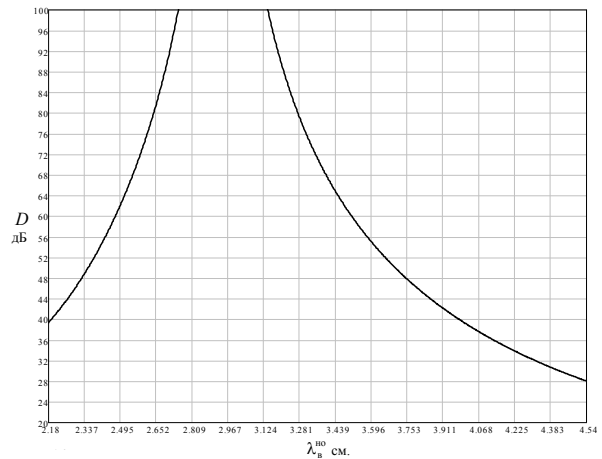


Рис. 2. Зависимость направленности направленного ответвителя от частоты

## Список литературы

1. Фельдштейн А.Л. Синтез четырехполосников и восьмиполосников на СВЧ / А.Л. Фельдштейн, Л.Р. Явич. – М.: Связь, 1971. – 388 с.
2. Бугайов П.А. Методика расчета параметров плоского металодіелектричного волновода / П.А. Бугайов, І.Л. Афонін, В.В. Саламатин // Академія військово-морських сил імені П.С. Нахімова: зб. наук. пр. – Севастополь: АВМС ім. П.С. Нахімова, 2010. – Вип. 4 (4). – С. 44–49.
3. Пат. 99003 Україна, МПК<sup>2012.01</sup> H01P 3/00. Металодіелектричний хвильовід / П.О. Бугайов, І.Л. Афонін, В.В. Саламатин, заявник та патентовласник Севастопольський національний технічний університет. – № а201011515; заявл. 28.09.10; опубл. 10.07.12, Бюл. № 13.
4. Бронштейн М.Н. Справочник по математике / М.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1981. – 718 с.
5. Фельдштейн А.Л. Справочник по элементам волноводной техники / А.Л. Фельдштейн, Л.Р. Явич, В.П. Смирнов. – М.: Сов. радио, 1967. – 651 с.
6. Саламатин В.В. Основы геометрической электродинамики волноводов прямоугольного сечения: [учеб. пособ.] / В.В. Саламатин, І.Л. Афонін, С.Н. Бердышев–Севастополь: Севастопольский национал. техн. ун-т, 2008. – 220 с.

Поступила в редколлегию 29.03.2013

**Рецензент:** д-р тех. наук, проф. Э.Ф. Бабуров, Севастопольский национальный технический университет, Севастополь.