

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА СВЧ

УДК 537.874.2:621.372.851.3

РЕЗОНАНСЫ ОТРАЖЕНИЯ ВОЛНОВОДНОЙ СЕКЦИИ С ДВУМЯ РАЗНОВЫСОКИМИ СТЕРЖНЯМИ

А. А. Кириленко, Д. Ю. Кулик, Л. П. Мосьпан, Л. А. Рудь

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: lyuda@ire.kharkov.ua*

Исследованы характеристики рассеяния прямоугольной волноводной секции с двумя разновысокими прямоугольными стержнями, расположенными в одном поперечном сечении волновода. Показано, что такая структура формирует характеристику с двумя резонансами полного отражения, частоты и добротность которых могут контролироваться независимо друг от друга. Ил. 10. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: резонанс отражения, прямоугольный волновод, гребневый волновод, метод частичных областей.

Металлический стержень в волноводе является, вероятно, наиболее простой и широко используемой неоднородностью в антенно-волноводной технике. Обычно стержни используют как подстроечные узлы или как элементы полосно-пропускающих фильтров [1]. Вместе с тем недавно была предложена простая и изящная идея использовать стержень в волноводе как элементарную режекторную секцию. Сначала в работе [2], а позднее и в [3] было показано, что вертикальный стержень в волноводе, смещенный от вертикальной оси симметрии тракта, обеспечивает узкополосный резонанс полного отражения падающей H_{10} -волны. Частота резонанса лежит в рабочей полосе волновода и определяется высотой стержня и величиной его смещения к боковой стенке волновода. Это свойство было использовано при проектировании квазиэллиптического и классического полосно-запирающего фильтров.

Исследованию именно таких резонансов полного отражения, способам управления их характеристиками и посвящена настоящая работа. Резонансы полного отражения исследуются в близкой к описанным в работах [2, 3] структуре. Здесь рассмотрен волновод не с одним, а с двумя прямоугольными стержнями, расположенными в одной плоскости поперечного сечения волновода (рис. 1). Как будет показано ниже, такая структура может формировать как один, так и два резонанса полного отражения, положение и добротность каждого из которых может контролироваться независимо. Типичный пример частотной характеристики приведен на рис. 2.

В значительной степени здесь использован тот же способ управления характеристикой рассеяния волноводного объекта, который был успешно развит применительно к многоапертурным неоднородностям [4-6]. Принципиальное от-

личие нашей работы состоит в том, что здесь для усложнения поперечного сечения волноводного объекта используются не разноразмерные апертуры, а разноразмерные стержни. Оказывается, что и в этом случае формируется сложная многорезонансная характеристика, качественным и количественным характером которой легко управлять.

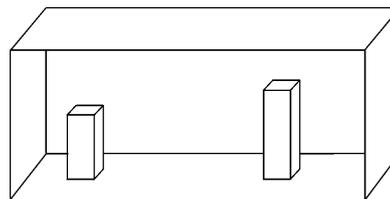


Рис. 1. Прямоугольный волновод с двумя разновысокими прямоугольными стержнями

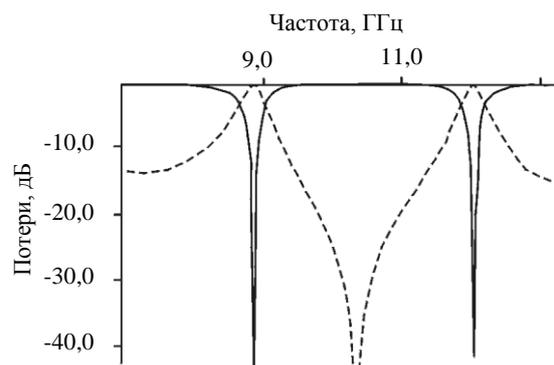


Рис. 2. Частотная характеристика волноводной секции с двумя разновысокими стержнями: вносимые потери - —; обратные потери - - - -

1. Математическая модель. Основой численной модели является решение задачи рассеяния на сложной неоднородности с кусочно-координатными границами хорошо известными методами декомпозиции, частичных областей,

поперечного резонанса и методом обобщенных матриц рассеяния. Решение задачи осуществляется в несколько этапов. Сначала исследуемую неоднородность представляют в виде последовательности ключевых элементов, матрица рассеяния которых рассчитывается методом частичных областей. Ключевым элементом здесь является плоскостное соединение прямоугольного и двухгребневого (или одногребневого) волноводов. В свою очередь, полная матрица рассеяния всей неоднородности рассчитывается по найденным матрицам рассеяния простейших плоскостных соединений. Наиболее трудоемкую задачу представляет собой нахождение полного спектра собственных волн гребневого волновода. Суть задачи состоит в определении набора критических частот и распределений электромагнитных полей собственных волн волновода со сложной координатной формой поперечного сечения. Поперечное сечение такого волновода описывается набором частичных областей, границы которых совпадают с координатными поверхностями. Пример такого разбиения для двухгребневого волновода с разновысокими гребнями представлен на рис. 3. Для каждой пары частичных областей решается задача дифракции на общей границе. Используя метод обобщенных матриц, устанавливается связь между полями H - или E -волн всех частичных областей. Обращая в ноль определитель полученной системы линейных алгебраических уравнений, получают уравнение для определения критических частот собственных волн волновода сложного сечения.

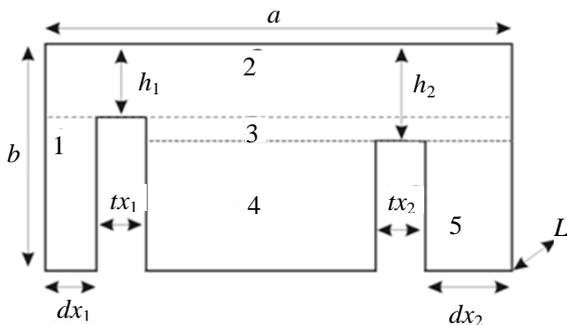


Рис. 3. Поперечное сечение волновода с двумя стержнями с характерными размерами и принятым в работе разбиением на частичные подобласти

На каждом этапе численной реализации алгоритмов бесконечные матрицы урезаются до конечных размеров, что соответствует усечению числа членов рядов Фурье в представлениях для полей в соответствующих областях. Таким образом, точность окончательного решения зависит от двух порядков усечения – матричного оператора в алгоритме расчета S -матрицы неоднородности с кусочно-координатными границами и оконча-

тельного определителя. Число мод, учитываемое в численной реализации проекционного алгоритма, здесь выбирается таким образом, чтобы максимальные поперечные волновые числа f_{cut} высших H - и E -мод (во всех волноводных каналах) были равны. Исходя из заданного f_{cut} , определяется и число гармоник поля как в частичных областях, на которые разбивается сложная неоднородность при реализации метода частичных областей, так и в подобластях, на которые разбивается сложное поперечное сечение, в задаче о поиске базиса сложного волновода. Однако в любом случае для подобласти с минимальными размерами это число на единицу превышает число всех распространяющихся волн. Типичный график сходимости результатов для задачи рассеяния H_{10} -волны на одностержневой волноводной секции с размерами $a \times b = 8,64 \times 4,32 \text{ мм}^2$; $h_1 = 3 \text{ мм}$; $tx_1 = 1 \text{ мм}$; $dx_1 = 1,3 \text{ мм}$; $L = 1 \text{ мм}$, аналогичными приведенным в работе [2], представлен на рис. 4. Отметим, что при выбранном $f_{cut} = 130 \text{ ГГц}$ расхождение результатов с данными работы [2] составляет $0,05 \text{ ГГц}$.

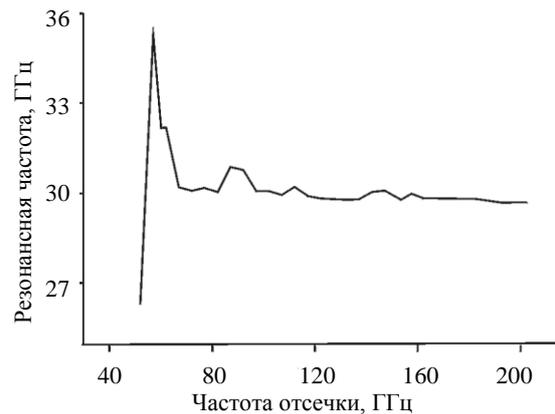


Рис. 4. Сходимость решения при увеличении точностного параметра f_{cut}

Описанные процедуры расчета были реализованы численно в виде основанной на методе частичных областей системы электродинамического моделирования MWD [7], позволяющей решать задачи рассеяния на неоднородностях с кусочно-линейными границами поперечного сечения сложной геометрии. Детальное изложение всех вопросов организации подобных алгоритмов дано в работе [8].

2. Численные результаты. Двухгребневый волновод с двумя одинаковыми стержнями. В качестве начальной конфигурации была исследована волноводная секция с парой одинаковых стержней. Частотная характеристика такой секции в волноводе $a \times b = 8,64 \times 4,32 \text{ мм}^2$ с парой стержней одинаковой высоты ($h_1 = h_2 = 3 \text{ мм}$) ши-

риной $tx_1 = tx_2 = 1$ мм и толщиной $L = 1$ мм, симметрично расположенных на одинаковом расстоянии 1,3 мм от боковых стенок, представлена на рис. 5. Как видно из рисунка, двухстержневая секция так же, как и одностержневая, описанная в работе [2], формирует резонанс полного отражения падающей H_{10} -волны. Количественные характеристики, а именно частота и добротность этого резонанса, как и в случае одностержневой секции, определяются смещением стержней и их высотой. Характерные зависимости резонансной частоты от величины расстояния между стержнями и боковыми стенками волновода для трех разных соотношений высот стержней и высоты волновода приведены на рис. 6. Как видно из рисунка, чем ближе к стенкам расположены стержни, тем ниже частота резонанса отражения. Кроме того, чем выше стержень, тем ниже частота резонанса. При изменении этих параметров меняется, в меньшей степени, и добротность резонанса. Отметим, что еще одним геометрическим размером, определяющим добротность, является ширина стержней: чем уже стержень, тем добротнее резонанс полного отражения.

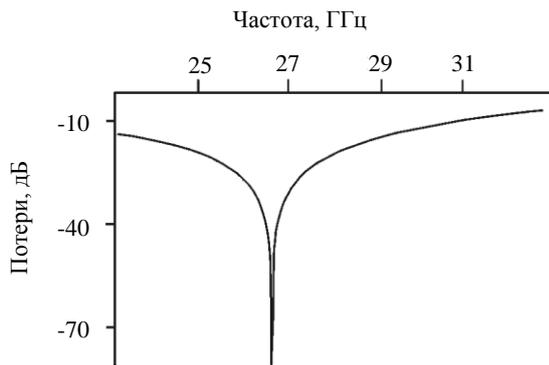


Рис. 5. Потери, вносимые волноводной секцией с парой одинаковых стержней

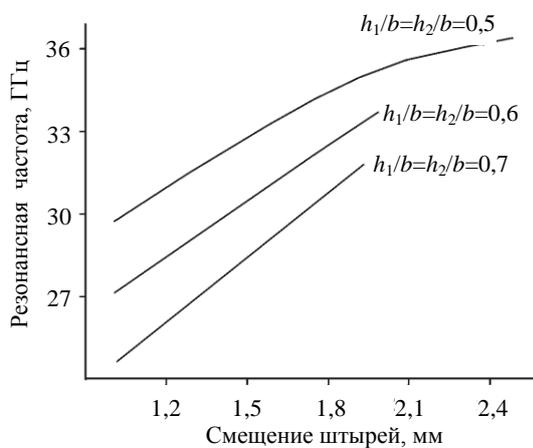


Рис. 6. Зависимости частоты резонанса полного отражения, формируемого волноводной секцией с парой одинаковых стержней, от величины смещения стержней

3. Двухгребневый волновод с двумя разновысокими стержнями. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) волноводной секции с двумя стержнями будет иметь более сложный - двухрезонансный характер, если стержни неодинаковы, например, имеют разную высоту. Пример такой характеристики приведен на рис. 2 для двухгребневого волновода с разновысокими гребнями ($a \times b = 23 \times 10$ мм²; $dx_1 = 1,5$ мм; $tx_1 = 1$ мм; $h_1 = 3$ мм; $dx_2 = 1,5$ мм; $tx_2 = 1$ мм; $h_2 = 5$ мм; $L = 2$ мм). Как видно из рис., АЧХ такого волновода содержит два резонанса полного запираения и широкую полосу пропускания между ними с ярко выраженной точкой полного согласования. Для того, чтобы понять, как можно сформировать такую двухрезонансную АЧХ, обратимся к рис. 7. На нем приведены АЧХ двухгребневого волновода $a \times b = 23 \times 10$ мм². Длина секции $L = 2$ мм. Ширина каждого гребня 1 мм, каждый расположен на расстоянии 1,5 мм от боковой стенки. Если гребни имеют одинаковую высоту $h_1 = h_2 = 4,0$ мм, такая секция формирует АЧХ с одним резонансом полного запираения на частоте чуть ниже 11 ГГц (сплошная кривая на рис. 7).

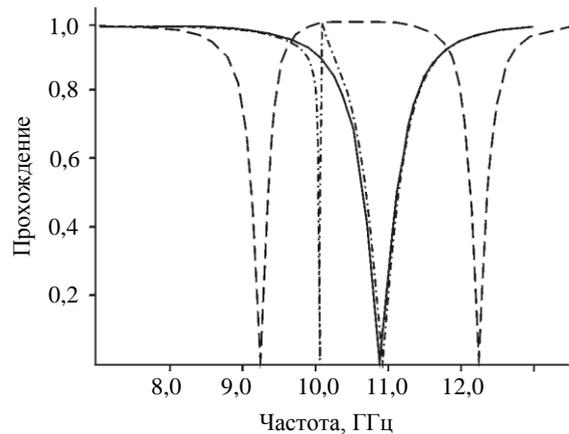


Рис. 7. Частотные характеристики волноводной секции с парой разновысоких стержней для различных соотношений высот стержней

Будем теперь одновременно изменять высоту гребней - один увеличивать, другой уменьшать. Все остальные геометрические параметры зафиксированы. Как только высоты гребней начинают отличаться, АЧХ приобретает многорезонансный характер. Так, на АЧХ волновода с $h_1 = 3,87$ мм и $h_2 = 4,12$ мм можно выделить резонанс полного запираения на 10,91 ГГц и появившуюся слева от него пару резонанс-антирезонанс с частотами соответственно 10,04 ГГц и 10,094 ГГц (штрих-пунктирная кривая). По мере увеличения разницы в высоте гребней высокочастотный резонанс полного запираения смещается вправо. Возникший низкочастотный резонанс

полного запираения смещается по частоте влево. Частотный разнос между ним и точкой полного прохождения увеличивается, и на некотором этапе низкочастотная пара «резонанс-антирезонанс» распадается, а на АЧХ четко выделяются два резонанса полного запираения и полоса полного прохождения между ними (так, как это показано на рис. 7 для случая $h_1=3,25$ мм, $h_2=4,75$ мм пунктирной кривой).

Был проведен ряд численных экспериментов по изменению положения этих двух резонансов полного отражения путем изменения только высоты гребней волновода. Так, на рис. 8 сплошными линиями приведена динамика изменения частот резонансов полного отражения при синхронном изменении высот гребней при остальных фиксированных параметрах $a \times b = 23 \times 10$ мм²; $dx_1=1,5$ мм; $tx_1=2,5$ мм; $dx_2=1,5$ мм; $tx_2=2,5$ мм; $L=2$ мм; $dh=|h_1-h_2|=1,5$ мм. Из рис. видно, что синхронное увеличение зазора над гребнями, т. е. уменьшение высоты гребней приводит к одновременному частотному сдвигу резонансов полного отражения в область высоких частот, добротность резонансов, при этом их частотный разнос изменяется слабо.

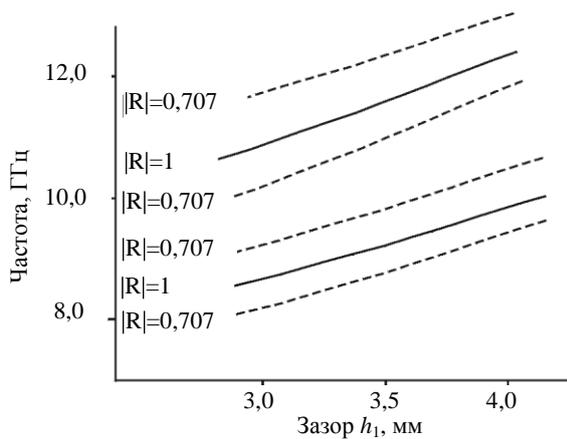


Рис. 8. Динамика поведения частот резонансов полного отражения, формируемых волноводной секцией с парой неодинаковых стержней при одновременном изменении

Добротности резонансов, оцениваемые по уровню половинной мощности (им соответствуют пунктирные кривые на рис. 8), при одновременном уменьшении высот гребней также изменяются незначительно. На рис. 9 и 10 показано, как можно изменять положение одного резонанса при фиксированном положении второго резонанса. На рис. 9 приведена динамика изменения положения низкочастотного резонанса полного отражения при изменении высоты одного из гребней при остальных фиксированных параметрах: $a \times b = 23 \times 10$ мм; $dx_1=1,5$ мм; $tx_1=1$ мм; $dx_2=1,5$ мм; $tx_2=1$ мм; $h_2=5,25$ мм; $L=2$ мм. Видно, что при

уменьшении разницы в высотах гребней низкочастотный резонанс смещается в область высоких частот. Дополнительно наблюдается изменение и его добротности: при сближении с высокочастотным резонансом добротность низкочастотного резонанса растет. Положение и добротность высокочастотного резонанса полного отражения при этом практически не изменяются.

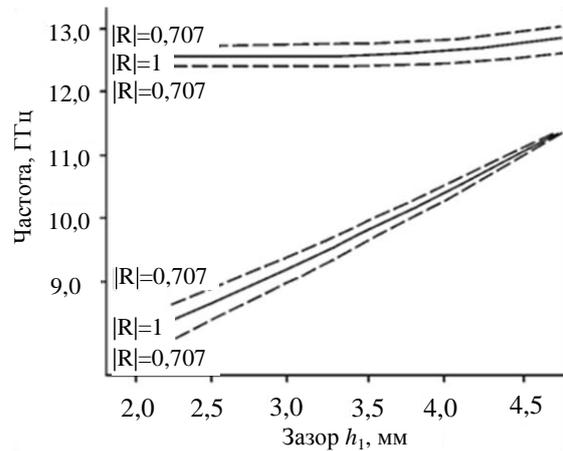


Рис. 9. Зависимости частот резонансов полного отражения, формируемых волноводной секцией с парой неодинаковых стержней, от величины зазора при фиксированных остальных параметрах

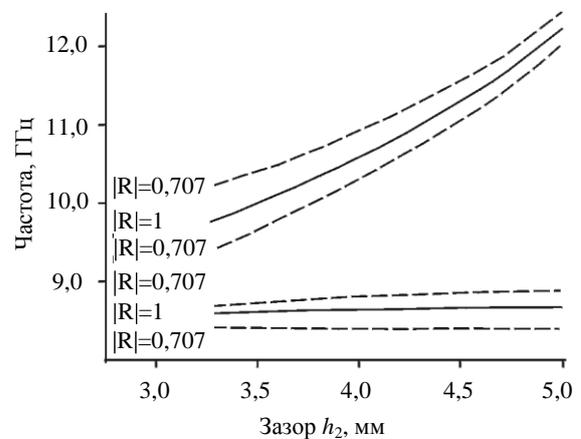


Рис. 10. Зависимости частот резонансов полного отражения, формируемых волноводной секцией с парой неодинаковых стержней, от величины зазора

Аналогичным образом можно изменять положение высокочастотного резонанса полного отражения при фиксированном положении низкочастотного резонанса. На рис. 10 приведена динамика изменения частоты высокочастотного резонанса полного отражения при изменении высоты другого гребня при остальных фиксированных параметрах: $a \times b = 23 \times 10$ мм²; $dx_1=1,5$ мм; $tx_1=1$ мм; $h_1=2,5$ мм; $dx_2=1,5$ мм; $tx_2=1$ мм; $L=2$ мм. Видно, что при уменьшении разницы в высотах гребней теперь уже высокочастотный

резонанс смещается в область низких частот. При этом добротность высокочастотного резонанса по мере смещения в область низких частот падает. Это отличается от предыдущего случая, когда добротность смещаемого в область высоких частот низкочастотного резонанса возрастала. Если в предыдущем случае добротность не смещающегося резонанса не изменялась, то здесь добротность низкочастотного резонанса уменьшается по мере сближения резонансов. Положение низкочастотного резонанса при этом практически не изменяется.

Выводы. Выявленный эффект полного загиравания волноводного тракта на одной или двух частотах одновременно при установленных способах изменения количественных характеристик этих резонансов посредством изменения геометрических размеров стержней может быть применен при конструировании различных частотно-селективных устройств, как полосно-запирающих, так и полосно-пропускающих. А простота самой конструкции предложенной волноводной секции обеспечивает и простоту изготовления.

1. *Helszajn J.* Ridge waveguides and passive microwave components. - London (UK): The institution of Electrical engineers, 2000. - 327 p.
2. *Rosenberg U., Amari S.* A Novel Band-Reject Element for Pseudoelliptic Bandstop Filters // IEEE Trans on MTT. - 2007. - 55, №4. - P. 742-747.
3. *Bekheit M., Rosenberg U., Menzel W., Amari S.* Design of bandstop filters using cylindrical metallic posts / EUMW'38 (Munich, Germany, 8-12 Oct., 2007): Proc. - 2007. - P. 870-873.
4. *Kirilenko A. A., Mospan L. P.* The simplest notch and bandstop filters based on the slotted strips / EUMW'31 (London UK, 22-27 Oct., 2001): Proc. - 2001. - P. 117-120.
5. *Mospan L. P., Kirilenko A. A.* Spatial Filter with Quasi-Elliptical Response / EUMW'35 (Paris, Fr., 3-7 Oct. 2005): Proc. - 2005. - P. 869-872.
6. *Don N., Kirilenko A., Mospan L.* A multi-aperture iris in a circular waveguide as a tool for the frequency response con-

trol / EUMW'36 (Manchester, UK, 11-15 Sept., 2006): Proc. - 2006. - P. 995-998.

7. *Kirilenko A., Kulik D., Tkachenko V.* General Scheme of the Mode-Matching Technique as a Basis for Generalized Solutions to the Internal Boundary-Value Problems // Telecommunications and Radio Engineering. - 2004. - 60. - P. 23-33.
8. *Kirilenko A., Kulik D., Rud L. et al.* Automatic electromagnetic solvers based on mode-matching, transverse resonance, and S-matrix techniques // Proc. of MIKON-2002. - 2002. - 3. - P. 815-824.

REFLECTION RESONANCES IN A WAVEGUIDE SECTION WITH TWO DIFFERENT HEIGHT POSTS

A. Kirilenko, D. Kulik, L. Mospan, L. Rud'

TE_{10} -mode scattering at two different-height rectangular posts, located side by side inside a rectangular waveguide is studied in the paper. A possibility to provide a frequency response with two rejection resonances is revealed. Independent control of the resonance locations is discussed.

Key words: reflection resonance, rectangular waveguide, ridged waveguide, mode-matching technique.

РЕЗОНАНСИ ВІДБИТТЯ ХВИЛЕВОДНОЇ СЕКЦІЇ З ДВОМА РІЗНОВИСОКИМИ СТРИЖНЯМИ

А. О. Кириленко, Д. Ю. Кулик,
Л. П. Моспан, Л. А. Рудь

Досліджено характеристики розсіяння прямокутної хвилеводної секції з двома різновисокими прямокутними стрижнями, розташованими в одному поперечному перерізі хвилевода. Виявлено, що така структура формує частотну характеристику з двома резонансами повного відбиття, частоти та добротність яких можуть контролюватися незалежно.

Ключові слова: резонанс відбиття, прямокутний хвилевод, гребінчастий хвилевод, метод часткових областей.

Рукопись поступила 11 марта 2008 г.