

09;12

Микрополосковый диплексер на двухмодовых резонаторах

© Б.А. Беляев, А.М. Сержантов, В.В. Тюрнев

Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск
Институт инженерной физики и радиоэлектроники, Сибирский
федеральный университет, Красноярск
Сибирский аэрокосмический университет, Красноярск
E-mail: belyaev@iph.krasn.ru

Поступило в Редакцию 16 марта 2012 г.

Представлена миниатюрная конструкция микрополоскового диплексера третьего порядка, содержащего на входе традиционный T -образный двухмодовый резонатор, а на выходе в каждом канале по одному двухмодовому резонатору оригинальной конструкции, регулярные полосковые проводники которых расщеплены с одного конца щелью. В формировании полосы пропускания каждого из каналов задействованы резонансы двух мод колебаний одного из расщепленных микрополосковых резонаторов и одной из мод T -образного микрополоскового резонатора. Разработанная конструкция технологична в изготовлении и позволяет независимо регулировать центральные частоты и ширины полос пропускания каждого из каналов в широких пределах. Перспективность разработки продемонстрирована достаточно высокими характеристиками действующего макета диплексера.

Как известно, в многоканальных системах связи широко используются мультиплексоры — частотно-избирательные устройства, предназначенные для разделения или объединения нескольких радиосигналов, разнесенных по частоте [1]. Один из подходов конструирования мультиплексоров основан на использовании самостоятельных двухканальных устройств — диплексеров, которые, как правило, строятся на связанных резонаторах. Широкое распространение в настоящее время получили микрополосковые диплексеры благодаря своей миниатюрности и технологичности в производстве. Разнообразные конструкции таких устройств содержат связанные микрополосковые резонаторы, образующие два полосно-пропускающих фильтра с одним общим портом [2–7]. При этом связь общего порта диплексера с резонаторами фильтров

осуществляется либо электромагнитно с помощью шлейфов [2–4], либо кондуктивно с помощью разветвленного проводника [5–7].

С целью миниатюризации микрополосковых диплексеров часто применяют двухмодовые резонаторы, две наименьшие собственные частоты которых совпадают с центральными частотами двух каналов устройства. Такой резонатор, подключенный к общему порту, заменяет по одному резонатору в фильтрах каждого канала, уменьшая тем самым размеры диплексера. Различные способы реализации этой идеи описаны в работах [8–12]. При этом в качестве двухмодовых резонаторов могут использоваться резонаторы со скачком волнового сопротивления [8–10], обусловленным ступенчатым изменением ширины полоскового проводника, которые допускают независимую настройку двух резонансных частот, но в очень ограниченных пределах [13]. Однако это ограничение снимается, если полосковый проводник двухмодового резонатора имеет *T*-образную форму [11,12], что позволяет независимо перестраивать резонансные частоты первых двух мод колебаний в широких пределах.

В работе [10] показано, что в микрополосковом диплексере не только входной резонатор, но и часть последующих резонаторов, формирующих полосы пропускания разных каналов, могут быть двухмодовыми. Однако важно отметить, что микрополосковые диплексеры можно строить, используя исключительно двухмодовые связанные резонаторы, что дает возможность еще больше уменьшить габариты устройства. Такая возможность, в частности, продемонстрирована теоретически и экспериментально в работе [8], в которой описана конструкция диплексера второго порядка, выполненного на паре двухмодовых микрополосковых резонаторов со скачком волнового сопротивления. В этой конструкции параметры обеих полос пропускания можно было независимо изменять в широких пределах, при этом для обеспечения оптимальной величины связи резонаторов с портами устройства использовались конденсаторы. Недостатком диплексеров [8,10] является невозможность близкого расположения полос пропускания, что обусловлено особенностями конструкций используемых двухмодовых резонаторов [13].

В данной работе описывается новая простая и технологичная в изготовлении конструкция миниатюрного микрополоскового диплексера третьего порядка, все три резонатора которого являются двухмодовыми. Представленная конструкция в отличие от конструкции [8] позволяет при необходимости повышения частотно-селективных свойств каналов без проблем наращивать число резонаторов. Используемые в ней двухмодовые резонаторы имеют прямоугольные полосковые проводники

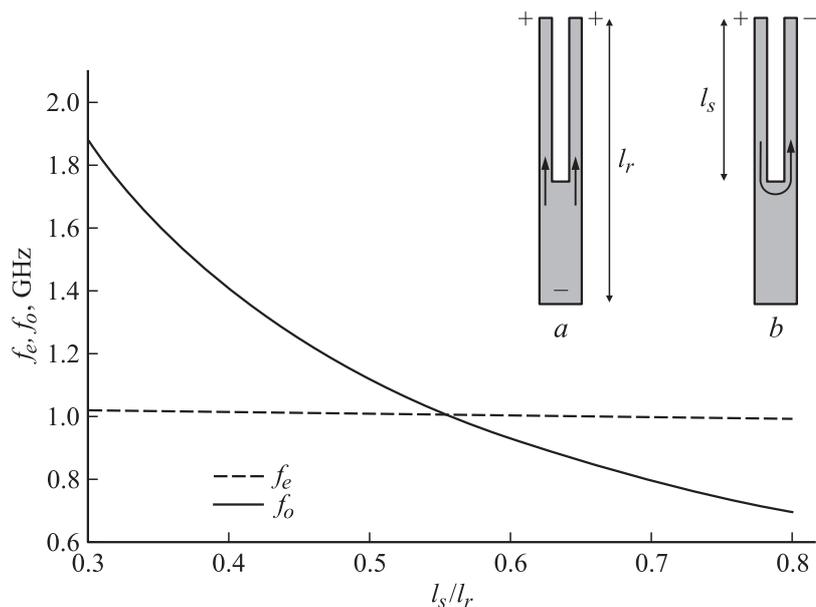


Рис. 1. Конструкция микрополоскового двухмодового резонатора и зависимости собственной частоты четного f_e и нечетного f_o типа колебаний от относительной длины щели.

длиной l_r , расщепленные с одной стороны узкой щелью длиной l_s (рис. 1). В таком резонаторе существуют две наинижешие моды колебаний. Первая из них четная, когда заряды на концах расщепленных проводников имеют одинаковые знаки (рис. 1, *a*), а вторая — нечетная, когда эти заряды противоположны по знаку (рис. 1, *b*).

Резонансные частоты четной f_e и нечетной f_o мод колебаний расщепленного микрополоскового резонатора являются корнями двух уравнений [14]

$$Z_e \operatorname{tg} \theta_1 + 2Z_1 \operatorname{tg} \theta_e = 0, \tag{1}$$

$$\cos \theta_o = 0, \tag{2}$$

где Z_1 и θ_1 — волновое сопротивление и электрическая длина отрезка одиночной микрополосковой линии на нерасщепленном участке резонатора, а $Z_e, Z_o, \theta_e, \theta_o$ — волновые сопротивления и электрические длины

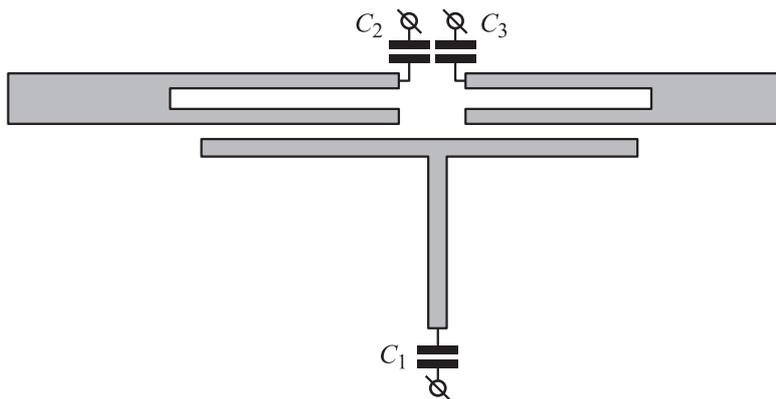


Рис. 2. Конструкция микрополоскового диплексера третьего порядка на двухмодовых микрополосковых резонаторах.

отрезка связанных микрополосковых линий на расщепленном участке для четных (e) и нечетных (o) волн. При этом резонансная частота четной моды почти не изменяется с увеличением длины расщепленного участка (штриховая линия на рис. 1), а частота нечетной моды, напротив, сильно зависит от этой длины (сплошная линия на рис. 1). В результате рассматриваемый двухмодовый резонатор позволяет обеспечить практически любое соотношение частот четных и нечетных колебаний, а значит, в диплексере, построенном на таких резонаторах, можно варьировать разнос между центральными частотами полос пропускания в очень широких пределах.

Схема микрополоскового диплексера приведена на рис. 2. Она содержит один T -образный микрополосковый резонатор и два электромагнитно взаимодействующих с ним расщепленных микрополосковых резонатора. Связь резонаторов с портами диплексера обеспечивают три емкости: емкость C_1 соединяет T -образный резонатор с общим портом каналов, C_2 соединяет порт низкочастотного канала с „длинным“ расщепленным резонатором, а C_3 соединяет порт высокочастотного канала с „коротким“ расщепленным резонатором. Центральную частоту полос пропускания каждого канала задают длина соответствующего шлейфа T -образного резонатора и длина прямоугольного полоскового проводника соответствующего расщепленного резонатора. Ширину

полосы пропускания каждого канала задают, во-первых, длина щели соответствующего расщепленного резонатора, которой определяет разность частот четной f_e и нечетной f_o мод колебаний в нем, а во-вторых, величина зазора между этим резонатором и соответствующим шлейфом T -образного резонатора. Уровни максимумов отражения в полосах пропускания задают величины емкостей, связывающих резонаторы с портами диплексера.

Таким образом, в формировании полос пропускания каждого канала диплексера участвуют три резонанса, два из которых являются резонансами двух наименьших мод колебаний расщепленного резонатора, а третий является резонансом одной из двух мод колебаний T -образного резонатора. Важно отметить, что в рассматриваемой конструкции каждый расщепленный двухмодовый резонатор задействован в формировании только одной из полос пропускания, что исключает необходимость настройки связей резонаторов одновременно на двух разнесенных частотах, как это требуется в конструкциях диплексеров на двухмодовых резонаторах, описанных в [8,10]. Этот факт не только значительно упрощает сам процесс конструирования предлагаемого диплексера, но и расширяет границы реализуемости относительных ширин полос пропускания в нем, причем независимо для каждого канала устройства.

Как уже отмечалось, от абсолютной величины разности частот четных и нечетных колебаний расщепленного резонатора зависит ширина соответствующей полосы пропускания диплексера. Однако важно заметить, что эта разность может быть как положительной, так и отрицательной (рис. 1). Поэтому, очевидно, существуют два разных значения длины щели в расщепленном резонаторе, при которых реализуется требуемая ширина полосы пропускания любого из каналов.

Экспериментальная проверка работоспособности описанной конструкции проводилась на действующем макете диплексера, изготовленном на подложке толщиной 1.0 mm из традиционного в СВЧ-технике материала — поликора, который имеет диэлектрическую проницаемость $\epsilon_r = 9.8$. Предварительно устройство было спроектировано с помощью известного пакета программ CST Microwave Studio. При этом для определенности была выбрана центральная частота низкочастотного канала $f_1 = 1.7$ GHz и высокочастотного канала $f_2 = 2.1$ GHz, а также зафиксированы абсолютная ширина их полос пропускания

$\Delta f = 0.2 \text{ GHz}$, измеренная по уровню -3 dB , и величина максимумов отражения СВЧ-мощности в этих полосах на уровне не хуже -14 dB . Кроме того, ширина полосковых проводников у обоих двухмодовых резонаторов на нерасщепленных участках была выбрана равной 4.5 mm , а на их расщепленных участках, как и у всех проводников T -образного резонатора, по 1 mm , а значит, ширина щели двухмодовых резонаторов составляла 2.5 mm . Величина зазора между расщепленным резонатором и связанным с ним соответствующим шлейфом T -образного резонатора выбрана одинаковой и равной 1 mm для обоих каналов. Поэтому настройка ширины полос пропускания каналов осуществлялась не только изменением длины расщепленных участков двухмодовых резонаторов, но и подбором длины их области связи с соответствующим шлейфом.

В результате синтеза были получены следующие значения конструктивных параметров диплексера. Длина шлейфа, подключаемого к общему порту через емкость $C_1 = 1.0 \text{ pF}$, равна 11.5 mm , длина двух других шлейфов T -образного резонатора составляет 17.0 и 10.8 mm . Длина проводника первого расщепленного резонатора, подключаемого к низкочастотному порту через емкость $C_2 = 1.1 \text{ pF}$, равна 28.5 mm , а второго расщепленного резонатора, подключаемого к высокочастотному порту через емкость $C_3 = 0.4 \text{ pF}$, равна 23.3 mm . При этом длины расщепленных участков этих резонаторов составляют соответственно 16.0 и 12.5 mm . Для удобства монтажа конструкции концы проводников, подключаемых к портам диплексера, изогнуты в сторону края подложки. Внесение таких изгибов не имеет принципиального значения и не препятствует работе устройства, но незначительно увеличивает площадь подложки до величины $58 \times 27 \text{ mm}^2$.

На рис. 3 представлена фотография действующего макета диплексера и его амплитудно-частотная характеристика, измеренная с помощью векторного анализатора цепей Rohde & Schwarz. Эксперимент показал, что полоса пропускания низкочастотного канала по уровню -3 dB имеет центральную частоту 1.69 и ширину 0.19 GHz , а полоса пропускания высокочастотного канала имеет центральную частоту 2.09 GHz и ширину 0.21 GHz , что достаточно хорошо согласуется с расчетными параметрами. Измерения показали также, что минимальные потери СВЧ-мощности в первом канале составляют 0.6 dB , а во втором канале — 1.1 dB . Максимальная величина отражений в полосе пропускания первого канала составляет -14.2 dB , а в полосе второго канала -14.4 dB .

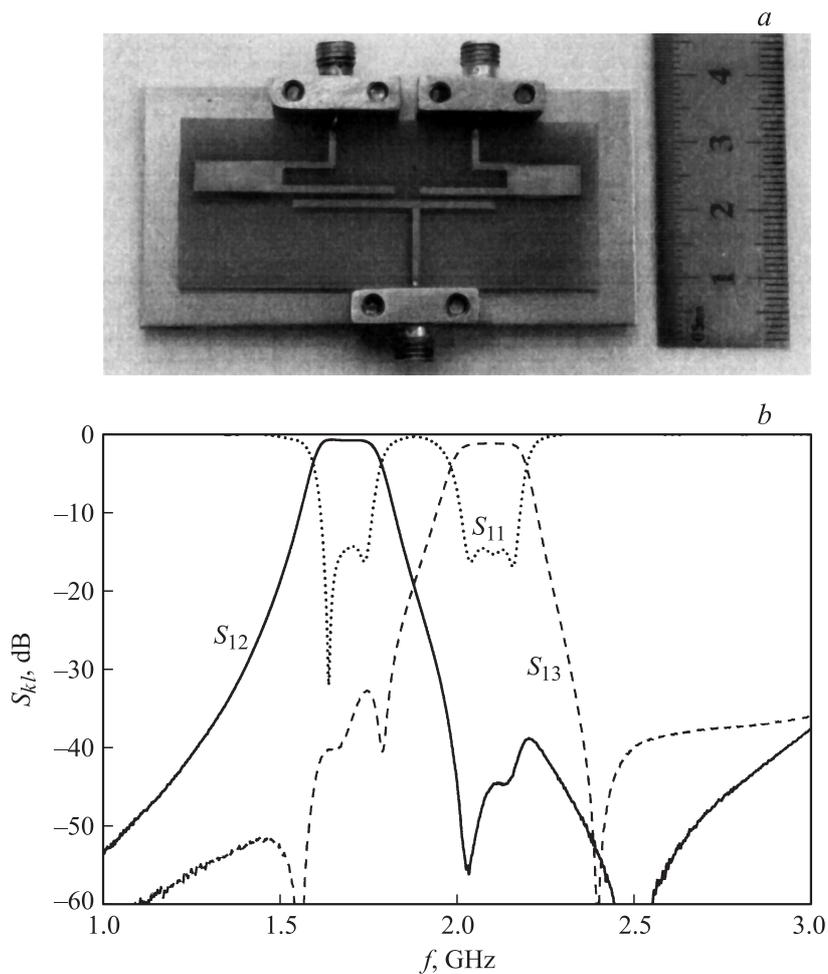


Рис. 3. *a* — фотография устройства; *b* — измеренные частотные зависимости потерь на отражение на общем порте диплексера S_{11} и потерь на прохождение в первом S_{12} и втором S_{13} каналах.

Таким образом, предложена простая миниатюрная и технологичная в изготовлении конструкция микрополоскового диплексера третьего порядка, выполненного исключительно на двухмодовых резонаторах,

имеющая при этом достаточно высокие электрические характеристики. Использование оригинальных расщепленных двухмодовых резонаторов в конструкции диплексера позволяет не только изменять центральные частоты полос пропускания в широких пределах, но и формировать ширину самих полос пропускания каналов независимо друг от друга также в широких пределах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Сибирского отделения Российской академии наук (междисциплинарный интегральный проект № 109) и Федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России 2009–2013 гг.“.

Список литературы

- [1] *Cameron R.J., Kudsia C.M., Mansour R.R.* Microwave filters for communication systems: fundamentals and applications. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2007. Ch. 18. P. 625.
- [2] *Sheta A.F., Coupez J.P., Tanné G., Toutaine S.* // Bandpass 1996 MTT-S International Microwave Symposium Digest. 1996. V. 2. P. 607–610.
- [3] *Budimir D., Athukorala L.* // IEE Antennas and Propagation Society International Symposium. July 5–11, 2008. San Diego. P. 1–4.
- [4] *Weng M.H., Huang C.-Y., Su Y.-K.* // IEEE Microwave and Wireless Components Letter. 2007. V. 17. N 7. P. 519–521.
- [5] *Tsai C.M., Lee S.-Y., Chuang C.-C., Tsai C.C.* // Application 2002 MTT-S International Microwave Symposium Digest. 2002. V. 3. P. 1927–1930.
- [6] *Shi J., Chen J.-X., Bao Z.-H.* // Progress In Electromagnetics Research. 2011. V. 115. P. 423–439.
- [7] *Hsu C.-H., Tung H.H., Hsu C.-K., Lin J.-S., Yang H.-W.* // Substrate Progress In Electromagnetics Symposium Proceedings. Suzhou, China, Sept. 12–16, 2011. P. 497–500.
- [8] *Беляев Б.А., Тюрнев В.В., Шихов Ю.Г.* // Электронная техника. Сер СВЧ-техника. 1997. № 2. С. 20–24.
- [9] *Weng M.-H., Wu H.-W., Shu K.* // Microwave and Optical Technology Letters. 2007. V. 49. N 5. P. 1222–1225.
- [10] *Chen C.-F., Huang T.-Y., Chou C.-P., Wu R.-B.* // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2006. V. 54. N 5. P. 1945–1952.

- [11] *Беляев Б.А., Лексиков А.А., Турнев В.В., Шихов Ю.Г.* // СВЧ диплексер на четвертьволновых микрополосковых резонаторах. Препринт № 774 Ф. Красноярск: Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, 1997.
- [12] *Chuang M.-L., Wu M.-T.* // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2011. V. 21. N 11. P. 583–585.
- [13] *Makimoto M., Yamashita S.* // IEEE Trans. 1980. V. MTT-28. N 12. P. 1413–1417.
- [14] *Turnev V.V., Serzhantov A.M.* // Progress In Electromagnetics Research C. 2011. V. 23. P. 151–160.