

УДК 621.372.852.1: 621.372.5

Глушеченко Э.Н.

ОАО "Научно-производственное предприятие "Сатурн". Украина, г. Киев

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МИКРОПОЛОСКОВЫХ НАПРАВЛЕННЫХ ФИЛЬТРОВ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

Анотація

Розглянута можливість конструктивної реалізації НВЧ напрямлених фільтрів бігучої хвилі в мікросмушковому виконанні. Наведені їх основні переваги та недоліки.

Abstract

The possibility of implementing design of microstrip directed traveling-wave filter has been studied. The main advantages and drawbacks of implementing design of of microstrip directed traveling-wave filter have been described.

Направленные фильтры бегущей волны (НФБВ) СВЧ как самостоятельный класс селективно-избирательных устройств известны давно [1]. Эти фильтры характеризуются хорошим согласованием по входу и выходу и не требуют дополнительных развязывающих устройств, т. е. имеют высокую — более 20 дБ — направленность. При этом в одном устройстве реализуются функции как полосно-пропускающего (ППФ), так и полосно-заграждающего (ПЗФ) фильтра. Структурная схема НФБВ приведена на рис. 1

Для обеспечения электрических характеристик НФБВ необходимо обеспечить между замкнутым кольцевым резонатором, образованным вторичными каналами $НО_1$ и $НО_2$ и четвертьволновыми отрезками линии передачи L_1 и L_2 , вдоль которого распространяется бегущая электромагнитная

волна, и первым и/или вторым НО связь порядка 3 дБ [2]. Только одновременное выполнение этих требований — наличие кольцевого резонатора бегущей волны, имеющего кратную длине рабочей волны λ электрическую длину, и его связи с каналами входа и выхода порядка 3 дБ — позволяет реализовать требуемый фильтр.

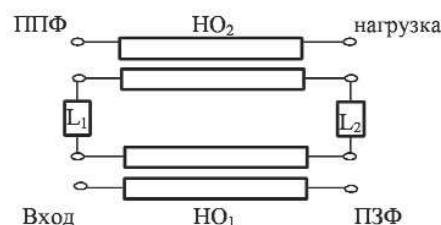


Рис. 1. Структурная схема направленного фильтра бегущей волны:

$НО_1$ и $НО_2$ — направленные ответвители;
 L_1 и L_2 — четвертьволновые отрезки линии передачи

Однако, несмотря на очевидные преимущества, НФБВ в устройствах СВЧ применяются не часто. Это следствие больших габаритов и трудностей его реализации в волно-водном и коаксиальном исполнении, а также на основе симметричных полосковых линий.

Перспективы минимизации НФБВ возникли с повсеместным использованием при создании СВЧ устройств микрополосковых линий передачи (МПЛ). Однако реализовать микрополосковый НО на двух параллельных связанных МПЛ с переходным ослаблением порядка 3 дБ невозможно

из-за технологических ограничений. Последнее связано с тем, что для реализации таких электрических параметров НО необходимо обеспечить протяженный, в четверть длины волны ($\lambda/4$), зазор между связанными МПЛ шириной менее 15 мкм, что существующие технологии производства МПЛ не обеспечивают.

Известен и часто применяется НО на связанных линиях со связью в 3 дБ, созданный на основе многопроводной МПЛ [3]. Однако его конструктивное решение не позволяет образовать с помощью вторичных каналов НО замкнутый непрерывный контур – кольцевой резонатор, вдоль которого могла бы распространяться бегущая электромагнитная волна. Особенность этого НО в том, что между полюсами вторичного канала расположены полюса основного канала, что исключает реализацию кольцевого резонатора.

Необходимый для создания микрополоскового НФБВ (МНФБВ) ответвитель предлагается реализовать, модифицировав известный НО типа “тандем” [4]. Идею модификации можно рассмотреть на основании структурных схем классического и модифицированного НО типа “тандем”, приведенных на рис. 2.

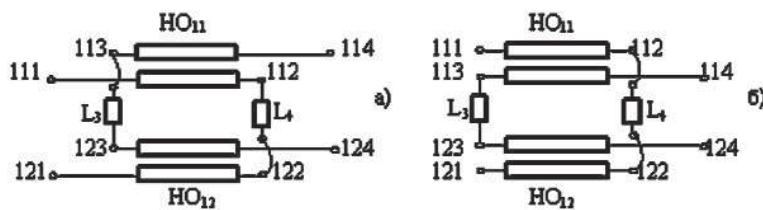


Рис. 2. Структурные схемы направленного ответвителя типа “тандем”: классического (а) и модифицированного (б)

Это составной ответвитель со связью порядка 3 дБ, образованный соединением двух четвертьволновых отрезков двух НО на двух связанных МПЛ, каждый из которых обладает связью порядка 8 дБ, т. е. не создает технологических проблем при реализации.

Классический НО типа “тандем” (рис. 2, а) образован двумя НО на двух связанных МПЛ (НО₁₁ и НО₁₂) со связью каждого 8,32 дБ. Один из каналов этих НО непосредственно связан с четвертьволновым отрезком МПЛ (111–112 с L_4 и 123–124 с L_3 , соответственно). Другой канал этих НО связан гальваническими перемычками со свободным полюсом четвертьволновых отрезков МПЛ (113–114 с L_3 и 121–122 с L_4). Сигнал СВЧ, поданный на полюс 121 “тандема”, на полюсах 111 и 114 “тандема” будет иметь ослабление 3,0 дБ, а его полюс 124 будет развязанным.

Идея модификации классического НО типа “тандем” показана на примере структурной схемы рис. 2, б. Канал 123–124 НО₁₂ с непосредственно

связанным $\lambda/4$ -отрезком МПЛ L_3 теперь непосредственно связан с каналом 113–114 НО₁₁. В то же время каналы 111–112 НО₁₁ и 121–122 НО₁₂ теперь связаны с отрезком МПЛ L_4 гальваническими перемычками. Однако передача СВЧ сигнала от полюса 121 “тандема” на полюса 111 и 114 “тандема” попрежнему имеет ослабление 3,0 дБ, а полюс 124 “тандема” – развязанный.

Таким образом решена указанная выше проблема конструктивно-технологической реализации микрополоскового НО со связью 3,0 дБ, вторичные каналы которых могут быть отрезками МПЛ L_1 и L_2 объединены в замкнутый кольцевой резонатор.

Если заменить приведенные на рис. 1 ответвители НО₁ и НО₂ модифицированными описанным образом НО типа “тандем”, то структурная схема МНФБВ примет вид, приведенный на рис. 3. А базовая топология такого МНФБВ приведена на рис. 4.

Как видно из рис. 4, в предложенной конструкции микрополоскового НФБВ замкнутый кольцевой резонатор образован вторичными четвертьволновыми каналами НО₁₁, НО₂₁, НО₂₂ и НО₁₂ “тандема”, непосредственно соединенными чет-

вертьволновыми отрезками МПЛ L_1, L_6, L_2 и L_3 , соответственно. Поскольку два НО “тандема” соединены между собой отрезками МПЛ длиной $\lambda/4$, а длина каждого НО – тоже $\lambda/4$, то электрическая длина резонансного кольца (резонатора бегущей волны) будет, в предложенном базовом варианте конструктивной реализации МНФБВ, равна $L_k =$

$= 2\lambda$, где λ – длина волны на рабочей (резонансной) частоте. При этом $\lambda/4$ -отрезки МПЛ, расположенные внутри кольца между двумя НО “тандема”, соединены с основными каналами ответвителей гальваническими перемычками.

В предложенной конструктивно-технологической реализации МНФБВ обеспечено одно из основных условий его функционирования – наличие замкнутого (непрерывного) кольцевого резонатора. Второе из условий – связь кольцевого резонатора порядка 3,0 дБ с каналами входа и выхода фильтра должно обеспечиваться автоматически конструкцией НО “тандема”, если правильно выполнить монтаж гальванических перемычек.

Гальванические перемычки в СВЧ устройствах на связанных МПЛ применяются часто, например, в НО со связью в 3 дБ, созданный на основе многопроводной МПЛ [3]. Они выполняются пайкой или микросваркой позолоченной фольгой или золотой проволокой $\varnothing 15\text{--}25$ мкм в зависимости от частотного диапазона фильтра.

Но при этом необходимо обеспечить не только надежный гальванический контакт, но и исключить возможность (путем подбора высоты перемычек) излучения через перемычки для функционирования электродинамической системы, что не является технологической проблемой.

Благодаря наличию НО, в резонансном кольце возникают два взаимноортогональных резонанса стоячей волны, соответствующих электрической и магнитной связи. Когда обе резонансные частоты совпадают, то составляющие двух резонансных видов колебаний накладываются друг на друга и образуют чистую бегущую волну в резонансном кольце, движущуюся по часовой стрелке.

Существенным недостатком большинства из известных фильтров СВЧ на основе МПЛ [5], которые относятся к классу зеркально отражающих устройств и основаны на отражении СВЧ-энергии вне полосы пропускания фильтра, является необходимость их согласования с основным трактом. Поскольку коэффициент стоячей волны ($K_{СТУ}$) в полосе пропускания мал, а в полосе заграждения — достаточно большой, то именно $K_{СТУ}$ определяет условия согласования любого фильтра с основным трактом, что создает определенные проблемы.

В этом плане направленные фильтры бегущей волны имеют существенное преимущество по сравнению с другими селективными устройствами СВЧ. Принцип функционирования МНФБВ, как уже отмечено выше, основан на возникновении во вторичных каналах всех четырех НО, объединенных отрезками МПЛ в замкнутый кольцевой резонатор, резонанса в виде бегущей волны. Поскольку входным и выходным элементом МНФБВ являются НО, то МНФБВ имеет идеальное согласование с трактом, так как $K_{СТУ}$ НО теоретически равен единице как при резонансе, так и вне его. А кольцевой резонатор не вносит рассогласования в основной тракт. Если сигнал (рис. 4)

поступает в плечо ①, то плечо ④ будет развязанным, в плече ③ будут реализованы характеристики ППФ, а в плече ② — характе-

ристики ПЗФ, т. е. реализованы параметры классического НФБВ. Длина резонансного кольца МНФБВ $L_K = 2\lambda$. Если на частоте резонанса длина волны равна λ , то в полосе пропускания (выход ППФ фильтра) потери будут минимальными, т. е. почти полная передача энергии со входа фильтра на его выход ППФ. Приведенная на рис. 4 конструкция МНФБВ защищена авторскими правами.

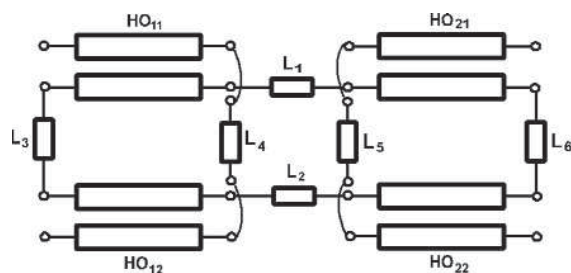


Рис. 3. Структурная схема МНФБВ:

НО₁₁, НО₁₂ — ответвители, а L₃ и L₄ — $\lambda/4$ -отрезки МПЛ — элементы модифицированного НО₁;
НО₂₁ и НО₂₂ — ответвители, а L₅ и L₆ — $\lambda/4$ -отрезки МПЛ — элементы модифицированного НО₂

Практически реализованы МНФБВ на частотах от 1,5 ГГц до 10,3 ГГц. Фильтры выполнены методом прецизионной фотолитографии на подложке из поликора толщиной 1 мм. Микрополосковый НФБВ на частоту $f = 1,5$ ГГц имел такие характеристики: во всех плечах фильтра $K_{СТУ} \leq 1,2$; прямые потери не превышают 0,3 дБ; уровень подавления вне полосы пропускания — более 23 дБ. На фильтр частоты $f = 9,9$ ГГц имел $K_{СТУ} \leq 1,35$; прямые потери не превышают 0,6 дБ, уровень подавления вне полосы пропускания — не менее 19 дБ. Полоса пропускания МНФБВ по уровню 3 дБ не превышала 4% от рабочей частоты.

Приведенные характеристики микрополосковых НФБВ практически подтверждают, что нагруженная добротность кольцевого резонатора фильтра аналогична нагруженной добротности единичного диэлектрического резонатора. Но при этом и сам резонатор, и фильтр, и СВЧ-устройство, в которое они входят, можно реализовать в едином технологическом цикле, т. е. в виде монолитного чипа.

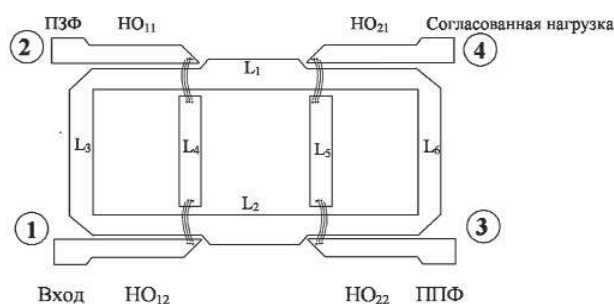


Рис. 4. Вариант топологии базового МНФБВ

Кроме указанных выше (в плане согласования с основным трактом) недостатков известных фильтров на МПЛ они не могут иметь управляемые характеристики в силу конструктивных реализаций. Это связано с тем, что встраивание в структуру фильтра любого нелинейного элемента создает неоднородность. В результате —

нарушение резонанса, что ведет не только к рассогласованию с основным трактом, но и к потере селективных свойств.

Однако МНФБВ и в этом плане имеет свое преимущество. Поскольку, как отмечено выше, кольцевой резонатор не вносит рассогласования в основной тракт, то в него можно встроить

МНФБВ не только скомпенсированы, но и получено усиление (рис. 5, б) на резонансной частоте. Увеличена также крутизна фронтов и, как следствие, возросло подавление сигнала вне рабочей полосы.

Используя те же преимущества МНФБВ, можно в резонансное кольцо встроить нелинейные элементы с иными (не усилительными) свойствами и получить управление другими параметрами МНФБВ.

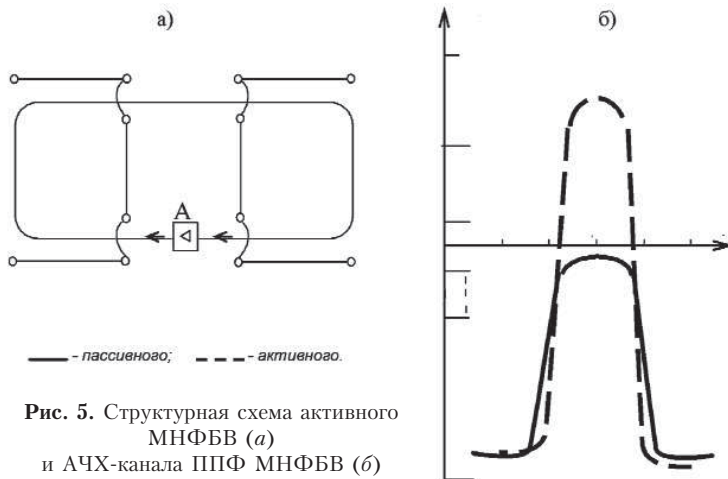


Рис. 5. Структурная схема активного МНФБВ (а) и АЧХ-канала ППФ МНФБВ (б)

активный (усилительный) элемент А без ухудшения селективных свойств фильтра. Такой активный фильтр (рис. 5, а) был реализован и запатентован [6].

Частотно-селективные свойства такого МНФБВ не ухудшились. В то же время были улучшены характеристики — потери ППФ-плеча

Литература

1. Харвей А.Ф. Техника сверхвысоких частот. — М.: Сов. радио, 1965. — Т. 1.
2. Халятин Д.Б. Коаксиальные и полосковые фильтры сверхвысоких частот. — М.: Связь, 1969. — 63 с.
3. Lange J. Interdigitated stripline quadrature hybrid // IEEE Trans. MTT, 1969. — V. 17. — № 12. — P. 1150–1151.
4. Shelton J.P., Wolf J., Van Wagoner R. Tandem couplers and phase shifters // Microwaves. — April 1965. — P. 14–19.
5. Влостовский Э.Г. Фильтры на параллельных связанных линиях для интегральных схем СВЧ. — М.: НИИ ТЭИР, обзор № 2/76. — 99 с.
6. Мікросмуговий напрямлений фільтр бігучої хвилі: Патент України на корисну модель, UA 40850 U, МПК, Н 01 Р 1/20, 27.04.2009, Бюл. № 8, 2009.