

# Высокоселективный микрополосковый фильтр на плавно-нерегулярных линиях передачи

Денис Клименко (г. Новосибирск)

Описаны варианты использования плавно-нерегулярных линий передачи в фильтрах на параллельно связанных линиях передачи с целью повышения селективности за счёт подавления паразитных резонансных частот. Характеристика разработанного СВЧ-фильтра показывает эффективность предложенного подхода, обеспечивая уровень внеполосного подавления в широкой полосе частот более 40 дБ.

## ВВЕДЕНИЕ

Современные сверхширокополосные радиолокационные системы и системы беспроводной связи требуют высокоэффективных и перестраиваемых радиочастотных систем, в том числе и полосно-пропускающих фильтров [1]. Микрополосковые фильтры на параллельно связанных линиях (СПЛП), впервые предложенные в 1958 году [2], являются одними из самых часто используемых типов фильтров в СВЧ- и ВЧ-системах. Такие фильтры имеют множество преимуществ, таких как простая процедура проектирования, планарная структура и широкий диапазон относительных полос пропускания. Фильтры на СПЛП могут быть с лёгкостью изготовлены и показывают достаточно хорошие характеристики. Однако, наряду с достоинствами, эти фильтры имеют и некоторые недостатки. Наиболее существенным из них для микрополоскового исполнения является снижение величины подавления за полосой пропускания, в результате чего появляются паразитные полосы пропускания на частотах  $2f_0$ ,  $3f_0$ ,  $4f_0$  и т.д. ( $f_0$  – центральная частота фильтра). Эти нежелательные полосы возникают из-за различных фазовых скоростей для чётных и нечётных мод секций связанных линий. Именно подавление таких нежелательных полос пропускания стано-

вится в последние годы важной задачей для конструкторов фильтров [3].

Для решения этой задачи вместо последовательных четвертьволновых соединительных линий мы использовали в фильтре эквивалентные Т-образные плавно-нерегулярные шлейфы, разомкнутые на конце, тем самым осуществив преобразование полосно-задерживающих фильтров в полосно-пропускающий фильтр. Получаемые таким образом фильтры имеют компактные размеры и широкую полосу заграждения: эквивалентные Т-образные плавно-нерегулярные линии передачи обеспечивают хорошую характеристику полосы пропускания на основной гармонике и отчётливую характеристику полосы задерживания на паразитных гармониках.

Нами был рассчитан микрополосковый фильтр на параллельно связанных линиях передачи с предлагаемой структурой на центральную частоту 2,5 ГГц и полосой пропускания 100 МГц. Экспериментальные результаты показали хорошие характеристики фильтра: величина подавления достигает 40 дБ в полосе до 6 ГГц.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФИЛЬТРА С ШИРОКОЙ ПОЛОСой ЗАГРАЖДЕНИЯ

Фильтр был реализован на подложке RT/Duroid 6010LM, имеющей следующие характеристики:  $\epsilon = 10,2 \pm 0,25$ ,  $b = 0,64 \pm 0,1$  мм,  $t = 35$  мкм,  $\text{tg}\delta = 0,0023$  при 10 ГГц. Расчётная центральная частота – 2,5 ГГц, полоса пропускания 100 МГц. Входной и выходной порты имеют сопротивление 50 Ом.

Для того чтобы подавить паразитные полосы пропускания в полосе задерживания без увеличения размеров фильтра, последовательные линии передачи были заменены Т-образными плавно-

нерегулярными линиями, разомкнутыми на концах. Такие шлейфы имеют лучшее ослабление на резонансных частотах и малые вносимые потери на других полосах частот. Фотография получившегося после трансформации полосно-пропускающего фильтра приведена на рис. 1. Следует отметить, что три плавно-нерегулярных шлейфа, разомкнутых на концах, добавляют несколько нулей передачи в полосу задерживания, позволяя устранить паразитные гармоники.

## СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЙ И ХАРАКТЕРИСТИКИ

Для разработанного микрополоскового фильтра шпилечного типа были произведены измерения S-матриц и получены характеристики импеданса при комнатной температуре. Схема измерений представлена на рис. 2. Измерительной системой является векторный анализатор цепей компании *Robde & Schwarz*, позволяющий одновременно производить измерения S-матрицы в полосе от 9 кГц до 10 ГГц в различных режимах мощности и согласованный с 50-омным волновым сопротивлением. Отметим, что все измерения производились при комнатной температуре.

Параметры S-матрицы в диапазоне частот от 9 кГц до 10 ГГц представлены на рис. 3. Кривые S21 и S12 показаны чёрным цветом, S11 и S22 – серым.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе поиска методов улучшения характеристик СВЧ-фильтров мы смогли интегрировать полосно-задерживающую характеристику в стандартный фильтр, тем самым получив полосно-пропускающий фильтр с широкой полосой заграждения. Более того, более высокие характеристики не потребовали увеличения размеров фильтра. Экспериментальные измерения параметров фильтра подтвердили, что предлагаемая комбинированная структура имеет полосу пропускания 100 МГц на центральной частоте, обеспечивая при этом внеполосное затухание не менее 40 дБ в полосе частот от 3 до 10 ГГц.

Достигнутые характеристики позволяют сделать вывод, что одним из наи-

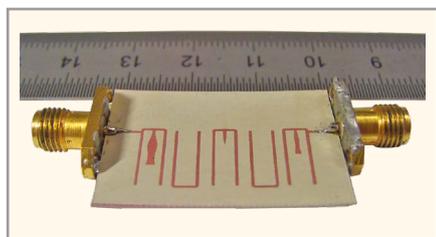
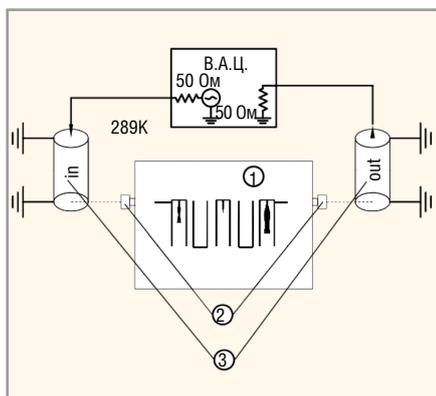


Рис. 1. Внешний вид фильтра с плавно-нерегулярными шлейфами



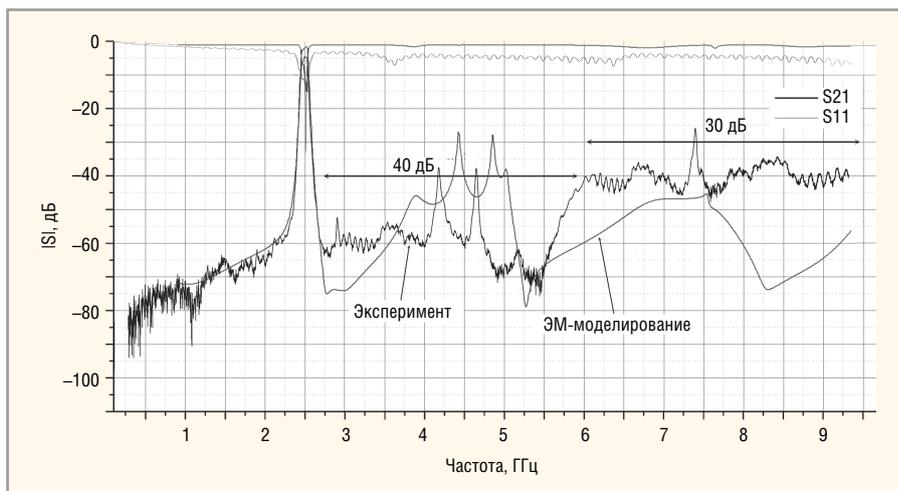
**Рис. 2.** Схема измерений характеристик полосно-пропускающего фильтра шпилечного типа:

1 – фильтр на подложке, 2 – 50-Ом разъёмы SMA, 3 – гибкий 50-Ом коаксиальный кабель

более перспективных направлений использования таких фильтрующих структур является частотная селекция во входных СВЧ-цепях измерения характеристик состояний трёхконтактных кубитов на частотах 1...10 ГГц.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. *Hunter I.C.* Microwave Filters Applications and Technology. IEEE Trans. on Micro-



**Рис. 3.** S-параметры полосно-пропускающего фильтра шпилечного типа при комнатной температуре

wave Theory Tech. 2002. Vol. 50, № 3. P. 794–805.  
 2. *Cohn S.B.* Parallel-Coupled Transmission-Line Resonator Filters. IRE Trans. Microw. Theory Tech. 1958. Vol. 6, № 2. P. 223–231.  
 3. *Kuo J.T. and Jiang M.* Suppression of Spurious Resonance for Microstrip Band Pass Filters Via Substrate Suppression. Asia-Pacific Microwave Conf. Kyoto, Japan. 2002. P. 497–500.

4. Микрополосковые фильтры шпилечного типа для криогенных высокочувствительных систем измерений / Б.И. Иванов, Д. Н. Клименко // Научный вестник НГТУ. 2011. № 4 (45). С. 155–160.  
 5. Narrow Bandpass Cryogenic Filter for Microwave Measurements / B.I. Ivanov, D.N. Klimenko, E. Il'ichev, A.N. Sultanov, H. Meyer // Review of Scientific Instruments. – Rev. Sci. Instrum. 84. 054707 (2013). ©