

# ЧАСТОТНЫЕ ФИЛЬТРЫ\*

При формировании и обработке сигналов электронных систем широко используются методы их фильтрации и преобразования в частотной области. Зачастую это удобнее и точнее выполнять путем разделения сигналов по полосе частот, улучшения соотношения энергий полезного сигнала и помехи в нужной полосе частот, решения проблем электромагнитной совместимости и т.п. с помощью преобразования Фурье, ставящего в соответствие зависящему от времени  $t$  сигналу его образ в виде функции от частоты  $f$ . При совместной передаче нескольких узкополосных сигналов в общей частотной полосе необходимо их суммировать при допустимых перекрестных искажениях. Эти задачи решают частотные фильтры, применяемые в большинстве электронных систем. Реализация фильтров с высокими качественными показателями, вплоть до частот миллиметрового диапазона, – сложная технологическая задача, которую, так или иначе, вынуждены решать разработчики электронной аппаратуры. Чтобы помочь им в оценке практических возможностей частотных методов обработки и в обоснованном выборе компонентов требуемого качества из имеющихся на мировом рынке, рассмотрим основные технические показатели таких фильтров.

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ

Частотный фильтр – линейная электрическая цепь с сосредоточенными или распределенными реактивными параметрами. Характеризуется он комплексным коэффициентом передачи  $W(f)$ , который описывается амплитудно-частотной  $|W(f)|$  и фазочастотной  $\varphi(f) = \arg[W(f)]$  характеристиками (АЧХ и ФЧХ, соответственно). Функция  $W(f)$  описывает импульсную реакцию  $h(t)$ , возникающую на выходе такого фильтра при поступлении на его вход короткого импульса. Крутизна ФЧХ фильтра определяет зависящее от частоты групповое время запаздывания (ГВЗ – group delay) отклика  $\tau_{гр}(f) = -(1/2\pi) d\varphi(f)/df$ .

Для обработки сигналов чаще всего используются:

- фильтры нижних частот, ФНЧ (Low-Pass Filter – LPF);

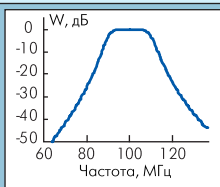
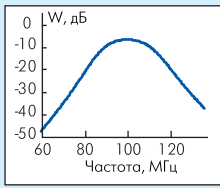
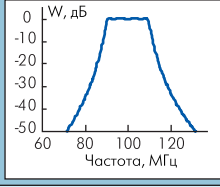
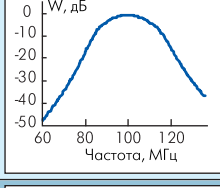
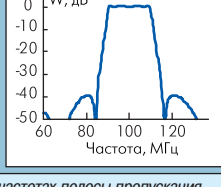
Л.Белов



- фильтры верхних частот, ФВЧ (High-Pass Filter – HPF);
- полосно-пропускающие фильтры, ППФ (Band-Pass Filter – BPF);
- полосно-заграждающие фильтры, ПЗФ (Band-Reject Filter – BRF-notch).

Физически реализуемые фильтры имеют АЧХ с конечной крутизной изменения коэффициента передачи на границах полосы пропускания и заграждения и, соответственно, конечное ГВЗ (табл. 1). Если полоса пропускания ППФ или полоса заграждения ПЗФ мала по сравнению с его средней частотой, их АЧХ симметричны, а формы изменения относительно средней частоты подобны характеристикам принимаемых в качестве прототипа ФНЧ или ФВЧ, соответственно.

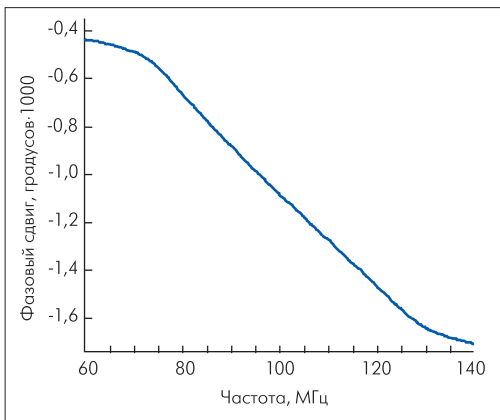
Таблица 1. Типы и характеристики частотных фильтров

Тип фильтра	Особенности	Вид АЧХ*
Баттерворта	Монотонная и наиболее плоская АЧХ; монотонная ФЧХ во всей полосе частот при высокой избирательности; большая неравномерность ГВЗ	
Бесселя	Монотонная АЧХ при низкой избирательности; гладкая ФЧХ; наименьшее изменение ГВЗ в полосе пропускания	
Чебышева-1	Равноволновые пульсации АЧХ в полосе пропускания, монотонное изменение АЧХ в полосе заграждения; гладкая ФЧХ; значительная неравномерность ГВЗ	
Линейная ФЧХ	Гладкая АЧХ при невысокой избирательности; высокая линейность ФЧХ в полосе пропускания; небольшие пульсации ГВЗ	
Эллиптический (фильтр Кауэра, SELF)	Задаваемые уровни равноволновых пульсаций АЧХ в полосах пропускания и заграждения; значительные нелинейность ФЧХ и неравномерность ГВЗ	

\*Расчетный вид АЧХ приведен для ППФ с  $n = 4$  при граничных частотах полосы пропускания 0,9 и 1,1 от центральной частоты; неравномерность АЧХ в пределах полосы пропускания задана равной 0,5 дБ, уровень ослабления в полосе заграждения – 40 дБ.

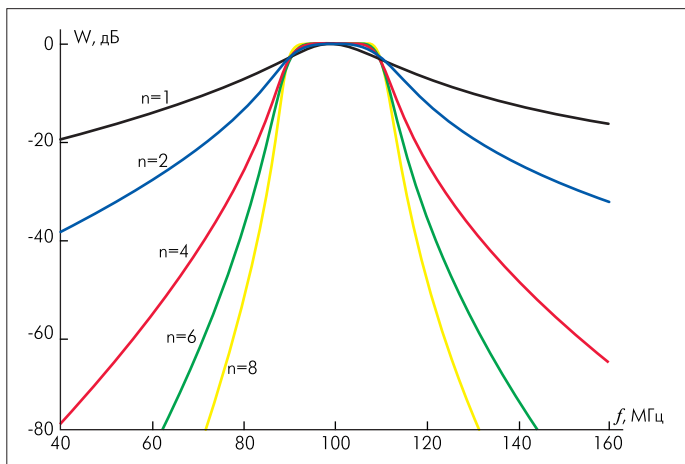


Вид АЧХ и ФЧХ фильтра зависит от числа последовательно включенных частотно-зависимых звеньев  $n$  (порядок фильтра) и от расположения нулей и полюсов коэффициента передачи. Путем подбора расположения нулей и полюсов коэффициента передачи (выбора связи между реактивными элементами частотно-зависимого звена) можно задать особые свойства фильтра высокого порядка ( $n \geq 2$ ).



**Рис.1. Фазочастотная характеристика восьмизвонного ППФ, настроенного на ее высокую линейность**

Существует множество вариантов настройки фильтра на заданную избирательность, на наибольшую линейность ФЧХ, на наименьшую неравномерность ГВЗ или на определенный компромисс свойств. В качестве типовых настроек применяют АЧХ вида Чебышева-1 или SELF (Symmetrical Equiripple Lumped Filter). Фильтры, представленные в табл.1, не единственно возможные. Например, можно выполнить настройку на характеристику типа Чебышева-2 (инверсный фильтр Чебышева) с гладкой АЧХ в полосе пропускания и заданным уровнем пульсаций в полосе заграждения или на характеристику с максимальной линейностью ФЧХ. При правильной настройке ППФ с числом звеньев  $n = 8$  при средней частоте 100 МГц и относительной ширине полосы  $\pm 5\%$  (рис.1) в полосе частот 75–125 МГц можно получить изменение фазового набега в пределах  $540^\circ$  с отклонением от линейности не более  $3^\circ$ .



**Рис.2. Амплитудно-частотные характеристики ППФ Баттерворта на полосу частот 90–110 МГц с различным числом звеньев**

Увеличение числа звеньев (порядка) фильтра позволяет улучшить прямоугльность АЧХ и увеличить соотношение между затуханием в полосах пропускания и заграждения (рис.2). Но возможность такого увеличения не безгранична. Повышение качества фильтрации с увеличением порядка сопровождается ростом потерь в полосе пропускания, которые пропорциональны числу звеньев. Их допустимое число существенно ограничено такими факторами, как повышенные требования к точности настройки фильтра и стоимости его изготовления, ухудшение надежности настройки в диапа-

зоне внешних воздействий при увеличении числа звеньев. Практически фильтры выпускаются с числом звеньев от 2 до 16.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧАСТОТНЫХ ФИЛЬТРОВ

Помимо выбранного типа АЧХ и числа звеньев  $n$ , технически корректны следующие характеристики фильтров:

- **ширина полосы частот** (Bandwidth) для заданного уровня потерь. Например, полоса пропускания для ППФ по умолчанию устанавливается на уровне  $-3$  дБ (Passband –  $BW_{3dB}$ ), а полоса заграждения – по уровню  $-40$  дБ (Stopband –  $BW_{40dB}$ ). Относительная ширина полосы (Percent Bandwidth) для ППФ и ПЗФ нормируется в процентах от значения центральной частоты, то есть от полусуммы значений граничных частот на уровне  $-3$  дБ. Кроме граничной частоты на уровне  $-3$  дБ указывают предельные значения минимальной и максимальной частот, для которых нормируется форма АЧХ;
- **время установления отклика** (Rise Time) – время, в течение которого после включения сигнала амплитуда отклика на выходе изменяется от 10 до 90% от максимальной амплитуды;
- **уровень потерь** (Insertion Loss – IL) в полосе прозрачности, пропорциональный **Q-фактору** (добротности) фильтра и обратно пропорциональный относительной полосе пропускания  $BW_{3dB}$ :  $IL = 20 \lg \frac{Q}{Q - 1,414/BW_{3dB}}$ . Некоторые производители различают потери сквозного прохождения (Dissipation Loss) и потери на отражение (Reflection Loss);
- **коэффициент прямоугльности**  $K_n$  (Shape Factor). Нормируется по умолчанию как отношение полосы по уровню  $-30$  дБ к полосе по уровню  $-3$  дБ;
- **потери в полосе заграждения** (изоляция нежелательной полосы);
- **уровень неравномерности** (пульсации) коэффициента передачи либо в полосе прозрачности (Passband Ripple), либо в полосе заграждения (Stopband Ripple), либо в обеих полосах, измеряемый в децибелах;
- **коэффициент стоячей волны** (Voltage Standing Wave Ratio – VSWR) или коэффициент отражения в полосе пропускания;
- **уровень входной мощности**  $P_{вх}$ . Значение входной мощности ограничивается не только электрической прочностью фильтра. Из-за наличия в составе фильтра активных компонент указывают входную мощность, при которой потери возрастают на 1 дБ –  $P_{1дБ}$ , а также входную мощность, при которой для двухчастотного входного сигнала уровень комбинационных компонент третьего порядка на выходе будет равен уровню основных компонент –  $P_{р3}$  (Intercept Point 3 order). Причина появления

интермодуляционных искажений в, казалось бы, линейном фильтре заключается в том, что в состав большинства фильтров входят индуктивные элементы, выполненные на базе ферритовых материалов, магнитная проницаемость и потери которых нелинейно зависят от амплитуды сигнала, а в состав электрически перестраиваемых фильтров – нелинейные емкости, варикапы (кроме того, некоторые фильтры интегрированы с транзисторными усилителями);

- **диапазон перестройки** (Tuning Range), **скорость перестройки** (Tuning Speed), **вид и разрядность** цифрового интерфейса, напряжения и токи **питания и управления**;
- **устойчивость к внешним воздействиям**: диапазон рабочих температур, допустимые значения ударопрочности и вибростойкости, стойкости к перепадам температуры, давления и влажности, к уровню проникающей радиации;
- **массогабаритные и установочные показатели**, входные и выходные импедансы, вид разъемов подключения по входу и выходу.

Для некоторых приложений надо учитывать **зависимость фазового сдвига** (Insertion Phase) от частоты гармонического сигнала в полосе пропускания фильтра (см. рис. 1). Для ППФ и ПЗФ указывают нижнюю и верхнюю границы полосы прозрачности и полосы заграждения по заданным уровням; центральную частоту и относительную ширину полосы прозрачности или заграждения.

### ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ФИЛЬТРОВ И УСТРОЙСТВА НА ИХ ОСНОВЕ

Сегодня существуют самые разнообразные технологии формирования электрических цепей с малыми потерями, проявляющих частотно-зависимые свойства (фильтров). Можно отметить следующие конструктивные варианты:

- **на сосредоточенных LC-элементах**: недорогие, из-за погрешностей выполнения число звеньев ограничено, используются на частотах менее 100 МГц;
- **на микроминиатюрных структурах**: имеют малые габариты и массу, допускают поверхностный монтаж;
- **на цепочках металлических резонаторов**: обладают высокой селективностью, обеспечиваемой посеребрёнными металлическими резонаторами и калиброванной связью;
- **на керамических резонаторах**: благодаря высокой диэлектрической проницаемости имеют малые габариты, ограничены частотами до 2–3 ГГц;
- **коаксиальные** (трубчатые): выпускаются складные варианты уменьшенных габаритов;
- **на микрополосковых связанных линиях** (Suspended Substrate Stripline – SSS): применяются на частотах от 100 МГц до 40 ГГц, удобны для поверхностного монтажа;
- **на волноводах цилиндрической или прямоугольной формы**: характеризуются высокими значениями добротности, до  $Q = 25000$ ;
- **на поверхностных акустических волнах** (ПАВ): выполняются на кристалле пьезокварца путем формирования топологии преобразователей; технология ПАВ обеспечивает высокую воспроизводимость характеристик фильтров с числом звеньев до 16. Для фильтров этого типа характерны дополнительные потери на прямое и обратное электроакустическое преобразование, поэтому они часто изготавливаются совместно с интегральными широкополосными усилителями;
- **кварцевые** (Monolithic Crystal Filters – MCF): отличаются высокой воспроизводимостью, число звеньев – 10–12, устойчивы к механическим воздействиям, пригодны для поверхностного монтажа;

Таблица 2. Сопоставление характеристик фильтров, выполненных по разным технологиям

Технология	Диапазон частот, МГц	BW/ $f_{cp}$ , %	$Q \cdot 10^{-3}$	$n$	Особенности
На сосредоточенных LC-элементах	0–100	3–200	0,02–1	2–10	Низкая стоимость
Микро-миниатюрные	5–40000	3–100	0,02–5	2–8	Малые габариты, поверхностный монтаж
Резонаторные	30–26000	0,2–66	0,1–1	2–15	Малые потери, устойчивость к внешним воздействиям
Керамические	400–3000	0,5–5	0,5–20	2–10	Малые габариты, устойчивость к внешним воздействиям, низкая стоимость
Коаксиальные трубчатые	50–20000	3–50	0,2–1	2–9	Малогабаритные ФНЧ и ФВЧ
Микрополосковые	100–40000	0,5–30	0,2–10	3–16	Высокая селективность, малые габариты
Волноводные	4000–40000	0,5–5	1–25	2–8	Низкие потери, высокая мощность
Кварцевые и ПАВ	10–2500	0,1–5	5–30	5–16	Высокая повторяемость, большая селективность
Перестраиваемые	20–3000	1–5	0,02–0,5	2–4	ППФ и ПЗФ с цифровой перестройкой до октавы

- **перестраиваемые**: предусматривают механическую сопряженную перестройку двух-трех резонаторов; для электронной перестройки граничных частот включаются варикапы или ферритовые резонаторы на железо-иттриевом гранате (ЖИГ-перестройка), число звеньев и диапазон управления ограничены возможностями сохранения формы АЧХ в диапазоне перестройки;
- **цифровые**: входной и выходной сигналы представляют собой потоки цифровых данных с частотой дискретизации по времени  $f_d$  и заданной разрядностью по ординатам. Нужные частотные свойства фильтра формируются блоками цифровой обработки интегральной микросхемы. Возможна реализация цифровых фильтров очень высокого порядка (до  $n = 150$ ) при соответствующем качестве фильтрации, а также получение характеристик, недостижимых в аналоговых фильтрах (например, ограниченной по времени реакции на скачок входного сигнала). Однако на частотах, превышающих половину частоты дискретизации  $f_d/2$ , они имеют паразитные полосы пропускания и требуют включения на входе АЦП аналогового ФНЧ с  $BW3dB < f_d/2$  и ЦАП на выходе. Рабочая частота ограничена быстродействием цифровой части. Для выравнивания коэффициента передачи ЦАП в широком диапазоне изменения тактовой частоты (например, в синтезаторах частот) используются дополнительные аналоговые корректирующие фильтры с АЧХ вида  $x/(\sin x)$ ;
- **фильтры волоконно-оптических линий связи** (ВОЛС): позволяют улучшить отношение сигнал/шум и увеличить протяженность до регенерации ВОЛС, по которой информация передается на фиксированных несущих частотах ИК- и видимого диапазонов, определяемых типом используемого лазера.

Выбор варианта фильтра определяется диапазоном частот, массогабаритными показателями, устойчивостью к внешним воздействиям (табл.2).

На основе частотных фильтров с фиксированными или управляемыми параметрами выпускаются более сложные устройства. Отметим следующие.

**Частотный мультиплексор** – частотно-разделительное устройство с  $N$  выходами, различающимися расположением частотных полос пропускания и заграждения. В зависимости от числа выход-



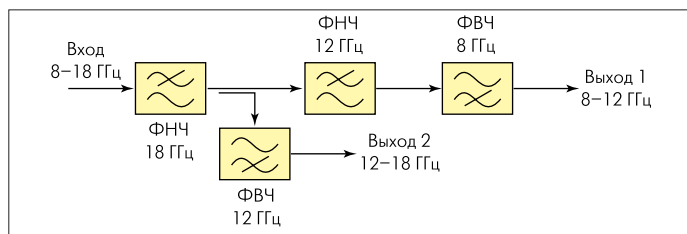


Рис.3. Структура диплексора на полосу частот 8–18 ГГц

ных каналов возможны диплексеры ( $N = 2$ ), триплексеры ( $N = 3$ ), квадриплексеры ( $N = 4$ ) и т.д. В большинстве случаев частотные мультиплексоры обладают свойством взаимности, то есть могут использоваться для объединения двух или нескольких сигналов в общую полосу частот. Типичная структура диплексера (Diplexer) приведена на рис.3. Для улучшения развязки портов входа и выхода, а также выравнивания коэффициентов отражения в широком частотном диапазоне входных сигналов в состав диплексера входят ФНЧ и ФВЧ с соответствующей настройкой. Отдельные фирмы для улучшения взаимной изоляции применяют в диплексерах мостовые балансные схемы и поляризационные решения. Для таких устройств, кроме перечисленных выше параметров, необходимо указывать характеристики взаимных связей (изоляция каналов) и частотные зависимости основных параметров.

**Подстраиваемый частотный фильтр (Tunable Filter)** – выпускается на основе ППФ с управляемым положением полосы пропускания (рис.4). Пример такого фильтра – модель Trak-Pole фирмы Pole Zero. Фильтры этого вида автоматически настраиваются на наибольший коэффициент передачи в полосе перестройки.

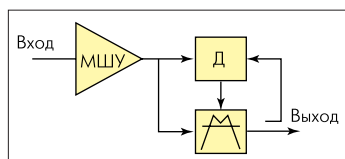


Рис.4. Структурная схема фильтра с автоподстройкой на несущую частоту входного сигнала

**Дуплексер (Duplexer)** – используется при работе с общей широкополосной антенной для смещенных по частоте полос одновременной передачи и приема (дуплексная связь). При такой передаче необходимо обеспечить частотное разделение канала, по которому сигнал от передатчика поступает к антенне, от канала передачи сигнала, приходящего от антенны к приемнику, при высокой межканальной изоляции (рис.5). Для обеспечения малых потерь в полосе прозрачности и допустимого уровня интермодуляционных искажений комбинация ППФ и ПЗФ в канале передатчика должна выполняться с учетом повышенной проходящей мощности. Наряду с невзаимными направляющими устройствами (направленными ответвителями, ферритовыми вентилями и циркуляторами) диплексеры предотвращают попадание мощного сигнала собственно передатчика на вход маломощного усилителя приемника.

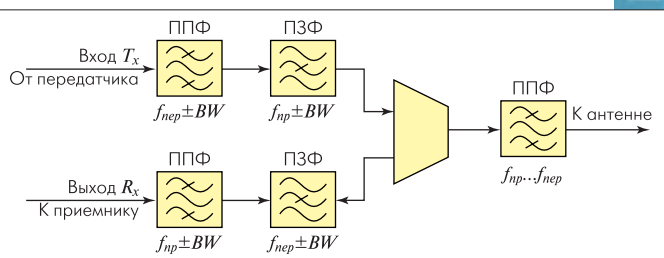


Рис.5. Структурная схема дуплексера

**Коммутатор частотных каналов** – частотно-разделительное устройство с одним входом и несколькими выходами (от 6 до 64). По командам управления коммутатор частотных каналов подключает на выход один, несколько или ни одного частотного канала.

**Коммутируемый банк фильтров** – имеет один вход и один выход, между которыми с помощью коммутирующих диодов включается тот или иной фильтр.

**Гармониковый фильтр** для частот до 40 ГГц – это комбинация ФНЧ + ФВЧ и резонансных поглощающих цепей на заданную гармонику. Характеризуется малыми потерями на заданной частоте и полосно-заграждающими свойствами на второй, третьей и четвертой гармониках. При фиксированной несущей частоте такой фильтр более эффективен, чем радиочастотный ФНЧ с частотой среза, превышающей несущую частоту, который пропускает высокую мощность и используется для снижения внеполосных излучений передатчиков на гармониках несущей.

**Дисперсионный фильтр** – выполняется по технологии ПАВ и имеет в определенной полосе частот заданную, например квадратичную, зависимость фазового сдвига от текущей частоты при плоской АЧХ. Применяется в качестве узла расширения полосы частот, занимаемой импульсным сигналом, или в качестве согласованного фильтра сжатия сложного сигнала по длительности.

## НОМЕНКЛАТУРА ЧАСТОТНЫХ ФИЛЬТРОВ, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ НА РЫНКЕ

Сегодня на рынке представлены тысячи моделей частотных фильтров и устройств на их основе, выпускаемых несколькими сотнями мировых производителей. Наиболее популярны изделия фирм Advanced Microtek, Celltronik, Coilcraft, ColemanMW, Delta Microwave, Electromagnetic Technologies, ES Microwave, Filtronetics, FSY, Flann Microwave, K&L, Lorch, Mini-Circuits, Microwave Filter Company, Millitech, Omniyig, Pole Zero, Reactel, Reeves Hoffman, Taiyo Ynden, Tekelec Temex, Trilithic, QuartzCom, Salisbury, SunWave, SuperConductor, Spectrum Control [2].

Большинство фирм производят заказные фильтры с заданной совокупностью электрических и механических параметров. Выпускаются и изделия широкого применения, предназначенные для

Таблица 3. Параметры ФНЧ и ФВЧ

Модель	Фирма	Тип	Технология	3 дБ BW, ГГц	$IL_{pass}$ , дБ	$K_n$	$IL_{zarp}$ , дБ
5IL31-2250/T3000-O/O	K&L	ФНЧ	Сосредоточенные LC	3	0,5	1,3:1; n = 5	-47
5ML1-250/T2000-P	K&L	ФНЧ	Микроминиатюрные	0,250	1,3	1,33:1; n = 5	-50
P7LP-507	Coilcraft	ФНЧ	Сосредоточенные LC	0,500	0,2	1,2:1; n = 7	-50
11SX10-18	K&L	ФВЧ	Полосковые линии	12–18	1	1,2:1	-55
3DH1-2000/T18000-O/O	K&L	ФВЧ	Распределенные параметры	2,1–18	0,5	2,2:1	-35
M27-2	Microwave Filter Company	ФНЧ, ФВЧ	ВОЛС	Оптический диапазон	-	-	-
FHP-08, 12, 10, 15, 19, 22, 28, 42	Millitech	ФВЧ	Волноводный	18–110	0,7–1,5	45 дБ/ГГц	-45
AM-180Q, AM-750Q-HARM	Advanced Microtek	ФВЧ+ФНЧ	Гармониковый	3,95–40	1	-	-45
4PL4	Reactel, Inc.	ФНЧ	Гармониковый	0,010–4	< 1	-	-50
RHP-1000	Mini-Circuits	ФВЧ	Микроминиатюрный с малыми потерями	2,2	< 1	2,2:1	-40

массового потребления применительно к стандарту системы (например, для аппаратуры радиосвязи и радионавигации). В табл.3 представлены параметры типичных фильтров классов **ФНЧ** и **ФВЧ**. Можно особо выделить миниатюрные недорогие керамические СВЧ-фильтры для поверхностного монтажа фирмы Mini-Circuits, изготовленные по многослойной технологии Blue Cell. Полоса пропускания ФНЧ серии LFCN – 500 МГц–5,4 ГГц, полоса заграждения с ослаблением -25...-45 дБ – до 9 ГГц. Полоса заграждения ФВЧ серии HFTC 0,7–3 ГГц при ослаблении от -100 до -40 дБ, полоса пропускания – 1,3–7 ГГц.

**Фильтры электромагнитных помех** (EMI Filter), предназначенные для линий электропитания или шин цифровых передач, относятся к классу ФНЧ. Такие фильтры выпускаются, в частности, фирмами Coilcraft (модель CCDLF 10000 для 10-разрядной шины с током до 500 мА), Spectrum Control, Taiyo Ynden и др. Номенклатура фильтров типа EMI охватывает изделия с полосой прозрачности от 2 до 100 МГц и ослаблением помех в полосе частот до 10 ГГц.

Таблица 4. Параметры ППФ и ПЗФ

Модель	Фирма	Тип	$f_{раб}$ , ГГц	3dB BW, МГц	$IL_{pass}$ , дБ	$K_n$	$IL_{загр}$ , дБ
BP-2000-10	K&L	ППФ	2	200	<1	8:1	-60
S5914	Delta Microwave	ПЗФ	1–15	500	1	2,2:1	80
IWD1695	Coleman	ППФ	16,8	300	1,6	4:1	-40
B05025G1	Microwave Circuits	ППФ	24,9	1200	1,4	2,5:1	-60
QUF2450L311	QuartzCom	ППФ	2,45	±50	0,7	1,3:1	-30
855291	Sawtek	ППФ ПАВ	0,4	±0,250	6	1,2:1	-55
N55	K&L	ПЗФ	2–10	5–20%	0,5	1,3:1	-50
SBP-3R6-836BP6-15M	SGC Techno	ПФ ПАВ	0,836	±3	4,5	1,5:1	-70

Таблица 5. Параметры мультиплексоров

Модель	Фирма	Число каналов	F, ГГц	$f_1$ , МГц	$f_2$ , МГц	3dB BW, %	$IL_{pass}$ , дБ	$IL_{загр}$ , дБ
2SML-.21/.33G-11PL	ES Microwave	4	1–2	–	–	5	1,75	-55
6SM-1/12	ES Microwave	6	1–12	–	–	5	2,1	-55
2SM-31	ES Microwave	Дуплексор	18–31	–	–	2	1,5	-45
KC31Z-0002	K&L Microwave	Дуплексор	0,001–0,5	88,7	361,2	5	2,6	-30
6SS-1000-18000-O	K&L Microwave	Триплексор	DC–18	–	–	3	1	-45
Серия	Flan Microwave	2	18–38	–	–	–	1	-35
CD810	Celltronik	2	0,1–10	1845	915	45 МГц	0,2	-50
602375	Coleman	2	2,2–2,3	1791	1811	±2	0,7	-50

Таблица 6. Параметры дуплексоров

Модель	Фирма	f, ГГц	$f_{пер}$ , МГц	$f_{пр}$ , МГц	3dB BW, МГц	$IL_{pass}$ , дБ	$IL_{изол}$ , дБ
8-CCB-F1/F2-B	K&L Microwave	DC–2	880	838	±12,5	1,5	-60
WSA-0045	K&L Microwave	DC–4	880/1800	838/1780	±12	1	-50
L5964-A	Delta Microwave	DC–2	900/1900	840/1850	±12	+45	-100
QUX1950L207	QuartzCom	1–5	1845	1950	±30	1	-60

Таблица 7. Коммутаторы частотных каналов

Модель	Фирма	F, ГГц	Число каналов	$IL_{pass}$ , дБ	t, мкс	$P_{вх}$ , дБм	$IL_{загр}$ , дБ
5SFB-50/500-11	ES Microwave	DC–0,25	5	0,5	0,06	+18	-60
6SFB-6/18-11	ES Microwave	DC–15	6	1	–	+15	-60
SFB-7-500-8000-MM	Salisbury	DC–10	8	6	1	+40	-50
8SFB-6720/17250-O/O	K&L	5,9–18,1	8	0,5	0,03	+40	-60
4SFBX	ES Microwave LLC	0,23	4	5	0,06	+10	50

Таблица 8. Параметры перестраиваемых частотных фильтров

Модель	Фирма	Тип устройства	f, ГГц	BW3dB, %	$IL_{pass}$ , дБ	$K_n$	$IL_{загр}$ , дБ
Micro-30-90-5	Pole/Zero	ППФ с автоподстройкой средней частоты	0,03–0,09	5	0,5	2,2:1	-50
GVBP-5-1000-2000	Salisbury	Автоподстройка	1–2	2	1	3:1	-45
5BT-1500/3000-5-N/N	K&L	Механическая перестройка	1,5–3	5	1	2,2:1	-50
DFTN-500/2000/N/GSV	K&L	Электронная перестройка	0,5–2	±2,5	0,7	2,2:1	-50
Серии 102-104, 1022	Omniiyig	Многооктавная ЖИГ перестройка	1–18	25–70 МГц	5	2,5:1	-80
200300	Coleman	Программная перестройка	2,2–2,3	±2 МГц	3,2	2,2:1	-50

**Гармониковые фильтры** серии 4PL4 фирмы Reactel отличаются высокой допустимой проходящей мощностью (до 15 кВт), большим числом звеньев (до 8) при малых потерях, ударопрочностью до 30 g и влагостойкостью до 98%.

Среди **ППФ** и **ПЗФ** наиболее многочисленна группа фильтров с фиксированной настройкой (табл.4). Здесь можно отметить ПЗФ серии N55 фирмы K&L, отличающиеся низкими потерями в полосе прозрачности, большим числом звеньев (до 12) и значительной допустимой мощностью (до 10 Вт). Большую серию ППФ на основе ПАВ-технологии (семейство TFR и TFS) предлагает фирма Vectron International Technology Express, а варианты кварцевых ППФ и ПЗФ на частоты от 10 кГц до 200 МГц (серия FN) – фирма Filtronetics. Высоким качеством отличаются кварцевые фильтры (MCF-технология), выпускаемые фирмами SGC Techno, Sawtek, QuartzCom и др. Их рабочие частоты лежат в диапазоне 9–200 МГц, ширина полосы на уровне 3 дБ (*BW3dB*) не превышает 0,1%. Фильтры этого типа пригодны для поверхностного монтажа. Они устойчиво работают в диапазоне температур, задаваемом военными стандартами.

**Частотные мультиплексоры** (табл.5) выпускаются на число каналов от 2 до 6. Развитие этих изделий – коммутируемые мультиплексоры, в которых выходные каналы могут отключаться с помощью коммутирующих СВЧ-диодов.

**Дуплексеры** различных частотных диапазонов многие фирмы предлагают в качестве узлов сопряжения приемопередающей антенны с приемником и передатчиком (табл.6). Для улучшения развязки между входным сигналом приемника и мощным сигналом собственного передатчика в близко расположенной частотной полосе дуплексеры имеют повышенное число секций (до 8). Например, модель 8-CCB-F1/F2-B фирмы K&L с восемью секциями пропускает от передатчика к антенне сигнал мощностью 50 Вт с развязкой -60 дБ в полосе приема, отстоящей на 20 МГц от границы полосы передачи. Для систем сотовой связи на 900/1800 МГц предлагаются двухполосные дуплексеры. Здесь интерес представляет двухполосный дуплексер L5964-A фирмы Delta Microwave, совмещенный с усилителем, коэффициент передачи которого составляет +45 дБ, а коэффициент шума – 1 дБ при межканальной изоляции на -100 дБ.

**Коммутаторы частотных каналов** (табл.7) содержат от 3 до 64 ППФ с временем переключения 30–60 нс. Большинство эти изделий переключают центральную частоту ППФ. Вместе с тем, например, в модели коммутатора 4SFBX фирмы ES Microwave LLC шестисекционные со значениями ширины полосы от 5 МГц до 32 МГц фильтры, настроенные на линейную ФЧХ с значениями ширины полосы 5–32 МГц, переключаются на фиксированной средней частоте. В модели FB-120 фирмы Electromagnetic Technology любой из девяти ППФ с полосой до 38%



от его средней частоты менее чем за 500 нс подключается между одним из двух входов (один на полосу 0,01–1 ГГц, второй – на полосу 1–20 ГГц) и выходом (с полосой 0,01–20 МГц).

**Перестраиваемые частотные фильтры** представлены в табл.8. Фильтры с механической сопряженной перестройкой и тремя-пятью секциями серии ВТ фирмы K&L Microwave допускают изменение центральной частоты на октаву при сохранении относительной ширины полосы. Их проходящая мощность достигает 50 Вт. Модель DTFN-500/2000/N/GSV фирмы K&L Microwave позволяет за 12 с перестроить кодом по шине GPIB среднюю частоту двух ППФ в пределах 500 МГц–2 ГГц с шагом 1 МГц при сохранении относительной полосы  $\pm 2,5\%$ . Модели серии 1022 фирмы Omnipig перестраивают чрезвычайно узкую полосу (0,1%) в пределах нескольких октав, что необходимо в широкополосных анализаторах спектра.

Типовые значения устойчивости частотных фильтров к внешним дестабилизирующим факторам определяются действующими стандартами. Как правило, они должны выдерживать воздействие входной мощности не менее 1 Вт, удары до 30 г, вибрацию – 10 г на частотах от 5 Гц до 1 кГц, относительной влажности – не менее 95% в интервале температур от -40 до 85°C.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Белов Л. Компоненты генераторов стабильной частоты. Генераторы, управляемые напряжением. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2004, №1, с.42; Преобразователи частоты. Современные ВЧ-компоненты. – №2, с.44; Синтезаторы стабильных частот. – №3, с. 38.
2. РАДИОКОМП – радиокомпоненты мировых производителей. <http://www.radiocomp.ru>