

# Проектирование перестраиваемого фильтра с регулируемой полосой пропускания

Михаил Ярославский, Денис Могучёнок (Санкт-Петербург)

В статье рассматриваются результаты проектирования и реализация макета полосового фильтра с перестраиваемой центральной частотой и регулируемой шириной полосы пропускания. Приводятся описание структурной схемы, новые технические решения и особенности работы устройства.

## ВВЕДЕНИЕ

В основу работы макета перестраиваемого фильтра (ПФ) положен принцип наложения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) нескольких фильтров с постоянными параметрами. Регулировка ширины полосы пропускания происходит за счёт гетеродинирования частоты полезного сигнала относительно АЧХ этих фильтров по специальному частотному плану.

Для компенсации паразитной угловой модуляции (ПУМ) сигнала гетеродинов, для каждого прямого гетеродинирования применено возвратное гетеродинирование. Данный принцип известен в литературе под названием метода возвратного гетеродинирования (ВГ) [1] и встречается при реализации различных радиотехнических устройств [2–4].

Функциональная схема макета устройства приведена на рисунке 1.

Основа структурной схемы ПФ подобна построению, приведённому в [3, 4]. Однако устройство дополняется преселектором, выходным селектором, линией задержки, модулем управления

и имеет индивидуальный частотный план работы модуля основной фильтрации (МОФ) (см. рис. 2).

При первом рассмотрении структурной схемы может показаться, что устройство обладает низким уровнем динамического диапазона, и на его выходе присутствует большое количество паразитных комбинационных составляющих за счёт применения четырёх преобразований частоты. Но при современном развитии элементной базы, с применением точного моделирования и благодаря выбору наилучшего частотного плана при разработке, возможно добиться высоких качественных характеристик макета ПФ.

## РАБОТА УСТРОЙСТВА

Рабочий сигнал поступает на вход преселектора (см. рис. 1), где происходит усиление в малощумящем усилителе (МШУ) и предварительная фильтрация с помощью одного из восьми коммутируемых фильтров. Далее сигнал поступает на вход смесителя СМ1 (см. рис. 2), где он с помощью сигнала гетероди-

на Г1 преобразуется вверх по частоте и поступает на вход фильтра основной селекции ФОС1, который в свою очередь состоит из полосно-пропускающего фильтра ППФ3, усилителя УС2 и фильтра ППФ5. После фильтрации в ФОС1 сигнал поступает в смеситель СМ2, где он преобразуется при помощи сигнала того же гетеродина Г1 на исходную частоту. Далее происходят аналогичные преобразования в смесителях СМ3, СМ4 с помощью сигнала гетеродина Г2 и фильтрации в ФОС2, состоящего из фильтров ППФ10 и ППФ12 и усилителя УС6. За счёт изменения разности частот гетеродинов Г1 и Г2 регулируется ширина полосы пропускания ПФ.

Согласно разработанному частотному плану частоты гетеродинов Г1 и Г2 расположены выше центральных частот настройки ФОС1 и ФОС2. Поэтому большая часть комбинационных составляющих и зеркальный канал находятся за полосой пропускания ПФ. Центральные частоты настройки ФОС1 и ФОС2 равны и составляют 1564 МГц (ширина их полос пропускания 264 МГц). Фильтры основной селекции реализованы на керамических резонаторах и имеют коэффициент прямоугольности не хуже 1,4 по уровням –3 дБ и –40 дБ.

В ходе настройки макета было отмечено, что частоты среза ФОС1 и ФОС2 отличались от изначально заложенных в частотный план. Однако точной частот-

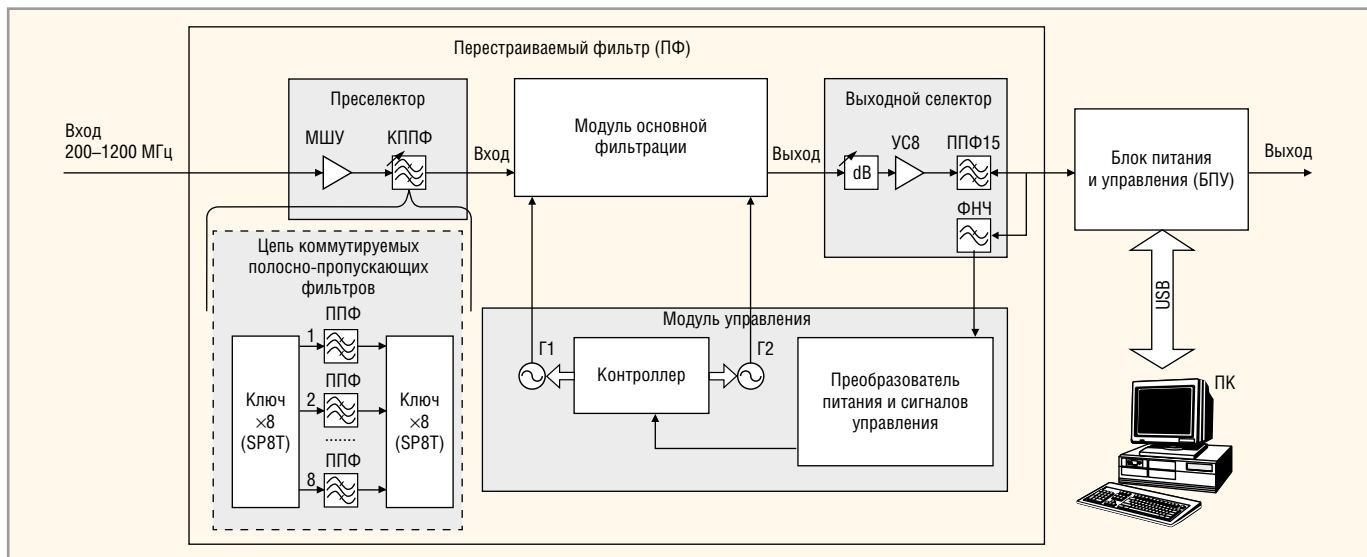


Рис. 1. Функциональная схема макета перестраиваемого фильтра

ной настройки фильтров не потребовалось, так как данное частотное отличие было учтено в программе управления.

В смесителе СМ1, вследствие частотного преобразования, на полезный сигнал накладывается паразитная угловая модуляция сигнала гетеродина Г1. Компенсация данной ПУМ происходит при возвратном гетеродинировании в смесителе СМ2. Аналогичная ситуация происходит и во второй паре смесителей СМ3, СМ4 и гетеродина Г2.

Как показано в [5] для лучшей компенсации сигналов с ПУМ необходимо соблюдение их временной корреляции в смесителе, выполняющем роль возвратного гетеродинирования. Поэтому для выравнивания времени прихода сигналов с ПУМ гетеродина Г1 с выхода фильтра ФОС1 и со стороны гетеродинного входа смесителя СМ2, в схему включена линия задержки (ЛЗ) (см. рис. 2).

В ходе отладки макета было отмечено, что включение ЛЗ с временем задержки, равным среднему значению группового времени задержки (ГВЗ) ФОС1 в цепь гетеродинного сигнала смесителя СМ2, снижает суммарный коэффициент шума устрой-

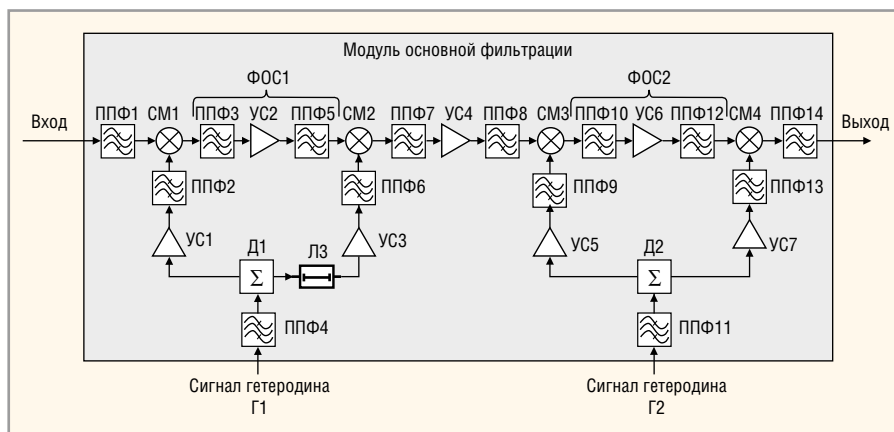


Рис. 2. Модуль основной фильтрации

ства. Наличие ЛЗ в цепи гетеродинного сигнала смесителя СМ4 практически не оказывало влияния на результирующие шумовые характеристики вследствие низкого значения вклада шумов последних каскадов устройства. Результаты измерения коэффициента шума макета ПФ с включённой ЛЗ с временем задержки равным 9,7 нс, реализованной на коаксиальном кабеле типа RG-316 длиной 2050 мм, показали, что коэффициент шума устройства в целом снизился на 1–1,5 дБ.

### КОНСТРУКЦИЯ УСТРОЙСТВА

Конструктивно макет ПФ выполнен в виде фрезерованного высокочастотного блока (см. рис.3) с размещёнными во внутренних отсеках платами: коммутатора преселектора, выходного селектора, МОФ – с одной стороны, и с другой стороны – платами управления, регулируемые аттенюаторами, фильтрами преселектора и формирования сигналов гетеродинов.

В ходе реализации ВЧ-блока было выполнено тщательное экранирова-

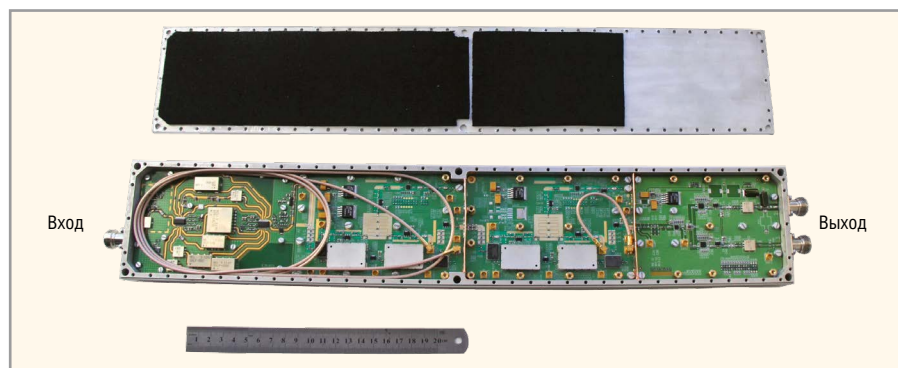


Рис. 3. Внешний вид перестраиваемого фильтра ПФ

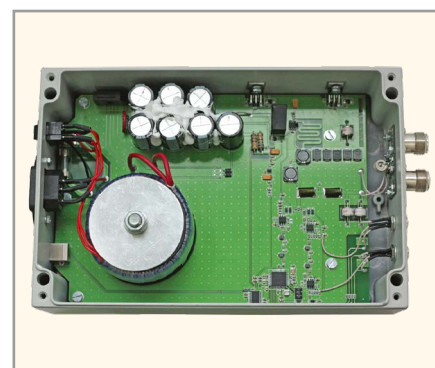


Рис. 4. Блок питания и управления

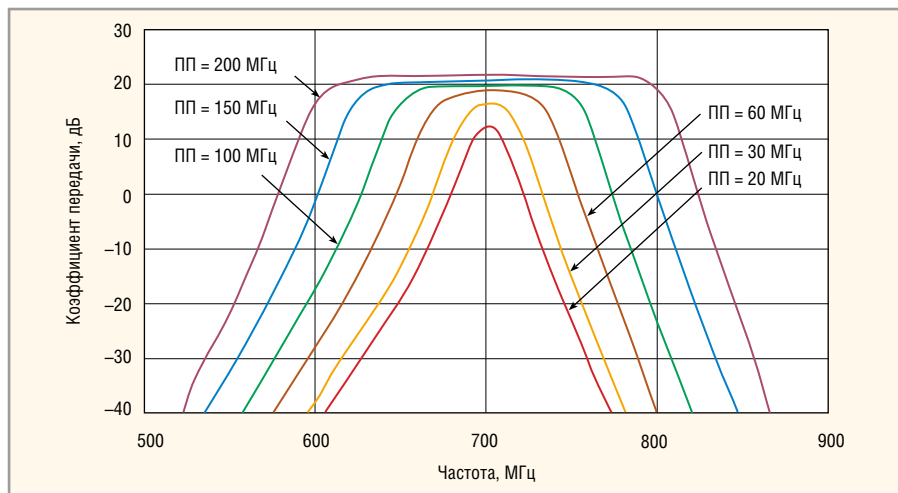


Рис. 5. Диапазон регулировки полос пропускания ПФ на примере рабочей частоты 700 МГц

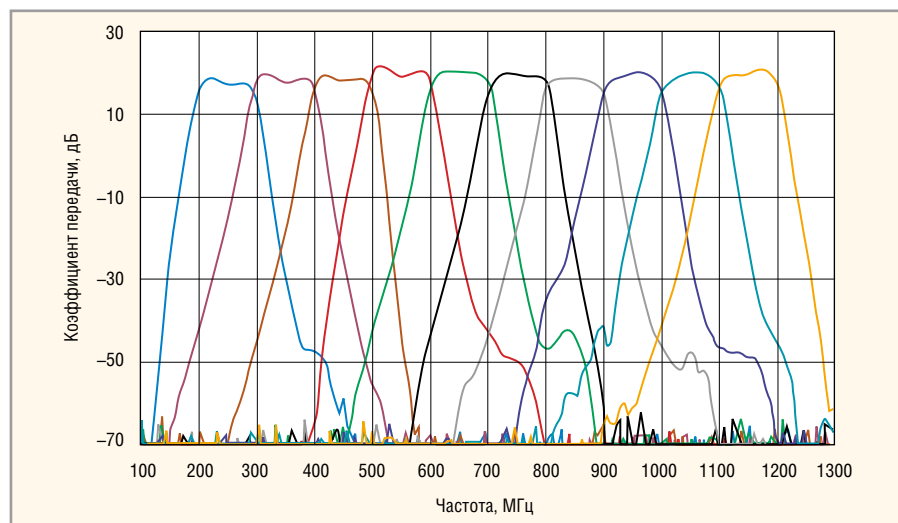


Рис. 6. Диапазон перестройки рабочей частоты ПФ, АЧХ при полосе пропускания 100 МГц. Графики построены для рабочих частот 250...1150 МГц с шагом 100 МГц

ние цепей формирования и усиления сигналов гетеродинов, а также использован радиопоглощающий материал в отсеках устройства. Это вызвано применением в МОФ смесителей двадцатого уровня, которым для работы требуется уровень сигнала гетеродина 20 дБм, поэтому существует вероятность появления побочных спектральных составляющих сигнала разностной частоты гетеродинов Г1 и Г2 на выходе устройства в полосе фильтрации.

Макет ПФ работает совместно с блоком питания и управления (БПУ) (см. рис. 4). Полезный сигнал с ПФ проходит через БПУ к следующим устройствам приёма и обработки сигналов.

Электропитание и управление ПФ осуществляется от БПУ через встроенный развязывающий фильтр по высокочастотному коаксиальному кабелю. Команды управления формируются с помощью специальной программы на компьютере и подаются через USB-порт на БПУ.

В программе отображаются расчётный вид АЧХ фильтра и режимы работы устройства по энергопотреблению.

В программе предусмотрено два способа установки значений требуемой частотной характеристики полосового фильтра:

- 1) установка центральной частоты и ширины полосы пропускания;
- 2) установка среза нижнего и верхнего ската характеристики по уровню -3 дБ.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО ФИЛЬТРА

В ходе измерения характеристик ПФ были получены значения селективных и динамических параметров устройства.

Так, регулировка ширины полосы пропускания ПФ составила 15...200 МГц (см. рис. 5) в любой части рабочего диапазона 200...1200 МГц (см. рис. 6). Ограничением ширины полосы пропускания является настройка ПФ на начальный и конечный участок рабочего диапазона. Шаг перестройки ширины полосы пропускания и центральной частоты составляет 0,5 МГц.

Также в ходе измерений отмечено, что коэффициент прямоугольности ПФ не зависит от рабочей частоты и обратно пропорционален ширине полосы пропускания. Зависимость коэффициента прямоугольности от полосы пропускания представлена на рисунке 7.

Оценка времени перестройки полосы пропускания показала, что его величина зависит от времени перестройки синтезаторов гетеродинов Г1 и Г2 и скорости передачи данных от интерфейса управления. В реализованном ПФ эта величина составила порядка 6 мс. При оптимизации интерфейса передачи данных, время перестройки полосы пропускания можно сократить до времени перестройки частоты используемых синтезаторов, равному 200 мкс.

Благодаря проведённым исследованиям появляется перспективная возможность построения адаптивных систем на базе применённых перестраиваемых фильтров с возвратным гетеродинамированием.

Остальные результирующие характеристики: диапазон регулировки коэффициента передачи, уровень компрессии полезного сигнала по входу, коэффициент шума и неравномерность АЧХ, – приведены в таблице 1 и [6].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный и изготовленный макет перестраиваемого фильтра открывает широкие и перспективные возможности для инженеров-исследователей при построении радиотехнических систем прикладного характера.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Левин В.А., Норкин Г.А. Радиотехнические системы фильтрации с возвратным гетеродинамированием. – М.: Советское радио. 1979. С. 272.
2. Cuddi Bernard M. Low noise microwave synthesizer employing high frequency for tuning drift cancel loop. EP Patent № 1395841 от 02.03.2005.
3. Elizondo E.L. Agile bandpass filter. USPatent № 5300838 от 05.04.1994.
4. Toyoda Sachibiro. Broadband bandpass filter with variable center frequency and bandwidth. Int. J. Infrared and Millimeter Waves. 1992. 13. № 11. P. 1757–1765.
5. Могучёнок Д.Ю. Оценка коэффициента компенсации паразитной угловой модуляции сигнала на выходе системы фильтрации с возвратным гетеродинамированием. Информационно-измерительные и управляющие системы. 2011. № 7 (т. 9). С. 25–29.
6. Система полосовой фильтрации // Группа компаний Авионика СВЧ. URL: <http://www.avionica.spb.ru>.

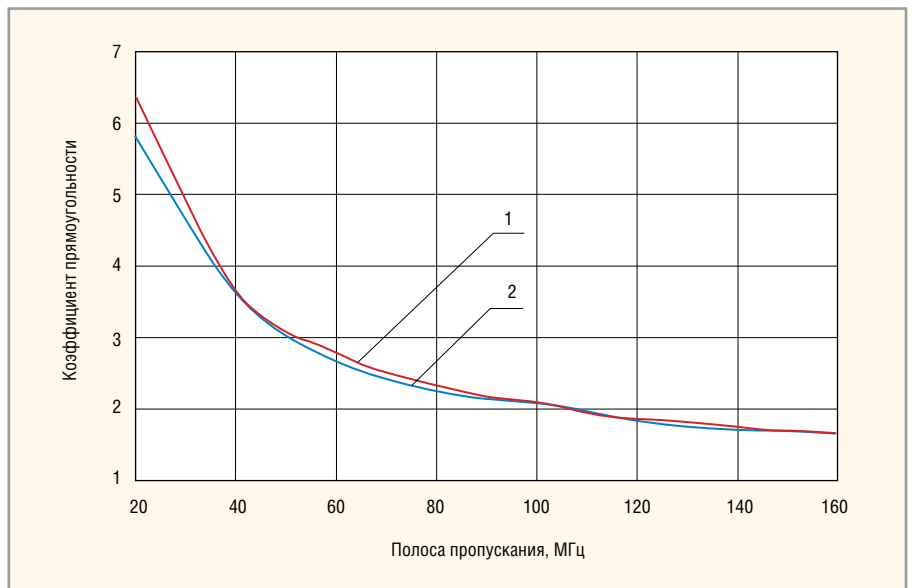


Рис. 7. Зависимость коэффициента прямоугольности по уровням –3 и –40 дБ от полосы пропускания на рабочей частоте 850 МГц, где:

1 – расчётный график; 2 – измеренные значения коэффициента прямоугольности

Таблица 1. Основные характеристики перестраиваемого фильтра

Название характеристик, параметров	Условия измерения	Значение
Диапазон рабочих частот		200...1200 МГц
Диапазон регулировки полосы пропускания		15...200 МГц
Диапазон регулировки коэффициента усиления		20 дБ
Коэффициент шума	В диапазоне рабочих частот, при полосе пропускания ПФ 100 МГц	3,9...6,9 дБ
Входная мощность сигнала при компрессии на 1 дБ (Input P1)	В диапазоне рабочих частот, при полосе пропускания ПФ 100 МГц	–15...–9 дБм
Выходная точка пересечения для составляющих третьего порядка (OIP3)	Рабочая частота ПФ 700 МГц, полоса пропускания ПФ 150 МГц; при воздействии двухтонового сигнала с частотами 695 и 705 МГц и мощностью –26 дБм	15,7 дБм
Подавление внеполосных помех, при отстройке на 50 МГц от частоты среза АЧХ по уровню –3 дБ	В диапазоне регулировки полосы пропускания, при рабочей частоте 700 МГц	–35...–38,5 дБ
Коэффициент усиления на центральной частоте установленной полосы пропускания	В диапазоне рабочих частот, при полосе пропускания ПФ 100 МГц	17,1...20,1 дБ
Коэффициент усиления при регулировке полосы пропускания	В диапазоне регулировки полосы пропускания, при рабочей частоте 700 МГц	12,2...21,4 дБ
Неравномерность коэффициента усиления	В диапазоне рабочих частот, при полосе пропускания ПФ 100 МГц	3...7 дБ