УДК 621.396.41

Н.М. Харитонов

Стабилизация установки частоты ЖИГ-фильтров в измерительных СВЧ-приборах

Описан метод улучшения стабильности установки частоты ЖИГ-фильтров «MicroLambda», работающих в диапазоне частот от 2 до 26,5 ГГц, путем применения схемы термостатирования корпуса преселектора с помощью термоэлектрических преобразователей Пельтье, а также схемы, стабилизирующей нагрев резонаторов резистивными элементами СВЧ-камеры ЖИГ-фильтра. Рассмотрено влияние эффекта магнитного гистерезиса на точность установки частоты, предложен алгоритм управления перестройкой преселектора, минимизирующий это влияние.

Ключевые слова: ЖИГ-фильтр, магнитное поле, температурная стабильность, резистивный нагреватель, СВЧ-камера, элемент Пельтье, термодатчик, гистерезис, измерительная трасса.

Фильтры на основе технологий железо-иттриевого граната (ЖИГ) широко применяются в измерительной СВЧ-аппаратуре сканирующего типа в качестве перестраиваемых преселекторов. Их достоинством являются высокая добротность резонаторов, малые потери, удобство управления установкой центральной частоты, компактные размеры.

Принцип работы ЖИГ-фильтров основан на резонансных свойствах железо-иттриевого граната. Когда к кристаллу приложено постоянное магнитное поле, магнитные моменты диполей начинают прецессировать вокруг направления поля с частотой прецессии, пропорциональной напряженности магнитного поля. Если к материалу приложить переменное магнитное поле с частотой прецессии в плоскости, перпендикулярной постоянному полю, то амплитуда прецессии начнет расти – появится ферромагнитный резонанс (ФМР). Но поскольку кристалл ЖИГ является анизотропным, частота прецессии имеет сильную температурную нестабильность [1]. Учитывая, что температура самого фильтра при перестройке значительно изменяется, девиация центральной частоты при одной и той же величине управляющего поля может составлять до 10...20 МГц, что в итоге сказывается на точности измерения приборами характеристик коэффициента шума (КШ) и коэффициента передачи (КП) радиотехнических устройств, а также абсолютного уровня мощности сигналов. Наиболее наглядно этот эффект наблюдается на калиброванных измерительных трассах приборов (рис. 1), когда в течение нескольких минут значения КШ и КП отклоняются от нуля на 0,5...1,5 дБ.



Рис. 1. Вид измерительной трассы анализатора спектра через 30 мин после калибровки

Для минимизации нестабильности установки частоты необходимо поддерживать температуру фильтра постоянной при любых режимах его работы в приборе. Кроме того, не следует забывать и о ещё одном эффекте, влияющем на точность установки частоты преселектора – явлении магнитного гистерезиса.

Конструкция ЖИГ-фильтров MLFP-42026. Реализацию ЖИГ-фильтров рассмотрим на примере преселекторов MLFP-42026 американской компании «MicroLambda», которые длительное время применяют в измерительных приборах фирмы «Микран», работающих на частотах до 20 ГГц. Основные параметры фильтров MLFP-42026 представлены в таблице 1 [2].

nupumerphi unibipob mili i "iooo mierolumbuu (dumbie nponsbodirein)	
Частотный диапазон перестройки, ГГц	226,5
Ширина полосы пропускания по уровню -3 дБ (мин), МГц	25
Потери в полосе пропускания (макс), дБ	6
Затухание вне полосы (сред), дБ	60
КСВН в полосе пропускания (макс)	2
Максимальный уровень входного сигнала, дБм	+10
Чувствительность настройки частоты (сред), МГц/мА	30
Температурный уход частоты (макс), МГц	30
Уход частоты из-за эффекта гистерезиса (макс), МГц	25

Параметры фильтров MLFP-42026 MicroLambda (данные производителя)

Вся конструкция ЖИГ-фильтра (рис. 2, *a*) заключена в массивном пермаллоевом корпусе (магнитопроводе), состоящем из двух плотно смыкающихся половин. Внутри каждой из них выполнена обмотка из 350...400 витков медного провода. Обмотки соединены последовательно, образуя единую катушку, на которую посредством проходных конденсаторов (выводы E1 и E2) заводится управляющий ток. Сердечники обмоток (полюса) имеют между своими наконечниками некоторый зазор, в котором при пропускании тока через катушку возникает постоянное магнитное поле. Таким образом, конструкция представляет собой подобие электромагнита Вейссовского типа.

В зазор между полюсами помещена так называемая СВЧ-камера (рис. 2, δ) – керамическая металлизированная пластина с отверстиями, в центрах которых на специальных вращающихся стержнях удерживаются ЖИГ-сферы. Поворотом стержней при настройке фильтра изменяют положение сфер в магнитном поле, добиваясь оптимальных параметров ФМР. Связь между резонаторами обеспечивается парами взаимно перпендикулярных индуктивных полупетель, окружающих ЖИГ-сферу. Вход и выход фильтра выполнены с помощью коаксиальных кабелей, впаянных в корпус камеры, и фланцевых СВЧ-разъемов, закрепленных на корпусе фильтра.



Рис. 2. ЖИГ-фильтр: а – общий вид (без верхней крышки); б – вид снизу (без нижней крышки)

Кроме того, в корпусе СВЧ-камеры располагаются нагревательные элементы (резисторы), на которые подается напряжение постоянной величины (также через пару проходных конденсаторов – выводы *E*3 и *E*4). Приблизительная зависимость сопротивления нагревателя от его температуры

показана на рис. 3. Такая характеристика резисторов должна обеспечивать быстрый прогрев камеры и резонаторов до некоторой рабочей температуры.



Рис. 3. Зависимость сопротивления *R*_{heat} резистивного нагревателя от температуры

Термостатирование корпуса ЖИГ-фильтра. При перестройке фильтра, установленного в приборах СК4М-18 и Х5М-18, во всём частотном диапазоне управляющий ток в обмотках изменяется от 0,15 до 1 А. При этом рассеиваемая на них мощность по результатам измерений вызывает нагрев корпуса фильтра до 36 °C на частоте 3,2 ГГц и до 44°C на частоте 20 ГГц (в установившемся режиме при температуре окружающей среды 20 °C).

Наиболее оптимальным решением для поддержания температуры корпуса постоянной является приме-

нение термоэлектрических элементов Пельтье. Принцип их работы заключается в поглощении или выделении тепла в месте контакта двух материалов с разными уровнями энергии электронов в зоне проводимости при протекании через них электрического тока. В элементах Пельтье используются пары полупроводниковых параллелепипедов *p*- и *n*-типа, расположенные таким образом, что одна из сторон корпуса элемента нагревается, а другая охлаждается. Разность температур тем выше, чем больше пропускаемый через элемент ток. По сравнению с другими устройствами элементы Пельтье (ЭП) имеют ряд преимуществ [3]:

- возможность как охлаждать, так и нагревать;

- простые схемные решения для управления температурой;
- отсутствие каких-либо движущихся частей, небольшие размеры;
- сравнительно высокое быстродействие и стабильность.

Для начала необходимо определить температуру термостатирования корпуса T_{st} . Желательно, чтобы эта величина находилась ниже диапазона 36...44 °C, что позволит применять управляющее напряжение на ЭП одной полярности, а корпус будет только охлаждаться.

Для более равномерного и быстрого охлаждения фильтра было решено использовать два ЭП, закрепленных на двух противоположных сторонах корпуса с применением теплопроводной пасты. Эффективность работы такой системы оценивалась зависимостью температуры корпуса фильтра, установленного на максимальную центральную частоту 20 ГГц, от величины протекающего через ЭП тока. В нашем случае предельное значение последнего определялось возможностями блока питания приборов и составляло около 2 А.



Результаты измерений представлены на рис. 4. Как видно, корпус фильтра можно охладить до температуры не ниже 32 °С (проверяется на максимальной частоте при наибольшем токе $I_{ЭП}$), но также нельзя достичь температуры выше 33 °С (проверяется на минимальной частоте при выключенных ЭП), следовательно, температура T_{st} должна лежать в пределах 32... 33 °С. Чтобы максимально снизить энергопотребление термостата, значение T_{st} было выбрано по возможности большим – равным 33 °С.

Рис. 4. Зависимость температуры корпуса фильтра, охлаждаемого двумя ЭП от протекающего через них тока

Упрощенная схема термостабилизации корпуса фильтра представлена на рис. 5, а.

В основе работы схемы – применение закрепленного на корпусе температурного датчика (*TS*), выходное напряжение которого (U_{TS}) прямо пропорционально его температуре. Это напряжение сравнивается интегратором, выполненным на операционном усилителе, с опорным напряжением (U_{on}), которое выбирается равным U_{TS} при требуемой температуре корпуса T_{st} . В случае отклонения величины U_{TS} от U_{on} на выходе интегратора формируется некоторое приращение напряжения ошибки ΔU_{om} , которое в ту или иную сторону изменяет сопротивление сток-исток транзистора VT, тем самым регулируя ток, протекающий через ЭП, и, соответственно, изменяя интенсивность охлаждения корпуса. Это происходит до тех пор, пока напряжения U_{TS} и U_{on} не выровняются, что и будет соответствовать заданной рабочей температуре фильтра.



Рис. 5. Упрощенные схемы термостабилизации: *а* – корпуса фильтра; *б* – СВЧ-камеры

Если охлаждать нагревающуюся сторону ЭП, то температура холодной стороны становится ещё ниже, что повышает энергетическую эффективность термостата. Поэтому на нагревающихся сторонах элементов были закреплены алюминиевые радиаторы (рис. 6).

Термостатирование СВЧ-камеры ЖИГфильтра. Однако в описанном виде стабилизация температуры протекала слишком медленно. Поскольку СВЧ-камера достаточно изолирована от магнитопровода, передача тепла от корпуса к ЖИГ-сферам занимает несколько минут. Кроме того, важно исключить возможный температурный градиент, который создается между корпусом, охлаждаемым элементами Пельтье, и камерой, нагреваемой резистивными элементами. Было необходимо дополнительно стабилизировать температуру самой СВЧ-камеры.

Схему термостатирования СВЧ-камеры можно использовать аналогичную той, что была



Рис. 6. Общий вид термостатированного ЖИГ-фильтра

описана выше, однако следует учесть, что температурный сенсор должен быть установлен непосредственно на саму камеру внутри фильтра, что резко ограничивает габариты и выбор типа датчика. В качестве термочувствительного элемента был использован чип-терморезистор типоразмера 0402 (длина 1 мм) с отрицательным температурным коэффициентом.

Упрощенная схема термостатирования СВЧ-камеры приведена на рис. 5, δ . Величина опорного напряжения выбирается равной падению напряжения на термисторе R_{sens} при той же температуре термостатирования T_{st} . В отличие от предыдущей схемы, здесь термистор включен в схему так, что при нагревании камеры выше T_{st} происходит увеличение сопротивления сток-исток транзистора VT.

Технологически такая доработка не требует никаких дополнительных выводов и разъёмов, поскольку один из контактов нагревателя отсоединяется от проходного конденсатора и замыкается на «землю» (корпус СВЧ-камеры), а освободившийся вывод *E*3 фильтра соединяется с контактом термистора, который другим своим контактом также припаивается к корпусу камеры, образуя с ней надежный термический контакт. Через вывод *E*4 напряжение по-прежнему подается на нагреватель.

Измерительная трасса анализатора спектра с полностью термостатированным преселектором представлена на рис. 7. Сравнивая нестабильность трассы прибора до и после модернизации (см. рис. 1 и 7), можно сделать вывод, насколько значительно этот показатель зависит от характеристик преселектора.



Рис. 7. Вид измерительной трассы анализатора спектра с термостатированным преселектором через 30 мин после калибровки

Влияние гистерезиса на установку частоты ЖИГ-фильтра. В измерительных приборах управление перестройкой преселектора осуществляется программой, которая отсылает соответствующие команды на специальную плату ЖИГ-драйвера. В соответствии с калибровочной характеристикой фильтра каждое дискретное значение центральной частоты (с шагом около 300 кГц) задается цифровым кодом (от 0 до 2¹⁶), который преобразуется платой драйвера с помощью цифроаналогового преобразователя (ЦАП) в аналоговый сигнал соответствующей величины.

Как уже было сказано ранее, при перестройке фильтров, управляемых магнитным полем, имеет место эффект, когда точность установки частоты зависит от направления и величины изменения магнитного потока в обмотках. Другими словами, изменяя, например, диапазон сканирования измерительного прибора, в каждом случае одной и той же величине кода ЦАП преселектора будет соответствовать разное значение частоты установки фильтра. Этот эффект наблюдается из-за влияния магнитного гистерезиса в магнитопроводе, и в рассматриваемых фильтрах может вызывать погрешности установки частоты в несколько мегагерц.

На рис. 8, *а* приведены экспериментально полученные графики, иллюстрирующие эффект гистерезиса в фильтре. В ходе эксперимента вручную задавались значения кода ЦАП преселектора в следующем порядке:

- от нуля до значения, соответствующего максимальной частоте 20 ГГц (прямой ход);

- от последнего значения кода до нуля (обратный ход);

- прямой ход повторно.

Представленные графики показывают отклонение центральной частоты фильтра Δf_0 при обратном ходе (кривая *A*) и повторном прямом ходе (кривая *Б*) от частоты, соответствующей тем же величинам кода ЦАП при первоначальном прямом ходе.



Рис. 8. Неточность установки центральной частоты преселектора Δf_0 в зависимости от направления перестройки (*a*) и примерный вид петли гистерезиса при разных полосах сканирования (δ)

Качественно петлю гистерезиса можно изобразить, как показано на рис. 8, б. График для наглядности изображен в координатах $f_0 = F(I_{ynp})$, где I_{ynp} – управляющий ток в катушке фильтра. Так как в нашем случае ток отрицательной величины на катушку не подается, петля AJ целиком находится выше первоначальной кривой намагничивания 1. Для разных полос сканирования петли будут разными (например, петля DK для полосы B_{DK}), соответственно, для значения управляющего тока I_{ynp0} существует некоторая неоднозначность установки частоты фильтра Δf_{ruc} .

Для того чтобы преселектор при любой полосе сканирования перестраивался по одной кривой (в нашем случае это может быть только кривая 3), необходимо условие «прохождения» фильтром точек *A* и *J* характеристики.

В соответствии с данным требованием был доработан алгоритм управления преселектором. В конце каждого цикла сканирования происходит перестройка фильтра на частоту 20 ГГц (по кривой 3 до точки *A*), а затем возвращение в положение, соответствующее нулю кода ЦАП (по кривой 2 в точку *J*). После этого фильтр возвращается (по кривой 3) на начальную частоту сканирования. Такая же процедура происходит при каждом новом запуске измерения, а также смене диапазона обзора.

Заключение. В результате проведенных экспериментов и доработок были выпущены несколько серийных приборов с термостатированными ЖИГ-преселекторами и улучшенными алгоритмами перестройки частоты. Так, по результатам метрологических испытаний погрешность измерения коэффициента передачи из-за нестабильности радиотракта $\Delta_{\text{КПнест}}$ модернизированных измерителей не превышает 0,25 дБ, тогда как у нестабилизированных приборов этот показатель составлял более 1,1 дБ.

Разработанные схемы термостатов реализуются на отдельных печатных платах.

В настоящее время в департаменте информационно-измерительных систем фирмы «Микран» осуществляется разработка собственных ЖИГ-преселекторов, аналогичных фильтрам серии MLFP. Технология изготовления новых фильтров предусматривает применение в них описанных схем термостабилизации.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в соответствии с договором 13.G25.31.0011 от 07.09.2010 г. и договором 74/10 от 15.07.2010 г. в порядке реализации Постановления № 218 Правительства РФ.

Литература

1. Маттей Д.Л. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи / Д.Л. Маттей, Л. Янг, Е.М.Т. Джонс. – Т. 2. – М.: Связь, 1971. – 495 с.

2. MLFP series. Electrical and performance specifications [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.microlambdawireless.com/YIG_Filters/MLFP_4_Stage.htm, свободный (дата обращения: 22.05.2011).

3. Охладительно-отопительные агрегаты. Эффект Пельтье. Элемент Пельтье [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://tepmoxota.ru/peltier.htm, свободный (дата обращения: 08.06.2011).

Харитонов Никита Михайлович

Аспирант каф. средств радиосвязи ТУСУРа Тел.: (382-2) 41-37-09 Эл. почта: ni-kit@sibmail.com

Kharitonov N.M. Frequency setting stabilization of YIG filters in microwave measuring devices

The article discusses the method of improving the stability of the YIG filter frequency setting. This method is based on thermal stabilization of the filter corps by means of the Peltier and microwave camera by means the resistive heaters. Hysteresis in filter is described and new tuning control algorithm that minimized the hysteresis effect is proposed.

Keywords: YIG filter, magnetic field, thermal stabilization, microwave camera, Peltier, resistive heater, temperature sensor, hysteresis, measuring line.