УДК 621.37

DOI: 10.36845/2073-8250-2020-259-4-4-11

БЫСТРОПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ НА МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

А.А. Давлятишина, В.П. Иванов, А.П. Зверев, В.В. Федоров

*Мытищинский научно-исследовательский институт радиоизмерительных приборов
(МНИИРИП)*

Московская обл., 141002, г. Мытищи, ул. Колпакова, д. 2а

В статье показаны результаты разработки быстроперестраиваемых полосно-пропускающих фильтров (ППФ) на магнитоэлектрических волнах в диапазоне частот от 1 ГГц до 4 ГГц. Приведены экспериментальные результаты исследований амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) фильтров на частотах 3 ГГц, 10,5 ГГц, 19,5 ГГц.

Ключевые слова: *полосно-пропускающие фильтры, диапазоны рабочих частот, приемники, передатчики, полоса пропускания, спектр сигнала, магнитопровод, перестройка частоты фильтров*

Сведения об авторах: *Давлятишина Алёна Андреевна, к.ф.-м.н., davlyatshina@mniirip.ru; Иванов Вячеслав Петрович; Зверев Алексей Петрович, к.т.н, доцент, moizver62@mail.ru; Федоров Владимир Владимирович*

RAPID-TUNING BANDPASS FILTERS ON MAGNETOSTATIC WAVES

A. A. Davlyatshina, V. P. Ivanov, A. P. Zverev, V. V. Fedorov

Mytishchinskiy nauchno-issledovatel'skiy institut radioizmeritel'nykh priborov (MNIIRIP)

Moscow Region, 141002, Mytishchi, Kolpakova st., 2a

The article presents the results of the development of rapid-tuning bandpass filters on magnetostatic waves, with operating frequency range from 1 GHz to 4 GHz. We also show the results of experimental studies that were performed to measure the amplitude-frequency response of the filters at 3 GHz, 10.5 GHz, 19.5 GHz.

Keywords: *band-pass filters, operating frequency range, receivers, transmitters, pass-band, signal spectrum, magnetic circuit, filter frequency tuning*

Data on authors: *Davlyatshina Alyona Andreevna, Ph.D., davlyatshina@mniirip.ru; Ivanov Vyacheslav Petrovich; Zverev Aleksey Petrovich, Ph.D., Assistant Professor, moizver62@mail.ru; Fedorov Vladimir Vladimirovich*

На сегодняшний день в различных областях науки и техники, в системах космической связи, фильтрах промежуточных частот, в приёмниках, передатчиках, широко применяются полосно-пропускающие фильтры (ППФ) на магнитоэлектронных волнах (МСВ).

ППФ на МСВ, в отличие от аналогов, построенных на сферических резонаторах, имеют меньшую неравномерность потерь в полосе пропускания, а также существенную разницу потерь при изменении направления сигнала. Стоит отметить, что при этом коэффициент стоячей волны имеет плавную характеристику, а изделия обладают меньшими габаритами [2, 3, 4, 5].

Малая неравномерность потерь в полосе пропускания и равномерная характеристика коэффициента стоячей волны по напряжению обеспечивает плавную характеристику группового времени запаздывания полосно-пропускных фильтров. Результатом данного эффекта является отсутствие искажений. Особенности работы фильтров определяются спецификой физических принципов, на основе которых они построены [4, 6].

Для расширения применимости и функциональности радиоаппаратуры, необходимо решить задачу по снижению времени перестройки фильтров, которое обеспечивает возможность быстрого перехода на другую рабочую частоту и таким образом, в свою очередь, увеличивает уровень помехозащищенности изделий военной техники.

Согласно ОСТ II 480.001-80, за время перестройки принимается интервал времени от момента включения или выключения управляющего тока до момента, когда изменение частоты фильтра достигнет значе-

ния 0,9 от диапазона перестройки. Значение времени перестройки для указанного типа фильтров составляет около 100 мкс при полосе частот ± 125 МГц.

С целью достижения существенного сокращения времени перестройки предложены пути оптимизации конструкции магнитной системы прибора и формы управляющего импульса.

Требования, которые могут предъявляться к перестраиваемым магнитным системам:

1. Высокая скорость перестройки магнитного поля.
2. Низкое энергопотребление при перестройке.
3. Высокое время перестройки.
4. Минимальный гистерезис.
5. Незначительные габариты и масса.
6. Невысокая себестоимость и технология изготовления.

Очень сложно выполнить данные требования для получения конструкции магнитных систем. Таким образом, реальная магнитная система всегда представляет собой компромиссное техническое решение, оптимальность которого зависит от того, насколько полно были учтены в нем особенности технической системы, в которой будет работать проектируемое магнитоэлектронное устройство.

В магнитных системах полосно-пропускающих фильтров на МСВ целесообразно использовать в качестве магнитных (т.е. с полем смещения от постоянных магнитов) поляризованные электромагниты. Конструкция данной системы приведена на рис. 1. Поляризующие постоянные магниты (10) КС-37 последовательно включены в магнитную цепь катушек (1). При нулевом токе в катушках постоянный магнит создает в рабочем зазоре ПЭ

Рис. 1
Магнитная система ППФ на МСВ

(промежуточного элемента) среднюю, по величине от необходимого диапазона перестройки напряженность магнитного поля на эпитаксиальной структуре железо-иттриевого граната, закрепленной на основании (3). За счет правильного выбора магнитного поля постоянных магнитов достигается снижение мощности подмагничивания.

Экспериментальная часть

При разработке данной системы была предпринята попытка также улучшить характеристики крутизны электрической перестройки за счет увеличения площади поверхности магнита. Между магнитами (10) и полюсными наконечниками (13, 22) расположены магнитопроводы (15) из материала пермаллоя марки 50Н

(ГОСТ 10160-75) с целью обеспечения необходимой скорости перестройки магнитной системы. Полюсные наконечники (позиции 13, 22) выполнялись из магнитопровода марки 5В-1М (ТУ14-123-215-2009). Магнитопровод, в свою очередь, изготовлен из быстрозакаленной аморфной магнитной ленты марки 5БДСР (ТУ14-123-149-2009), имеющей высокую магнитную проницаемость при малой коэрцитивной силе. Стоит отметить, что на частоте 50 Гц при напряженности магнитного поля в 25 А/м магнитная индукция составляет 1.2 Тл, при этом коэрцитивная сила составляет не более 3 А/м. Толщина ленты при этом составляет порядка 20-30 мкм, это служит главным подавляющим фактором токов Фуко. Для сохранения необходимой механической прочности

конструкции ППФ, корпус магнитной системы целесообразно изготавливать из сплава 50Н пермаллоя (ГОСТ 10160-75), позиции (16,17,18,19). После механической обработки все детали из пермаллоя в обязательном порядке должны быть подвергнуты термообработке по ГОСТ 10160-75.

В данной магнитной системе использованы две катушки подмагничивания (1), которые выполнены из обмоточного провода ПЭТВ-2 ТУ 15-502.003-82 диаметром 0,38 мм и числом витков 52. Данные катушки соединены в последовательную электрическую цепь, имеющую сопротивление порядка 1,6 Ом. Катушки крепятся с помощью клея на полюсных наконечниках со стороны рабочего зазора. Такое расположение катушек и их форма уменьшает магнитный поток от тока в катушках и тем самым снижает влияние на скорость перестройки от токов Фуко, которые воз-

никают в корпусе, крышке и основании. На рис. 2 приведена схема подключения фильтра при измерении времени перестройки.

На амплитудном детекторе выходной сигнал пропорционален подаваемой на него мощности. В этом случае осциллограф показывает временную развертку переходного процесса.

Время перестройки частоты фильтров определяется как интервал времени от начала подачи тока на катушки перестройки фильтров, до момента, когда изменение частоты фильтров достигнет значения 0,9 диапазона перестройки:

$$f_2 = f_1 + 0,9 (f_3 - f_1), \quad (1)$$

где $f_1 = f_{\text{ц}} - 125 \text{ МГц}$, $f_3 = f_{\text{ц}} + 125 \text{ МГц}$ $f_{\text{ц}}$ – центральная частота несущей, при коде, подаваемой с компьютера (ПК) на устройство управления (УУ) в случае, когда ток в катушках равен нулю.

Рис. 2

Схема подключения ППФ при измерении времени перестройки и эпюры напряжения во временной и частотной развертке с амплитудного детектора, подключенного к выходу фильтра

Правая часть рисунка, показывает контроль времени перестройки t_n , при изменении частоты фильтров от f_1 до f_3 границ перестройки. Стоит отметить, что f_2 – частотная точка равная значению 0,9 от диапазона перестройки; f_4 – частота на кривой АЧХ фильтра, ее значение равно минус 10 – 20 дБ при установки центральной частоты f_3 ; t_0 – время начала подачи тока на катушки перестройки фильтров; t_1 – время, когда изменение частоты фильтров достигнет величины 0,9 от значения диапазона перестройки.

Для сокращения времени перестройки показана форма управляющего импульса напряжения с фиксированным начальным участком.

Изменяя с помощью УУ центральную частоту фильтра скачкообразно от t_1 до t_3 необходимо измерить время от начала воздействия до момента, когда фильтр достиг-

нет частоты t_2 . С целью получения более точного измерения необходимо выбирать точку не на вершине, а в пределах 3-10 дБ от вершины, ввиду того, что там наиболее крутая характеристика АЧХ.

Для фиксации огибающей мощности сигнала при движении фильтра от точки f_1 до f_3 необходимо настраивать анализатор цепей на выдачу моно частоты со значением f_4 .

На рис. 3 приведена характеристика времени перестройки центральной частоты в диапазоне быстрой электрической перестройки ($\Delta f_{on} = \pm 125$ МГц), данная характеристика была получена при измерении опытного образца.

Изображенный зеленый канал – это запись падения напряжения на катушках, оранжевый канал – запись напряжения на амплитудном СВЧ детекторе. Показана разница во времени, когда подан импульс

Рис. 3

Время перестройки центральной частоты в диапазоне быстрой электрической перестройки

напряжения на катушку (левый горизонтальный курсор) и моментом, когда АЧХ фильтра перестроилась на значение $0,9 \Delta f_{\text{оп}}$ (правый курсор).

Рассмотренный образец фильтра перестраивается на ± 125 МГц всего за 19,4 мкс, при напряжении питания драйвера (УУ) фильтра всего ± 12 В. Данное напряжение не является предельным, при

повышении напряжения питания можно добиться дальнейшего сокращения времени пристраивания, хотя и незначительно.

На рис. 4, 5, 6 показаны экспериментально измеренные характеристики электрической перестройки фильтров, настроенных на центральную частоту 3 ГГц, 10,5 ГГц, 19,5 ГГц соответственно.

Рис. 4

АЧХ фильтра, настроенного на $f_{\text{ц}} = 3$ ГГц в диапазоне полной частотной перестройки

Рис. 5

АЧХ фильтра, настроенного на $f_{\text{ц}} = 10,5$ ГГц в диапазоне полной частотной перестройки

Рис. 6

АЧХ фильтра, настроенного на $f_{\text{ц}} = 19,5$ ГГц в диапазоне полной частотной перестройки

Рис. 7

Изделие ППФ на МСВ

Данные были получены для диапазона быстрой перестройки фильтров ± 125 МГц с временем перестройки менее 20 мкс и диапазона полной перестройки более ± 500 МГц с временем перестройки менее 250 мкс.

Готовое изделие представлено на рис. 7.

Выводы

Таким образом, оптимизация конструкции магнитной системы и использование специальной формы управляющего импульса напряжения позволили сократить время перестройки и соответственно увеличить быстродействие примерно в пять раз.

Литература

1. Владимиров, В.М. Расширение динамического диапазона и снижении прямых потерь в устройствах на невзаимных магнитостатических волнах / В.М. Владимиров, В.П. Иванов // 20-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», 13-17 сентября 2010, Севастополь, Крым, Украина. – Севастополь: Вебер, 2010. – С. 700-702.
2. Полезная модель № 113076 U1 Российская Федерация, МПКН01Р 1/218 (2006.01), Устройство на магнитостатических волнах: № 2011131557: заявл. 27.07.2011; опубл. 27.01.2012 / В.П. Иванов, Г.А. Николайчук; заявитель Минпромторг РФ. – 13 с.
3. Лебедь, Б.М. Магнитостатические колебания в ферритах и их использование в технике СВЧ / Б.М. Лебедь, В.П. Лопатин // Обзоры по электронной технике. Сер.1. Вып. 12 (561). – М.: ЦНИИ «Электроника», 1978.
4. Калиникос, Б.А. Сверхвысокочастотные спиновые волны в ферромагнитных пленках / Б.А. Калиникос, А.Б. Устинов – СПб: Изд-во «Литера», 2008. – 124 с.
5. Рабодзей, А.Г. Термомагнитные сплавы / А.Г. Рабодзей // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 1975. – №9. – С.3-20.
6. Дубовой, В.А. Время перестройки полосно-пропускающих фильтров на монокристаллическом феррите / В.А. Дубовой В, А.Э. Козин, Г.С. Майоров, Д.Н. Федин // Сборник трудов всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», 4-7 июня 2012 г., Санкт-Петербург, Россия. – Санкт-Петербург, 2012. – Том.2. – С.142-146.

References

1. Vladimirov V. M., Ivanov V. P. Rasshireniye dinamicheskogo diapazona i snizhenii pryamykh poter' v ustroystvakh na nevzaimnykh magnitostaticeskikh volnakh [Expanding the dynamic range and reducing forward losses in devices based on nonreciprocal magnetostatic waves]. 20th International Conference "Microwave and Telecommunication Technologies", Ukraine, Sevastopol, 2010, Veber, pp.700-702.
2. Ivanov V. P., Nikolaychuk G. A., Ustroystvo na magnitostaticeskikh volnakh [Magnetostatic wave device]. Utility patent no. 113076 U1 Russian Federation, IPC N01R 1/218 (2006.01), the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation, application no. 2011131557, app. 07.27.2011, publ. 01.27.2012.
3. Lebed B. M., Lopatin V. P. Magnitostaticheskiye kolebaniya v ferritakh i ikh ispol'zovaniye v tekhnike SVCH [Magnetostatic vibrations in ferrites and their use in microwave technology]. *Reviews on electronic engineering. Series 1*, Moscow, TsNII "Elektronika", 1978, iss. 12(561).
4. Kalinikos B. A., Ustinov A. B. Sverkhvysokochastotnyye spinovyye volny v ferromagnitnykh plenkakh [Microwave spin waves in ferromagnetic films]. Saint-Petersburg, Litera, 2008, 124 p.
5. Rabodzey A. G. Termomagnitnyye splavy [Thermomagnetic alloy]. *Electronic Engineering. Series 1. Microwave devices*, 1975, no. 9, pp. 3-20.
6. Dubovoy V. A., Kozin A. E., Mayorov G. S., Fedin D. N. Vremya perestroyki polosno-propuskayushchikh fil'trov na monokristallicheskom ferrite [Tuning time of bandpass filters on single-crystal ferrite]. Proceedings of scientific and technical conference "Elektronika i mikroelektronika SVCH", Russia, Saint-Petersburg, 2012, vol. 2, pp. 142-146.