

# The Characteristic Analysis of Microwave Photonic Filter Using Cascaded IIR Filter and FIR Filter

Kuiying Nie, Zonghua Hu

Xingyi Normal University for Nationalities, Xingyi Guizhou  
Email: niekuiying@163.com

Received: Mar. 6<sup>th</sup>, 2019; accepted: Mar. 19<sup>th</sup>, 2019; published: Mar. 26<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

Based on the thorough research of the technology of microwave filtering, a kind of microwave photonic filter (MPF) using cascaded IIR filter and FIR filter was theoretically analyzed. And the influences of the coupling coefficient of the IIR filter, the gain of Er-doped fiber ring, the reflectivity of the fiber Bragg gratings (FBGs), and the coupling coefficient of the FIR filter on the filtering performance of the MPF were discussed. The results show that the intermodulation of band pass and band stop filtering can be achieved by optimizing the coupling coefficient of the FIR filter, the coupling coefficient, the gain of Er-doped fiber ring and the reflectivity of FBGs of the IIR filter.

## Keywords

Microwave Photonic Filter, Flatband Pass Filtering, Infinite Impulse Response Filter, Finite Impulse Response Filter

---

# 级联IIR和FIR滤波器的微波光子滤波器的特性分析

聂奎莹, 胡总华

兴义民族师范学院, 贵州 兴义  
Email: niekuiying@163.com

收稿日期: 2019年3月6日; 录用日期: 2019年3月19日; 发布日期: 2019年3月26日

---

## 摘要

在深入研究微波滤波技术的基础上, 理论分析了一种级联IIR和FIR滤波器的微波光子滤波器(MPF)。讨

论了IIR滤波器的耦合系数、掺饵光纤环的增益和光纤布拉格光栅(FBGs)的反射率以及FIR滤波器的耦合系数对微波光子滤波器滤波性能的影响。结果表明通过优化FIR滤波器的耦合系数, IIR滤波器的耦合系数、掺饵光纤环增益和FBGs的反射率, 可以实现平坦带通和平坦带阻滤波性能的互调。

### 关键词

微波光子滤波器, 平坦带通滤波, 无限脉冲响应滤波器, 有限脉冲响应滤波器

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

微波滤波是射频(Radio Frequency, RF)系统中的一种重要技术, 广泛应用于雷达和通信领域, 因此, 微波光子滤波技术近年来备受关注[1] [2]。由于射频系统逐渐增加的复杂性, 微波光子滤波器(Microwave Photonic Filter, MPF)正向高频、高 Q 值、可重构和可调谐方向发展。与传统的电子滤波器相比, MPF 突破了电子器件的带宽限制, 在高采样频率、可调谐性、低损耗和抗电磁干扰等方面都具有很大的优势[3] [4]。由于其优异的性能, MPF 可以满足未来通信领域的大部分需求。

基于无限脉冲响应(Infinite Impulse Response, IIR)的滤波器是 MPF 的一种典型结构, 其原理是利用光纤环提供无数的加权和延迟输入信号, 然而这种 MPF 具有较低的自由光谱范围[5]。MPF 的另外一种常用结构是基于有限脉冲响应(Finite Impulse Response, FIR)滤波器的, 这种结构是以多抽头延迟线为基础的。通常, MPF 的光源是由多波长光源或切片宽带光源实现, 基于多波长光源的 MPF 因其高 Q 值、可调谐性、低噪声而被广泛应用[6] [7]。众所周知, 在常用的多波长 MPF 中存在正抽头, 通常用作低通滤波器。许多科研工作者通过使用偏振调制[8] [9]、交叉增益调制[10]、相位调制到强度调制转换[11]、多个电光调制器与色散介质相结合[12]等实现带通 MPF。但是基于偏振调制和相位调制的 MPF 稳定性能较差; 级联 FIR 滤波器和 IIR 滤波器的 MPF 可以用于实现带通滤波[13], 本文详细分析了一种级联 IIR 滤波器和 FIR 滤波器的 MPF, 通过调节 IIR 滤波器的耦合系数、掺饵光纤环的增益和 FBGs 的反射率以及 FIR 滤波器的耦合系数可以实现平坦带通滤波和带阻滤波的互调。

## 2. 级联 IIR 滤波器和 FIR 滤波器的 MPF 的结构和滤波原理

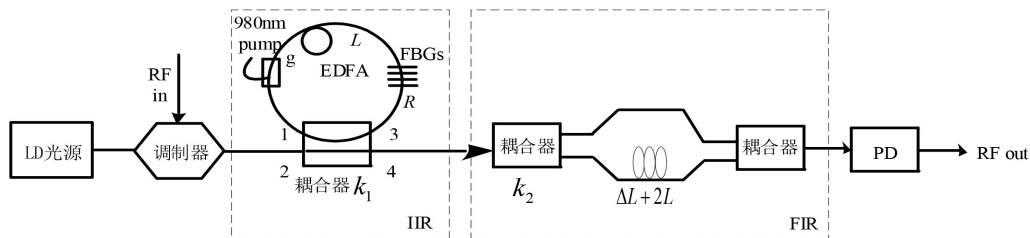


Figure 1. The structure diagram of the microwave photonic filter based on cascaded IIR filter and FIR filter  
图 1. 级联 IIR 滤波器和 FIR 滤波器的 MPF 的结构图

级联 IIR 滤波器和 FIR 滤波器的 MPF 的结构如图 1 所示。第一部分是基于掺饵光纤光栅环的 IIR 滤波器, 第二部分是基于 M-Z 干涉仪的 FIR 滤波器。调制光通过耦合系数为  $k_1$  的耦合器, 其中的  $(1 - k_1)$  部

分光直接进入 FIR 滤波器中, 剩余的  $k_1$  部分的光进入长为  $L$  的掺饵光纤环中, 当经过 FBGs 时, 其中的  $R$  部分光被 FBGs 反射回来, 进入耦合器, 其中的  $(1 - k_1)$  部分沿顺时针方向进入掺饵光纤环中, 经过掺饵光纤放大器后, 在 FBGs 的另一端再次反射, 再经过放大后进入耦合器, 其中的  $k_1$  部分进入 FIR 滤波器, 另外的  $(1 - k_1)$  部分继续进入掺饵光纤环中传输, 如此循环下去。耦合进耦合器  $k_2$  的光信号通过耦合器  $k_2$  后被分成两束, 其中一束光信号经过 M-Z 干涉仪上臂后经过耦合器输出, 另一束光经过长为  $\Delta L + 2L$  的光纤环后也经过耦合器后输出, 其中  $\Delta L$  的光纤环使两路产生的相位差为  $\pi$ , 从而实现 FIR 微波光子滤波响应。为了使 IIR 滤波器和 FIR 滤波器有相同的自由光谱范围, M-Z 干涉仪的臂长差减去  $\Delta L$  后是 IIR 滤波器光纤环长  $L$  的 2 倍。整个微波光子滤波器由 FIR 滤波器和 IIR 滤波器级联形成, 通过调节  $k_1$ 、 $k_2$ 、FBGs 的反射率  $R$ 、掺饵光纤环增益  $g$  和长度  $L$  可以实现 MPF 不同的滤波性能。

### 3. 分析和讨论

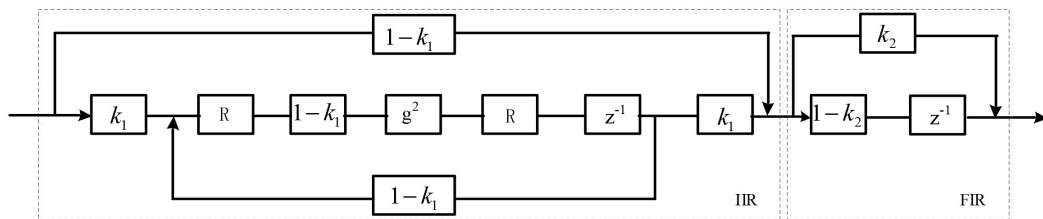


Figure 2. The signal flow diagram of the microwave photonic filter based on cascaded IIR filter and FIR filter  
图 2. 级联 IIR 滤波器和 FIR 滤波器的 MPF 的信号流程图

根据级联 IIR 滤波器和 FIR 滤波器的 MPF 结构图, 可以得到其信号流程图如图 2 所示, 根据信号流程图, 利用自动控制原理可以推导出系统函数的表达式:

$$H(\omega) = \left[ \frac{(1 - k_1) e^{j\omega T} - (2k_1 - 1)(1 - k_1) R^2 g^2}{e^{j\omega T} - R^2 g^2 (1 - k_1)^2} \right] [k_2 - (1 - k_2) e^{j\omega T}]$$

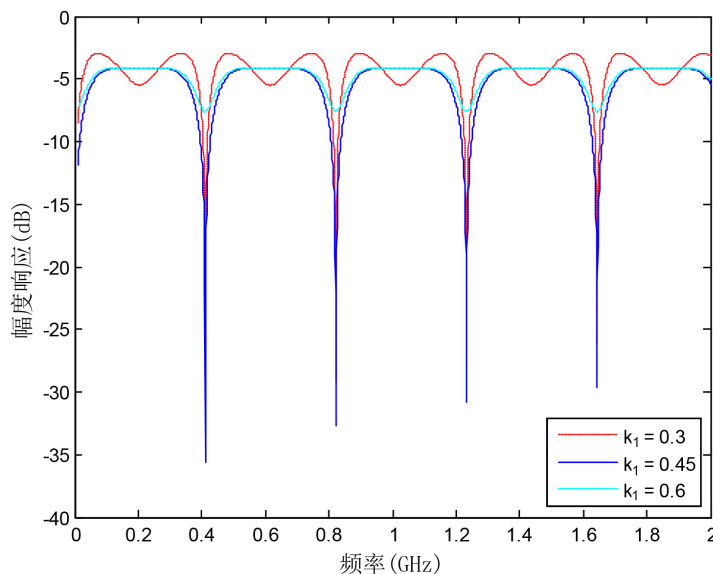
其中  $k_1$ 、 $k_2$  分别是 IIR 和 FIR 中耦合器的耦合系数;  $g$  为掺饵光纤环的增益;  $R$  为 FBGs 的反射率;  $z = e^{j\omega T} = e^{j2\pi f T}$ ,  $f$  是微波信号的基波频率,  $T = \frac{2nL}{c}$  是光信号在光纤环中的延迟时间,  $n$  为光纤环的折射率,  $L$  为光纤环的长度,  $c$  为光速。

#### 3.1. IIR 滤波器中耦合器的耦合系数 $k_1$ 对 MPF 滤波性能的影响

为了理解 IIR 滤波器中耦合器的耦合系数  $k_1$  对 MPF 滤波性能的影响, 我们计算了当 FIR 滤波器中耦合器的耦合系数  $k_2 = 0.5$ , 掺饵光纤环增益  $g = 2$ 、长度  $L = 0.5$  m, FBGs 的反射率  $R = 0.5$ , 耦合系数  $k_1$  分别为 0.3、0.45、0.6 时 MPF 的传输特性曲线, 如图 3 所示, 从图中可以看出, MPF 的滤波效果均呈现带通响应, 主要是由于  $k_2 = 0.5$  保持不变时, FIR 滤波器的滤波深度最大, 可以实现深度约为 50 dB 的带通滤波响应[13]。而 IIR 滤波器起到了补偿的作用, 所以 MPF 的传输特性呈现带通响应。从图 3 可以看出, 当  $k_1 = 0.3$  时, 补偿效果不好, 通带有较大的纹波, 而在  $k_1 = 0.45$  时, 补偿效果最佳, 平坦度最好, 随着  $k_1$  的继续增大, 补偿效果变差, 可能出现了过补偿。

#### 3.2. FIR 滤波器中耦合器的耦合系数 $k_2$ 对 MPF 滤波性能的影响

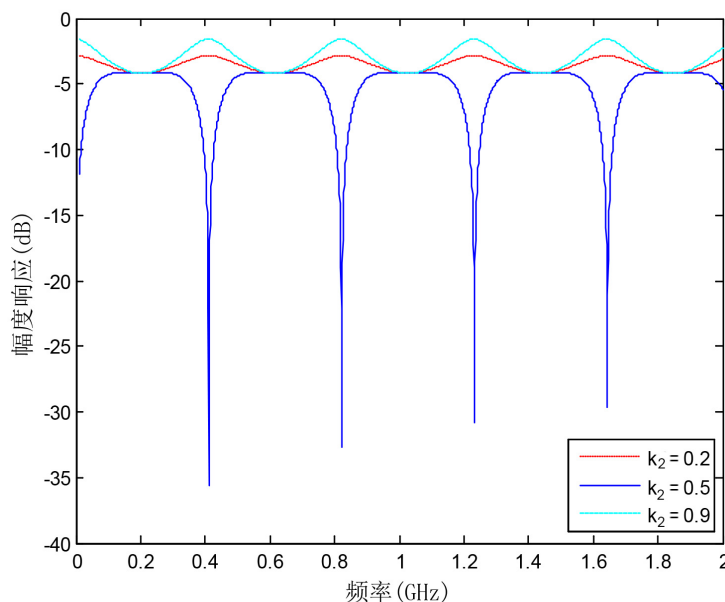
当固定 IIR 滤波器中耦合器的耦合系数  $k_1 = 0.45$ , 掺饵光纤环增益  $g = 2$ 、FBGs 的反射率  $R = 0.5$ , 长度  $L = 0.5$  m 时, FIR 滤波器中耦合器的耦合系数  $k_2$  分别为 0.2、0.5 和 0.9 时, 分析 MPF 的滤波性能,



**Figure 3.** The effect of coupling coefficient  $k_1$  with IIR filter on the performance of the microwave photonic filter

**图 3.** IIR 滤波器中耦合器的耦合系数  $k_1$  对 MPF 滤波性能的影响

如图 4 所示, 可以看到当  $k_2 = 0.5$  时, 实现了平坦的带通滤波性能, 而当  $k_2 = 0.2$  和  $k_2 = 0.9$  时, MPF 的滤波性能反而呈现出带阻响应。这是因为 FIR 滤波器在  $k_2 = 0.5$  时具有最大的深度, 这时利用 IIR 滤波器的波谷有效补偿了 FIR 滤波器的波峰, 从而实现平坦的带通滤波响应特性。而改变  $k_2$  为其他值时, FIR 滤波器的深度都将变小, 此时 IIR 滤波器的波谷补偿 FIR 滤波器的波峰, 就起到了过补偿的作用, 因此呈现出的是带阻响应。



**Figure 4.** The effect of coupling coefficient  $k_2$  with FIR filter on the performance of the microwave photonic filter

**图 4.** FIR 滤波器中耦合器的耦合系数  $k_2$  对 MPF 滤波性能的影响

### 3.3. IIR 滤波器中的掺饵光纤环的增益 $g$ 对 MPF 滤波性能的影响

当固定 IIR 滤波器中耦合器的耦合系数  $k_1 = 0.45$ , FBGs 的反射率  $R = 0.5$ , 掺饵光纤环长度  $L = 0.5$  m, FIR 滤波器中耦合器的耦合系数  $k_2 = 0.5$  时, 改变掺饵光纤环的增益  $g$  分别为 1、2、3 时, 分析其对 MPF 滤波性能的影响, 如图 5 所示。从图中可以看出, 增益  $g$  的改变并没有改变 MPF 的带通滤波特性, 这主要是因为 FIR 滤波器中耦合器的耦合系数  $k_2 = 0.5$  不变, 可以实现最大的滤波深度, 而 IIR 滤波器的补偿作用只会改变 MPF 的平坦度, 不会改变其带通滤波特性, 因此只会引起 MPF 滤波幅度的改变。

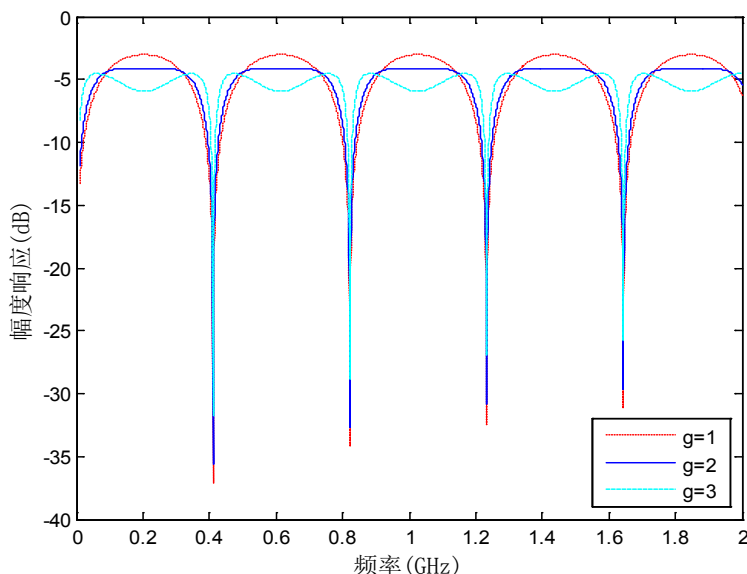


Figure 5. The effect of the gain of the erbium-doped fiber on the performance of the microwave photonic filter

图 5. IIR 滤波器中掺饵光纤环的增益  $g$  对 MPF 滤波性能的影响

### 3.4. IIR 滤波器中 FBGs 的反射率 $R$ 对 MPF 滤波性能的影响

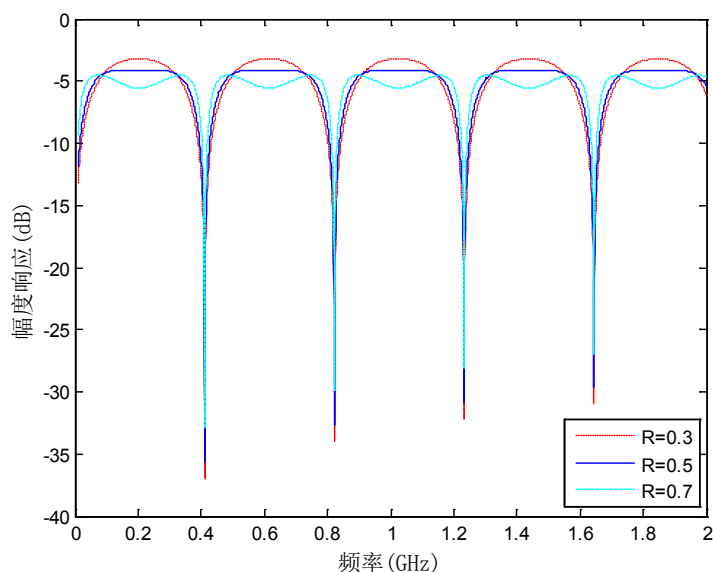
当固定 IIR 滤波器中耦合器的耦合系数  $k_1 = 0.45$ , 掺饵光纤环的增益  $g = 2$ 、长度  $L = 0.5$  m, FIR 滤波器中耦合器的耦合系数  $k_2 = 0.5$  时, 改变 FBGs 的反射率  $R$  分别为 0.3、0.5、0.7 时, 分析其对 MPF 滤波性能的影响, 如图 6 所示。从图中可以看出, 反射率  $R$  的改变引起滤波性能的变化情况类似于改变掺饵光纤环增益  $g$  的情况, 这主要是因为 FIR 滤波器中耦合器的耦合系数  $k_2 = 0.5$  时可以实现最大的滤波深度, 而 IIR 滤波器的补偿作用只会改变 MPF 的平坦度, 不会改变其带通滤波特性。

### 3.5. 掺饵光纤环的长度 $L$ 对 MPF 滤波性能的影响

当固定 IIR 滤波器中耦合器的耦合系数  $k_1 = 0.45$ , 掺饵光纤环增益  $g = 2$ , FBGs 的反射率  $R = 0.5$ , FIR 滤波器中耦合器的耦合系数  $k_2 = 0.5$ , 改变掺饵光纤环的长度  $L$  分别为 0.2 m、0.4 m、1 m 时, 分析其对 MPF 滤波性能的影响, 如图 7 所示。从图中可以看出, MPF 具有很强的边频选择特性, 因此可以通过控制光纤环的长度来实现 MPF 的可调谐性。

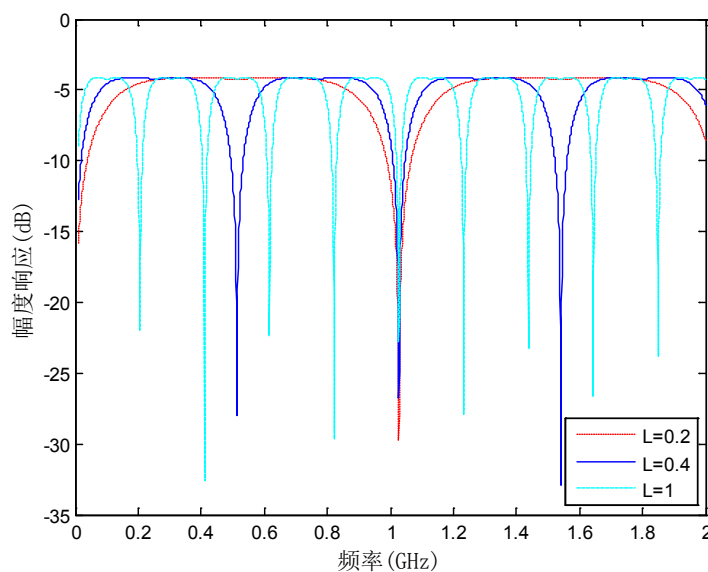
### 3.6. 平坦带阻 MPF 的实现

当 IIR 滤波器中的耦合器的耦合系数  $k_1 = 0.5$ , 掺饵光纤环增益  $g = 2$ , FBGs 的反射率  $R = 1$  时, IIR 滤波器可以实现带阻滤波特性。当 FIR 滤波器的滤波深度较浅时, 即  $k_2$  分别等于 0.2、0.4、0.9 时分析其



**Figure 6.** The effect of the reflectivity of the fiber Bragg grating on the performance of the microwave photonic filter

**图 6.** IIR 滤波器中 FBGs 的反射率  $R$  对 MPF 滤波性能的影响



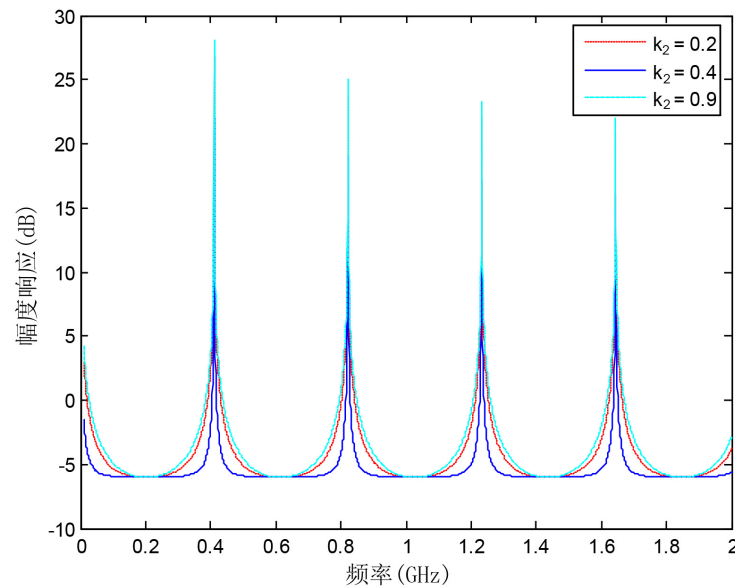
**Figure 7.** The effect of the length of the fiber ring on the performance of the microwave photonic filter

**图 7.** 掺饵光纤环长度  $L$  对 MPF 滤波性能的影响

对 MPF 滤波性能的影响, 如图 8 所示, 从图中可以看出三组不同  $k_2$  的值都分别实现了平坦的带阻滤波特性。这是因为 FIR 滤波器只有在  $k_2 = 0.5$  时具有最大的滤波深度, 改变为其它值时, FIR 滤波器的滤波深度都变得很小, 此时 IIR 滤波器的补偿就起到了过补偿的作用, 从而实现的是带阻滤波响应。

#### 4. 结束语

本文给出了一种级联 IIR 滤波器和 FIR 滤波器的 MPF, 根据其结构图, 利用自动控制原理得到了该 MPF 的信号流程图, 根据信号流程图计算出系统的传输函数。讨论了 IIR 滤波器和 FIR 滤波器的耦合系



**Figure 8.** The effect of coupling coefficient  $k_2$  with FIR filter on the performance of the bandstop microwave photonic filter  
**图 8.** FIR 滤波器耦合系数  $k_2$  对带阻 MPF 滤波性能的影响

数、FBGs 的反射率、掺饵光纤环的增益和长度对 MPF 滤波性能的影响。通过对 IIR 滤波器和 FIR 滤波器中结构参数的分析可知, 当  $k_1 = 0.45$ ,  $k_2 = 0.5$ ,  $g = 2$ ,  $R = 0.5$  时, 可以实现平坦的带通滤波特性; 而当  $k_1 = 0.5$ ,  $k_2 = 0.4$ ,  $g = 2$ ,  $R = 1$  时, 可以实现平坦的带阻滤波特性。因此可以通过改变 IIR 滤波器和 FIR 滤波器的结构参数实现平坦带通 MPF 和平坦带阻 MPF 的互调。

### 基金项目

贵州省科技厅联合基金项目(黔科合 LH 字[2016]7036 号)、贵州省教育厅青年项目(黔教合 KY 字[2016]326)、贵州省教育厅青年项目(黔教合 KY 字[2017]360)。

### 参考文献

- [1] Capmany, J., Mora, J., Gasulla, I., *et al.* (2013) Microwave Photonic Signal Processing. *Journal of Light Wave Technology*, **31**, 571-586. <https://doi.org/10.1109/JLT.2012.2222348>
- [2] Minasian, R.A. (2006) Photonic Signal Processing of Microwave Signals. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **54**, 832-846. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2005.863060>
- [3] Capmany, N.D. (2007) Microwave Photonics Combines Two Worlds. *Nature Photonics*, **1**, 319-330.
- [4] Dolfi, D. (2011) New Trends in Optoelectronics for Radar, EW and Communication Systems. *IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics*, Singapore.
- [5] Liu, J., Guo, N., Li, Z., *et al.* (2013) Ultrahigh-Q Microwave Photonic Filter with Tunable Q Value Utilizing Cascaded Optical-Electrical Feedback Loops. *Optics Letters*, **38**, 4304-4307. <https://doi.org/10.1364/OL.38.004304>
- [6] Capmany, J., Pastor, D. and Ortega, B. (1999) New and Flexible Fiber-Optic Delay-Line Filters Using Chirped Bragg Gratings and Laser Arrays. *IEEE Transactions on Microwave theory and Techniques*, **47**, 1321-1326. <https://doi.org/10.1109/22.775473>
- [7] Hamidi, E., Leaird, D.E. and Weiner, A.M. (2010) Tunable Programmable Microwave Photonic Filters Based on Anoptical Frequency Comb. *IEEE Transactions on Microwave theory and Techniques*, **58**, 3269-3278. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2010.2076970>
- [8] Zhangy, P.S. (2013) Tunable Multitap Microwave Photonic Filter with All Complex Coefficients. *Optics Letters*, **38**, 802-804. <https://doi.org/10.1364/OL.38.000802>

- [9] Wang, Q. and Yao, J.P. (2008) Multitap Photonic Microwave Filters with Arbitrary Positive and Negative Coefficients Using a Polarization Modulator and an Optical Polarizer. *IEEE Photonics Technology Letters*, **20**, 78-80. <https://doi.org/10.1109/LPT.2007.912562>
- [10] Manzanedo, M.D., Mora, J. and Campmany, J. (2008) Continuously Tunable Microwave Photonic Filter with Negative Coefficients Using Cross-Phase Modulation in an SOA-MZ Interferometer. *IEEE Photonics Technology Letters*, **20**, 526-528. <https://doi.org/10.1109/LPT.2008.918884>
- [11] Zeng, F., Wang, J. and Yao, J. (2005) All-Optical Microwave Bandpass Filter with Negative Coefficients Based on a Phase Modulator and Linearly Chirped Fiber Bragg Gratings. *Optics Letters*, **30**, 2203-2205. <https://doi.org/10.1364/OL.30.002203>
- [12] Yan, Y. and Yao, J. (2007) A Tunable Photonic Microwave Filter with a Complex Coefficient Using an Optical RF Phaseshifter. *IEEE Photonics Technology Letters*, **19**, 1472-1474. <https://doi.org/10.1109/LPT.2007.903753>
- [13] Qi, C.H., Pei, L., Ning, T.G., et al. (2010) Flat Microwave Photonic Filter Based on Hybrid of Two Filters. *Journal of Optics*, **12**, Article ID: 055402.

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5450, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [oe@hanspub.org](mailto:oe@hanspub.org)