

The Characteristic of Microwave Photonic Filters Using Cascaded Two IIR Filters

Kuiying Nie, Zonghua Hu

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

Received: May 1st, 2019; accepted: May 14th, 2019; published: May 21st, 2019

Abstract

A kind of adjustable bandpass microwave photonic filters (MPFs) that can realize a high Q value is presented in the paper. It consists of two cascaded infinite impulse response filters. The theory of it was detailed analyzed, and the paper discussed the influences on the filtering performance of microwave photonic filters the coupling coefficient k_1 , k_2 , k_3 of the two IIR filters, the gain of Er-doped fiber ring g , the fiber ring length L_1 , L_2 of the two IIR filters. Theoretical calculation and simulation analysis indicate that the best filtering effect of the microwave photonic filters can be obtained when the coupling coefficient of the IIR1 filter is 0.5, the gain of Er-doped fiber ring is 2, the coupling coefficient of the IIR2 filter is $k_2 = 0.5$ and $k_3 = 0.9$, and the fiber ring length of the two IIR filters is equal.

Keywords

Microwave Photonic Filters, High Quality Value, Infinite Impulse Response Filters, Adjustable

一种级联两个IIR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5月1日; 录用日期: 2019年5月14日; 发布日期: 2019年5月21日

摘要

本文给出了一种可调的高Q值的带通微波光子滤波器(Microwave Photonic Filters, MPFs), 它由两个级

联的无限脉冲响应(Infinite Impulse Response, IIR)滤波器组成。对其进行了详细的理论分析, 讨论了两个IIR滤波器的耦合系数 k_1, k_2, k_3 、掺饵光纤环的增益 g 和光纤环的长度 L_1 和 L_2 对微波光子滤波器滤波性能的影响。通过理论计算和仿真分析可知, 在IIR1滤波器的耦合系数为 $k_1 = 0.5$ 、掺饵光纤环增益为2、IIR2滤波器的耦合系数 $k_2 = 0.5, k_3 = 0.9$ 、两个光纤环长度相等时, 得到的微波光子滤波器的滤波效果最佳。

关键词

微波光子滤波器, 高Q值, 无限脉冲响应滤波器, 可调谐

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

微波光子学是利用光子技术实现微波系统射频功能的一门交叉学科[1], 微波光子滤波器是微波光子学的一个重要分支, 由于其低损耗、高带宽和抗电磁干扰等优点, 多年来一直受到研究者的关注[2]。具有高品质因子 Q 或窄带宽的 MPFs 能够提供高频选择性, 在高纯微波信号产生、高分辨率微波光子传感器和高性能微波光子雷达中具有重要应用[3] [4] [5]。

近年来, 研究者们采用多种方法来提高 MPFs 的 Q 值, 对于有限脉冲响应(Finite Impulse Response, FIR) MPFs, 大多采用增加抽头数量来增加 Q 值, 但是相应的元件数量和花费都将增加, 从而 MPFs 的可靠性降低[6]。相对于 FIR 微波光子滤波器, 增加 IIR 微波光子滤波器的 Q 值需要较少元件, 比如可以采用级联 FIR 滤波器和 IIR 滤波器的方法增强其 Q 值[7], 采用级联两个 IIR 滤波器的方法增强 Q 值[8]。本文详细分析了一种级联两个 IIR 滤波器的微波光子滤波器, 通过调节两个 IIR 滤波器的耦合系数和掺饵光纤环的增益, 得到了在耦合系数 $k_1 = 0.5, k_2 = 0.5, k_3 = 0.9$, 掺饵光纤环增益 $g = 2$ 时, 微波光子滤波器的滤波性能最佳。另外由于游标效应, 只有同时与两个 IIR 滤波器频率相匹配的频率才能被过滤掉, 从而显著增加级联两个 IIR 滤波器的 MPFs 自由频谱范围和 Q 值, 这里选择两个 IIR 滤波器的光纤环长相等。

2. 级联两个 IIR 滤波器的 MPFs 的结构和滤波原理分析

级联两个 IIR 滤波器的 MPFs 的结构如图 1 所示。第一部分是基于耦合器 k_1 和掺饵光纤光栅环的 IIR 滤波器, 第二部分是基于两个耦合器 k_2 和 k_3 的 IIR 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 IIR2 滤波器中, 剩余的 k_1 部分的光进入长为 L_1 的掺饵光纤环中, 经过掺饵光纤环放大器后, 其中的 k_1 部分进入 IIR2 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。对于 IIR1 滤波器, 通过控制输入的光功率可以得到一个尖锐的带通滤波响应。耦合进耦合器 k_2 的光信号通过长为 $L_2/2$ 的光纤环后再经过耦合器 k_3 , 其中有 k_3 部分直接输出, 另外的 $(1 - k_3)$ 部分光进入到 IIR2 滤波器的左半臂, 经过的长为 $L_2/2$ 光纤环后有 $(1 - k_2)$ 部分进入 IIR2 滤波器的右半臂, 如此循环下去。由于游标效应, 只有同时与两个 IIR 滤波器频率相匹配的频率才能被过滤掉, 因此这里选择 IIR2 滤波器的臂长与 IIR1 滤波器的臂长相同, 即 $L_1 = L_2 = L$, 可以增大自由频谱范围, 从而增强 MPFs 的 Q 值。整个微波光子滤波器由 IIR1 滤波器和 IIR2 滤波器级联形成, 通过调节 k_1, k_2, k_3 、掺饵光纤环增益 g 和长度 L_1, L_2 可以实现 MPFs 的最佳滤波性能。

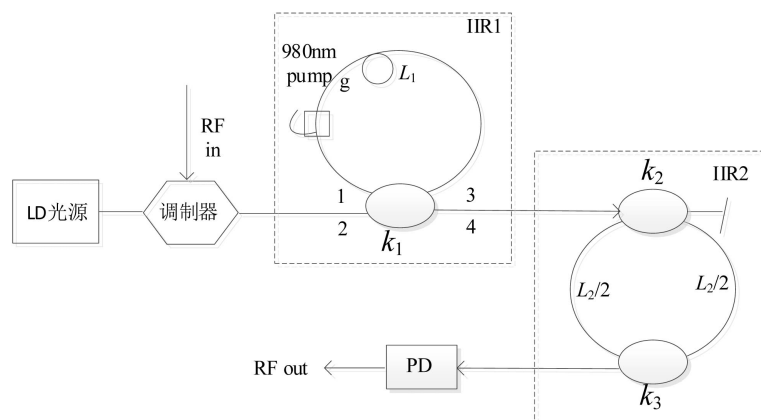


Figure 1. The structure diagram of the microwave photonic filter based on two cascaded IIR filters
图 1. 级联两个 IIR 滤波器的 MPFs 的结构图

根据级联两个 IIR 滤波器的 MPFs 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:

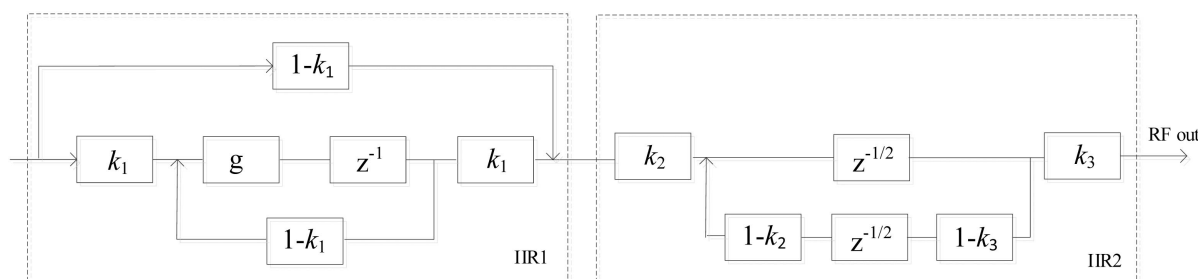


Figure 2. The signal flow diagram of the microwave photonic filter based on two cascaded IIR filters
图 2. 级联两个 IIR 滤波器的 MPFs 信号流程图

$$H(z) = \left[\frac{(1-k_1) + (2k_1-1)gz^{-1}}{1-(1-k_1)gz^{-1}} \right] \left[\frac{k_2k_3z^{1/2} + k_2k_3(1-k_2)(1-k_3)z^{-1/2}}{z-(1-k_2)(1-k_3)} \right] \quad (1)$$

其中 k_1 、 k_2 和 k_3 分别是 IIR1 和 IIR2 滤波器中耦合器的耦合系数; g 为掺饵光纤环的增益; $z = e^{j\omega T} = e^{j2\pi fT}$, f 是射频信号的基波频率, $T = \frac{nL}{c}$ 是光信号在光纤环中的延迟时间, n 为光纤环的有效折射率, L 为光纤环的长度, c 为真空中的光速。

级联两个 IIR 滤波器的 MPFs 在频域中的传输函数为:

$$H(\omega) = \left[\frac{(1-k_1)e^{j\omega T} + (2k_1-1)g}{e^{j\omega T} - (1-k_1)g} \right] \left[\frac{k_2k_3e^{j\omega T/2} + k_2k_3(1-k_2)(1-k_3)e^{-j\omega T/2}}{e^{j\omega T} - (1-k_2)(1-k_3)} \right] \quad (2)$$

3. 仿真分析与讨论

3.1. IIR1 滤波器中耦合系数 k_1 对 MPFs 滤波性能的影响

图 3 给出了 IIR1 耦合器的耦合系数分别为 $k_1 = 0.4$, $k_1 = 0.5$, $k_1 = 0.6$ 时微波光子滤波器的传输特性曲线, 其中 IIR2 滤波器中耦合器的耦合系数 $k_2 = 0.5$, $k_3 = 0.9$, 掺饵光纤放大器的增益 $g = 2$, 光纤环长 $L_1 = L_2 = L = 50$ cm。从图中可以看出当 IIR1 滤波器中耦合系数 $k_1 = 0.5$ 时, MPFs 的滤波性能最佳。减小

耦合系数当 $k_1 = 0.4$ 时, MPFs 的幅频响应带宽展宽, 幅度下降。增大耦合系数当 $k_1 = 0.6$ 时, MPFs 的幅频响应由窄的带通响应变为带陷响应。

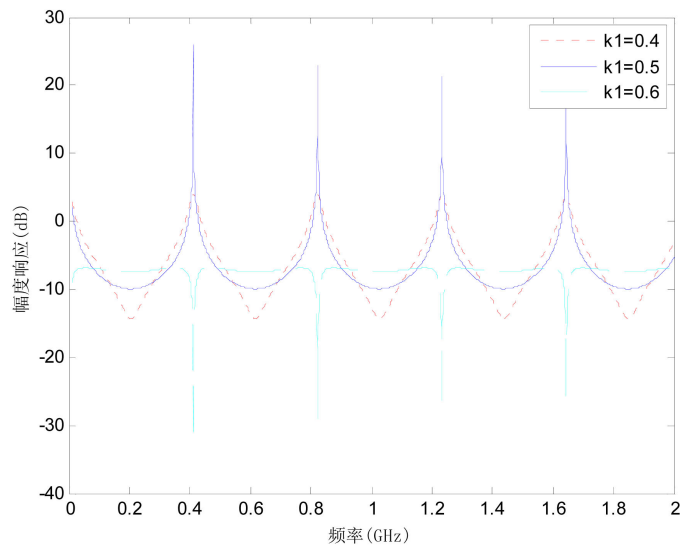


Figure 3. The frequency characteristic of the microwave photonic filter based on two cascaded IIR filters with different coupling coefficient k_1

图 3. 级联两个 IIR 滤波器的 MPFs 在不同耦合系数 k_1 下的幅频特性

3.2. IIR1 滤波器中掺饵光纤环增益 g 对 MPFs 滤波性能的影响

如图 4 所示, 给出了 IIR1 中耦合器的耦合系数 $k_1 = 0.5$, IIR2 滤波器中耦合器的耦合系数 $k_2 = 0.5$, $k_3 = 0.9$, 光纤环长 $L_1 = L_2 = L = 50$ cm 都固定不变的情况下, 掺饵光纤环增益分别为 $g = 1, g = 2, g = 4$ 时 MPFs 的传输特性曲线。从图中可以看出, 只有当掺饵光纤环增益 $g = 2$ 时, MPFs 的幅频响应带宽最窄, 幅度最大, 增大或减小掺饵光纤环的增益, 得到的 MPFs 的滤波效果均很差, 不仅带宽变宽, 幅度也下降很多。

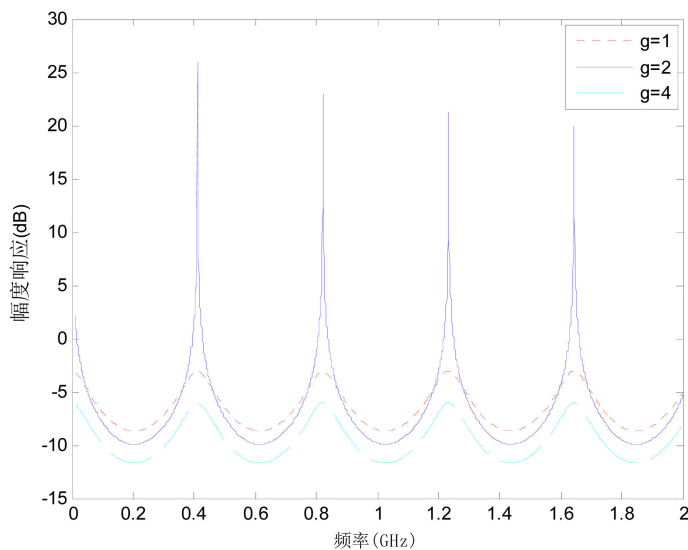


Figure 4. The frequency characteristic of the microwave photonic filter based on two cascaded IIR filters with different gain of Er-doped fiber ring g

图 4. 级联两个 IIR 滤波器的 MPFs 在不同掺饵光纤增益 g 下的幅频特性

3.3. IIR2 滤波器中耦合系数 k_2 对 MPFs 滤波性能的影响

如图 5 所示, 给出了 IIR1 中耦合器的耦合系数 $k_1 = 0.5$, 掺饵光纤环增益为 $g = 2$, IIR2 滤波器中耦合器的耦合系数 $k_3 = 0.9$, 光纤环长 $L_1 = L_2 = L = 50$ cm, IIR2 滤波器中耦合器的耦合系数 k_2 分别为 $k_2 = 0.4$, $k_2 = 0.5$, $k_2 = 0.6$ 时 MPFs 的传输特性曲线。从图中可以看出, 当 $k_2 = 0.5$ 时, MPFs 的滤波性能最佳, 减小 IIR2 滤波器中耦合器的耦合系数 k_2 为 0.4 时, MPFs 的滤波深度减小, 而增加 IIR2 滤波器中耦合器的耦合系数 k_2 为 0.6 时, MPFs 的滤波带宽展宽, 因此, 这里选择 $k_2 = 0.5$ 。

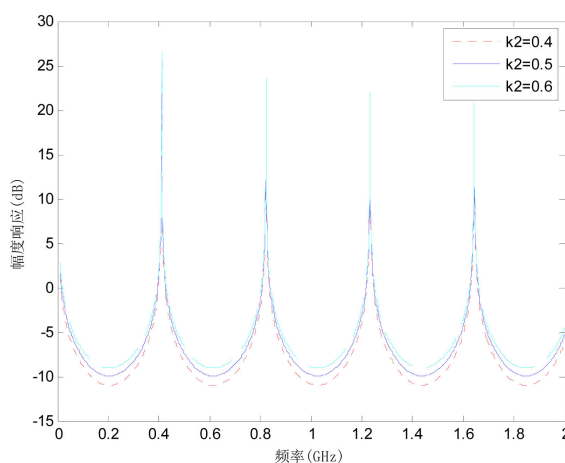


Figure 5. The frequency characteristic of the MPFs based on two cascaded IIR filters with different coupling coefficient k_2
图 5. 级联两个 IIR 滤波器的 MPFs 在不同耦合系数 k_2 下的幅频特性

3.4. IIR2 滤波器中耦合系数 k_3 对 MPFs 滤波性能的影响

如图 6 所示, 给出了 IIR1 中耦合器的耦合系数 $k_1 = 0.5$, 掺饵光纤环增益为 $g = 2$, IIR2 滤波器中耦合器的耦合系数 $k_2 = 0.5$, 光纤环长 $L_1 = L_2 = L = 50$ cm, IIR2 滤波器中耦合器的耦合系数 k_3 分别为 $k_3 = 0.8$, $k_3 = 0.9$, $k_3 = 0.95$ 时 MPFs 的传输特性曲线。从图中可以看出, 当 $k_3 = 0.9$ 时, MPFs 的滤波性能最佳, 减小 IIR2 滤波器中耦合器的耦合系数 k_3 为 0.8 时, MPFs 的滤波深度变低, 而增加 IIR2 滤波器中耦合器的耦合系数 k_3 为 0.95 时, MPFs 幅频响应的带宽展宽, 因此, 这里选择 $k_3 = 0.9$ 。

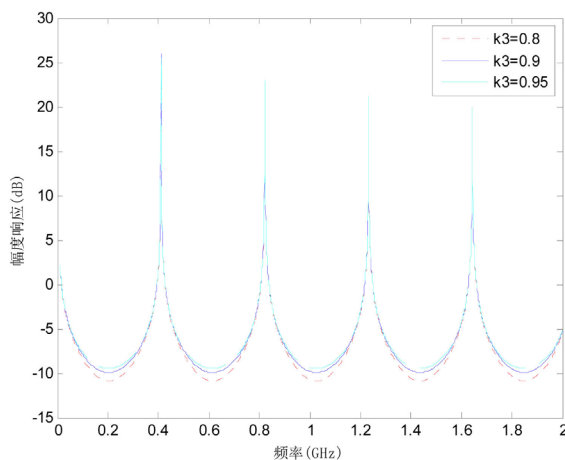


Figure 6. The frequency characteristic of the MPFs based on two cascaded IIR filters with different coupling coefficient k_3
图 6. 级联两个 IIR 滤波器的 MPFs 在不同耦合系数 k_3 下的幅频特性

3.5. 光纤环长度 L 对 MPFs 滤波性能的影响

如图 7 所示, 给出了 IIR1 中耦合器的耦合系数 $k_1 = 0.5$, 掺饵光纤环增益为 $g = 2$, IIR2 滤波器中耦合器的耦合系数 $k_2 = 0.5$, $k_3 = 0.9$, 光纤环长分别为 $L = 20\text{ cm}$, $L = 40\text{ cm}$, $L = 80\text{ cm}$ 时 MPFs 的传输特性曲线。从图中可以看出, 级联两个 IIR 滤波器的 MPFs 具有很强的边频选择性, 因此可以通过控制光纤环的环长实现 MPFs 的可调谐性。当光纤环长从 20 cm 增加到 80 cm 时, 频谱的自由频谱范围减小, 同时 3 dB 带宽也有明显减小, 因此 Q 值变化不大。

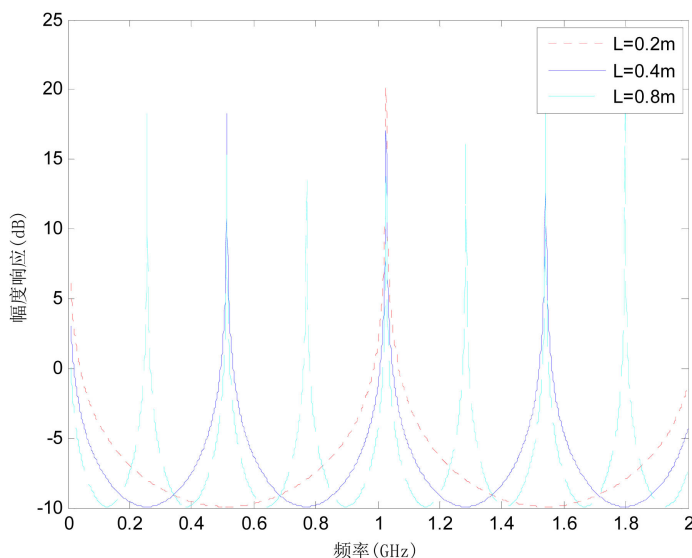


Figure 7. The frequency characteristic of the MPFs based on two cascaded IIR filters with different length of fiber ring L
图 7. 级联两个 IIR 滤波器的 MPFs 在不同光纤环长 L 下的幅频特性

图 8 给出了 IIR1 滤波器(Front loop)的环长 L_1 和 IIR2 滤波器(Back loop)的环长 L_2 时 IIR1 滤波器和 IIR2 滤波器的幅频响应, 内置图是下面曲线 IIR2 滤波器幅频响应的放大图, 从图中可以看出, 当 IIR1 滤波器和 IIR2 滤波器的光纤环长相等时, IIR1 滤波器的幅频响应与 IIR2 滤波器的幅频响应在频率上相匹配, 从而实现高 Q 值的 MPFs, 因此选择 IIR1 滤波器和 IIR2 滤波器的光纤环长相等。

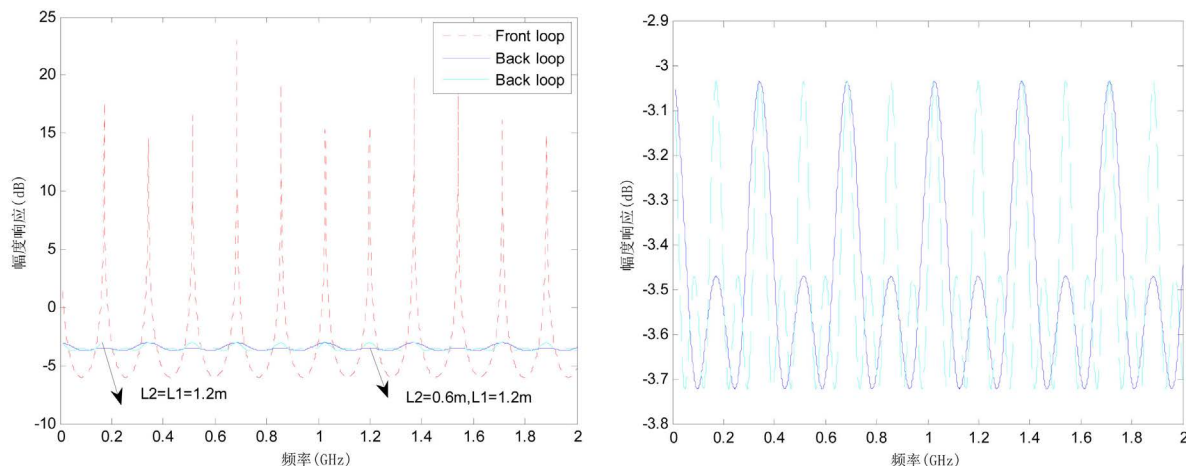


Figure 8. Compare the frequency response of IIR1 filter and IIR2 filter with different optical fiber rings
图 8. 比较 IIR1 滤波器与 IIR2 滤波器在不同光纤环长时的幅频响应

4. 结束语

本文给出了一种级联两个 IIR 滤波器的微波光子滤波器, 根据其结构图, 得到了该微波光子滤波器的信号流程图, 利用自动控制原理由信号流程图计算出该微波光子滤波器的传输函数。讨论了 IIR1 滤波器的耦合系数 k_1 和掺饵光纤环的增益 g 、IIR2 滤波器的耦合系数 k_2 、 k_3 和光纤环长度对 MPFs 滤波性能的影响。通过对 IIR1 滤波器和 IIR2 滤波器中结构参数的分析可知, 当 $k_1 = 0.5$, $k_2 = 0.5$, $k_3 = 0.9$, $g = 2$ 时, 可以实现窄带的带通滤波特性; 通过分析 IIR1 滤波器的光纤环长 L_1 和 IIR2 滤波器的光纤环长 L_2 对 MPFs 滤波性能的影响可知, 当 $L_1 = L_2$ 时, IIR1 滤波器的幅频响应与 IIR2 滤波器的幅频响应在频率上相匹配, 从而实现高 Q 值的 MPFs。因此可以通过改变 IIR1 滤波器和 IIR2 滤波器的结构参数实现可调谐的高 Q 值的带通微波光子滤波器。

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. and Novak, D. (2007) Microwave Photonics Combines Two Worlds. *Nature Photonics*, **1**, 319-330. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2007.89>
- [2] Wang, L., Yang, C.W., Li, M., Zhu, N.H. and Li, W. (2018) Switchable Microwave Photonic Filter Based on a Dual-Parallel Mach-Zehnder Modulator. *Applied Optics*, **57**, 4537-4541. <https://doi.org/10.1364/AO.57.004537>
- [3] Maleki, L. (2011) The Optoelectronic Oscillator. *Nature Photonics*, **5**, 728-730. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2011.293>
- [4] Xu, O., Zhang, J.J. and Yao, J.P. (2016) High Speed and High Resolution Interrogation of a Fiber Bragg Grating Sensor Based on Microwave Photonic Filtering and Chirped Microwave Pulse Compression. *Optics Letters*, **41**, 4859-4862. <https://doi.org/10.1364/OL.41.004859>
- [5] Ghelfi, P., Laghezza, F., Scotti, F., et al. (2014) A Fully Photonics-Based Coherent Radar System. *Nature*, **507**, 341-345. <https://doi.org/10.1038/nature13078>
- [6] Xu, E.-M., Wang, F. and Li, P.-L. (2013) A High-Q Microwave Photonic Filter by Using an SOA-Based Active Mode-Locked Fiber Ring Laser. *Optoelectronics Letters*, **9**, 97-100. <https://doi.org/10.1007/s11801-013-2414-y>
- [7] Xu, E.-M., Zhang, X.-L., Zhou, L.-N., et al. (2009) Hybrid Active-Passive Microwave Photonic Filter with High Quality Factor. *Chinese Physics Letters*, **26**, Article ID: 094208. <https://doi.org/10.1088/0256-307X/26/9/094208>
- [8] Liu, J., Guo, N., Li, Z.H., 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>

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: 2160-7567, 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: app@hanspub.org