

文章编号: 0253-2239(2008)04-0638-05

环形谐振器辅助马赫-曾德尔干涉仪型 波长交错滤波器的研究

董小伟 裴 丽 许 鸥 鲁韶华 冯素春 赵瑞峰 谭中伟

(北京交通大学光波技术研究所全光网与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要 将环形谐振器与马赫-曾德尔干涉仪相结合, 利用谐振器反馈回路引入的相位调节效应, 选择合适的谐振器耦合角, 设计出一种具有最大平坦滤波响应的环形谐振器辅助马赫-曾德尔干涉型波长交错滤波器。与普通马赫-曾德尔干涉型波长交错滤波器相比, 不仅阻带抑制 ($>38\text{dB}$) 和过渡带滚降特性明显加强, 而且在通带中心 15 GHz 范围, 将色散降低到 $\pm 10\text{ ps/nm}$ 以内, 从而可以有效避免对传输信号造成失真。在此基础上, 进一步研究环周长 (L_r) 与马赫-曾德尔干涉臂长差 (ΔL) 之间的关系, 指出波长交错滤波器奇偶输出端口的带宽分配比直接决定于 $L_r/\Delta L$, 当调整 $L_r/\Delta L=1/2$, 可以实现具有 1:2 非对称带宽分配特性的新型波长交错滤波器, 为 10 Gb/s 向 10 Gb/s + 40 Gb/s 系统升级提供一种简单、灵活的方式。

关键词 导波光学; 波长交错滤波器; 马赫-曾德尔干涉仪; 环形谐振器

中图分类号 TN252; TN256 **文献标识码** A

Study of Interleaver Based on Ring Resonator Assisted Mach-Zehnder Interferometer

Dong Xiaowei Pei Li Xu Ou Lu Shaohua Feng Suchun
Zhao Ruifeng Tan Zhongwei

(Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education,
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract An interleaver combining ring resonator with Mach-Zehnder interferometer (MZI) is proposed. Based on the phase modification provided by the ring resonator, a maximum flatness filtering response is obtained by optimizing the coupling angle of resonator. Compared with the traditional MZI, the isolation in stopband ($>38\text{ dB}$) and the rolloff in transition band are strengthened, but also the dispersion in passband is reduced to $\pm 10\text{ ps/nm}$ in the center frequency range of 15 GHz which eliminate the distortion of transmission signals. Furthermore, the influences of ring circumference (L_r) on length difference (ΔL) of MZI arms are investigated, and the bandwidth allocation of odd-even ports is directly determined by $L_r/\Delta L$. The result demonstrates that a novel interleaver with 1:2 asymmetric bandwidth allocation can be achieved by adjusting $L_r/\Delta L=1/2$. This kind of interleaver will make system upgrade from 10 Gb/s to 10 Gb/s+40 Gb/s in a more simple and flexible way.

Key words guided-wave optics; interleaver; Mach-Zehnder interferometer; ring resonator

1 引 言

随着密集波分复用 (DWDM) 传输速率的增加和信道间隔的降低, 对系统中波长选择器件的性能提出了更加严格的要求, 导致制作成本显著增加。波长交错滤波器 (Interleaver)^[1] 利用光的干涉效应形成周期性、中心波长交错的、互补性梳状光谱, 从而以奇偶交错的方式将复用信道分离。由于分离后

信道间隔扩展为原来的两倍, 将会大大减轻系统中解复用器或上下话路波长交错滤波器的设计压力。

马赫-曾德尔干涉仪 (MZI) 是目前制作波长交错滤波器最广泛采用的一种方案。但是, 单级马赫-曾德尔干涉仪的响应函数近似为正弦型, 其传输效率对信号波长的偏移十分敏感, 虽然多级级联提高响应通带平坦性的方法^[2], 可以在很大程度上缓解

收稿日期: 2007-05-15; 收到修改稿日期: 2007-11-07

基金项目: 国家自然科学基金 (60607001)、北京市自然科学基金 (4052023) 和新世纪优秀人才支持计划 (NCET-05-0091) 资助课题。

作者简介: 董小伟 (1978-), 女, 天津人, 讲师, 主要从事光通信器件方面的研究。E-mail: way7803@163.com

对激光器波长精度的要求,然而级联造成马赫-曾德尔干涉仪总臂长增加,必将严重影响器件结构的简洁性和性能的稳定性^[3]。

为解决上述问题,本文将环形谐振器与马赫-曾德尔干涉仪相结合,利用谐振器反馈回路引入的相位调节效应,在加强波长交错滤波器设计灵活性的同时,进一步改善其滤波响应性能。

2 器件结构和理论基础

在干涉臂上引入环形谐振器,构成的环形谐振器辅助马赫-曾德尔干涉仪型波长交错滤波器如图 1 所示^[4]。

将其结构拆分为两个方向耦合器(图1点框)与

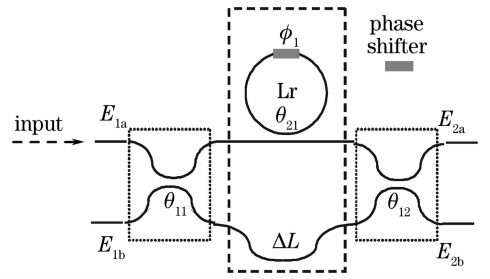


图 1 环形谐振器辅助马赫-曾德尔干涉仪型波长交错滤波器的结构示意图

Fig. 1 Structure of interleaver with ring resonator assisted MZI

中间环形谐振器(图 1 虚框)的级联,利用传输矩阵法^[5]获得输入/输出的关系为

$$\begin{bmatrix} E_{2a} \\ E_{2b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{12} & -j \sin \theta_{12} \\ -j \sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |T| \exp(-j\Phi) & 0 \\ 0 & \exp(-j\Delta\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_{11} & -j \sin \theta_{11} \\ -j \sin \theta_{11} & \cos \theta_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{1a} \\ E_{1b} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 θ_{11} 、 θ_{12} 为输入、输出耦合器的耦合角; $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}} \cdot \Delta L$ 为干涉臂长差 ΔL 引起的相移, n_{eff} 为有效折射率;

根据文献^[6],环形谐振器的幅度 $|T|$ 和相位 Φ 函数可分别表示为

$$|T| = \frac{\cos^2 \theta_{21} - 2\tau \cos \theta_{21} \cos(\phi_1 + \phi_r) + \tau^2}{1 - 2\tau \cos \theta_{21} \cos(\phi_1 + \phi_r) + \tau^2 \cos^2 \theta_{21}}, \quad (2)$$

$$\Phi = \arctan \left[\frac{\tau(\cos^2 \theta_{21} - 1) \sin(\phi_1 + \phi_r)}{(1 + \tau^2) \cos \theta_{21} - \tau(1 + \cos^2 \theta_{21}) \cos(\phi_1 + \phi_r)} \right], \quad (3)$$

式中 ϕ_1 为相移器提供的相位调节; $\theta_{21} = k_c \cdot L_c$ 为马赫-曾德尔干涉仪干涉臂与环形谐振腔间的耦合角,其中 k_c 、 L_c 分别为耦合系数和耦合长度; $\phi_r = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}} \cdot L_r$ 和 $\tau = \exp(-\alpha \cdot L_r)$ (α 为损耗系数) 分别为光在谐振腔中循环一周的相移与归一化损耗。

对于普通马赫-曾德尔干涉仪型波长交错滤波器,当输入,输出均为 3 dB 耦合器时,其响应特性达到最佳^[7]。为此设定环形谐振器辅助马赫-曾德尔干涉仪的 $\theta_{11} = \theta_{12} = \pi/4$,以便在与普通马赫-曾德尔干涉仪性能比较时具有等同的基准。这样,将(2)式、(3)式代入(1)式,经过简化可以求得直通臂和交叉臂的响应函数 $B = |E_{2a}|^2 / |E_{1a}|^2$ 和 $C = |E_{2b}|^2 / |E_{1a}|^2$,由于它们之间具有互补性,下面只需对直通臂的情况进行讨论。

3 分析讨论

3.1 耦合角 θ_{21} 和损耗 τ 对波长交错滤波器响应特性的影响

在研究环形谐振器改善马赫-曾德尔干涉仪型波

长交错滤波器性能之前,图 2 首先给出了耦合角 θ_{21} 和损耗 τ 对环形谐振器自身幅度和相位特性的影响,从图 2 可见,当环形谐振腔无损,即 $\tau = 1$ 时,其幅度响应恒为 1,也就是尽管经过环的谐振和选择,输入光信号仍全部输出,此时谐振器对传输信号只提供相位调节作用。

利用谐振器反馈回路的相位调节效应,如果令 $z^{-1} = \exp(j\phi_r)$,从(1)式~(3)式可知,环形谐振器辅助马赫-曾德尔干涉仪的响应函数具有无限脉冲响应(IIR)的特征,在器件结构和尺寸一定的条件下,从图 3 可以看出,耦合角 θ_{21} 是决定其输出特性的关键因素,通过调节马赫-曾德尔干涉仪干涉臂与谐振器的间距和作用长度,改变耦合系数 k_c 和耦合长度 L_c ,使耦合角 $\theta_{21} = 1.1731$ 时,所构成的环形谐振器辅助马赫-曾德尔干涉仪型波长交错滤波器将可实现通带响应的最大平坦[图 3(a)实线],同时获得大于 38 dB 的阻带抑制[图 3(b)实线],并且与普通马赫-曾德尔干涉仪型波长交错滤波器(没有环形谐振器)相比,过渡带的滚降特性明显加强(图 4)。

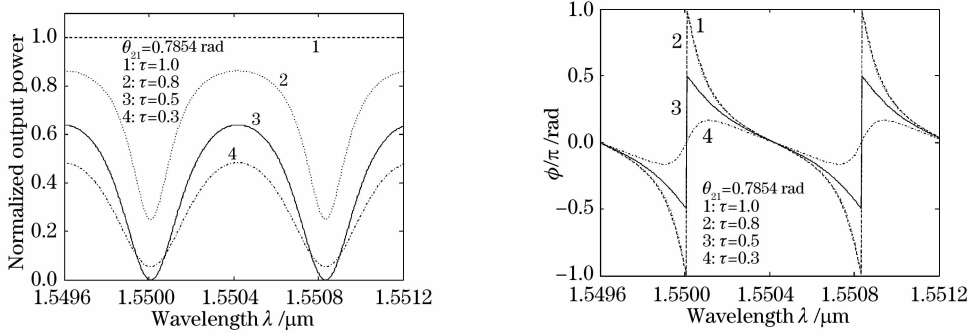


图 2 环形谐振器自身的(a)幅度和(b)相位响应

Fig. 2 (a) Amplitude and (b) phase response of ring resonator

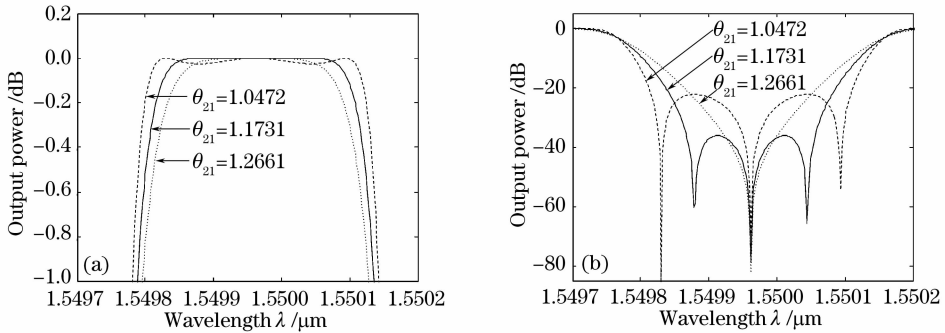


图 3 耦合角对(a)通带平坦和(b)阻带抑制特性的影响

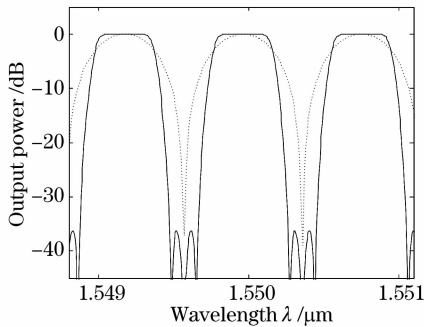
Fig. 3 Influence of θ_{21} on flatness of passband and isolation of stopband

图 4 环辅助马赫-曾德尔干涉仪(实线)与普通马赫-曾德尔干涉仪(点线)输出响应的比较

Fig. 4 Comparison of the responses of ring-assisted MZI (solid) with traditional MZI (dot)

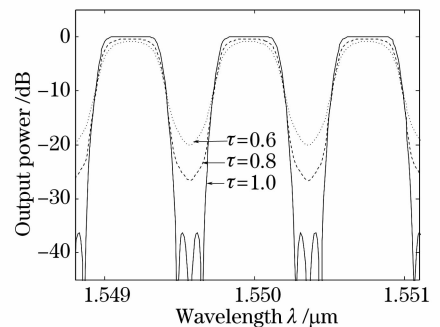


图 5 损耗对波长交错滤波器消光特性的影响

Fig. 5 Influence of loss on extinction ratio of interleaver
致密集波分复用信道间的串话干扰大大增加。

3.2 改善通带内的色散特性

虽然上述具有“全通”特性的无损环形谐振器对改善波长交错滤波器性能非常有利,但实际制作中,除非采取有源的方式对损耗进行补偿,否则在损耗的作用下,谐振器的幅度响应将表现出波长依赖性^[8],当归一化损耗 $\tau = \cos \theta_{21}$ 时,谐振波长处的输出功率甚至降为 0 [见图 2(a)],因此由于谐振器传输损耗的影响,经过马赫-曾德尔干涉上下干涉臂到达第二个方向耦合器时,相干涉的两束光信号将存在幅度差异,造成波长交错滤波器消光特性恶化,从图 5 可见:当 $\tau \leq 0.6$ 时,阻带抑制将低于 20 dB,导

除通带平坦、过渡带滚降和消光特性外,表征波长交错滤波器性能的另一项重要指标是通带响应内的色散特性,特别是对于速率较高的传输信号,色散的影响将越来越大。图 6 给出了环形谐振器辅助马赫-曾德尔干涉仪的色散特性(点线),虽然通带中心色散为 0,但因色散斜率较高,当信号波长稍微偏移时,在色散的作用下信号仍将严重失真^[9]。为此必须对所设计波长交错滤波器的通带内色散进行补偿,这可以通过在其输出端口再附加一个环形谐振器实现(图 6 插图)。从图 6 实线可见,补偿后通带

中心附近的色散斜率明显降低,与补偿前相比,色散小于 ± 10 ps/nm的带宽范围从 5 GHz 扩展到 15 GHz,能够满足目前10 Gb/s系统的需求。

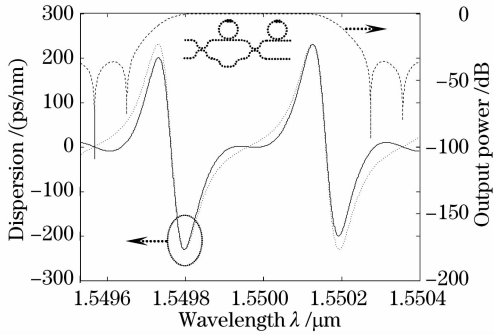


图 6 环形谐振器辅助马赫-曾德尔干涉仪型波长交错滤波器的色散特性。补偿前(点线),补偿后(实线)

Fig. 6 Dispersion of the interleaver based on ring-assisted MZI. Dot: before dispersion is compensated, solid: after dispersion is compensated

3.3 具有非对称带宽分配特性的新型波长交错滤波器

除了能够以奇偶交错的方式将复用信道分离

外,根据互易性,采用波长交错滤波器还能对不同波长的信道进行奇偶间插,压缩信道间隔、增加信道数,从而有效提高波分复用系统的带宽利用率。随着 40 Gb/s 技术的成熟和成本的降低,对系统升级势在必行,但在进行系统升级时应该尽力避免对现有业务造成影响。一种灵活、有效的解决方案是将 40 Gb/s 新波长信号间插到现有信道间隔为 100 GHz 的 10 Gb/s 系统中。但是,目前商用波长交错滤波器均为 50:50 型,即其奇偶信道占用的带宽相同,因此在对两种不同速率的信号进行间插复用时,对于 40 Gb/s 信号,除非采取光谱效率很高的先进调制格式,否则由于所分配滤波响应带宽的不足,将会导致严重失真;而对于 10 Gb/s 信号,所分配的滤波带宽又远远超出其传输速率 B 要求的最佳带宽($\Delta f \geq 1.5B$),造成资源浪费。因此设计一种新型波长交错滤波器,使其奇偶信道具有不同的带宽分配特性,对改善系统性能将非常有利,其工作原理如图 7 所示^[10]。

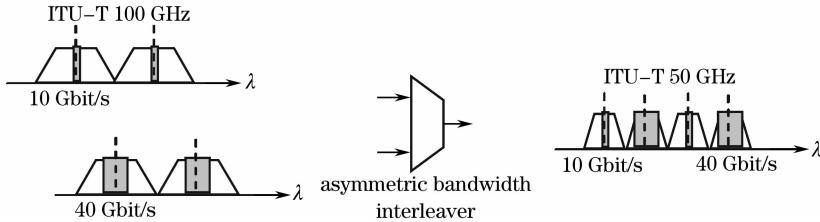


图 7 奇偶信道具有非对称带宽分配特性的波长交错滤波器的工作原理图^[10]

Fig. 7 Principle diagram of interleaver with odd even channel of asymmetric bandwidth allocation

普通马赫-曾德尔干涉仪型波长交错滤波器滤波信道间隔仅取决于臂长差 ΔL ,奇偶信道具有对称带宽特性。但是,在引入环形谐振器后,光信号在环中循环产生的相位时延,将在原马赫-曾德尔干涉背景光谱中产生周期性的谐振效应^[11],从图 8 的分析可以

看出,环周长与马赫-曾德尔干涉臂长差之间的比例 ($L_r/\Delta L$) 直接决定每个光谱包络中的谐振个数,如果调节附加相移器,使各谐振相位一致或相反,组合出不同的光谱响应,就可实现对波长交错滤波器带宽分配特性的控制。基于此原理,调整 $L_r/\Delta L = 1/2$,

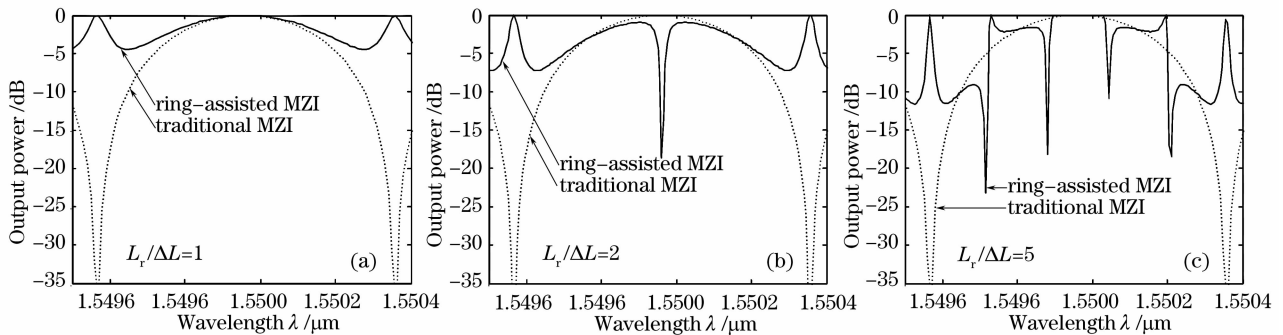


图 8 环周长对波长交错滤波器输出光谱中谐振个数的影响

Fig. 8 Effect of ring circumference on the number of resonances in interleaver's output response

图 9 给出了奇偶信道具有 1:2 非对称带宽分配特性波长交错滤波器的滤波响应。

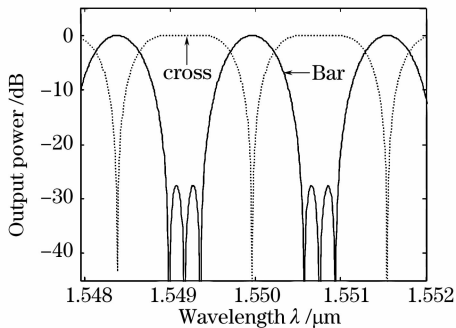


图 9 奇偶信道具有 1:2 非对称带宽分配特性的波长交错滤波器的滤波响应

Fig. 9 Filtering responses of interleaver with odd even channel of 1:2 asymmetric bandwidth allocation

4 结 论

本文在深入研究耦合角和传输损耗对环形谐振器幅度和相位时延影响的基础上,利用谐振器反馈回路对光信号引入的相位调节,实现了马赫-曾德尔干涉仪滤波通带响应的最大平坦和过渡带滚降特性的加强,并有效抑制了色散对传输信号造成的失真。这种性能优良的、基于环形谐振器辅助马赫-曾德尔干涉仪的新型波长交错滤波器,将会在未来密集波分复用系统中发挥重要的作用。

参 考 文 献

1 Pei Li, Dong Xiaowei, Li Bin *et al.*. Interleaver technology in DWDM system[J]. *Optical Fiber & Electric Cable*, 2004, **1**: 11~13

裴 丽,董小伟,李 彬等. DWDM 系统中的 Interleaver 技术[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2004, **1**: 11~13

2 Li Jie, Tong Zhengrong, Meng Hongyun *et al.*. Theoretical study on optical comb-filter of cascaded M-Z interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 41~44

李 杰,童峥嵘,蒙红云等. 级联马赫-曾德尔干涉仪光学梳状滤波的理论研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(1): 41~44

3 M. Kuznetsov. Cascaded coupler Mach-Zehnder channel dropping filters for wavelength-division multiplexer optical systems[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(2): 226~230

4 Jianyi Yang, Fan Wang, Xiaoqing Jiang *et al.*. Linearization of Mach-Zehnder modulator using microring-based all-pass filter[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(6): 333~335

5 Dong Xiaowei, Pei Li, Jian Shuisheng. Characteristic analyses of series-coupled multiple-ring resonator filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 207~211

董小伟,裴 丽,简水生. 集成串联环型谐振光滤波器特性的数值分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 207~211

6 Otto Schwelb. Transmission, group delay, and dispersion in single-ring optical resonators and add/drop filters—a tutorial overview[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(5): 1380~1394

7 Huang Yonglin, Li Jie, Ma Xourong *et al.*. High extinction ratio Mach-Zehnder interferometer filter and implementation of single-channel optical switch[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **222**: 191~195

8 Pang Fufei, Han Xiyou, Cai Haiwen *et al.*. An integrated optical waveguide ring resonator by using sol-gel technology[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(5): 591~595

庞拂飞,韩秀友,蔡海文等. 利用有机-无机溶胶-凝胶方法制备平面波导环形谐振腔[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 591~595

9 Chao-Wei Lee, Ruibo Wang, Pochi Yeh *et al.*. A flat-top birefringent interleaver based on ring-cavity architecture [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **260**: 311~317

10 Philip N. Ji, Arthur Dogariu, Lei Xu *et al.*. Optical tunable asymmetric interleaver[C]. *OFC06, OTuM7*

11 John E. Heebner, Vincent Wong, Aaron Schweinsberg *et al.*. Optical transmission characteristics of fiber ring resonators[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2004, **40**(6): 726~730