

文章编号: 1001-3806(2008)01-0033-04

级联臂长差啁啾 MZI 型带通滤波器的分析设计

周 志¹, 潘 炜¹, 罗 斌¹, 邹喜华¹, 肖 波^{1,2}, 张伟利¹

(1. 西南交通大学 信息科学与技术学院 光通信与光器件研究所, 成都 610031; 2. 西南交通大学 峨眉校区, 峨眉 614202)

摘要: 为了设计出自由频谱区 (FSR) 较大和 3dB 带宽较小的带通滤波器, 拟合级联马赫-曾德尔干涉仪 (MZI) 与阶梯形滤波器原理的相似性, 在 MZI 中引入啁啾臂长差以有效扩展 FSR。采用传输矩阵法建立带通滤波器的理论模型, 进而分析其滤波性能 (3dB 带宽、FSR) 与结构参数 (级联级数、衍射阶数) 的对应关系。结果表明, 当合理选取啁啾系数, 该滤波器在保持 3dB 带宽不变的前提下有效扩展了 FSR, 并且在整个 FSR 内具有高边模抑制比。在设计实例中, 对应低于 4.5nm 的 3dB 带宽和高于 100nm 的 FSR (要求边模抑制比高于 35dB) 的滤波性能, 器件的级联级数、衍射阶数、最佳啁啾系数分别对应 16, 45 和 5。

关键词: 光学器件; 带通滤波器; 传输矩阵法; 级联马赫-曾德尔干涉仪; 啁啾臂长差

中图分类号: TN29.11; TN252 **文献标识码:** A

Analysis and design of band-pass filter based on cascaded Mach-Zehnder interferometers

ZHOU Zhi¹, PAN Wei¹, LUO Bin¹, ZOU Xi-hua¹, XIAO Bo^{1,2}, ZHANG Wei-li¹

(1. Institute of Optical Communication and Optical Devices, School of Information Science & Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Emei Campus, Southwest Jiaotong University, Emei 614202, China)

Abstract: The optical band-pass filter based on cascaded Mach-Zehnder interferometers with chirped path differences was designed. The filter had wide free spectral range (FSR) and narrow 3dB bandwidth. With theoretical model established by transfer matrix method, its band-pass filtering characteristics (i.e., 3dB bandwidth and FSR) were investigated under different structure parameters (i.e., number of stages and diffraction order). Using optimized chip coefficient, the FSR was expanded and the 3dB bandwidth was almost fixed. Meanwhile, the side-mode-suppression-ratio (SMSR) during whole FSR was excellent. For a design example, the 3dB bandwidth was specified less than 4.5nm and the FSR was specified more than 100nm (the corresponding SMSR was required to be more than 35dB). The derived structure parameters of filter were as follows: number of stages was 16; the diffraction order was 45; and the optimal chip coefficient was 5 (the corresponding SMSR was 65.90dB).

Key words: optical devices; band-pass filter; transfer matrix method; cascaded Mach-Zehnder interferometers; chirped path differences

引 言

马赫-曾德尔干涉仪 (Mach-Zehnder interferometer, MZI) 具有梳状滤波性能, 而且结构简单、可多级串联, 在光交错滤波、光分插复用、光码分多址、光匹配滤波等系统中都有重要应用^[1-3]。近年来, 国内外研究人员

提出了众多级联 MZI 方案以优化其滤波性能, 如改善消光比、减小 3dB 带宽、平坦化通带 (或阻带) 等^[4-7]。

光带通滤波器是光通信和光传感领域的一种重要器件, 级联 MZI 也可应用于带通滤波, 如树形级联非平衡 MZI^[8] 和阶梯形滤波器^[9-13]。带通滤波要求具有较大的自由频谱区 (free spectral range, FSR) 和较小的 3dB 带宽。但常规级联 MZI 滤波器的 FSR 和 3dB 带宽都与衍射阶数成反比, 难以同时实现大 FSR 和小 3dB 带宽; 而在阶梯形滤波器中, 交叉波导的啁啾效应可以有效扩展 FSR^[12-13], 这给了如何设计出具有较大 FSR 的级联 MZI 型带通滤波器以启发。

作者通过将级联 MZI 与阶梯形滤波器^[9-11] 的干涉效应进行类比, 提出在级联 MZI 中引入啁啾臂长差, 在 3dB 带宽保持不变的前提下有效扩展 FSR, 从而设计出大 FSR 的带通滤波器。首先采用传输矩阵法建

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10174057; 90201011); 教育部科学技术研究重点基金资助项目 (105148); 四川省应用基础研究基金资助项目 (03JY029-048-1); 宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室开放基金资助项目 (KF2006)

作者简介: 周 志 (1980-), 男, 助教, 主要研究方向为光通信及光器件。

E-mail: zhouzhi@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2006-10-24; 收到修改稿日期: 2006-12-29

立数学模型,然后分析带通滤波性能(3dB带宽及FSR中的边模抑制比),最后给出了带通滤波器的设计实例。此类带通滤波器在可调谐滤波器和可调谐激光器领域有独特的应用前景。

1 理论模型

1.1 器件结构及原理

级联臂长差啁啾MZI型带通滤波器的结构如图1所示,由N个臂长差为 ΔL_k ($1 \leq k \leq N$)的MZI首尾连

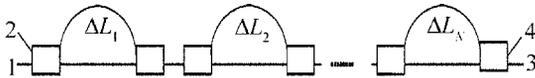


Fig 1 Schematic diagram of the optical filter based on cascaded MZIs with chipped path differences

接而构成,端口1、端口2和端口3、端口4分别为输入和输出端。光场 E_0 从输入端注入,在第1个定向耦合器中被分成两束,分别经MZI的长臂或短臂产生相对相位延迟,然后在第2个定向耦合器中形成干涉效应。以此类推,在每一级MZI中都形成类似的干涉效应。最后,累积的干涉效应可在输出端的光场中得到。当级联MZI臂长差恒定时,其梳状滤波波形对应的3dB带宽和FSR同时增大或减小。但将其设计成带通滤波器时,关键应考虑同时获得较大的FSR和较小的3dB带宽。由于臂长差恒定的级联MZI与阶梯形滤波器在物理机制的相似性,为此,作者借鉴阶梯形滤波器的啁啾方案,引入臂长差啁啾来实现级联MZI的高性能带通滤波。

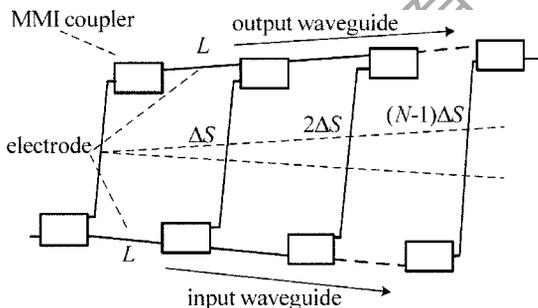


Fig 2 Schematic diagram of ladder-type optical filter

图2是阶梯形滤波器的示意图,它由输入/输出波导、交叉阵列波导(长度按逐 ΔS 级递增)和多模干涉(multi-mode interference, MMI)耦合器构成^[11]。在阶梯形滤波器中,光场被输入波导多模干涉耦合器分为两束,一束沿输入波导传输,不断被分为两束,另一束通过交叉波导后,与输出波导中的光束在多模干涉耦合器中发生干涉形成新的输出波导光束。以此类推,实现逐级多光束干涉滤波。不难发现,阶梯形滤波器可视为一种臂长差恒定的级联MZI,只是两者干涉方式有所区别。并且在阶梯形滤波器中已经提出了增大FSR的有效方案——交叉波导的啁啾效应,这已得到

了理论和实验验证^[12-13]。

因此,可在级联MZI中引入臂长差啁啾方案,定义臂长差变化 ΔL_k 为:

$$\Delta L_k = \frac{m + (k - N/2)\gamma}{n_e} \lambda_0, \quad (\gamma \geq 1, 1 \leq k \leq N) \quad (1)$$

式中, n_e 表示有效折射率, γ 和 m 分别表示啁啾系数和衍射阶数, λ_0 为通带中心波长, N 为级联级数。当臂长差恒定为 ΔL 时,滤波器的3dB带宽和FSR宽度主要受衍射阶数的影响。增大 m ,可以获得较窄的3dB带宽,但同时FSR也变小。减小 m ,可以获得较大的FSR,但3dB带宽也变宽。其对应的FSR值 A 与中心波长 λ_0 的关系为:

$$A = \frac{\lambda_0}{m - 0.5} \quad (2)$$

$$\lambda_0 = \frac{n_e}{m} \Delta L \quad (3)$$

如果引入(1)式的啁啾,便可在保持3dB带宽不变的情况下扩展FSR,实现3dB带宽与FSR的相互独立调整,因而便于获得优越的带通滤波性能(较小的3dB带宽和较大的FSR)。

考虑级联MZI型带通滤波器的调谐性能时,在各级MZI的双臂上制作出等长的电极,电极长度按如下方式设计^[13]:

$$L_k = \frac{m + (k - N/2)\gamma}{m} L_0 \quad (4)$$

式中, L_0 为单位电极长度。由(1)式和(3)式,可以推导出中心波长的偏移量 $\Delta\lambda$ 满足:

$$n_e \Delta L_k \pm \Delta n L_k = [m + (k - N/2)\gamma] (\lambda_0 \pm \Delta\lambda) \quad (5)$$

式中, Δn 为电极工作时对波导的折射率改变量。在中心波长调谐过程中,向长臂长电极区注入电流,其有效折射率减小,从而导致相对臂长差减小。此时,(4)式取负号,中心波长向短波长方向移动;反之,向短臂长电极区注入电流,(4)式取正号,中心波长向长波长方向移动。这与阶梯形滤波器的调谐机制一致^[9-13]。

1.2 传输矩阵法建立数学模型

分析MZ型器件光学性能时可采用传输矩阵法。在级联MZI型带通滤波器设计中,也采用传输矩阵法建立光场干涉的理论模型,以便进一步进行数值仿真和分析。MZI的两个基本传输矩阵分别是耦合器(考虑3dB耦合器)的散射矩阵 M_1 和相对臂长差的相位延迟矩阵 M_2 ,分别如下:

$$M_1 = \begin{bmatrix} \cos(\pi/4) & -j\sin(\pi/4) \\ -j\sin(\pi/4) & \cos(\pi/4) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} \exp(j2\pi n_e \Delta L_k / \lambda) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, λ 为波长。当仅从端口2注入光场 E_0 (端口1无输入),通过矩阵连乘的方式可以推导出端口4的

输出光场 E 表达式为:

$$E = \left(\frac{-1}{2}\right)^N \times \left\{ \prod_{k=1}^N \left[1 + \exp\left[j2\pi \frac{n_e \Delta L_k}{\lambda} \right] \right] \right\} \times E_0 \quad (8)$$

(8) 式即为级联 MZI 型带通滤波器的理论模型。基于此模型, 便可对滤波性能展开详细分析和研究。

2 输出特性讨论

具有良好的带通滤波特性是本设计方案的出发

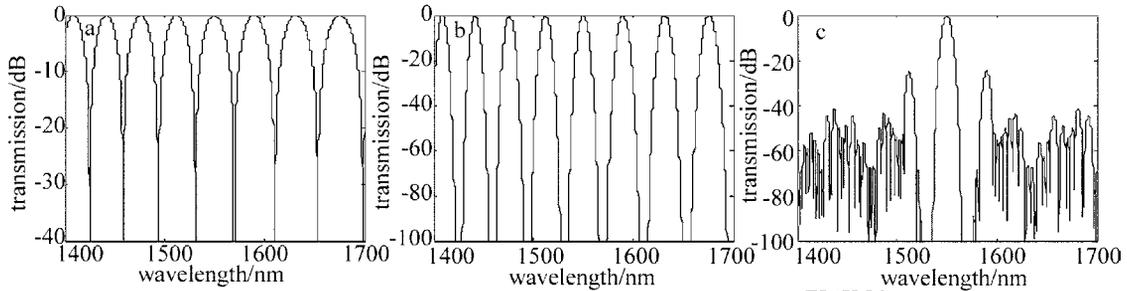


Fig 3 Transmission spectra

a—single stage MZI b—cascaded MZIs with fixed path differences c—cascaded MZIs with chipped path differences

(约 1400nm~1700nm), 而且扩展后的 FSR 边模抑制比达到 25dB。显然, 上述结果表明级联臂长差啁啾 MZI 可以同时具备大 FSR 和小 3dB 带宽, 验证了臂长差啁啾方案的有效性。

3 带通滤波器设计实例

为进一步说明级联臂长差啁啾 MZI 的带通滤波性能, 本节中给出一个给定指标的带通滤波器设计实例。指标数值如下: 3dB 带宽低于 4.5nm, FSR 大于 100nm, 并且在整个 FSR 中边模抑制比高于 35dB。

首先, 根据 3dB 带宽的指标确定级联级数和衍射阶数。由图 3 可知, 级联臂长差啁啾 MZI 的 3dB 带宽与级联臂长差恒定 MZI 几乎一致。结合 (3) 式和 (8) 式 (臂长差恒定时, ΔL_k 恒等于 ΔL) 可推导出 3dB 带宽的表达式为:

$$W = 2\lambda_0 \times \frac{\arccos(\sqrt[2N]{1/2})}{m\pi + \arccos(\sqrt[2N]{1/2})} \quad (9)$$

由 (9) 式不难得到 3dB 带宽随级联级数 N 和衍射阶数 m 的分布情况, 见图 4。显然, 可以从中找出对应于某

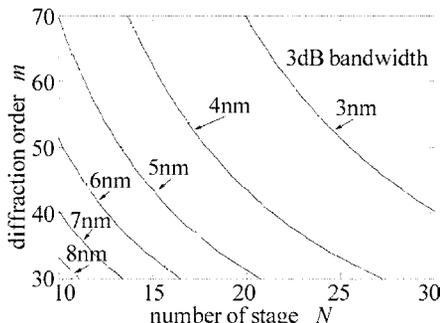


Fig 4 3dB bandwidth versus number of stages and diffraction order

一 3dB 带宽的级联级数和衍射阶数的组合, 如 4.5nm 的 3dB 带宽对应的结构参数为 $N = 16$ 和 $m = 45$ 。

点, 根据上面建立的数学模型, 本节中详细分析级联臂长差啁啾 MZI 的带通滤波性能。结合 (1) 式, 级联 MZI 型带通滤波器选取如下参数: $m = 40, N = 10, \gamma = 3$ 。图 3 中给出了单级 MZI 级联臂长差恒定 MZI 和级联臂长差啁啾 MZI 的透射功率谱曲线。不难看出: 与单级 MZI 相比, 级联臂长差啁啾 MZI 的 3dB 带宽变小, FSR 变大; 与级联臂长差恒定 MZI 相比, 级联啁啾型 MZI 的 3dB 带宽大小基本相同, 但 FSR 得到了扩展

随后分析级联臂长差啁啾 MZI 的 FSR 的变化。此时, FSR 的范围和性能 (边模抑制比) 取决于臂长差啁啾效应, 也即取决于啁啾系数 γ 。当 $N = 16, m = 45$ 时, FSR 的边模抑制比随 γ 变化的趋势如图 5 所示。

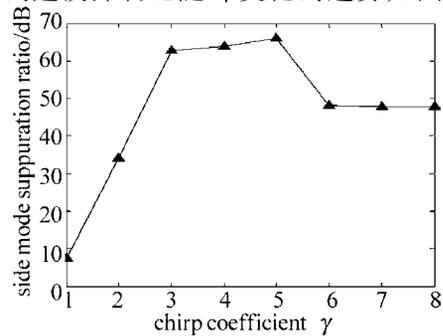


Fig 5 Side mode suppression ratio versus chip coefficient

可以看出, 在边模抑制比大于 35dB 的指标下, 对应的最佳啁啾系数为 $\gamma = 5$ 。

至此, 得到了级联 MZI 型带通滤波器的结构参数: $N = 16, m = 45, \gamma = 5$ 。图 6 中给出了此滤波器的输

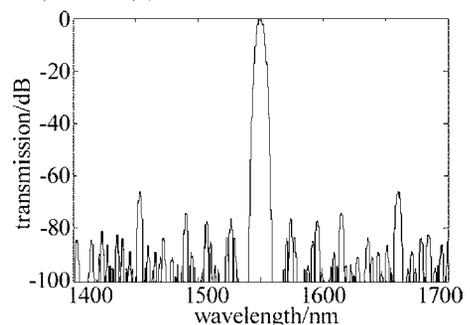


Fig 6 Transmission spectra of cascaded MZIs with chipped path differences with $N = 16, m = 45, \gamma = 5$

出响应。由图可见, 在此结构参数下, 该带通滤波器的 3dB 带宽及 FSR (大于 100nm) 内的边模抑制比分别

为: 4.32nm 和 65.90dB。显然这些数据符合上面的设计指标,即成功设计出了符合性能指标的带通滤波器。

在上面的分析和仿真中,设计出了具有较大 FSR 的级联臂长差啁啾 MZI 型带通滤波器。FSR 较大有利于实现中心波长的大范围调谐。根据 (3) 式,可设定 L_0 和电极电流得到大范围双向调谐的性能,此调谐方案的实现过程与可调谐阶梯形滤波器基本一致^[12-13]。此类带通滤波器与可调谐阶梯形滤波器具有类似的应用前景,如调谐范围宽、响应速度快的可调谐光滤波器^[9],数字型波长可调谐激光器^[13]等。

4 结论

作者设计出基于级联臂长差啁啾 MZI 的带通滤波器。臂长差啁啾方案在 3dB 带宽基本保持不变的前提下极大地拓宽了 FSR。因而,采用本方案设计得到的带通滤波器具有大的 FSR 和小的 3dB 带宽的性能。文中还给出了级联 MZI 型带通滤波器设计实例,设计得到的滤波器结构参数为 $N = 16$, $m = 45$, $\gamma = 5$, 以及 4.32nm 的 3dB 带宽和 65.90dB 的边模抑制比,符合 3dB 带宽低于 4.5nm 以及 FSR (大于 100nm) 内边模抑制比高于 35dB 的给定指标。

参考文献

- [1] ZOU X H, PAN W, LUO B, *et al* Accurate analytical expression for reflection peak wavelengths of sampled Bragg grating [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18 (3): 529-531.
- [2] KUZNETSOV M. Cascaded coupler Mach-Zehnder channel dropping filter for wavelength division multiplexed optical systems [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1994, 12 (2): 226-230.
- [3] JI Y F, BA I L, XU D X A new OADM architecture for packet service [J]. Laser Technology, 2003, 27 (5): 393-395 (in Chinese).
- [4] LI J, TONG Zh R, MENG H Y, *et al* Theoretical study on optical comb-filter of cascaded M-Z interferometer [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23 (1): 41-44 (in Chinese).
- [5] ZHANG R F, GE Ch F, WANG Sh H, *et al* Optimized design of all fiber interleaver [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2003, 14 (3): 496-500 (in Chinese).
- [6] XIAO Y Y, HE S L. The design of cascaded Mach-Zehnder interferometer filter based on digital filter technique [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24 (3): 346-350 (in Chinese).
- [7] ZOU X H, PAN W, LUO B, *et al* Particle swarm optimization for design of cascaded Mach-Zehnder interferometer based filter [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2005, 16 (10): 1152-1156 (in Chinese).
- [8] QU R H, ZHAO H, FANG Z J. Analysis of optical multiplexer/demultiplexer based on cascaded non-balanced Mach-Zehnder interferometer [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2001, 12 (3): 254-257 (in Chinese).
- [9] MATSUO S, YOSHIKUNI Y, SEGAWA T, *et al* A widely tunable optical filter using ladder-type structure [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15 (8): 1114-1116.
- [10] ZOU X H, PAN W, LUO B, *et al* Optimization of a novel ladder-type structure tunable optical filter [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2005, 16 (2): 146-149 (in Chinese).
- [11] PAN W, ZHANG X X, LUO B, *et al* Design of tunable optical filter using ladder-interference-type structure [J]. Optics and Precision Engineering, 2005, 13 (6): 627-632 (in Chinese).
- [12] JEONG S H, MATSUO S, YOSHIKUNI Y, *et al* Tuning characteristics of chirped ladder-type filter for widely tunable laser [C] // The 17th Annual Meeting of the IEEE LEOS2004. Puerto Rico: IEEE, 2004: 304-305.
- [13] MATSUO S, SEOK-HWAN J, SEGAWA T, *et al* Digitally tunable ring laser using ladder filter and ring resonator [J]. IEEE J Q E, 2005, 11 (5): 924-929.

(上接第 32 页)

里渊散射回波信号的基础之上,通过设计 MATLAB 程序仿真出不同水质参数情况下,探测系统中布里渊散射频移测量误差与探测深度之间的关系,从理论上证明了边缘探测技术具有较高的信噪比、较小的测量误差的结论。在此基础之上,奠定激光雷达探测系统的测量误差分析,为基于边缘探测技术的激光雷达实际应用提供理论基础和技术支持。

参考文献

- [1] HICKMAN G D, KATTAWAR G W, FRY E S Aircraft laser sensing of sound velocity in water: Brillouin scattering [J]. Remote Sens Environ, 1991, 36 (1): 165~178.
- [2] EMERY Y E, FRY E S Laboratory development of a lidar for measurement of sound velocity in the ocean using Brillouin scattering [J]. SPIE, 1997, 2963: 210-215.
- [3] KORB C L, GENTRY B M, WENG C Y. Edge technique: theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind [J]. Appl Opt, 1992, 31 (21): 4202-4213.
- [4] PIIRONEN P, ELORANTA E W. Demonstration of a high - spectral - resolution Lidar based on an iodine absorption filter [J]. Opt Lett, 1994, 19 (3): 234-236.
- [5] LIU Zh Sh, SONG X Q, LIU J T. Speed measuring system of non - coherent pulse Doppler lidar [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46 (24): 2080-2085 (in Chinese).
- [6] LIU D H, JEFFEREY W K Edge technique for the measurements of Brillouin scattering in water [J]. Chinese Journal of Lasers, 1999, 26 (4): 307-311 (in Chinese).
- [7] WANG L L, REN G, ZHANG Y. Study of Brillouin scattering in atmosphere [J]. Laser Technology, 2003, 27 (4): 365-367 (in Chinese).
- [8] HUANG Zh H, REN G, CAI B W. Calculation of detecting spatial object based on Brillouin scattering [J]. Laser Technology, 2004, 27 (4): 518-520 (in Chinese).
- [9] LIU D H. Signal estimate and statistical error analysis for edge technique [J]. Chinese Journal of Lasers, 1999, 26 (8): 701-705 (in Chinese).
- [10] FLESA C, KORB C L. Theory of the double edge molecular technique for Doppler lidar wind measurement [J]. Appl Opt, 1999, 38 (3): 432-440.