

# 基于有限长脉冲响应的光多波长选择器设计

金杰 刘菲 李可佳

(天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

**摘要** 为实现自由光谱范围(FSR)内任意多个不等波长间隔的光波长选择,将有限长脉冲响应(FIR)数字滤波的算法移植到马赫-曾德尔干涉仪(MZI)级联结构的光滤波器中,采用离散傅里叶变换(DFT)表示目标传输函数矩阵,由此求解传输矩阵,利用待定系数法得到选择阵列具体物理参数( $k$ 阶耦合角 $\theta_k$ , $k$ 阶相位偏移量 $\varphi_k$ )。该波长选择器可根据实际需要,选出FSR内任意一个或多个波长的光波,且波长间隔不等。对所得参数及仿真结果进行分析,在所选中心波长处,能够近似达到0 dB传输,阻带隔离度可达到12 dB。每个所选波长的3 dB带宽和最小波长间隔均随着级联级数 $N$ 的增大而减小。当自由光谱范围 $\nu_{\text{FSR}}=1000$  GHz、 $N=15$ 时,每个所选波长的3 dB带宽约为0.5 nm,最小波长间隔为1 nm。

**关键词** Z变换;马赫-曾德尔耦合级联;有限长脉冲响应滤波器;多波长选择;不等波长间隔

**中图分类号** TN253      **文献标识码** A      **doi**: 10.3788/LOP48.102302

## Design of Optical Multi-Wavelength Selector Based on Finite Impulse Response

Jin Jie Liu Fei Li Kejia

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** In order to realize the optical multi-wavelength selector which is capable of selecting multiple wavelengths with unequal wavelength interval as needed in the free spectral range (FSR)  $\nu_{\text{FSR}}$ , the algorithm of finite impulse response (FIR) digital filter is transplanted to the optical filter with the Mach-Zehnder interferometer (MZI) cascaded coupler structure. The target transfer function matrix is represented by discrete Fourier transform (DFT). Using method of undetermined coefficients, the array concrete physical parameters ( $k$ th-order coupling coefficient angle  $\theta_k$  and  $k$ th-order phase shift value of  $\varphi_k$ ) which the transfer function desires are derived from the transfer matrix. This kind of multi-wavelength selector is capable of selecting single or multiple wavelength of light wave randomly as needed in FSR, and the wavelength interval is unequal. Analyzing all the array parameters and simulation figures, the selector realizes nearly 0 dB transmittance on the point of the desired wavelength and the isolation is up to 12 dB. The 3 dB bandwidth of each wavelength and minimum wavelength interval decrease with increasing the cascading order  $N$ . When  $\nu_{\text{FSR}}=1000$  GHz and  $N=15$ , the 3 dB bandwidth of each wavelength achieves 0.5 nm and the minimum wavelength interval reaches 1 nm.

**Key words** Z-transform; cascaded coupler Mach-Zehnder; finite impulse response filter; multi-wavelength selection; unequal wavelength interval

**OCIS codes** 230.7408; 070.1170; 070.2615; 060.1810

## 1 引言

近年来,光多波长选择器因可应用于密集波分复用技术(DWDM)及多种激光器等众多光学技术领域而受到越来越多的关注<sup>[1~4]</sup>。目前,多个波长的同时提取主要有以下几种方法:1)由多个单波长窄带滤波器级联来实现,这种方法原理简单,但是节点设计较复杂,稳定性较差<sup>[5]</sup>;2)采用梳状滤波器<sup>[6]</sup>。Julien Magné等<sup>[7]</sup>设计了一种自由光谱范围(FSR)可调的全光梳状滤波器,FSR的调谐范围可达3.9~51 GHz,这种方法大大降低了网络节点的复杂性,从而提高了系统的集成度与稳定度,但是滤波后波长间隔相同,灵活度低。

**收稿日期**: 2011-03-18; **收到修改稿日期**: 2011-05-12; **网络出版日期**: 2011-07-29

**基金项目**: 国家自然科学基金(60777014)和高等学校博士学科点专项科研基金(20090032110027)资助课题。

**作者简介**: 金杰(1962—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事激光与光电子技术等方面的研究。

E-mail: jinjie@tju.edu.cn

马赫-曾德尔干涉仪(MZI)是一种常见的光滤波器,M. Kuznetsov<sup>[8]</sup>提出了由数个 M-Z 干涉结构级联构成的二端口网络,该网络结构可以降低旁瓣电平提高阻带隔离度。本文将电学中的 Z 变换和 FIR 数字滤波器理论应用于该二端口网络,在自由光谱范围  $\nu_{\text{FSR}} = 1000 \text{ GHz}$  的情况下,设计并实现了任意个间隔不等的波长的同时选择,同时二个端口的输出波形具有互易特点,从而大大提高了多个波长选择的灵活性。该多波长选择器可作为光网络节点中的窄带滤波器件,也可作为多波长光纤激光器的选频元件。

## 2 理论分析

多波长选择器的二端口网络由具有不同分光比的耦合器通过有单位时延的干涉臂级联构成,如图 1 所示。其中  $\theta$  为耦合角,  $\varphi$  为相位偏移量,  $\Delta\tau = 1/\nu_{\text{FSR}}$  为单位延时。每一级 MZI 作为一个传输单元,  $N$  为耦合级数,该二端口网络是由  $N+1$  个单元耦合级联而成。设每一级 MZI 的传输矩阵为  $S_k$ ,则该网络的传输矩阵  $S$  可表示为

$$S = S_N S_{N-1}, \dots, S_k, \dots, S_1 S_0, \quad (1)$$

式中  $k=1, 2, \dots, N$ ,  $N$  为耦合级数。

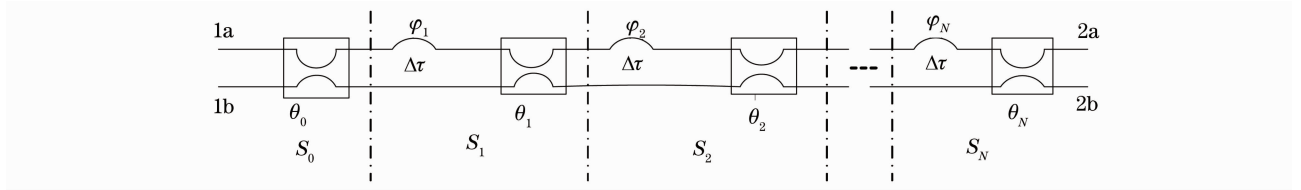


图 1  $N$  阶多波长选择器网络结构示意图

Fig. 1 Structure of  $N$ -th multi-wavelength selector network

$S_k$  由  $\theta_k, \varphi_k, \Delta\tau$  三部分组成,可表示为

$$S_k = \begin{bmatrix} \cos \theta_k \exp\left(-j \frac{\varphi_k}{2}\right) \exp\left(-j \frac{\omega \Delta\tau}{2}\right) & -j \sin \theta_k \exp\left(j \frac{\varphi_k}{2}\right) \exp\left(j \frac{\omega \Delta\tau}{2}\right) \\ -j \sin \theta_k \exp\left(-j \frac{\varphi_k}{2}\right) \exp\left(-j \frac{\omega \Delta\tau}{2}\right) & \cos \theta_k \exp\left(j \frac{\varphi_k}{2}\right) \exp\left(j \frac{\omega \Delta\tau}{2}\right) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

经过计算,矩阵  $S_k, S$  均为酉矩阵。

采用 Z 变换的方法,令  $z = \exp(j\omega)$  ( $\omega$  为归一化后的角频率),则矩阵  $S$  表示为

$$S = \begin{bmatrix} H(z) & -F^* \left( \frac{1}{z^*} \right) \\ F(z) & H^* \left( \frac{1}{z^*} \right) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

因为  $S$  为酉矩阵,故有

$$F(z)F^* \left( \frac{1}{z^*} \right) + H(z)H^* \left( \frac{1}{z^*} \right) = 1. \quad (4)$$

每个传输单元中,设:  $\exp(\pm j\omega \Delta\tau/2) = z^{\pm 1/2}$ ,为了得到  $F(z)$  和  $H(z)$  的关于  $z$  的整数次幂,提出公因子  $z^{N/2}$ ,得到

$$H(z) = \left( \sum_{k=0}^N a_k z^{-k} \right) z^{N/2}, \quad (5)$$

$$F(z) = j \left( \sum_{k=0}^N b_k z^{-k} \right) z^{N/2}. \quad (6)$$

通过(4)~(6)式,参考文献[9],可以得出波长选择器的物理参数,其耦合角及相位偏移量分别为

$$\theta_k = -\arctan \left( \frac{b_k^{[k]}}{a_k^{[k]}} \right), \quad (7)$$

$$\varphi_k = -\arg \left[ \frac{a_1^{[k]} b_0^{[k]} - a_0^{[k]} b_1^{[k]}}{(a_0^{[k]})^2 + (b_0^{[k]})^2} \right], \quad (8)$$

式中  $a_n^{[k]}$  和  $b_n^{[k]}$  是  $k$  阶滤波器中相应的第  $n$  阶傅里叶变换系数。

根据各阶耦合角  $\theta_k$  和相位偏移量  $\varphi_k$  得到的二端口网络可以实现传输函数为  $F(z)$  和其互易函数  $H(z)$  的滤波响应。

### 3 多波长选择器设计与分析

根据前述的理论分析,设计多波长选择器。采用离散傅里叶变换(DFT)来表示目标传输函数  $F(z)$ 。将以  $\lambda_0$  为中心的FSR波段的光谱信号送入选择器的1b端口,观察2a端口的输出光信号强度透射率谱。选取中心波长为  $\lambda_0=1550\text{ nm}$ ,  $\nu_{\text{FSR}}=1000\text{ GHz}$ (8 nm),将FSR内的频段等分为8个通道。

首先,设级联级数  $N=15$ ,为了保证其任意性,在1546~1554 nm频段内,选取任意一个通道。8个通道中,相对于该FSR波段的起始频率,每一通道的相对中心频率可表示为

$$f(i) = (2i - 1) \cdot \frac{\nu_{\text{FSR}}}{(N + 1)}, \quad (i = 1, 2, \dots, 8) \quad (9)$$

式中  $i$  为当前通道序号。

在此,选择第4通道:中心波长为1549.5 nm(193.61 THz)的光波。该选择器传输函数  $F(z)$  的幅值函数可以表示为

$$|F(z)| = \begin{cases} 1 & (i = 4) \\ 0 & (i \in [1, 3] \cup [5, 8]) \end{cases}, \quad (10)$$

式中  $z = \exp(j\omega) = \exp[j2\pi f(i)\Delta\tau]$ ,得到2a端口的滤波输出光强透射率谱,如图2所示。横坐标表示1546~1554 nm内的波长,纵坐标为光强透射率。

然后,应用同样的方法,在相同频段1546~1554 nm内,任意选取3个通道,且波长间隔不同。文中分别为第2通道、第4通道和第8通道,中心波长分别为1547.5 nm(193.86 THz),1549.5 nm(193.61 THz),1553.5 nm(193.11 THz)的光波。得到2a端口的输出信号强度透射率谱,如图3所示。

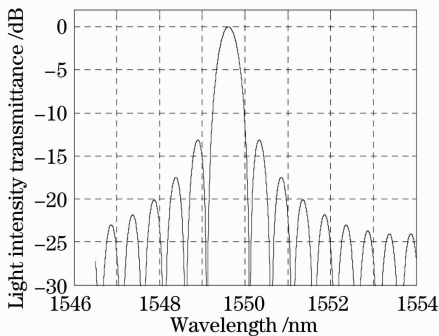


图2  $N=15$ 时2a端口的单波长输出光强透射率谱  
Fig. 2 Single wavelength's light intensity transmittance of port 2a when  $N=15$

分析得到的仿真数据,在所选波长处,能够近似达到0 dB传输。单波长输出(图2)时阻带隔离度约为13 dB,3 dB带宽约为0.5 nm。3波长输出(图3)时约为12 dB,3 dB带宽同样约为0.5 nm。可以得出,在级联级数  $N$  一定的情况下,阻带隔离度以及滤波的3 dB带宽与所选择波长的个数基本无关。

为了得到耦合阶数  $N$  对滤波效果的影响,在输入光谱特性、目标传输函数  $F(z)$ 、FSR及其通道数等不变的情况下,改变  $N$  的值,观察输出滤波曲线。在此,令  $N=31$ ,选取与图3所示的3个相同波长的光波,即第2通道、第4通道和第8通道,得到图4所示的滤波光强透射

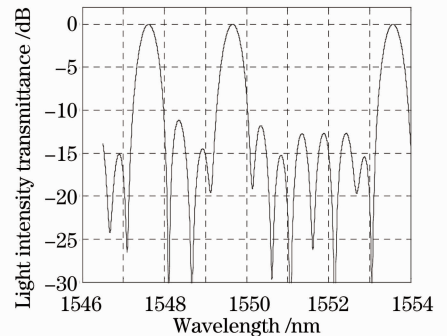


图3  $N=15$ 时3波长输出光强透射率谱  
Fig. 3 3-wavelength's light intensity transmittance when  $N=15$

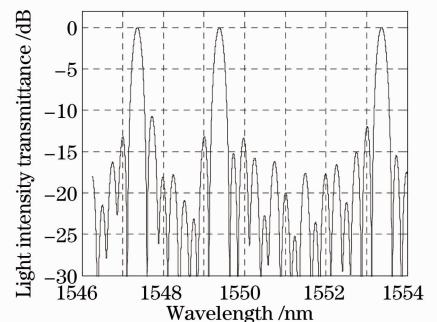


图4  $N=31$ 时3波长输出光强透射率谱  
Fig. 4 3-wavelength's light intensity transmittance when  $N=31$

率谱。对比图 3 和图 4,可以看出,与  $N=15$  时滤波曲线相比, $N=31$  时,阻带隔离度没有变化,同样约为 12 dB;但是所选波长的 3 dB 带宽减小了一半,约为 0.25 nm。

通过多次仿真实验得到:在  $\nu_{\text{FSR}}=1000$  GHz 的情况下, $N=15$  时,最小波长间隔约为 1 nm, $N=31$  时,最小波长间隔约为 0.5 nm。即耦合级数  $N$  越大,最小波长间隔越小,相同 FSR 内可同时选择的波长数越大。

令  $N=15$ ,在 1546~1554 nm 的频段内,选取了 3 个中心波长分别为 1547.5 nm(193.86 THz),1549.5 nm(193.61 THz),1553.5 nm(193.11 THz)的光波(图 3),得到如表 1 所示的物理参数,波长选择器的  $k$  阶耦合角  $\theta_k$ , $k$  阶相位偏移量  $\varphi_k$ 。

表 1  $N=31$  时 3 波长选择器的物理参数

Table 1 Physical parameters of 3 wavelengths selector when  $N=31$

$k$	$\theta_k$	$\varphi_k$
0	-1.0962	0
1	0.8130	2.8649
2	0.2856	2.0392
3	0.3906	2.5846
4	0.2541	-1.0568
5	0.5566	-2.6977
6	0.1989	-0.5149
7	0.2728	3.0025
8	0.2445	-2.1022
9	0.2651	-1.5380
10	0.4088	2.8995
11	0.1666	0.6931
12	0.4213	0.6890
13	0.4194	-2.7412
14	0.7061	-0.0701
15	-0.5149	-2.8837

## 4 结 论

将电学中 FIR 数字滤波的算法移植到光学中具有 MZI 干涉级联结构的滤波器中,编写相应程序,在  $\nu_{\text{FSR}}=1000$  GHz 情况下,设计了多波长选择器,可选出任意一个或多个波长间隔不同的光波。由目标传输函数得到阵列具体物理参数(滤波器的  $k$  阶耦合角  $\theta_k$ , $k$  阶相位偏移量  $\varphi_k$ )。对所得参数及仿真图进行分析,可以得到,在所需波长处可近似达到 0 dB 滤波,阻带隔离度约为 12 dB。当  $N=15$  时,3 dB 带宽可达 0.5 nm,最小波长间隔可达到 1 nm。每个所选波长的 3 dB 带宽和最小波长间隔均随着耦合阶数  $N$  的增大而减小,从而可以通过增大  $N$  值来提高波长选择的密集度。该设计方法通过二端口网络可以得到两组互易的滤波特性曲线  $H(z)$  和  $F(z)$ ,灵活性较强。

## 参 考 文 献

- 1 Yang Wei, Liu Ying, Xiao Lifeng *et al.*. Suppression of sidelobe levels for acousto-optic tunable filters using cascaded single-stage acousto-optic tunable filters[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(10): 2734~2739  
杨 薇, 刘 迎, 肖立峰 等. 多级级联声光可调谐滤波器旁瓣的抑制[J]. *中国激光*, 2009, **36**(10): 2734~2739
- 2 Chen Peng, Wang Rong, Pu Tao *et al.*. Fabrication of super-narrow bandwidth grating filter based on phase error correction[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2076~2082  
陈 鹏, 王 荣, 蒲 涛 等. 基于相位补偿技术的超窄带光栅滤波器的制作[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2076~2082
- 3 Jiang Weiwei, Li Jian, Zhao Ruifeng *et al.*. Analysis of fiber grating filters written in fiber coupler by employing the unified coupled-mode theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 644~649  
江微微, 李 坚, 赵瑞峰 等. 用统一耦合模式理论分析光纤光栅耦合器型滤波器的滤波特性[J]. *光学学报*, 2010,

- 30**(3): 644~649
- 4 Wang Zhi, Zhang Limei, Wang Jing *et al.*. Dual resonance interference of cascaded LPG inscribed in photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2909~2913  
王 智, 张丽梅, 王 晶 等. 光子晶体光纤中级联长周期光栅双谐振波长干涉的研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2909~2913
- 5 N. Park, J. W. Dawson, K. J. Vahala. Multiple wavelength operation of an erbium-doped fiber laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(6): 540~541
- 6 Ma Weitao, Zhou Jun, Xu Tiefeng *et al.*. Design of optical comb filter with multi-concatenated linearly chirped fiber gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1284~1289  
马伟涛, 周 俊, 徐铁峰 等. 多级联线性啾啾光纤光栅梳状滤波器的优化设计[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1284~1289
- 7 Julien Magné, Philippe Giaccari, Sophie LaRoche *et al.*. All-fiber comb filter with tunable free spectral range[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(16): 2062~2064
- 8 M. Kuznetsov. Cascaded coupler Mach-Zehnder channel dropping filters for wavelength-division-multiplexed optical systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(2): 226~230
- 9 K. Jinguji, M. Kawachi. Synthesis of coherent two-port lattice-form optical delay-line circuit[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(1): 73~82