

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0224-05

# 有限脉冲响应理论在交错滤波器设计中的应用

杨小伟 张 娟

(上海大学通信与信息工程学院, 特种光纤与光接入网省部级共建重点实验室, 上海 200072)

**摘要** 利用数字信号处理理论, 设计不等带宽晶体型交错滤波器。运用琼斯矩阵理论计算晶体型交错滤波器的光谱透射率表达式, 在此基础上利用数字信号处理中的  $Z$  变换方法对其进行简化, 使其满足有限脉冲响应(FIR)表达式, 继而利用数字信号处理中的 FIR 理论设计不等带宽型交错滤波器。其中晶体和检偏器的偏角根据系统光谱透射率的表达式反向推解求出。设计了窄口和宽口输出谱 3 dB 处带宽比为 1:2 的 50 GHz 不等带宽交错滤波器, 并给出了宽口和窄口输出光谱在 0.5 dB 处带宽宽度、隔离度和陡度的各组参数; 比较了在同种阶数下运用不同 FIR 设计所得的结果, 分析了不同方法对于输出透射光谱波形特性的优缺点。

**关键词** 密集波分复用; 光学交错滤波器; 有限脉冲响应; 不等带宽

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200835s2.0224

## Application of Finite Impulse Response Theory in the Design of Optical Interleaver

Yang Xiaowei Zhang Juan

*School of Communication and Information Engineering,*

*(Key Laboratory of Special Fiber Optics and Optical Access Network, Shanghai University, Shanghai 200072, China)*

**Abstract** Asymmetrical birefringent crystal interleaver is designed by using digital signal processing theory. Based on Jones-matrix theory, the expression of the system composed of several cascaded crystal wave plates located between a polarizer and an analyzer is calculated, and it is simplified to make the output frequency response satisfy the expression of FIR by using  $Z$  transform. Using FIR digital filter design technique, an asymmetrical interleaver is designed. The azimuth angles of crystal and analyzer are determined by using step-down iteration method based on the expression of spectral transmittance. An asymmetrical 50 GHz interleaver is designed, the ratio of one output port (narrow bandwidth) to another output port (wide bandwidth) at 3 dB passband is 1:2. The design examples of three crystals structure using Equiripple method are given. The bandwidth at 0.5 dB passband, channel isolation and gradient in both wide port and narrow port are given. Three design results respectively got by three different FIR design methods in the same order are compared, and the advantages and drawbacks of different methods are analyzed.

**Key words** dense wavelength division multiplexing(DWDM); interleaver; FIR; asymmetrical bandwidth

## 1 引 言

密集波分复用(DWDM)技术是满足带宽需求和提高通信容量的一种有效解决方法。随着信号频率间隔不断减少, 信道数目不断增多, 对复用器/解复用器提出了更高的光谱分辨要求。光学交错滤波

器可以很好地解决这个问题, 它能将一路波长间隔密集的光信号分成两路信道间隔倍增的光信号。根据两路输出谱 3 dB 处的通带宽度是否相等可以分为等带宽交错滤波器和不等带宽交错滤波器, 目前研究等带宽的交错滤波器的方法比较多且较为成熟, 已经成功研制出了 25/50 GHz 的交错滤波器。

**基金项目:** 国家自然科学基金(10804070)资助课题。

**作者简介:** 杨小伟(1984), 男, 硕士研究生, 主要从事光通信无源器件方面的研究。

**导师简介:** 张娟(1976), 女, 副教授, 博士, 主要从事光通信无源器件、光信号处理、晶体光学等方面的研究。

E-mail: juanzhang@staff.shu.edu.cn(通信联系人)

但是为了扩宽现有网络容量,更好地提高带宽利用率,降低系统升级的成本以及有助于光分插复用(OADM),实现不同速率的同步传输,不等带宽交错滤波器具有较强的灵活性。不等带宽交错滤波器的研究才刚刚开始,主要包括迈克耳孙 Gires-Tournois 干涉型(MGTI)<sup>[1,2]</sup>,马赫-曾德尔(MZ)级联型<sup>[3]</sup>,双折射光纤环镜型<sup>[4]</sup>等方案。文献[1,2]利用多镜 GT 腔代替 MI 的两面全反镜来实现不等带宽交错滤波器的设计,其块状 GT 干涉仪的插入损耗大,在光纤系统中的应用受到限制。张瑞峰等<sup>[3]</sup>采用 33 个不同分光比的耦合器级联设计出高隔离度的输出谱,但过多的级联数在实际中难以应用。张婷等<sup>[4]</sup>运用两段双折射光纤,偏振控制器和耦合器级联得到不等带宽交错滤波器,但其窄口输出谱通带不平坦呈正弦状。

双折射晶体型的交错滤波器具有工艺成熟、插入损耗小、隔离度高以及可以采用不同晶体波片进行温度补偿等优点。张娟等<sup>[5]</sup>利用傅里叶级数对比法来设计等带宽双折射晶体型的交错滤波器,但是如果用此方法设计不等带宽交错滤波器,计算量非

常大。运用成熟的数字信号处理中的有限脉冲响应(FIR)来设计交错滤波器,可以大大简化计算量<sup>[6,7]</sup>。本文研究利用数字信号处理理论设计不等带宽晶体型交错滤波器。分析了其设计原理,给出了利用 FIR 思想中的 Equiripple 方法的 50 GHz 不等带宽交错滤波器的具体设计实例,其宽口输出谱宽大于 60 GHz,窄口输出谱宽大于 30 GHz,两路输出谱均有较好的平坦度和隔离度。分析了在不同阶数下运用 Equiripple 方法和在相同阶数下运用三种不同 FIR 设计方法得到交错滤波器的相关参数和输出幅频特性曲线。

## 2 原 理

双折射晶体型交错滤波器结构如图 1 所示,由两块偏振片和  $N$  块晶体波片级联而成。起偏器偏振方向为  $X$  轴方向,晶体方位角定义为晶体光轴方向与  $X$  轴方向的夹角,依次为  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i$ ,检偏器偏振方向与  $X$  轴方向的夹角  $\theta_p$  为检偏器的方位<sup>[8]</sup>。每块晶体的厚度均为  $L$ ,  $\Delta n$  为晶体的折射率差,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为光波波长,光波频率用  $f$  表示。

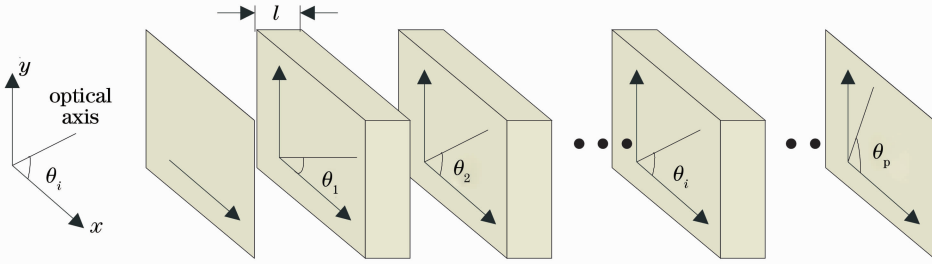


图 1 晶体光滤波器的结构

Fig.1 Structure of birefringent interleave

假定晶片两个表面均无反射,即光是完全透过的,按照琼斯矩阵理论,任一晶体波片可用琼斯矩阵表示为

$$G_i = R(-\theta_i)W_iR(\theta_i) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-jk\Delta nL/2} & 0 \\ 0 & e^{jk\Delta nL/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i \\ -\sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$i = 1, 2, \dots, N。$

式中  $R(\theta_i)$  是旋转矩阵,  $W_i$  是延迟片的琼斯矩阵。

起偏器的旋转矩阵为单位矩阵,即  $P_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ , 检偏器的旋转矩阵为

$$P_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_p & \sin \theta_p \\ -\sin \theta_p & \cos \theta_p \end{bmatrix}。$$

按照琼斯矩阵理论,整个系统表示为

$$F = P_2 G_N \dots G_1 P_1, \quad (2)$$

令  $\varphi_1 = \theta_1, \varphi_2 = \theta_2 - \theta_1, \varphi_3 = \theta_3 - \theta_2, \dots, \varphi_{N+1} = \theta_p - \theta_N$ , 同时令  $c_i = \cos \varphi_i, s_i = \sin \varphi_i$ , 则可利用数字信号处理的  $z$  变换  $e^{-jk\Delta nL} = e^{-j\omega} = z^{-1}$  来简化(2)式为

$$F = \begin{bmatrix} c_{N+1} z^{-1/2} & s_{N+1} z^{1/2} \\ -s_{N+1} z^{-1/2} & c_{N+1} z^{1/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_N z^{-1/2} & s_N z^{1/2} \\ -s_N z^{-1/2} & c_N z^{1/2} \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} c_2 z^{-1/2} & s_2 z^{1/2} \\ -s_2 z^{-1/2} & c_2 z^{1/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 z^{-1/2} & s_1 z^{1/2} \\ -s_1 z^{-1/2} & c_1 z^{1/2} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

假定输入光的偏振态为  $\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ , 则通过该滤波器的输出光信号为

$$E_{out} = F \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

根据能量守恒,  $F_1$  和  $F_2$  功率谱互补。由式(4)化简的  $F_1$  为

$$F_1 \cdot z^{-N/2} = a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_i z^{-i} + \dots + a_N z^{-N}, \quad (5)$$

其中上式的  $a_0, a_1, \dots, a_N$  代表  $c_1, c_2, \dots, c_{N+1}$  和  $s_1, s_2, \dots, s_{N+1}$  任意组合的和项, 差项或者和差项。从上式可知, 等式右边正好满足数字信号处理的有限冲激响应滤波器的表达形式, 而且左边乘积项  $z^{-N/2}$  对幅频特性没有影响, 只是改变了滤波器的相频特性, 所以  $F_1$  可以通过 FIR 滤波器的设计方法来逼近设计目标滤波函数。

### 3 设计实例

由上述原理可知, 晶体双折射型交错滤波器的信道频率间隔  $\Delta f = \frac{c}{\Delta n \times L}$ ,  $c$  为光速, 也就是说滤

波器的信道频率间隔完全由晶体厚度  $L$  决定, 所以选定了  $\Delta f$ , 只要考虑晶体和检偏器的方位角即可。利用数字信号处理中的不同方法可以得到不同  $F_1$  的目标逼近滤波函数, 进而可计算出不同的晶体和检偏器的方位角。以 Equiripple 方法为例<sup>[9]</sup>, 此方法由于是在一致意义上对目标滤波函数作最佳逼近, 因而可以获得较好的通带和阻带性能。以 7 阶为例, 由上述设计方法得到

$$F_1 = -0.0341 - 0.0093z^{-1} + 0.1658z^{-2} + 0.3775z^{-3} + 0.3775z^{-4} + 0.1658z^{-5} - 0.0093z^{-6} - 0.0341z^{-7}. \quad (6)$$

通过(3)、(4)式和功率谱互补可以求出  $F_2$  的表达式, 再利用已知的  $F_1$  和  $F_2$  式以及待定系数法<sup>[10]</sup>, 编程模拟设计出了每块晶体和检偏器的方位角, 如表 1 所示。

表 1 每块晶体和检偏器的方位角

Table 1 Each crystal's azimuth angle and analyser's azimuth angle

	crystal 1	crystal 2	crystal 3	crystal 4	crystal 5	crystal 6	crystal 7	analyser
azimuth angle/(°)	-63.4276	-61.6923	-134.7095	-134.4564	-134.2034	-207.2206	-205.4853	-180.8999

由于晶体 1, 2, 晶体 3~5, 晶体 6, 7 的方位角都比较接近, 可以对它们进行合并修正, 检偏器的方位角保持不变, 结果如表 2 所示。仿真模拟结果如图 2 所示, 光谱输出强度用  $T$  表示。project 1 是用 7 块厚度相同的晶体得到的输出光谱, project 2 是经过修正后运用 3 块晶体得到的输出光谱。

表 2 修正后晶体的方位角和厚度

Table 2 Azimuth angle and thickness of each crystal after modification

	crystal 1	crystal 2	crystal 3
azimuth angle/(°)	-63.0998	-135.3269	-207.4795
crystal thickness	2L	3L	2L

可以看出, 修正后与修正前相比, 宽口输出光谱波形变化并不明显, 窄口输出谱的阻带隔离度约低于 4 dB 左右, 而其他部分的变化也不明显。从而可用此方法简化晶体数目设计得到不等带宽交错滤波器, 便于实际应用。

阶数对输出光谱波形的平坦通带宽度、隔离度和陡度有重要影响。图 3 为采用 Equiripple 方法分

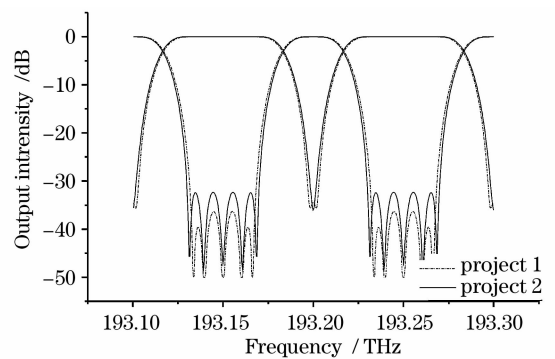


图 2 修正前和修正后输出光谱的比较

Fig. 2 Output spectra before and after modification

别得到 7 阶、11 阶、15 阶在两路 3dB 处带宽比分别为 1:2 的输出透射光谱。

为描述输出光谱过渡带变化程度, 陡度定义为隔离度之差与对应频率(或波长)的比值。陡度越大, 过渡带变化越明显, 波形效果越好。图 3 中三组不同阶数所得结果如表 3 所示。表中宽口和窄口分别代表宽口输出谱和窄口输出谱。

由表 3 可知, 不管宽口还是窄口输出光谱, 随着阶数的增加, 0.5 dB 处通带带宽、隔离度以及陡度都有明显的提高, 其中隔离度变化最明显(如图 3 所示)。当陡度变化越大, 则通带宽度变化越大, 即通

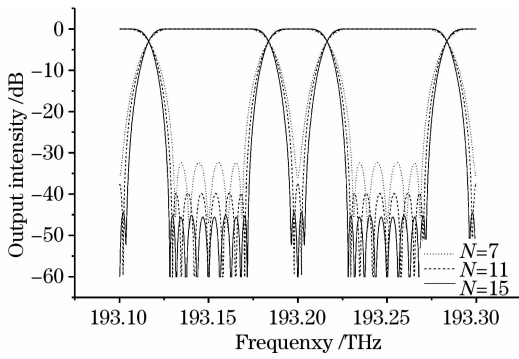


图 3 利用 Equiripple 方法得到三组不同阶数的输出光谱  
Fig. 3 Three output spectra in different orders obtained by using Equiripple method

带带宽和陡度变化是一致的。结合图 3 也可知滤波器输出波形的矩形化改善是以增加滤波器阶数作为代价的。对于窄口输出谱,变化相同阶数,当阶数越小时,其隔离度变化越明显,而宽口输出谱特性正好与此相反。

表 3 运用三组不同阶数所得输出光谱的具体参数  
Table 3 Three output spectral concrete parameters in different orders

order	bandwidth at 0.5 dB/GHz		isolation /dB		gradient /(dB/GHz)	
	wide port	narrow port	wide port	narrow port	wide port	narrow port
	7	54.2	19.8	36.0	32.2	1.41
11	56.2	21.2	37.5	39.6	1.63	1.70
15	58.0	23.2	44.3	45.1	1.93	1.99

#### 4 不同目标函数设计方法的比较

利用不同的目标函数设计方法可以得到不同平坦通带宽度、隔离度和陡度的输出光谱波形。图 4 为分别采用 Equiripple、Hamming 和 Kaiser 三种代表性的目标函数设计方法在 15 阶时得到两路 3 dB 处带宽比分别为 1:2 的输出透射光谱。表 4 为对应不同设计方法得到的输出光谱的具体参数。

由此可知,在相同阶数的情况下,利用 Equiripple 方法得到光透射率输出谱,其对于宽口和窄口输出谱都有较好的通带带宽,隔离度和陡度。特别是对宽口输出谱有最好的通带带宽和隔离度,对窄口输出谱有最好的陡度。利用 Hamming 方法,对于窄口输出光谱可以得到最好的通带带宽和较好的隔离度,对宽口输出光谱有最好的陡度。相比之下,利用 Kaiser 方法,其窄口输出谱的隔离度最高,可以达到 54 dB 以下,但是其他参数都是三种

方法中最差的。三种方法各有不同的优缺点,因此在实际应用当中,应结合具体情况来考虑。

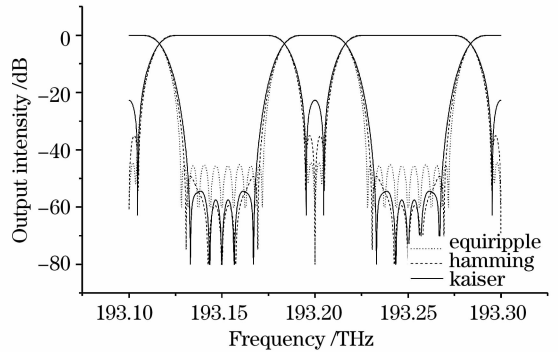


图 4 利用三种不同方法得到的输出光谱  
Fig. 4 Three output spectral in the same order are obtained by using different methods

表 4 利用三种不同设计方法得到输出光谱的具体参数  
Table 4 Three output spectral concrete parameters obtained by using three different methods

method	bandwidth at 0.5 dB/GHz		isolation /dB		gradient /(dB/GHz)	
	wide port	narrow port	wide port	narrow port	wide port	narrow port
	Equiripple	58.0	23.3	44.3	45.1	1.93
Hamming	57.1	23.4	35.0	49.2	1.99	1.84
Kaiser	56.5	22.4	22.6	54.4	1.86	1.68

#### 5 结 论

采用 FIR 方法设计双折射晶体不等带宽交错滤波器,以 Equiripple 方法 7 阶为例具体模拟了 dB 处带宽比为 1:2 的 50 GHz 交错滤波器,给出了结构参数,表明该器件具有高隔离度以及宽平坦度和通带波纹小的特点。接着运用 Equiripple 方法设计出了阶数分别为 7、11、15 的交错滤波器,分析了阶数增加对宽口和窄口两输出光谱的影响。讨论了在相同阶数条件下用三种不同目标函数设计方法得到的输出透射光谱特性,分析了每种方法利与弊。

#### 参 考 文 献

- Shao Yonghong, Miao Tongqun, Jiang Yaoliang et al. . A novel interleaver with different output spectrum bandwidth[J]. *Acta Photonica Sinica* , 2003, **32**(8):948~950  
邵永红, 缪同群, 姜耀亮 等. 一种不等带宽光学梳状滤波器 [J]. *光子学报*, 2003, **32**(8):948~950
- Cheng Chihao. Asymmetrical interleaver structure based on the modified Michelson interferometer[J]. *Optical Engineering* , 2005, **44**(11):115003(1-5)

- 3 Zhang Ruifeng, Wang Shuhui, Ge Chunfeng *et al.*. Design of different bandwidth interleaver [J]. *Journal of Tianjin University*, 2006, **39**(3):365~368  
张瑞峰, 王书慧, 葛春风等. 不等带宽奇偶交错滤波器设计[J]. *天津大学学报*, 2006, **39**(3):365~368
- 4 Zhang Ting, Chen Kai, Zhao Shuai *et al.*. A novel unequal passband interleaver employing high birefringence fiber sagnac loop mirror[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2005, **16**(4):436~440  
张婷, 陈凯, 赵帅等. 双折射光纤环镜不等带宽交错复用器的研究[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(4):436~440
- 5 Zhang Juan, Liu Liren, Zhou Yu *et al.*. Flattening optimization of spectral transmittance for birefringent filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4):426~430  
张娟, 刘立人, 周煜等. 双折射滤波器光谱透射率函数的平坦化优化计算[J]. *光学学报*, 2003, **23**(4):426~430
- 6 Liu Jihong, Fang Qiang, Yin Yafang. Synthesis of crystal comb filter based on lattice structure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(4):706~709  
刘继红, 方强, 阴亚芳. 格结构在晶体梳状滤波器设计中的应用[J]. *光子学报*, 2007, **36**(4):706~709
- 7 Liu Jihong, Fang Qiang, Yin Yafang. Jones matrix based synthesis for FIR optical filter using birefringent crystals[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(11):1673~1676  
刘继红, 方强, 阴亚芳. 基于琼斯矩阵的 FIR 晶体光滤波器设计方法[J]. *光子学报*, 2005, **34**(11):1673~1676
- 8 Juan Zhang, Liren Liu, Yu Zhou. Novel and simple approach for designing lattice-for interleaver filter [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(18):2217~2224
- 9 A. V. Oppenheim, A. S. Willsky, S. H. Nawab. *Signals & Systems*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998. 171~195
- 10 Kaname Jinguji, Masao Kawachi. Synthesis of coherent two-port lattice-form optical delay-line circuit[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(1): 73~82