

文章编号: 0253-2239(2005)02-228-5

介质膜滤波器色散特性的研究

崔新友^{1,2} 刘 军² 黄德修¹ 许远忠²

(¹ 华中科技大学光电子工程系, 武汉 430074)
(² 武汉光迅科技有限责任公司, 武汉 430074)

摘要: 采用信号处理的方法,对介质膜滤波器的滤波特性进行了详细的研究。介质膜滤波器是最小相位滤波器,它的幅度响应与相位响应之间存在希尔伯特变换规律,因此可以通过它的幅度响应重构它的相位响应,进而可以得到它的色散特性。为了验证理论分析,设计了射频调制法测试介质膜滤波器群速度延时的实验装置。实验测试了一个 100 GHz 33 信道的介质膜滤波器的群速度延迟。通过对实验结果与理论计算结果的对比分析,发现实验数据与理论分析吻合得比较好。最后,对介质膜滤波器的色散的特点进行了分析。

关键词: 光纤通信技术; 介质膜滤波器; 射频调制; 群速度色散; 无限冲击响应滤波器; 最小相位响应滤波器
中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

Research on Chromatic Dispersion Characteristic of Thin Film Filter

Cui Xinyou^{1,2} Liu Jun² Huang Dexiu¹ Xu Yuanzhong²

(¹ Department of Optoelectronic Engineering, Huangzhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)
(² Accelink Technologies Co., Ltd, Wuhan 430074)

Abstract: Based on signal processing theory, the filtering characteristic of thin film filter was researched in detail. Thin film filter is minimum phase filter (MPF) and Hilbert transform law is related with the amplitude response and the phase response. So the phase response can be reconstructed from its amplitude response and then the characteristic of chromatic dispersion can be achieved. To validate the theoretical analysis, a test system for group velocity delay was set up based on RF modulation. As an example, the group velocity delay of a 100 GHz 33CH thin film filter was tested. The experimental result matched with the theoretical result very well through contrasting analysis. At last, an analysis of the characteristic of chromatic dispersion of thin film filter was also provided.

Key words: optical fiber communication technology; thin film filter; RF modulation; group velocity dispersion; infinite impulse filter; minimum phase filter

1 引 言

随着光纤放大器(主要指掺铒光纤放大器 EDFA 与拉曼光纤放大器)的发展,光纤的损耗不再成为光纤通信系统中的一个主要限制因素。事实上,光纤放大器解决了损耗问题的同时,加深了色散问题^[1]。

基于介质膜滤波器(Thin film filter, TFF)的光波分复用/解复用器件(DWDM),由于其具有低插入损耗,宽带宽,高隔离度,不需温控以及可靠性高等优点在光通信系统中取得了广泛的应用。在低速

光通信系统中,人们对滤波器的幅度响应(Filter's amplitude response,主要影响器件的插入损耗,带内插入损耗的纹波,相邻信道的隔离度与非相邻信道的隔离度等指标)特性的研究是比较成熟的^[2,3]。随着高速光通信系统的发展,已将注意力转到滤波器的相位响应(Filter's phase response),也即滤波器的色散特性上来^[4~8]。

而从数学模型的角度出发,对介质膜色散特性做出定量研究工作的报道则非常少。

随着滤波器的结构向着复杂化的方向发展(主

作者简介: 崔新友(1976~),男,湖南武冈人,华中科技大学硕士研究生,主要从事光通信器件方面的研究工作。

E-mail: peter_cui@wri.com.cn。

收稿日期: 2003-11-10;收到修改稿日期: 2004-08-09

要表现为反射器数量的增加),其数学表达式的复杂性迅速增长^[9]。而介质膜滤波器在功能与原理方面,与电学里的滤波器是一致的。因此,可以利用电学里成熟的信号处理技术来研究介质膜滤波器的幅度与相位响应特性^[10]。

介质膜滤波器作为一个因果的线性系统,它的幅度响应与相位响应并不是无关的,而是必须符合一定的制约关系^[11,12]。本文就是从这一点出发,利用信号处理的方法,对介质膜滤波器的幅度和相位特性进行分析。在以下的分析中,忽视材料色散与波导色散,而只考虑由滤光片本身引起的色散(在波分复用器件中,前者相对后者可忽略并且在带宽内可看作常数)。

2 理论分析

2.1 介质膜滤波器的幅度与相位响应

对理想的介质膜滤波器而言,应当具有品质因子(Figure of Merit, 0.5 dB 带宽/25 dB 带宽)为 1 的幅度响应和线性的相位响应。它的系统函数为

$$H(\omega) = \begin{cases} \exp[-j\phi(\omega)], & \omega_{c1} \leq \omega \leq \omega_{c2} \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (1)$$

式中 $H(\omega)$ 是滤波器的系统函数, ω_{c1} 与 ω_{c2} 为截止频率, $\phi(\omega)$ 是滤波器的相位延迟。然而理想滤波器是非因果的,因而在现实中是不可实现的。设计过程中只能接近而不能达到理想滤波器的频率响应特性。

对(1)式中系统函数的相位 $\phi(\omega)$ 取导数,得介质膜滤波器的群速度延迟,即

$$D_g = -\frac{d\phi}{d\omega} = \tau(\omega), \quad (2)$$

(2)式中,若 $\tau(\omega)$ 为常数,则这样的系统称为线性相位系统;若 $\tau(\omega)$ 的值随着 ω 值的变化而变化,则这样的系统称为非线性相位系统。系统的群速度色散为 $D_{gv} = -\frac{d^2\phi}{d^2\omega}$ 。因此,对线性相位系统,群速度色散值 D_{gv} 为零;而非线性相位响应的系统存在色散。

根据滤波器系统函数的特点,可被分为有限冲击响应(Finite impulse response, FIR)滤波器与无限冲击响应(Infinite impulse response, IIR)滤波器。对有限冲击响应滤波器,只要单位脉冲响应的每一个值在幅度上都是有限的,有限冲击响应系统总是稳定的。如果系统函数满足对称性条件,它可被设计为线性相位滤波器^[11]。因此,从理论的角度而言,有限冲击响应滤波器可被设计为具有零色散的特征的滤波器。

介质膜滤波器是一种无限冲击响应滤波器,它的系统函数如下:

$$H(\omega) = \frac{\sum_{k=1}^N b_k \exp(-j\omega k)}{1 - \sum_{k=1}^N a_k \exp(-j\omega k)}, \quad (3)$$

式中 a_k, b_k 为多层膜反射与透射导出的系数, N 是介质膜的层数。无限冲击响应滤波器中,由于存在反馈机制,不可能被设计成线性相位函数。因此,从滤波的原理上看,介质膜滤波器就会给信号带来色散。

2.2 介质膜滤波器幅度响应与相位响应的关系

介质膜滤波器的零点与极点都位于单位圆内,为最小相位滤波器,因此幅度响应与相位响应唯一地互相决定,他们之间的变换关系符合希尔伯特变换规律(Hilbert transform)^[12]。设介质膜滤波器的幅频响应为

$$H(\omega) = |H(\omega)| \exp[j\phi(\omega)] = \exp[-\alpha(\omega)] \exp[j\phi(\omega)], \quad (4)$$

于是, $H(\omega)$ 的自然对数为

$$\hat{H}(\omega) = \ln[H(\omega)] = -\alpha(\omega) + j\phi(\omega), \quad (5)$$

$\hat{H}(\omega)$ 的实部 $\alpha(\omega)$ 与虚部 $\phi(\omega)$ 之间为希尔伯特变换对。表示如下:

$$\phi(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\alpha(\theta)}{\theta - \omega} d\theta, \quad (6)$$

$$\alpha(\omega) = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\phi(\theta)}{\theta - \omega} d\theta. \quad (7)$$

由(6)式和(7)式可知,对介质膜滤波器而言,其幅度响应与相位响应互相决定。通过它的幅度响应可以唯一地求得它的相位响应;相反,也可通过介质膜滤波器的相位响应求得它的幅度响应。

另外,由希尔伯特变换规律所得出的另一个结论是要使滤波器的矩形度越高的话,则滤波器的相位畸变越大,也即色散越大。在 $\alpha(\omega)$ 变化较缓慢的区域, $\phi(\omega)$ 的变化也较缓慢而可近似做线性函数处理。

3 实验装置与原理

采用一种用射频信号调制光波并将对光波幅度和相位的测量转化到测量射频信号相应量的方法,对介质膜滤波器群速度延迟进行测量。测试系统的实际装置如图 1 所示,由可调谐激光器发出的光波被射频(RF)信号调制后入射到被测介质膜滤波器上,其透射或反射的光波信号经过解调,输出的射频信号与参考射频信号进行相位和幅度比较,即可从中得到介

质膜滤波器对特定波长的响应特性,通过扫描光波长则可得到介质膜滤波器在某一波段的响应特性。

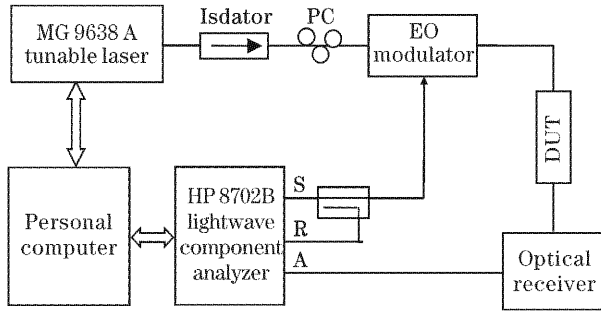


图1 射频调制法测试群速度延迟的实验装置示意图

Fig. 1 Test setup for group velocity delay based on RF modulation

其中可调谐光源采用安立 MG 9 6 3 7 A 型激光

器,其波长分辨力可达到1 pm,可在1520~1580 nm 范围内扫描输出。所用惠普 HP8702B 光波器件分析仪既可作为射频信号源又可完成相位与幅度的比较,它对幅度与相位的分辨率分别为0.001 dB和0.01°,射频输出频率可在300 Hz~3 GHz范围内任选,图中 S,R 和 A 三个电端口分别为射频信号输出端,参考信号输入端及被测信号输入端。被测介质膜滤波器 DUT 与电光调制器(EO modulator)及光接收器(Optical receiver)相连。根据连接的方式,可分别用于介质膜滤波器的透射与反射色散的测试。采用偏振控制器(PC)是为了避免偏振相关的光功率波动对测试可能造成的影响。

假设可调谐激光器发出的光波角频率为 ω , 经过射频调制后的光信号可表述为

$$E_1(t) = A_0[1 + m\cos(\Omega t + \theta_0)]\cos \omega = \frac{A_0}{2}\{2\cos \omega t + m\cos[(\omega + \Omega)t + \theta_0] + m\cos[(\omega - \Omega)t + \theta_0]\}, \quad (8)$$

其中 A_0 为幅度系数, m 为调制深度, Ω 为射频的角频率, θ_0 为其初相位。如果将介质膜滤波器的透射系数表示为 $t(\omega)\exp[j\phi(\omega)]$ 则经介质膜滤波器后的光信号为

$$E_2(t) = \frac{A_0}{2}\{2t(\omega)\cos[\omega t + \phi(\omega)] + mt(\omega + \Omega)\cos[(\omega + \Omega)t + \theta_0 + \phi(\omega + \Omega)] + mt(\omega - \Omega)\cos[(\omega - \Omega)t + \theta_0 + \phi(\omega - \Omega)]\}, \quad (9)$$

在光接收机解调后输出的射频信号为

$$E_3(t) = 2A_0mk\{t(\omega)t(\omega + \Omega)\cos[\Omega t + \theta_0 + \phi(\omega + \Omega) - \phi(\omega)] + t(\omega)t(\omega - \Omega)\cos[\Omega t + \theta_0 + \phi(\omega) - \phi(\omega - \Omega)]\}, \quad (10)$$

其中 k 是与光接收机有关的常数。通常 $\Omega \ll \omega$, 故有以下近似关系成立:

$$t(\omega \pm \Omega) \approx t(\omega), \quad (11)$$

$$\phi(\omega \pm \Omega) \approx \phi(\omega) \pm \tau(\omega)\Omega, \quad (12)$$

其中 $\tau(\omega) = \frac{d\phi(\omega)}{d\omega}$ 是介质膜滤波器的时延, 将(11)式、(12)式代入式(10)得

$$E_3(t) = 2A_0mkT(\omega)\cos[\Omega t + \theta_0 + \psi(\omega)], \quad (13)$$

其中

$$T(\omega) = |t(\omega)|^2, \quad (14)$$

$$\psi(\omega) = \tau(\omega)\Omega, \quad (15)$$

从(14)式和(15)式可看出, 如果将原射频信号作为参考信号, 通过比较两者的相位和幅度就可以得到介质膜滤波器的透射率和时延特性, 其中时延还可表示为

$$\tau(\omega) = \frac{\psi(\omega)}{2\pi f}, \quad (16)$$

其中 f 为射频信号的频率。由(16)可知, 实验测试的

群速度延迟与射频信号的频率 f 成反比关系。

4 理论计算与实验结果分析

以100 GHz 33 信道(ITU-T波长为1550.92 nm)的滤光片为例, 对介质膜滤波器的色散特性进行了实验与理论比较研究。使用 Agilent 81642A 型光谱分析仪(Optical spectrum analyzer, OSA)测试介质膜滤波器的幅度响应, 设置的光谱区间为1549.645 nm到1552.200 nm, 步长为0.005 nm, 共512个点。图2为该滤波器的幅度响应特性。0.5 dB处的波长值为1550.687 nm 与 1551.172 nm, 即0.5 dB 带宽为0.485 nm, 中心波长为1550.929 nm。

调用 Matlab 6.5 软件中的希尔伯特变换程序, 直接对图2中的512个点的幅度值进行希尔伯特变换, 得到512个分离的相位值, 如图3所示。

对图3中的512个点的相位响应取导数, 得到滤波器的群速度延迟的群速度色散值 D_{gv} 。将它与实验测得的群速度延迟的群速度色散值 D_{gv} 一起画于图4

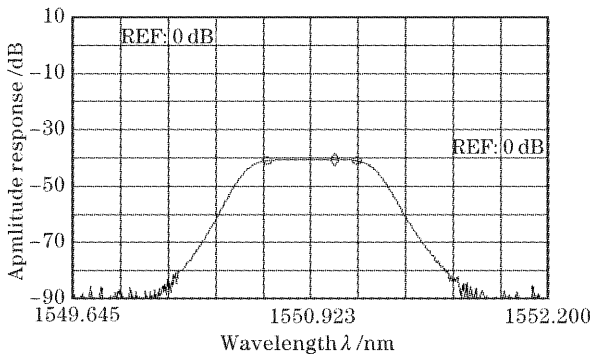


图 2 介质膜滤波器的幅度响应
Fig. 2 Amplitude Response of the TFF

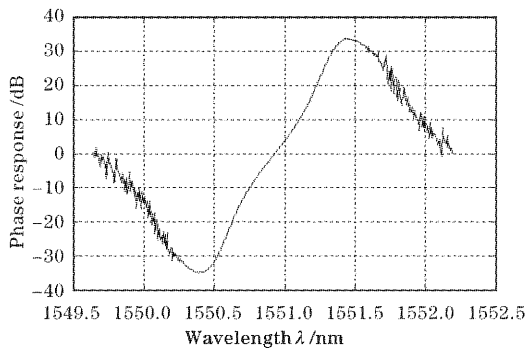


图 3 希尔伯特变换得到的相位响应
Fig. 3 Phase response calculated from Hilbert transform

中。如(16)式所示,在群速度的测试过程中,测试值的大小与信号的调制速率有关,因此理论计算与实验的测试值的大小不同,但是他们的变化趋势是一致的。另外,由于在通带以外,透过的信号光变弱,受噪声的引响较大,所以在离通带较近的区域,实验测试的曲线较理论计算的曲线先出现振荡现象。从图 4 也可以看出,在通带范围内,群速度延迟较平缓,而在离通带外较近处,群速度延迟变化的波动较大。

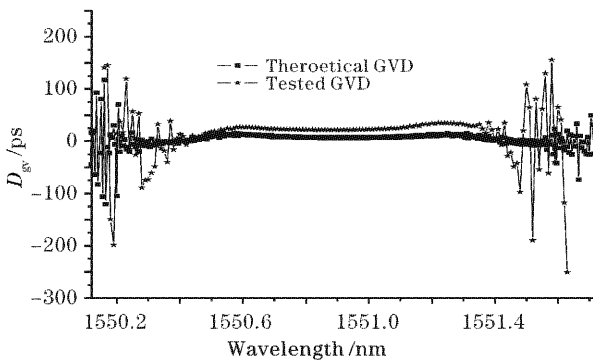


图 4 理论计算与实验测试的群速度延时
(中心波长±0.8 nm)

Fig. 4 Theoretical and experimental group velocity delay (CWL±0.8nm)

为得到该滤波器的色散特性,以图 4 中的两条曲线的每一点的前后 5 点(共 11 点)进行平滑后再求导数,即可得到该滤波器的色散(CD),如图 5 所示。

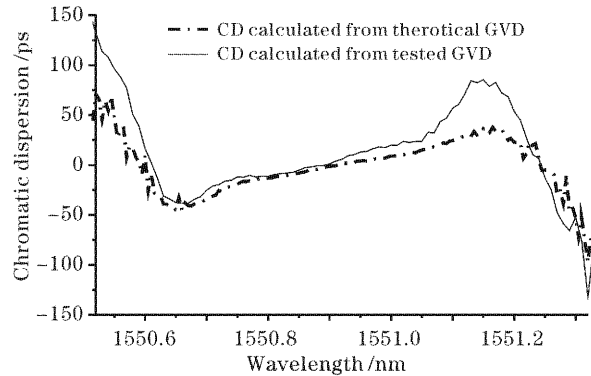


图 5 由理论计算与实验测试值得到的色散
(中心波长±0.4 nm)

Fig. 5 Theoretical and experimental chromatic dispersion (CD) (CWL±0.4 nm)

由图 5 可以看出,在滤波器的通带附近,色散的变化非常平缓,但在离通带较远的地方,色散的变化非常剧烈。这一区域与图 2 中幅度响应变化加快的区域一致,这与前面的理论分析中它们之间存在希尔伯特变换关系的规律是相符合的。在幅度响应变化剧烈的过渡带,透过的信号变化率较快,由于噪声的影响,理论计算值与实验值出现了偏差,但变化趋势是一致的。

色散对系统的影响主要是由滤波器通带内的色散引起的,因此对滤波器通带内的色散特性的研究尤为重要。取图 5 中 1550.80~1551.04 nm(即中心波长±0.12 nm 的通带范围)的色散值与波长的关系如图 6 所示。由图中可以看出,在通带范围色散值与波长的关系近似为线性关系,在中心波长处的色散值近似为零,小于中心波长处为负色散,大于

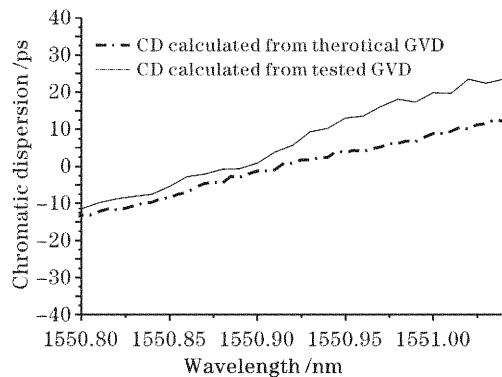


图 6 通带内的色散(中心波长±0.12 nm)

Fig. 6 Chromatic dispersion within passband (CWL±0.12 nm)

中心波长处为无色散。

在整个通带内,理论值与实验值符合得较好,因此我们的实验数据较好地验证了我们的理论模型及其计算结果。

5 结 论

介质膜滤波器由于利用的是光波的多次干涉原理,从信号处理的角度也就是说存在反馈机制,属于无限冲击响应滤波器,因此存在色散。研究表明,在介质膜滤波器平坦的透过区,存在一个近似线性变化的色散区,而在幅度响应变化较为剧烈的通带边缘,色散也变化较快。幅度响应与相位响应之间存在希尔伯特变换规律的制约。因此,尽管可以通过加大通带宽度的方法(也即提高滤波器的矩形度)来降低器件通带内的色散,然而通过提高滤波器的阶数加大通带的方法也会增大滤波器通带内的纹波,纹波的增加反过来又会增加通带内的色散值。因此,当考虑到色散特性时,介质膜滤波器的设计过程是一个均衡幅度响应与相位响应特性的过程。同时,通过理论计算值与实验值的对比,发现理论值与实验值符合得较好。因此,文中得出的介质滤波器色散特性计算的理论模型也提供了一种检验介质膜滤波器的色散特性的重要手段。

参 考 文 献

1 T. Li. The impact of amplifiers on long-distance lightwave telecommunications[J]. *Proc. IEEE*, 1993, **81**(11): 1568~1579

- 2 Gu Peifu, Bai Shengyuan, Li Haifeng *et al.*. Design of DWDM thin film interference filters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7): 794~797 (in Chinese)
顾培夫,白胜元,李海峰等. 密集型波分复用薄膜干涉滤光片的设计[J]. *光学学报*, 2002, **22**(7): 794~797
- 3 Zong Lei, Li Yanhe, Zheng Xiaoping *et al.*. Study on homodyne crosstalk in integrative OADM/OXC node[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(1): 57~60 (in Chinese)
宗磊,李艳和,郑小平等. 一体化 OADM/OXC 节点降低串扰结构研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(1): 57~60
- 4 G. Lenz, B. J. Eggleton, C. R. Giles *et al.*. Dispersive properties of optical filters for WDM systems [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1998, **34**(8): 1390~1402
- 5 M. E. Vieira Segatto, G. D. Maxwell, R. Kashyap *et al.*. High-speed transmission and dispersion characteristics of an arranged-waveguide grating[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **195**(8): 151~157
- 6 H. Macleod. *Advances in Thin Films* [C]. OFC'03, ThM1, 2003. 520~521
- 7 T. Ito, Y. Lida, K. Minagawa *et al.*. Optimization for CD Characteristic of Band-OADM Using 4-skip-0 100 GHz Filter [C]. OFC'03, ThM2, 2003. 521~522
- 8 R. M Fortenberry, M. E. wescott, L. P. Ghislain *et al.*. Low Chromatic Dispersion Thin Film DWDM Filters for 40 Gb/s Transmission Systems [C]. OFC'02, WS2, 2002. 319~320
- 9 H. van de Stadt, J. M. Muller. Multimirror Fabry-Perot interferometers [J]. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1985, **2**(8): 1363~1370
- 10 Eric M. Dowling, Duncan L. MacFarlane. Lightwave lattice Filters for optically multiplexed communication systems[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(3): 471~486
- 11 Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schaffer, John R. Buck. *Discrete-Time Signal Processing* [M]. Huang Jianguo, Liu Shutang trans., Beijing: Academic Press, 1998 (in Chinese)
A. V. 奥本海姆, R. W. 谢弗. 离散时间信号处理[M]. 黄建国, 刘树棠译, 北京: 科学出版社, 1998
- 12 Zheng Junli, Ying Qihang, Yang Weili. *Signal and System* [M]. Beijing: High Education Press, 2000 (in Chinese)
郑君里, 应启珩, 杨为理. 信号与系统[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000