

基于液晶可调谐滤波技术的动态增益均衡器研究*

吴晓平 胡强高 许远忠

(武汉邮科院光迅科技有限责任公司,湖北 武汉 430074)

摘 要 提出了一种基于液晶技术的新型可调谐滤波器结构,详细介绍了这种新型液晶可调谐滤波器的结构及其工作原理,用琼斯矩阵法推导出其光传输矩阵,得出了其光透过率表达式,并在数值上进行了仿真,得出了其幅度与相位的调制特性.同时分析了采用这种液晶可调谐滤波器八级级联组成动态增益均衡器的遗传算法优化仿真结果.利用优化得出的参数值,对该动态增益均衡器进行了实验,得出了 DGE 完整的光增益透过谱,实验结果与理论分析相吻合.

关键词 液晶可调谐滤波器;琼斯矩阵;遗传算法;动态增益均衡器

中图分类号 TN715 **文献标识码** A

0 引言

EDFA 已广泛用于 DWDM 系统,对多波长光信号进行放大,但由于 EDFA 对不同波长信号的增益饱和特性,导致 EDFA 增益谱不平坦,特别是在多个 EDFA 级联后,这种不平坦性加剧,使得一些信道产生严重的误码,OSNR 显著下降,整个系统性能大幅下降.同时,在干线及分布网络中,上/下话路或信道功率的随机涨落会引起各信道功率的失衡,这种信道功率失衡使得系统不稳定.所以必须引进光功率(增益)动态均衡技术.

目前制作动态增益均衡器(Dynamic Gain Equalizer, DGE)采用的技术有:声光技术、热光技术、波导技术^[1]、MEMS 技术^[2]、液晶技术等.其中关于液晶技术又有液晶相位调制技术^[3,4]、聚合物分散液晶技术等.本文以一种新型的液晶可调谐滤波器(Liquid Crystal Tunable Filter, LCTF)技术为基础,对其滤波特性及级联组成的 DGE 进行了详细分析与研究,理论上和实验上证明了其可行性.

1 液晶可调谐滤波器

1.1 结构与基本工作原理

液晶作为一种凝聚态物质,其特性与结构介于固态晶体与各向同性液体之间,是有序性的流体.在宏观上看,既具有液体的流动性、粘滞性,又具有晶体的各向异性,能如晶体一样发生双折射,布拉格反射、衍射及旋光效应,也能在外电场作用下产生热光、电光或磁光效应.当对液晶施加电场时将改变液晶分子的排列方向,一定偏振方向的入射光将在

晶体中发生双折射现象(电控双折射效应),使 o 光与 e 光的折射率发生变化,改变 o 光与 e 光的折射率差^[5,6],从而引起一定的相位差,其表达式为

$$\Delta\varphi = 2\pi\Delta n d / \lambda = 2\pi(n_e - n_o)d / \lambda \quad (1)$$

式中, Δn 为液晶的折射率差.

正是由于液晶的电控双折射效应,使 o 光与 e 光的相位差被电压调制,所以可用液晶、波片、偏振分束器构成一种新型的液晶光可调谐滤波器,具体结构如图 1. PBS_1 作为起偏器, PBS_2 则为检偏器.液晶 1、3(LC_1 、 LC_3)与 $\lambda/4$ 波片组成旋光装置,对输入光信号的幅度进行调制,而液晶 2(LC_2)与晶体($\Delta\varphi_2 + \Delta\varphi_c$)则对光信号的相位进行调制,从而使单级 LCTF 实现动态滤波.第二块 $\lambda/4$ 波片本来与 LC_3 在一起组成旋光装置,但为了制造方便,可移到固定相位波片后,具体如图 1,两个 $\lambda/4$ 波片和固定相位波片做成一体.

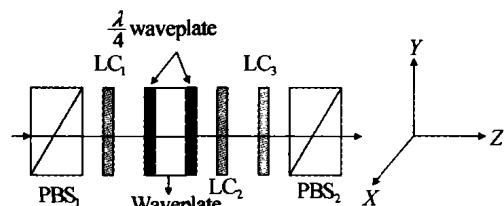


图 1 液晶可调谐滤波器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of liquid crystal tunable filter

1.2 理论推导

液晶在加电时相当于相位可变的双折射器,其琼斯矩阵^[7,8]为

$$M(\varphi, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{j\frac{\varphi}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{\varphi}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

θ 为双折射器快轴与 X 轴的夹角, φ 为相位差.固定相位波片(快轴沿 Y 轴)的琼斯矩阵

*国家 863 计划通用光电子材料、器件与集成技术专题资助项目(2002AA312200)

Tel: 027-87693577 Email: xpwu@wri.com.cn

收稿日期: 2004-03-29

$$M_c \left(\varphi_c, \frac{\pi}{2} \right) = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{j\frac{\varphi_c}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{\varphi_c}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-j\frac{\varphi_c}{2}} & 0 \\ 0 & e^{j\frac{\varphi_c}{2}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$\lambda/4$ 波片(快轴沿 Y 轴)的琼斯矩阵为

$$M_{1/4} = \frac{1}{\sqrt{2}}(1+j) \begin{bmatrix} -j & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

单级 LCTF 的光传输矩阵为(液晶 1、3 的快轴与 X 轴的夹角为 45° , 液晶 2 的快轴沿 Y 轴方向)

$$M = M_{PBS_2} * M_{LC_3} \left[\frac{\pi}{4}, \varphi_{LC_3} \right] * M_{LC_2} \left[\frac{\pi}{2}, \varphi_{LC_2} \right] * 1/4 * M_c * M_{1/4} * M_{LC_1} \left[\frac{\pi}{4}, \varphi_{LC_1} \right] * M_{PBS_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{j\frac{\varphi_{LC_3}}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{\varphi_{LC_3}}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{j\frac{\varphi_{LC_2}}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{\varphi_{LC_2}}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} * \frac{1}{\sqrt{2}}(1+j) \cdot \begin{bmatrix} -j & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-j\frac{\varphi_c}{2}} & 0 \\ 0 & e^{j\frac{\varphi_c}{2}} \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}}(1+j) \begin{bmatrix} -j & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{j\frac{\varphi_{LC_1}}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{\varphi_{LC_1}}{2}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

进而,可得单级 LCTF 透过率为

$$T = \frac{E_{out}}{E_{in}} = \frac{1}{4} e^{j\frac{\varphi_c}{2}} \left\{ \begin{aligned} & \left[(e^{j\frac{\varphi_{LC_3}}{2}} - e^{-j\frac{\varphi_{LC_3}}{2}}) * e^{j\frac{(\varphi_{LC_2} + \varphi_c)}{2}} - (e^{j\frac{\varphi_{LC_3}}{2}} + e^{-j\frac{\varphi_{LC_3}}{2}}) * e^{-j\frac{(\varphi_{LC_2} + \varphi_c)}{2}} \right] * e^{j\frac{\varphi_{LC_1}}{2}} \\ & \left[(e^{j\frac{\varphi_{LC_3}}{2}} - e^{-j\frac{\varphi_{LC_3}}{2}}) * e^{j\frac{(\varphi_{LC_2} + \varphi_c)}{2}} + (e^{j\frac{\varphi_{LC_3}}{2}} + e^{-j\frac{\varphi_{LC_3}}{2}}) * e^{-j\frac{(\varphi_{LC_2} + \varphi_c)}{2}} \right] * e^{-j\frac{\varphi_{LC_1}}{2}} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中, $\varphi_i = 2\pi\Delta n_i d_i / \lambda$ 为对应液晶、波片的相位差; Δn_i 为对应液晶、波片的折射率差; d_i 为对应液晶、波片的厚度.

1.3 单级 LCTF 数值分析

当对液晶施加不同的电压, 根据透过滤表达式可以得出不同的滤波波形. 图 2 为液晶 2 所加电压 $V_{LC_2} = 2.8V$ 不变, 液晶 1、3 在不同调制电压 $V_{LC_1} = V_{LC_3} = 2.5V, 3.6V, 7.9V$ 时幅度变化的计算滤波波形. 由图可知对液晶 1、3 所加电压愈大, 滤波波形的幅度调制愈深, LCTF 的幅度调制范围最大可达到 30 dB.

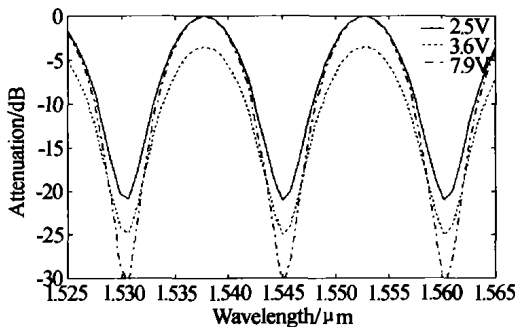


图 2 液晶可调谐滤波器的幅度传输谱图
Fig. 2 The calculated amplitude transmission spectra of LCTF

图 3 为液晶 1、3 所加电压 $V_{LC_1} = V_{LC_3} = 2.5V$ 不变时, 液晶 2 在不同调制电压 $V_{LC_2} = 2.8V, 3.5V, 4.7V$ 时的相位变化的计算滤波波形. 从图中

可以知道, 只要改变液晶 2 的调制电压, 便可以左右移动滤波波形, 改变滤波器的相位.

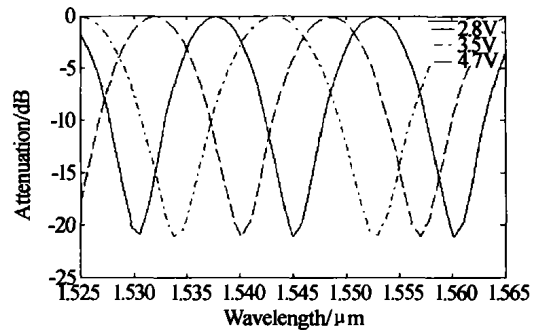


图 3 液晶可调谐滤波器的相位传输谱图
Fig. 3 The calculated phase transmission spectra of LCTF

因此, 对于这种新型的液晶可调谐滤波器, 只要动态调节不同液晶的电压值, 可以得到滤波器幅度与相位的任意调制, 液晶 1、3 对应滤波器的幅度调制, 液晶 2 对应滤波器的相位调制.

2 LCTF 组成 DGE 的理论仿真

正是由于单级 LCTF 的动态调谐的滤波特性, 所以可用多个滤波器级联组成 DGE. 通过实时控制液晶的电压就可以形成所需的光增益透射谱, 解决光增益谱的不平坦, 实现光增益的动态均衡.

要实现滤波器的动态调谐, 即通过实时控制液晶可调谐滤波器参数(对应液晶所加电压)实现. 由于 LCTF 的正、余弦滤波特性决定了要实现复杂增

益波形的均衡,必须采用多个滤波器级联. 单级 LCTF 的控制参数为 3 个,随着多个滤波器级联,控制的参数逐渐增多,总函数式越来越复杂. 用一般的算法解决不了多参数、复杂函数的优化问题,所以本文采用遗传算法进行优化,并对滤波器级联组成的 DGE 进行了仿真.

在这里我们采用了八级 LCTF 级联组成 DGE,其表达式为

$$T = \prod_{i=1}^8 T_i \quad (7)$$

所以八级级联的控制参数为 24 个. 本文采用的遗传算法优化的基本参数为:迭代次数 1000、种群规模 20、实数编码方式.

经遗传算法对目标数据(2000 kmWDM 传输系统中 30 级 EDFA 级联后的反增益谱)进行优化后,优化结果如图 4,拟合数据与目标数据很接近,误差在 -0.3 dB~0.35 dB 之间. 经遗传算法具体优化得到的八级滤波器的 24 个参数值如表 1.

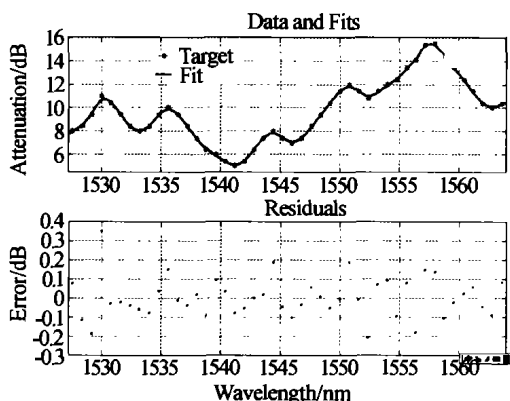


图 4 遗传算法优化八级液晶可调谐滤波器级联(DGE)结果
Fig. 4 The optimization result diagram with genetic algorithm of eight cascaded LCTFs(DGE)

表 1 DEG 优化结果参数

级数	1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th	6 th	7 th	8 th	9 th
V _{LC1}	2.52	3.02	6.53	8.26	7.65	4.58	5.53	7.64	
V _{LC2}	3.43	3.83	4.31	6.43	5.87	3.98	4.72	5.21	
V _{LC3}	3.76	4.23	5.32	6.68	4.76	4.02	3.53	4.18	

3 实验结果

我们利用优化得到的参数对 DGE 进行了实验,分别对每级液晶施加表 1 中的电压值,得出了实际的增益滤波波形,如图 5. 由于我们对要增益均衡的是 EDFA 经过 30 级级联放大后的增益谱,其谱形的不平坦度较大,最大值在 11 dB,所以实际滤波谱中在 1537.6~1541.08 nm,1551.96~1555.44 nm 范围内存在一定的误差,与理论上的差值约为在 ±0.3 dB,这在理论误差允许的范围内,因此所得 DGE 的实验数据与理论值吻合得较好.

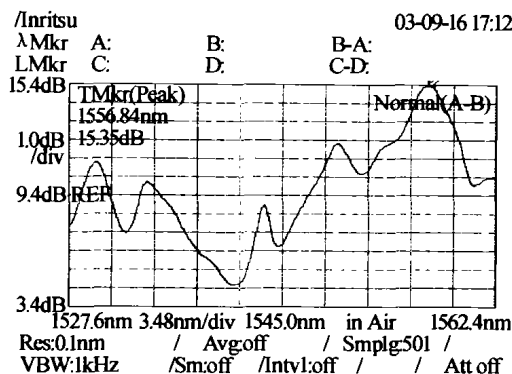


图 5 八级液晶可调谐滤波器级联(DGE)实验传输谱
Fig. 5 The experimental transmission spectra of eight cascaded LCTFs(DGE)

4 结论

本文对用于 DGE 的 LCTF 的结构与工作原理进行了详细分析,用琼斯矩阵法推导出 LCTF 的光传输矩阵,得出了其光透过率表达式,对其动态调谐的电压调制特性进行了数值分析,得出 LCTF 的动态电压幅度与相位调制特性;同时对八级 LCTF 组成的 DGE 用遗传算法进行了优化仿真,得出了各级滤波器的控制参数值;最后对其进行了实验,实验数据与理论值吻合得较好. 说明了采用这种基于液晶技术的低成本、高性能的动态增益均衡器的良好应用前景.

参考文献

- 1 Uetsuka H, Hasegawa T, Ohkawa M, et al. Variable optical attenuators combined with an arrayed waveguide grating filter for next-generation WDM system. *Hitachi Cable Review*, 2001, 2(20): 15~18
- 2 Roger Allan. Highly accurate dynamic gain equalizer controls optical power precisely. *Electronic Design*, 2002, 4(2): 37~40
- 3 陈怀新,魏宏刚,陈祯培,等. 采用液晶空间光调制器的可控性阵列菲涅耳波带片. *光子学报*, 2001, 30(5): 562~566
- 4 Chen H X, Wei H G, Chen Z P, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(5): 562~566
- 5 Chen p l, Lin K C, Chuang W C, et al. Analysis of a liquid crystal Fabry-Perot etalon filter: A Novel Model. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, 9(4): 467~469
- 6 Khoo I C, Wu S T. Optics and nonlinear optics of liquid crystals. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 1993. 107~120
- 7 李大海,谭泽富,陈怀新,等. 采用环路径向剪切干涉法测量液晶电视的相位调制特性. *光子学报*, 2002, 31(8): 970~974

- Li D H, Tan Z F, Chen H X, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(8):970~974
- 7 Jones R C. Calculus for the treatment of optical system. *Opt Soc Am*, 1941, **8**(31):488~493
- 8 黄腾超,陈海星,李海峰,等. 可调液晶法-珀滤光片的研究. *光子学报*, 2003, **32**(12):1438~1441
- Huang T C, Chen H X, Li H F, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(12):1438~1441

Analysis of a Dynamic Gain Equalizer Based on Liquid Crystal Tunable Filter Technology

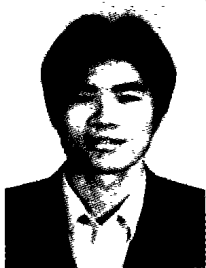
Wu Xiaoping, Hu Qianggao, Xu Yuanzhong

Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications Accelink Technologies Co., LTD, Wuhan 430074

Received date: 2004-03-29

Abstract A novel optical tunable filter based on liquid crystal technology is reported in this paper. The structure and principle of this novel liquid crystal tunable filter are presented carefully, and then the optical signal transmission matrix and expression are deduced by the Jones Matrix way, the modulated characteristics of the LCTF's amplitude and phase are achieved by numerical simulation. The DGE based on eight cascaded LCTFs are analyzed and emulated with genetic algorithm, and the experiment of DGE is realized with the parameters of the simulation results, the whole optical transmission spectrum are gained, and these experimental results agree well with the theoretical analysis.

Keywords Liquid crystal tunable filter; Jones matrix; Genetic algorithm; Dynamic gain equalizer



Wu Xiaoping was born in December, 1978, in Ezhou Hubei. He received B. S. degree from the Telecom Department of Hubei Polytechnic University in 2001, and received the M. S. degree from Wuhan Research Institute of P & T in 2004. Now, he is an engineer in the Accelink Technologies Co., LTD, Wuhan. His research interests are in fiber laser and optical passive components.