

文章编号: 0253-2239(2005)07-970-6

引入衰减的多腔法布里-珀罗滤波器的特性分析*

孙雪铮 陈海星 顾培夫

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 多腔法布里-珀罗滤波器是光纤通信中的关键器件,为了改善该器件的透过光谱的性能,讨论了衰减对器件性能的影响。利用多镜理论以两种不同方法推导了在多腔级联法布里-珀罗滤波器器件中引入衰减时信号透过率的传输矩阵算法。以三腔法布里-珀罗滤波器为例,数值模拟计算证明了当引入衰减时,可以有效抑制多腔法布里-珀罗器件的内部串扰,改善通带内信号的透过率,提高了通带信号的利用率。通过对引入不同衰减时器件透过率的计算,详细比较和讨论了透过率与衰减系数的关系,以及不同衰减时次峰与主峰的相对关系,同时使用薄膜设计软件 TFC 进行模拟,证实了结果的准确性。最后为尽量减少系统因引入衰减的损耗,提出了减少衰减系数的方法,即增大反射镜的反射率,并以矩阵运算的结果证明其可行性。

关键词: 应用光学; 密集波分复用; 多镜理论; 法布里-珀罗滤波器; 多腔; 衰减

中图分类号: TB851⁺.7 文献标识码: A

Characteristic Analysis of Multi-Cavities Fabry-Pérot Filters with Attenuation

Sun Xuezheng Chen Haixing Gu Peifu

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: Multi-cavities Fabry-Pérot filter is a key device used in optical fiber communication system. To improve the transmission spectrum, the influence of attenuation on the device is discussed here. A matrix treatment is presented by two different methods based on multi-mirror theory to calculate the transmission characteristics of the multi-cavities Fabry-Pérot filters with attenuation. As an example, the transmission of a three-cavities Fabry-Pérot filter with different attenuation is obtained. The comparison of simulated results indicated that the multi-mirror Fabry-Pérot filter with attenuation could suppress the crosstalk of intra-cavities effectively, improves the transmission of the signal in the passband, and increase the utilization of the signal consequently. The relation of transmission with different attenuation is discussed primary, and also discussing the relationship of the value of peak transmission and the secondary peak transmission. Simulating by TFC approved the result. At last the method of increasing the reflection of mirrors to reduce attenuation is put forward for the sake of reducing the cost of the system. And the feasibility of the method is demonstrated by matrix calculation.

Key words: applied optics; dense wavelength division multiplexing; multi-mirror theory; Fabry-Pérot filter; multi-cavities; attenuation

1 引 言

近年来,作为密集波分复用系统中关键技术的滤波器件已有了突飞猛进的发展,其实现方法发展迅速、新技术层出不穷。其中基于法布里-珀罗(F-P)干涉仪原理的滤波器更是受到人们的普遍关

注,技术也日趋成熟^[1~3],应用越发广泛^[4,5]。一般在光通信中,相对于单腔法布里-珀罗滤波器,多采用腔长不等的多腔级联的法布里-珀罗滤波器来实现分频、滤波^[6]。这是由于多腔级联法布里-珀罗器件中反射光束在多面平行反射镜内的传输可以形成

* 国家自然科学基金(60478301)资助课题。

作者简介: 孙雪铮(1983~),女,安徽人,浙江大学硕士研究生,主要从事光学薄膜及光通信方面的研究。

E-mail: sxznecy@sohu.com

收稿日期: 2004-03-12; 收到修改稿日期: 2004-11-25

相干叠加,再加上非对称腔的透射光谱相互叠加作用,减少了单腔法布里-珀罗滤波器中的传输损耗。这样可以增加自由光谱范围,减小带宽从而提高了精细度,同时加强了对边带的抑制作用,并改善了通道信号的平坦度,能实现更好的滤波效果。因而这种技术已经出现了不少相关研究,同时也有文献对多腔的透过率进行了精确计算^[7,8]。但在对多腔法布里-珀罗器件的深入研究中发现,多腔法布里-珀罗器件的透过光谱会出现很大的串扰,这对于实际使用是极为不利的。由于光线在腔内的多次反射,研究表明^[9],在多腔法布里-珀罗器件中引入一定的衰减时,其可以吸收一部分腔内多次反射引起的光束,从而降低了串扰,可以改善透过光谱。然而,由于引入的衰减同时会降低通带信号的透过率,因此对衰减系数的选择是十分重要的,这关系到整个系统实际使用的损耗付出。于是对于如何选择衰减系数以消除串扰,同时保证通带内信号的损耗满足使用要求等问题都需要较为准确的计算。

本文以多镜理论为基础推导了引入衰减时多腔级联法布里-珀罗器件透过率的矩阵算法。并以三腔法布里-珀罗滤波器为例展开具体分析,通过对引入不同衰减时器件透过率的计算和分析,着重讨论含衰减的多腔法布里-珀罗器件的透过率与衰减系数的关系,这样就可以得出尽可能低的衰减系数来满足消除系统串扰的需求。同时进一步提出了减少衰减参数的有效方法。数值模拟计算表明,当引入适当的衰减时,可以有效抑制多腔法布里-珀罗器件的透过光谱的扰动,较好地改善通带内信号,这些特性对于光通信技术中增加信道容量及提高短程通信系统性能都是很有价值的。

2 原 理

多腔级联法布里-珀罗滤波器可以用多镜理论进行分析。这种分析方法最早是由 Van De Stat 和

Muller 在 1986 年提出的^[7],通过分析各个法布里-珀罗腔的反射系数和相位厚度,可以很容易地得到整个器件的透过率函数,且得到它们之间的解析关系。

2.1 不含衰减的多腔级联法布里-珀罗滤波器

对于 $N-1$ 个腔组成的级联法布里-珀罗滤波器,共有 N 面反射镜。图 1 是第 i 腔各电矢量振幅示意图, E_i^+ 与 E_i^- 分别表示第 i 面镜界面处的入射波电矢量振幅与反射波电矢量振幅,其传输方向相反; r_i 与 t_i 分别表示第 i 面镜的振幅反射和透射系数; l_i 表示第 i 腔的腔长,一般用相位厚度表示为 $\phi_i = 2\pi n l_i / \lambda$,对于腔内介质为空气的情况下,有 $n = 1.0$,即 $\phi_i = 2\pi l_i / \lambda$ 。此处所有振幅均为多反射光束的叠加。根据多镜理论,在不考虑腔内物质的损耗时,第 i 面镜边界处的电场与第 $i+1$ 面镜边界处的电场有如下关系:

$$\begin{bmatrix} E_i^+ \\ E_i^- \end{bmatrix} = \frac{1}{t_i} \begin{bmatrix} \exp(-i\phi_i) & -r_i \exp(+i\phi_i) \\ -r_i \exp(-i\phi_i) & \exp(+i\phi_i) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_{i+1}^+ \\ E_{i+1}^- \end{bmatrix}. \quad (1)$$

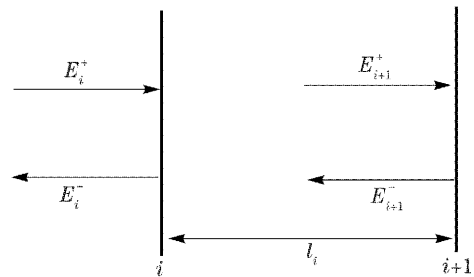


图 1 $N-1$ 腔级联法布里-珀罗滤波器第 i 腔振幅示意图

Fig. 1 The amplitudes at the cavity out of $N-1$ cavities

2.2 引入衰减的多腔级联法布里-珀罗滤波器

由图 1,设 N 腔法布里-珀罗器件的第 i 个腔内引入了损耗介质,对电矢量振幅的吸收系数为 α 。由斯托克斯定律^[9]对其矩阵重新推导为

$$\begin{cases} E_{i+1}^+ \exp(-i\phi_i) \exp(\alpha l) = t_i E_i^+ + r_i E_{i+1}^- \exp(i\phi_i) \exp(-\alpha l), \\ E_i^- = -r_i E_i^+ + t_i E_{i+1}^- \exp(i\phi_i) \exp(-\alpha l) \end{cases} \quad (2)$$

则可得到矩阵式

$$\begin{bmatrix} E_i^+ \\ E_i^- \end{bmatrix} = \frac{1}{t_i} \begin{bmatrix} \exp(-i\phi_i) \exp(\alpha l) & -r_i \exp(i\phi_i) \exp(-\alpha l) \\ -r_i \exp(-i\phi_i) \exp(\alpha l) & \exp(i\phi_i) \exp(-\alpha l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{i+1}^+ \\ E_{i+1}^- \end{bmatrix}, \quad (3)$$

对于整个多腔法布里-珀罗滤波器计算后可简单表示为

$$\begin{bmatrix} E_1^+ \\ E_1^- \end{bmatrix} = \frac{1}{t_1 t_2 \cdots t_{N-1}} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_N^+ \\ E_N^- \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中 A, B, C, D 为多镜传输矩阵系数。由此可知最终透过系数为

$$t = \frac{E_{N+1}^+}{E_1^+} = \frac{t_1 t_2 \cdots t_N}{A - r_N B}. \quad (5)$$

3 模拟计算与讨论

下面以含衰减的三腔法布里-珀罗器件为例进行计算。设在第 2 个腔内引入了损耗介质,对电矢量振幅的损耗系数为 α ,如图 2 所示。则其振幅矩阵为

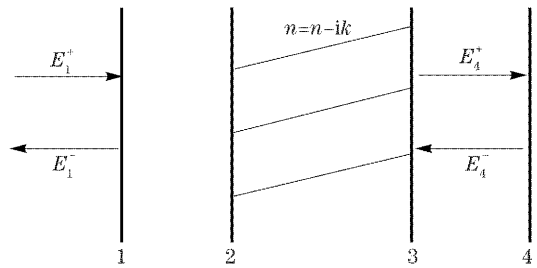


图 2 中间腔引入衰减的三腔法布里-珀罗滤波器示意图

Fig. 2 A three-cavities Fabry-Pérot filter with attenuation in the middle cavity

$$\begin{bmatrix} E_1^+ \\ E_1^- \end{bmatrix} = \frac{1}{t_1 t_2 t_3} \begin{bmatrix} \exp(-i\phi_1) & -r_1 \exp(i\phi_1) \\ -r_1 \exp(-i\phi_1) & \exp(i\phi_1) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \exp(-i\phi_2) \exp(\alpha l) & -r_2 \exp(i\phi_2) \exp(-\alpha l) \\ -r_2 \exp(-i\phi_2) \exp(\alpha l) & \exp(i\phi_2) \exp(-\alpha l) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \exp(-i\phi_3) & -r_3 \exp(i\phi_3) \\ -r_3 \exp(-i\phi_3) & \exp(i\phi_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_3^+ \\ E_3^- \end{bmatrix},$$

求出 A, B 后继续得

$$t = t_1 t_2 t_3 t_4 / \{ \exp(\alpha l) \{ \exp[i(-\phi_1 - \phi_2 - \phi_3)] + r_1 r_2 \exp[i(\phi_1 - \phi_2 - \phi_3)] + r_2 r_3 \exp[i(-\phi_1 + \phi_2 - \phi_3)] + r_1 r_3 \exp[i(\phi_1 + \phi_2 + \phi_3)] \} + \exp(-\alpha l) \{ r_3 r_4 \exp[i(-\phi_1 - \phi_2 + \phi_3)] + r_1 r_2 r_3 r_4 \exp[i(\phi_1 - \phi_2 + \phi_3)] + r_2 r_4 \exp[i(-\phi_1 + \phi_2 + \phi_3)] + r_1 r_4 \exp[i(\phi_1 + \phi_2 + \phi_3)] \} \}, \quad (6)$$

由此即可得到能量透过率 $T = t^*$ 。

另外,可通过直接在折射率中引入衰减的方法求解。即把中间腔的材料折射率 n 替换为 $n - ik$ (k 为消光系数),则原来的 $\phi = -(2\pi/\lambda)nl_i$ 换成 $\phi = -(2\pi/\lambda)(n - ik)l_i$ 代入上式即可:

$$\begin{bmatrix} E_i^+ \\ E_i^- \end{bmatrix} = \frac{1}{t_i} \begin{bmatrix} \exp(-i\phi_i) \exp\left(\frac{2\pi k l_i}{\lambda}\right) & -r_i \exp(i\phi_i) \exp\left(-\frac{2\pi k l_i}{\lambda}\right) \\ -r_i \exp(-i\phi_i) \exp\left(\frac{2\pi k l_i}{\lambda}\right) & \exp(i\phi_i) \exp\left(-\frac{2\pi k l_i}{\lambda}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{i+1}^+ \\ E_{i+1}^- \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中 $\phi_i = -\frac{2\pi}{\lambda}nl_i$ 。

一般在空气腔的情况下,取 $n = 1.0$,由 $\alpha = \frac{2\pi k}{\lambda}$,可见结果与(3)式完全一致。

在使用多腔级联法布里-珀罗滤波器时,由于各个腔之间的串扰,使得透过光谱的次峰值仍然较大,无法达到很好的滤波要求,这时引入一定的衰减就可以抑制次峰的干扰。

图 3 为未引入衰减时三腔法布里-珀罗滤波器的透过率,其中 $r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = \sqrt{0.912}$,即 $R = 0.912$,腔长 $l_1 \approx 1.55 \text{ mm}, l_2 = 0.155 \text{ m}, l_3 \approx 1.40 \text{ mm}$,中心波长为 1550 nm 。由图 3 可以看出,当衰减为 0 时,在中心波长处,次峰值相对主峰已经超过了 -8 dB ,得到的透过信号扰动很大,而在波分局域网中,要求分配给用户在载波在其频带宽度范

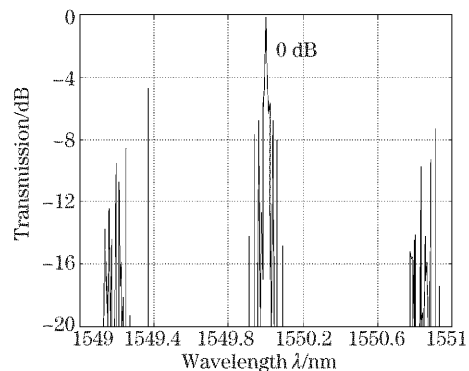


图 3 无衰减三腔法布里-珀罗滤波器透射光谱图
Fig. 3 Transmission of three-cavities Fabry-Pérot filter without attenuation

围内,透过光谱次峰值相对于主峰小于 $-14 \text{ dB}^{[10]}$,以保证信号的清晰、稳定。这个滤波器的性能显然无法达到要求。

图 4(a)~图 4(d)分别是在中间腔引入损耗 1 dB、3 dB、6 dB 以及 10 dB 时的透过率曲线图,图 5 是引入损耗 10 dB 时在中心波长处的放大图。由于引入的损耗使信号衰减过大,这里我们以中心波长处透过率为基准对各处透过率进行了归一化。通

过比较可以看出当引入衰减后,可以有效地抑制扰动,减少串扰的影响。随着衰减的增大,抑制的效果也越为明显,由图 5 可以看出,在引入 10 dB 的衰减后,已经可以满足 -14 dB 的标准,很好的改善了滤波效果。

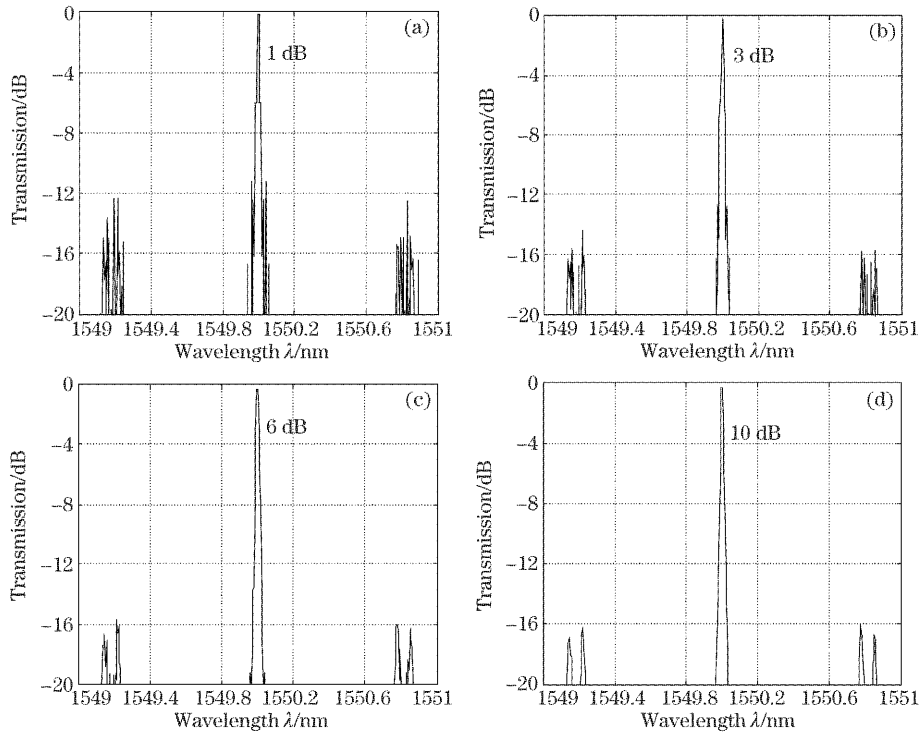


图 4 引入衰减分别为(a) 1 dB, (b) 3 dB, (c) 6 dB 和(d) 10 dB 的三腔法布里-珀罗滤波器透射光谱图

Fig. 4 Transmission of a three-cavities Fabry-Pérot filter with (a) 1 dB, (b) 3 dB, (c) 6 dB and (d) 10 dB of attenuation

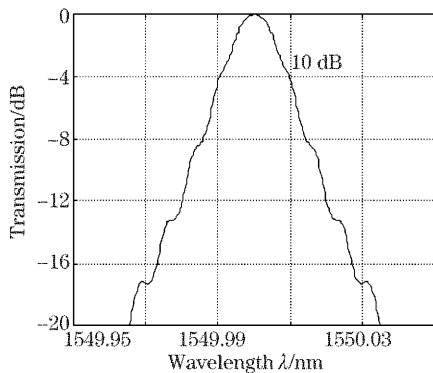


图 5 引入衰减 10 dB 的三腔法布里-珀罗滤波器中心波长处透射光谱放大示意图

Fig. 5 Transmission of a three-cavities Fabry-Pérot filter with 10 dB of attenuation at the center wavelength

为保证计算结果的准确性,使用薄膜设计软件(TFC)进行了模拟。为不失一般性,这里比较了引入损耗为 6 dB、未经归一化时真实透过率的情况,由图 6 可以看出,使用传输矩阵计算的结果与 TFC 的模拟结果完全一致。

图 7(a)表示引入不同衰减时峰值透过率的变化,注意到由于通带信号的透过率也会随引入的衰减的增大而降低,于是为了放大信号付出的代价也越大。这样,在满足消除串扰的前提下,要尽量选择较低的衰减系数。

实际上,由前面模拟计算的公式,同样可以很容易得到次峰的透过率,为了更明确体现透过率与衰减之间的关系,这里仍然进行次峰相对主峰透过率的求解,通过最小二乘法拟合曲线,得到由图 7(b)所表示的引入不同衰减时次峰相对主峰透过率的变化示意图,可以看出,当衰减比较大时,再增大衰减系数对次峰的抑止效果已经不能得到很大的改善。基于以上分析,在实际应用中,要慎重进行衰减系数的选择。

同时,由于增加平面镜表面反射率 R 可以降低反射光线的传输损耗,我们也可以采取提高反射率 R 的方法减低这个衰减参量。图 8 表示引入衰减 10 dB, R 分别等于 0.95 和 0.912 时透过率的比较,图 9 给出了当满足前文中 -14 dB 要求时需引入的损耗随反射率同反射率的关系。

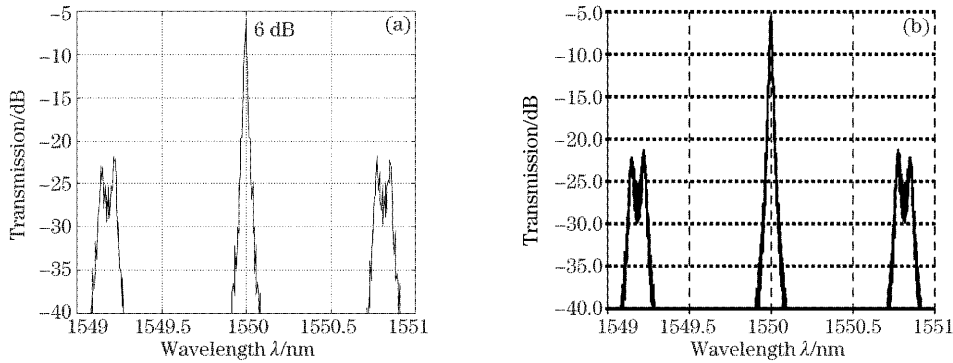


图 6 多镜理论(a)与 TFC(b)传输矩阵理论计算引入衰减 6 dB 三腔法布里-珀罗滤波器透镜光谱对比图
 Fig. 6 Comparison of the result of matrix treatment (a) and TFC (b) with 6 dB of attenuation

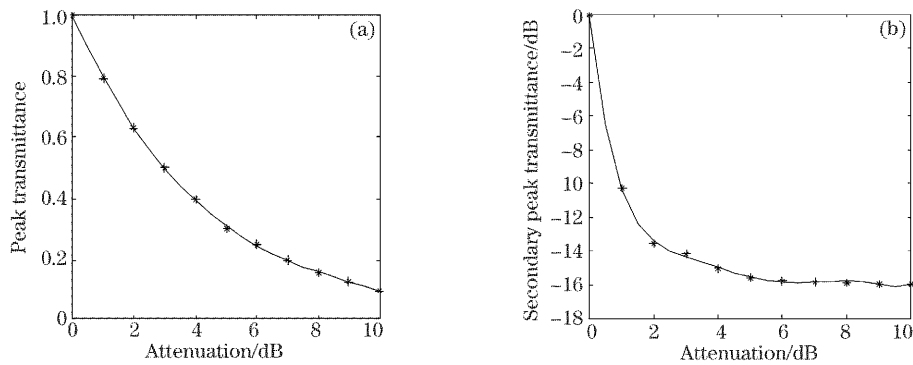


图 7 引入不同衰减的三腔法布里-珀罗主峰透过率,(b)次峰相对主峰透过率变化示意图
 Fig. 7 (a) Peak transmission of a three-cavities Fabry-Pérot filter with different attenuation,
 (b) relative value of the secondary peak

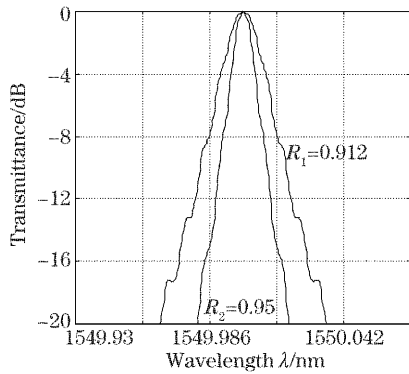


图 8 不同反射率下引入衰减 10 dB 的三腔法布里-珀罗透射光谱图

Fig. 8 Transmission of a three-cavities Fabry-Pérot filter with 10 dB of attenuation for different values of reflection

可以看出随着 R 的增加,在改善透过率曲线的同时还减小了带宽,因此,选择适当反射系数的反射镜也是十分重要的。但是,已有文献指出^[11,12],多腔法布里-珀罗滤波器中,过大的反射率有可能会减小中心波长透过率。在图 9 的计算过程中,我们发现,当反射率大于 0.97 时,中心峰值透过率降低得十分严重。此外,图中反射率与衰减的关系呈阶梯

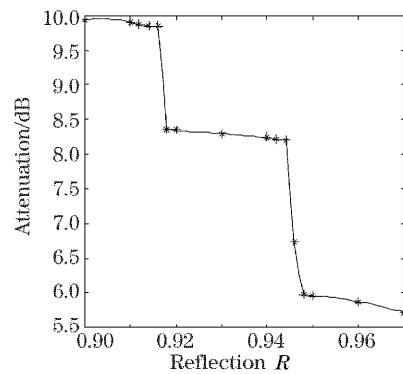


图 9 反射率与引入衰减关系示意图

Fig. 9 Relationship with reflection and attenuation

状,这是由于多腔法布里-珀罗滤波器的几面反射镜的反射率存在最佳匹配值^[7],当恰好满足这个最佳匹配时,提高反射率的优越性才可以明显体现出来。因此在实际应用中,我们应该综合考虑各种因素,以达到最佳效果。

4 结 论

本文基于多腔级联法布里-珀罗滤波器器件的计

算方法,采用多镜理论计算了引入衰减时法布里-珀罗腔的透过率,并以三腔法布里-珀罗器件为例进行了具体计算,对引入不同衰减系数的法布里-珀罗腔透过率进行了比较。计算结果表明,当引入衰减时,能够对法布里-珀罗腔的透过率进行很好的修正,抑制频带中的扰动,改善了分频、滤波的效果。同时为了避免通带内信号的损耗过大,提出了降低衰减系数的方法,即增大反射镜的反射率。这样可以在满足滤波性能的前提下,尽量降低整个系统的实际成本。这种方法可以应用在光学传感、信号处理、激光尤其是光纤网络传输等等众多领域,充分发挥其优越性,拓展了传统法布里-珀罗滤波器的功能。尤其是对于近年来发展迅速的光频分复用技术来说,引入适当的衰减可以有效地提高其频谱利用率,从而增加了系统容量,提高了系统的优越性。

参 考 文 献

- 1 Chen Haixing, Li Haifeng, Gu Peifu *et al.*. Interleaver design based on phase characteristic of Fabry-Perot cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 37~40 (in Chinese)
陈海星,李海峰,顾培夫等. 基于法布里-珀罗腔反射光相位特性设计的梳状滤波器[J]. 光学学报, 2003, **23**(1): 37~40
- 2 Wu Zhengmao, Xia Guangqiong, Chen Jianguo *et al.*. Temporal response of Fabry-Perot etalon filters to short optical pulses[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(4): 427~431 (in Chinese)
吴正茂,夏光琼,陈建国等. 法布里-珀罗标准具滤波器对超短光脉冲的时间响应[J]. 光学学报, 1995, **15**(4): 427~431
- 3 Han Naiqian, Wu Deming, Xie Linzhen. A study on high quality F-P cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(12): 1735~1741 (in Chinese)
韩乃骞,吴德明,谢麟振. 高性能法布里-珀罗腔的研究[J]. 光学学报, 1997, **17**(12): 1735~1741
- 4 Zhongwei Tan, Yan Liu, Tigang Ning *et al.*. The generation of group delay ripple of chirped fiber gratings[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(1): 18~20
- 5 Caini Zhang, Xiangzhao Wang. A new method for angular displacement measurement[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(8): 459~461
- 6 Chen Zhibiao, Gao Wenzhi, Chen Hongda *et al.*. Modulation characteristics analysis of asymmetric Fabry-Perot cavity and GaAs/AlGaAs modulator with high contrast ratio[J]. *Chin. J. Semiconductor*, 1996, **17**(12): 891~897 (in Chinese)
陈志标,高文智,陈弘达等. 非对称法布里-珀罗腔光调制特性分析及高对比度 GaAs/AlGaAs 调制器[J]. 半导体学报, 1996, **17**(12): 891~897
- 7 Herman van de Stadt, Johan M. Muller. Multimirror Fabry-Perot interferometers[J]. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1985, **2**(8): 1363~1370
- 8 Wei Renxuan, Jiang Desheng. Refractive index measurement with Fabry-Perot interference wavelength[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(6): 551~554 (in Chinese)
魏仁选,姜德生. 基于 F-P 干涉波长的折射率测量[J]. 中国激光, 2003, **30**(6): 551~554
- 9 Eugene Hecht, Alfred Zajac. *Optics* [M]. New York: Addison-Wesley Publishing Company, 1974. 91~93
- 10 A. A. M. Saleh, J. Stone. Two-stage Fabry-Perot filters as demultiplexers in optical FDMA LAN's [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(2): 323~330
- 11 Liao Qing, Peng Jiangde, Zhou Bingkun. High finesse and low insertion loss fiber Fabry-Perot filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(5): 631~635 (in Chinese)
廖青,彭江得,周炳琨. 高细度、低损耗光纤滤波器的研制[J]. 光学学报, 1995, **15**(5): 631~635
- 12 J. Stone, D. Marcuse. Ultrahigh finesse Fabry-Perot interferometers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1986, **LT-4**(4): 377~381