

相移布喇格光栅滤波器的分析及其串扰对 FDM-FSK 光纤传输系统复用路数的影响

曹顺湘 杨祥林

(东南大学电子工程系光纤室, 南京 210096)

提要 提出并分析了一种新型的布喇格光栅滤波器, 用模式耦合方程分析了滤波器的传输特性, 计算了通带宽度、自由谱宽和精细度。并把它用在以频移键控(FSK)方式调制的频分复用系统中, 得到了比较理想的结果。

关键词 光栅滤波器, 通带宽度, 功率损害, 频移键控, 信道间的串扰

1 引言

相移布喇格光栅滤波器(Bragg-Grating Resonator Filter)是一种较为理想的光学滤波器。与 F-P 腔滤波器相比它具有精细度高、通带宽度(FWHM)窄、自由光谱区宽的特点。作为去复用器(Demultiplexer), 它能用于直接检测 FSK 调制的频分复用光纤传输系统中。相位连续的 FSK 信号的功率谱由两个间隔为 f_c 的小峰组成, 可看作两个独立的 ASK 信号功率谱的叠加, 其中一个小峰对应于“0”码, 另一个小峰对应于“1”码。适当选择滤波器的 FWHM, 使 $\text{FWHM} = B$ (B 为信号传输速率), 就能近乎无失真地将“1”码选出, 并且同时将 FSK 信号转换为 ASK 信号, 实现直接检测。FDM 系统也可采用 ASK 方式调制, 但是为了避免啁啾(Chirping)现象, 需要采用价格昂贵的外调制器, 因此 FDM 系统以 FSK 方式调制为佳。由于滤波器的非理想的传输特性, 信道之间的串扰在所难免, 必须合理安排信道间隔。本文根据所设计的滤波器及系统所能忍受的功率损害(Power Penalty), 确定出各信道之间的频率间隔。

2 滤波器的结构

布喇格光栅滤波器的结构如图 1 所示, 在平板波导的上表面制作一个周期为 Λ 的矩形光栅, 适当选择光栅的周期, 使正向传输的导模与同阶反向传输导模之间产生耦合, 将正向传输导模的功率传递给反向传输导模。在两个长度为 L_1 的光

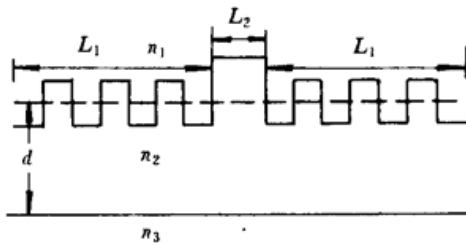


Fig. 1 The configuration of a Bragg grating filter

* 国家自然科学基金重点基金、通信 863 资助项目。

栅区域之间插入一个长度为 L_2 的相移区域, 以调节入射波与反射波之间的相位, 使它们满足谐振条件。布喇格谐振滤波器的结构和 F-P 腔滤波器的结构相似, 只是它的光学反馈不是由高反射率的镜面, 而是由波导上边缘的皱阶提供的。这就解决了薄膜滤波器平面集成化的问题。

3 滤波器的理论分析

根据正规模的完备性, 具有微小畸变的光波导中的电磁场可以用正规模的线性叠加来表示。若理想的平板波导满足单模工作条件, 此模的纵向传播常数为 β , 波导表面光栅的周期为 Λ , 且满足 $\Lambda = \lambda_0/2N_s$, $\beta_0 = \pi/\Lambda$, 其中 λ_0 为布喇格波长, β_0 为布喇格波数, N_s 为导模的有效折射率。设波导中正向传播模式为 $f(x)\exp[i(\omega t - \beta z)]$, 反向传播的模式为 $f(x)\exp[i(\omega t + \beta z)]$ 。则实际波导中的场强可表示为

$$E(z) = A_1(z)f(x)\exp[i(\omega t - \beta z)] + A_2(z)f(x)\exp[i(\omega t + \beta z)] \quad (1)$$

由互易定理得耦合幅度方程为^[1]

$$dA_1(z)/dz = \kappa e^{i2\delta z}A_2(z) \quad (2)$$

$$dA_2(z)/dz = \kappa^* e^{-i2\delta z}A_1(z) \quad (3)$$

其中 $\delta = \beta - \beta_0 = \beta - \pi/\Lambda$ 为模式传播常数对布喇格波数的偏移, κ 为耦合系数, $\kappa = \frac{\omega\epsilon_0}{2\pi} \cdot$

$\int_{-\infty}^{+\infty} \Delta n^2(x)e_1e_2dx$, $\kappa = \kappa^*$, * 表示共轭复算, $\Delta n^2(x) = n_2^2 - n_1^2$ 。设

$$A_1(z) = B_1(z)e^{i\delta z} \quad A_2(z) = B_2(z)e^{-i\delta z} \quad (4)$$

将(4)式代入(2), (3)两式得

$$B_1(z) = \left[\cosh(Qz) - i \frac{\delta}{Q} \sinh(Qz) \right] B_1(0) + \frac{\kappa}{Q} \sinh(Qz) B_2(0) \quad (5)$$

$$B_2(z) = \left[\cosh(Qz) + i \frac{\delta}{Q} \sinh(Qz) \right] B_2(0) + \frac{\kappa}{Q} \sinh(Qz) B_1(0) \quad (6)$$

其中

$$Q = \sqrt{\kappa^2 - \delta^2} \quad (7)$$

当在两个长度为 L_1 的光栅区域之间插入一个长度为 L_2 相移区域后有^[2,3]

$$B_1(L_1 + L_2) = B_1(L_1)e^{-(\beta_1 - \beta)L_2} = B_1(L_1)e^{-i\delta L_2} \quad (8)$$

$$B_2(L_1 + L_2) = B_2(L_1)e^{(\beta_1 - \beta)L_2} = B_2(L_1)e^{i\delta L_2} \quad (9)$$

其中 β_1 为相移区域中的传播常数, β 为光栅区域中的传播常数。由(5) ~ (9)式得

$$\begin{aligned} B_1(2L_1 + L_2) &= \left\{ \left[\cosh(QL_1) - i \frac{\delta}{Q} \sinh(QL_1) \right]^2 e^{-i\delta L_2} + \frac{\kappa^2}{Q^2} \sinh^2(QL_1) e^{i\delta L_2} \right\} B_1(0) \\ &+ \frac{\kappa}{Q} \sinh(QL_1) \left\{ \left[\cosh(QL_1) - i \frac{\delta}{Q} \sinh(QL_1) \right] e^{-i\delta L_2} + \left[\cosh(QL_1) + i \frac{\delta}{Q} \sinh(QL_1) \right] e^{i\delta L_2} \right\} B_2(0) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} B_2(2L_1 + L_2) &= \left\{ \left[\cosh(QL_1) + i \frac{\delta}{Q} \sinh(QL_1) \right]^2 e^{i\delta L_2} + \frac{\kappa^2}{Q^2} \sinh^2(QL_1) e^{-i\delta L_2} \right\} B_2(0) \\ &+ \frac{\kappa}{Q} \sinh(QL_1) \left\{ \left[\cosh(QL_1) - i \frac{\delta}{Q} \sinh(QL_1) \right] e^{-i\delta L_2} + \left[\cosh(QL_1) + i \frac{\delta}{Q} \sinh(QL_1) \right] e^{i\delta L_2} \right\} B_1(0) \end{aligned} \quad (11)$$

由(10), (11)两式可求得该滤波器的传输系数为

$$T = \frac{B_1(2L_1 + L_2)}{B_1(0)} = \frac{1}{[\cosh(QL_1) + i(\delta/Q)\sinh(QL_1)]^2 e^{i\theta} + (\kappa^2/Q^2)\sinh^2(L_1)e^{-i\theta}} \quad (12)$$

4 相位匹配条件及滤波特性

由(5),(6)两式可求得长度为 L_1 的两个光栅区域的反射系数皆为

$$R = \frac{B_2(0)}{B_1(0)} = -\frac{\kappa\sinh(QL_1)}{Q\cosh(QL_1) + i\delta\sinh(QL_1)} \quad (13)$$

则输入信号经光栅区域反射所产生的相位变化为

$$\arg(R) = -\left[\frac{\pi}{2} + \tan^{-1}\frac{\delta\tanh(QL_1)}{Q}\right] \quad (14)$$

输入信号在腔内反射一个来回应满足的谐振条件为

$$2\arg(R) + 2(\beta_1 - \beta)L_2 = 2m\pi \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (15)$$

由(12)式,可求得当 $\theta = \pi/2$ 及初始条件 $A_1(0) = 1, A_2(0) = 0$ 时该滤波器的功率传输函数为

$$P(f) = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{1}{1 + (4\delta^2/Q^2)(1 + \delta^2/Q^2)\sinh^4(QL_1)} \quad (16)$$

设滤波器结构参数为 $\theta = \pi/2$, $n_1 = n_3 = 3.2, n_2 = 3.5$, $L_1 = 110 \mu\text{m}$, $\Lambda = 0.2271 \mu\text{m}$, $\lambda_0 = 1.5 \mu\text{m}$, $d = 0.6 \mu\text{m}$, $\Delta d = 0.1 \mu\text{m}$, 用(16)式可画出图 2 所示的输出特性曲线。适当调整滤波器的结构参数使 θ 从 $\pi/2$ 变到 π , 画出如图 3 所示该滤波器的传输特性, 图中曲线 a 表示当 $\theta = \pi/2$ 时该滤波器的输出特性曲线, 曲线 b 表示当 $\theta = \pi$ 时该滤波器的输出特性曲线。

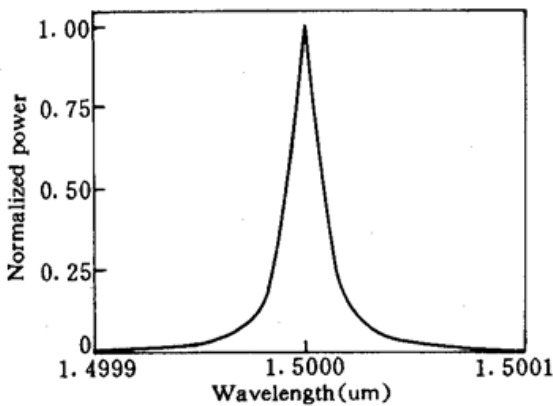


Fig. 2 The transmission characteristic of the filter

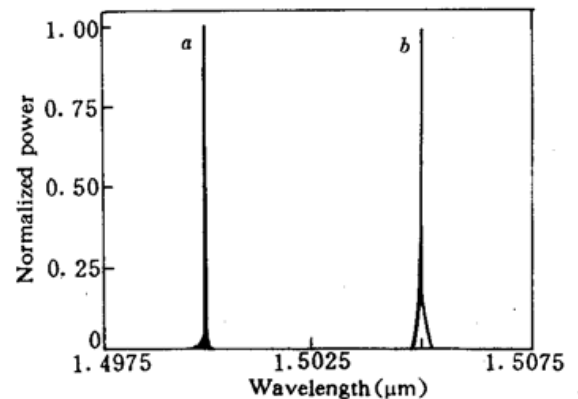


Fig. 3 The relationship between transmission power and wavelength of the filter

由图 2 可求得该滤波器的 FWHM 为 0.016 nm , 由图 3 可求得该滤波器的自由光谱区 $\text{FSR} = 5 \text{ nm}$, 则精细度 F 为 312。从上面的分析可知, 布喇格波导光栅滤波器的选频特性非常好, 它具有峰值透射率高, FWHM 窄, 精细度高的特点, 当用作 FDM-FSK 系统的分波器时能大大增加系统所能复用的信道数目。

5 相移布喇格滤波器在 FSK-FDM 系统中的串扰及其对系统复用路数的影响

由于滤波器的非零阻带特性, 滤出的信号中有串扰成份, 这些串扰来自本信道的“0”码及

其余非接收信道“0”码和“1”码。要严格地计算串扰必须对所有信道的功率谱和滤波器的功率传输函数 $P(f)$ 的乘积进行积分。但由于布喇格滤波器的传输特性在通带以外衰减很快,因此可以忽略所有非相邻信道对串扰的贡献,只考虑本信道以及上一信道的“0”码的影响。串扰的产生分两部分,一部分是由滤波器非理想的滤波特性而引起的串扰,另一部分是由调制后的“0”码功率谱的尾部延伸至滤波器谐振峰下而引起的串扰。

多信道 FSK 信号的功率谱如图 4 所示,在计算串扰的过程中为了将最坏的情况考虑在内,设上一信道一直处于工作状态,并且始终传输“0”码。为了使信道间的串扰足够小, f_i 要比 B 大数倍,因此在计算第一部分串扰时可以忽略因调制而引起的谱线展宽。而用“0”码的载波来代替,即 $P_0(f) = (P_0/2)\delta(f - f_i)$, $f_i = -f_i$, $f_c - f_i$,其中 $P_0(f)$ 为“0”码的功率谱函数, P_0 为每一信道的功率, f_c 为信道间隔, f_i 为各信道中“0”码和“1”码之间的频率间隔。所以第一部份串扰为

$$T_{c_1} = \frac{P_0}{2} [P(-f_i) + P(f_c - f_i)] \quad (17)$$

式中 $P(f)$ 为布喇格光栅滤波器的功率传输函数。调制后“0”码的功率谱函数可用平方洛仑兹函数来近似表示^[4]

$$G(\Delta f) = \frac{4(\sqrt{2} - 1)^2 P_0}{\pi B [1 + (\sqrt{2} - 1)(4\Delta f/B)^2]^2} \quad (18)$$

式中 B 为调制码速, $\Delta f = f - f_i$, f_i 为“0”码功率谱的中心频率。则第二部份串扰为

$$T_{c_2} = \int_{-\infty}^{+\infty} P(f) [G(-f_i) + G(f_c - f_i)] df \quad (19)$$

显然,当 $f_c = 2f_i$ 时系统所能安排的信道数目最多^[5],这时信道之间总的串扰为

$$T_c = T_{c_1} + T_{c_2} = \frac{P_0}{2} [P(f_i) + P(-f_i)] + 2 \int_{-\infty}^{+\infty} P(f) G(f_i) df \quad (20)$$

信道间的串扰和信道间隔的关系如图 5 所示。串扰对系统的作用可以看作是系统的功率损害。在没有串扰的情况下,当发送端发“0”码时,接收端接收到的光功率为 0,当有串扰存在时,则接收到的功率不再为 0 而是 T_c ,功率损害的定义为^[4]

$$p_l = -10 \log(1 - T_c/p_0) \quad (21)$$

信道间隔 f_c 和功率损害的关系如图 6 所示。根据系统所能忍受的功率损害可确定各信道之间的频率间隔。若 $p_l \leq 0.1$ dB 认为可以忽略,则由(20)式可得

$$\frac{1}{2} [P(f_i) + P(-f_i)] + 2 \int_{-\infty}^{+\infty} P(f) G(f_i) df \leq 0.023 \quad (22)$$

由(22)式可得,当 $B = 2$ Gbit/s 时, $f_i \leq 7.44358$ GHz。为了避免信号混叠,系统所能运用的带宽应为 $FSR = 665$ GHz,所以该系统所能复用的信道数目为 $M = FSR/2f_i = 42$ 路,系统的传输容量为 84 Gbit/s。

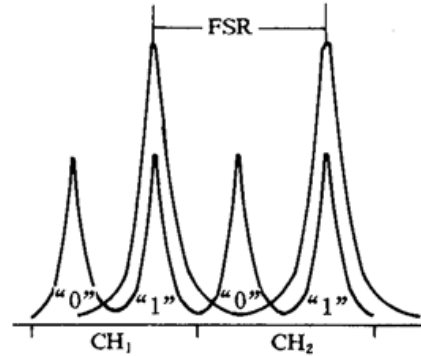


Fig. 4 Filter transmission function and the multichannel FSK spectrum

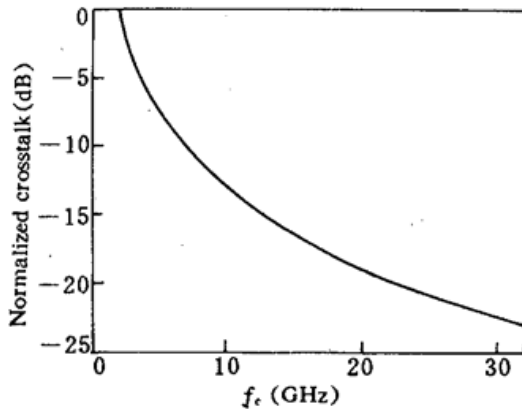


Fig. 5 The curve shows the relationship between crosstalk and channel spacing

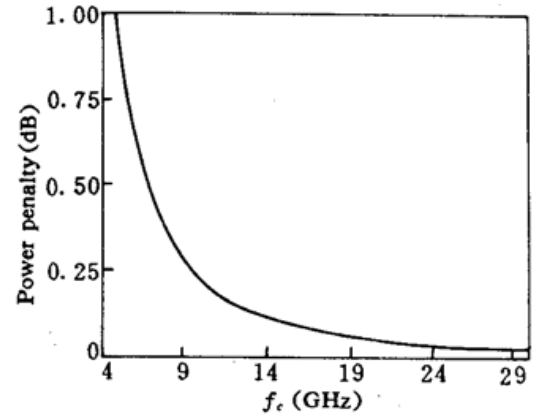


Fig. 6 The curve represents the relationship between power penalty and channel spacing

6 结 论

相移布喇格光栅滤波器可作为 FDM-FSK 光纤传输系统的去复用器。采用本文所设计的滤波器,可实现 42 路速率为 2 Gbit/s 的 FSK 信号的复用,传输容量可达 84Gbit/s。和目前低水平的 WDM 系统相比,其意义是很明显的。适当调整滤波器的结构参数可使其 FWHM 更小,从而减小信道之间的串扰,但是接收端的信号功率也同时减小,所以应根据系统的要求适当选择滤波器的通带宽度。

参 考 文 献

- 1 Yariv A. Coupled-mode theory for guided-wave optics. *IEEE J. Quat. Electr.*, 1973, QE-9(9): 919~933
- 2 Koyama F., Suematsu Y., Kojima K.. 1.5 μm phase adjusted active distributed reflector laser for complete dynamic single-mode operation. *Electr. Lett.*, 1984, 20(10): 391~393
- 3 Yiyang A., Correc P., Carru H.. Narrow band rib waveguide grating resonator filters. *IEE Proceedings*, 1990, 137(2): 132~138
- 4 I. P. Kaminow, P. P. Iannone, J. Stone *et al.*. FDMA-FSK Star Networkork with a Tunable Optical Filter Demultiplexer. *J. Lightwave Tech.*, 1988, 6(9): 1406~1414
- 5 Ivan P. Kaminow. FSK with Direct Dectionation in Optical Multiple Access FDM Networks. *J. on Selected Aeras in Communications August*, 1990, 8(6): 1005~1013

Analysis of a Phase-shifted Bragg Grating Filter and the Effect of Crosstalk on the Number of Channels in a FDM-FSK Optical Fiber Transmission System

Cao Shunxiang Yang Sianglin

(*Electronic Engineering Department, Southeast Universit, Nanjing 210096*)

Abstract The optical filter is a key device used to select frequency in the FDM and high density WDM optical fiber communication systems. In this paper, a novel Bragg grating fiber filter is reported. Its transmission characteristics, width of passband, free spectral rang and fineness are analysed by a coupled-mode theory. Also, We applied the filter to the FDM-FSK system and achieved good results.

Key words grating filter, the width of passband, power penaltyfrequency-shift-keying, crosstalk between channels