

基于光纤光栅的光交叉互连*

陈章渊 徐安士 吴德明

(北京大学电子学系 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室 北京 100871)

提要 提出了一种新颖的光交叉互连,并分析了其特性。这种光交叉互连采用光纤光栅作为上下路滤波器,并通过调谐光栅来实现交换。通过分析给出了信道带宽、间隔和调谐频移等特性及对光纤光栅的要求。

关键词 光交叉互连, 光纤光栅, 波分复用

1 引 言

光交叉互连(Optical Cross-connect, 以下简称 OXC)是波分复用(Wavelength-Division-Multiplexing, 以下简称 WDM)全光网的关键器件,将光空分交换与波分复用技术结合,可用于光信号处理,特别是各信号通道的数据交换。这种交换具有频率选择性,不同的 WDM 频率信道各自独立、平行地进行处理。光空分开关能够不经光/电/光转换和电处理就能实现光信号的空间交换,而 WDM 则可以充分利用光纤的带宽资源。已有数种结构的 OXC 见诸报道^[1-3],通常由光滤波器和空间光开关阵列构成。图 1(a) 是 2×2 OXC 的一种典型结构,其中分波器将各频率信道分开,由 2×2 光开关阵列控制相同频率的两个信道的输出方向。通常分波器会引入可观的损耗,特别是采用分束器加光滤波器方案时^[1],需要光放大器进行功率补偿。光开关通常为 LiNbO_3 光开关或基于半导体材料的光开关(如半导体光放大器开关、基于 GaAs-AlGaAs 和 InP-InGaAsP 材料的平面波导开关)^[1,3,4]。这类光开关速度很高,为纳秒量级甚至更低,可以集成,但是目前开关比不高,特别是光开关阵列,这将导致较高的串扰水平。而且插入损耗通常较大,因此常与光放大器集成,以实现低损耗,但这又会受到放大的自发辐射噪声和交叉增益调制等的影响。用 LiNbO_3 声光调制滤波器可以直接实现 OXC,插入损耗通常为 5~9 dB,串扰水平在 -25~-35 dB 之间^[2]。电-机械光开关的串扰可以很低,但开关时间太长,在毫秒量级。本文提出一种新颖的基于紫外光辐照光纤光栅的 OXC,与其它 OXC 相比,因为是光纤器件,尽管体积较大,不易集成,但可以做到插入损耗小,串扰低,对偏振不敏感。

2 工作原理

这种基于光纤光栅的 OXC,其原理可由图 1(b) 所示的两进两出(2×2)四波长交换单元

* 863 计划资助项目(863-317-9602-03-1)。

来说明。每路光纤上串接了四个光纤光栅,其反射中心波长分别对应一个信道波长。在两端连接着三端口光环行器,光环行器的一个端口与另一路光纤上的光环行器交叉连接。每个光纤光栅用压电陶瓷(PZT)的张拉或收缩来控制。两路光纤上的配置完全相同,因此用光纤 1 上的信号来说明即可。

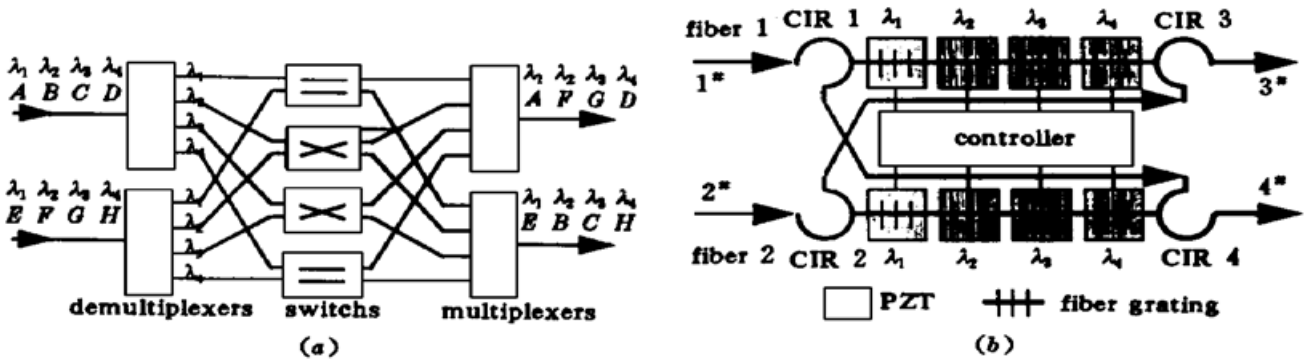


图 1 波分复用光交叉互连结构

(a) 常见的 OXC, 其中两个波长信道 (λ_2, λ_3) 已交换; (b) 采用可调谐光纤光栅的新颖 OXC

Fig. 1 Structures of WDM optical crossconnects (OXCs)

(a) a conventional OXC, example with a two wavelength channels (λ_2, λ_3) switching; (b) novel OXC using tunable fiber gratings

当端口 1 来的信号经光环行器 CIR1 进入光纤光栅时,如果是通过状态,则在压电陶瓷上加一定电压,使光纤光栅的反射波长移动,从而对该波长信号不反射。如果是交换状态,则不加电压,该波长的信号光被反射,经光环行器 CIR1 的第三端下路,再由光环行器 CIR4 的第三端进入另一路光纤,被同样波长的光纤光栅反射后与其它波长的信号光复用,从端口 4 输出。同时,从端口 2 来的相同波长的信号,也经光环行器 CIR2 和 CIR3 交换到端口 3。可以看出,两路光纤上相同波长的光纤光栅调谐应是同步的,可通过将这两个光栅胶粘在同一个压电陶瓷上来实现。由于通过信号和交换信号经过光环行器和光纤光栅反射的次数不相同,因而损耗是不一样的。因为光纤光栅是全光纤器件,反射率可大于 99%,插入损耗极小,对偏振不敏感;光环行器的插入损耗与端口有关,按目前的工艺水平可达到小于 1 dB,偏振灵敏度小于 0.2 dB。故交换信号和通过信号的插入损耗将分别小于 4 dB 和 2 dB,而它们的功率差别将小于 3 dB。

另一种变形结构是用 3 dB 耦合器代替光环行器 CIR3 和 CIR4,或者全部光环行器,这可以降低成本。这时插入损耗将较大。

采用多个光纤光栅串联的结构,主要基于下面的理由。首先,光纤光栅大范围调谐比较困难,采用压应力调谐,可达到 18 nm,但调谐速度不高^[5];而用压电陶瓷的伸缩来调谐,范围很小,可达到 1.2 nm/100 V^[6]。因此采用选好反射波长(比如建议的 ITU-T 标准 WDM 波长)的多个光纤光栅串联,既可以避免大范围调谐的问题,又容易实现滤波器的波长对准。而且这里的调谐只是为了实现反射和通过状态的选择,不需连续调节控制电压,各波长的选择实际上是数字化的,容易控制。最后,光纤光栅是全光纤器件,插入损耗小,对偏振不敏感,又是二端反射器件,可以实现很高的消光比(> 40 dB),减小残余信号对交叉信号的串扰,下一节将进一步分析这点。

交换速度将主要决定于电路和压电陶瓷的响应。文献[6]报道了 30 μs 的开关时间。因此,这种 OXC 不适合于高速的信息处理,如光包交换,但在基于波长路由的 WDM 光网中,因为所有光连接类似于“电路交换”,微秒量级的开关速度还是可行的,所以这种光交叉互连可用于

WDM 网中的网间互连、通道交换等。如图 2 所示,两个环形网网间互连可用一个 2×2 OXC 实现。

由图 1 (b) 所示的 2×2 交换单元,按一定的结构,还可以构造更大的 $M \times M$ OXC,用于多输入输出端的连接。

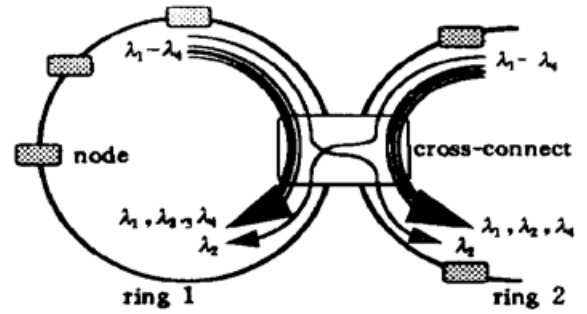


图 2 OXC 应用示例: 环形网间的互连

Fig. 2 An application of OXC in communication between ring networks

3 理论分析

3.1 频率响应

均匀光纤光栅的功率反射函数为^[8]

$$|R(\nu - \nu_0)|^2 = \left| \frac{j\kappa \cdot \sinh(\Omega \cdot L)}{j\delta \cdot \sinh(\Omega \cdot L) + \Omega \cdot \cosh(\Omega \cdot L)} \right|^2 \quad (1)$$

其中, κ 为光纤光栅的耦合系数, L 为光栅长度, ν_0 为布喇格波长对应的光频, $\delta = 2\pi \cdot n_{\text{eff}}(\nu - \nu_0)/c$, $\Omega = (\kappa^2 - \delta^2)^{0.5}$, 式中 n_{eff} 为模式有效折射率, c 为真空光速。图 3(a) 为 $\kappa = 200 \text{ m}^{-1}$, $L = 15 \text{ mm}$ 时光栅的频率响应。可以看出在反射峰两边有周期性的旁瓣, 如果相邻的信道刚好落在第一级旁瓣上, 造成的信道间串扰将比较严重。采用调制光栅的空间分布方法, 可以进一步压缩旁瓣, 甚至完全消除旁瓣^[7]。在这里我们仍然考虑均匀光栅的情况, 并用旁瓣的包络来作为光栅的传输函数在远离中心波长时的近似。旁瓣的包络在 $|\delta| \gg \kappa$ 时可表示为

$$|R(\nu - \nu_0)|^2 = \frac{1}{\delta^2/\kappa^2 - 1} \quad (2)$$

图 3(a) 中的虚线给出了旁瓣的包络。

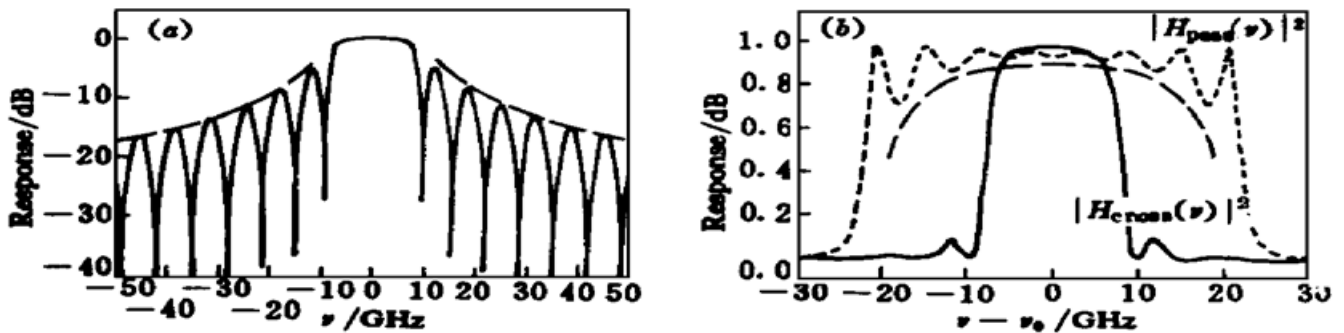


图 3 频谱响应: (a) $|R(\nu)|^2$, (b) $|H_{\text{pass}}(\nu)|^2$ (实线) 和 $|H_{\text{cross}}(\nu)|^2$ (点线)。 $\kappa = 200 \text{ m}^{-1}$, $L = 15 \text{ mm}$, $\delta\nu = 30.14 \text{ GHz}$, $\Delta\nu = 60.27 \text{ GHz}$ 。虚线为包络近似

Fig. 3 Frequency spectral response (a) $|R(\nu)|^2$, (b) $|H_{\text{pass}}(\nu)|^2$ (solid line) and $|H_{\text{cross}}(\nu)|^2$ (dotted line). $\kappa = 200 \text{ m}^{-1}$, $L = 15 \text{ mm}$, $\delta\nu = 30.14 \text{ GHz}$, and $\Delta\nu = 60.27 \text{ GHz}$. The dashed line is the envelope approximation

需要说明的是, 由于紫外辐照制作的光纤光栅结构上是轴对称的, 偏振敏感性很小, (1) 和 (2) 式对任何偏振的光波是一样的; 而光环形器的偏振敏感性也很小(可做到小于 0.2 dB)。因而下面不再考虑偏振特性。

如果不考虑插入损耗, 对于交换信号, OXC 的传输函数(图 1 (b) 中端口 1# \rightarrow 端口 4#) 为

$$|H_{\text{cross}}(\nu - \nu_0)|^2 = |R(\nu - \nu_0)|^4 \quad (3)$$

对于通过信号, OXC 的传输函数(图 1 (b) 中端口 1# \rightarrow 端口 3#) 为

$$|H_{\text{pass}}(\nu - \nu_0)|^2 \approx [1 - |R(\nu - \nu_0 + \delta\nu)|^2][1 - |R(\nu - \nu_1)|^2], \quad (\nu_0 - \delta\nu \leq \nu \leq \nu_1) \quad (4)$$

其中 ν_1 为最接近的光栅的中心频率, $\nu_1 = \nu_0 + \Delta\nu$ (交换状态) 或 $\nu_1 = \nu_0 + \Delta\nu - \delta\nu$ (通过状态), $\Delta\nu$ 为 WDM 信道间隔, $\delta\nu$ 为压电陶瓷加电压后光栅的反射峰频移。(4) 式中只考虑了与 ν_0 最接近的两个光纤光栅的影响。值得注意的是, 信号在光栅之间会出现多次反射, 类似于 F-P 腔, (4) 式已忽略了高阶项。图 3 (b) 是 $\kappa = 200 \text{ m}^{-1}$, $L = 15 \text{ mm}$, $\delta\nu = 30.1 \text{ GHz}$ 以及 $\Delta\nu = 60.3 \text{ GHz}$ 时的传输函数, 其中虚线段给出了采用包络近似(2) 时的 $|H_{\text{pass}}(\nu)|^2$ 函数。

3.2 带宽、信道间隔和总信道数

由于在 WDM 全光网中, 常用掺铒光纤放大器(EDFA) 来补偿光纤的传输损耗以及器件的插入损耗, 而掺铒光纤放大器的可用带宽约为 35 nm , 因此可容纳的信道数是有限的。可容纳的总信道数是 WDM 网的重要参数之一。假设所有光纤光栅都是靠压电陶瓷的张拉来调谐的, 谐振频率从 ν_0 变为 $\nu_0 - \delta\nu$ 。由于图 1(b) 所示的 OXC 是利用光纤光栅的调谐来实现信号交换的, 所以最小调谐频移 $\delta\nu$ 可以定义为: 当 OXC 对某个波长处于通过状态时, 该波长信号对另一根光纤同一波长信道的串扰不超过 $-T$ (单位 dB), 即

$$10\log_{10}\{[1 - |H_{\text{pass}}(0)|^2]^2 / |H_{\text{pass}}(0)|^2\} \leq -T \text{ (dB)} \quad (5)$$

类似地, 最小信道间隔 $\Delta\nu$ 也可以定义为: 当 OXC 对某个波长处于交换状态时, 与该波长最接近的通过信道对另一根光纤上同一波长信道的串扰不超过 $-T$ (dB), 即

$$10\log_{10}\{[|H_{\text{cross}}(\Delta\nu)|^2 + |H_{\text{cross}}(-\Delta\nu)|^2] / |H_{\text{pass}}(0)|^2\} \leq -T \text{ (dB)} \quad (6)$$

通常要求信号的滤波损失很小, 即 $|H_{\text{pass}}(0)|^2 \approx 1$, $|H_{\text{cross}}(0)|^2 \approx 1$, 由函数 $|R(\nu)|^2$ 的对称性, (5) 式左边表示的串扰在

$$\Delta\nu = 2 \cdot \delta\nu \quad (7)$$

时取最小值, 采用(7) 式所示的波长分配方案可以兼顾串扰和带宽利用率两方面。将(7), (2) 代入(5) 式, 忽略高阶项, 得

$$\Delta\nu \geq \sqrt{2 \times 10^{T/20} + 1} \cdot B_{\text{gap}} \quad (8)$$

其中 $B_{\text{gap}} = c \cdot \kappa / (n_{\text{eff}} \cdot \pi)$ 为光纤光栅的带宽(禁带宽^[8])。满足条件(7), (8) 时, 必满足(6) 式。

另外, 我们定义 OXC 的带宽 B_{-1} , 即从传输函数的峰值衰减 -1 dB 对应的带宽

$$B_{-1i} = \Delta\nu \left\{ 10\log_{10} \left[|H_i(\nu - \nu_0)|^2 / |H_i(0)|^2 \right] \geq -1 \text{ (dB)} \right\} \quad i = \text{cross, pass} \quad (9)$$

例如, 若 $\kappa = 200 \text{ m}^{-1}$, $L = 15 \text{ mm}$, $T = 20 \text{ dB}$, 则 $(\Delta\nu)_{\text{min}} = 2(\delta\nu)_{\text{min}} = 60.3 \text{ GHz}$, $B_{-1\text{pass}} = 34.6 \text{ GHz}$ (31.6 GHz , 包络近似), $B_{-1\text{cross}} = 13.5 \text{ GHz}$ 。假设系统中用于功率补偿的 EDFA 带宽为 $B_{\text{EDFA}} = 30 \text{ nm}$, 这时可容纳的信道数最多为 $B_{\text{EDFA}} / \Delta\nu + 1 \approx 63$ 。若 $\kappa = 1000 \text{ m}^{-1}$, $L = 3 \text{ mm}$, $T = 20 \text{ dB}$, 则 $(\Delta\nu)_{\text{min}} = 2(\delta\nu)_{\text{min}} = 301.4 \text{ GHz}$, $B_{-1\text{pass}} = 173.2 \text{ GHz}$ (158.3 GHz , 包络近似), $B_{-1\text{cross}} = 67.7 \text{ GHz}$, 最大信道数为 13。

3.3 $M \times M$ OXC 和串联 OXC 的特性

在构成更大的 $M \times M$ OXC 时, 需要将 2×2 交换单元按一定的结构连接。同时在网络应用中, 存在多个 OXC 串联的情况。这两种情况对信号来说, 就是要经过一系列串联的 2×2 单元。假设信号 ν_0 经历了 N 次交换和 M 次通过状态, 则总的传输函数为 $|H_{\text{cross}}(\nu - \nu_0)|^{2N} \cdot |H_{\text{pass}}(\nu - \nu_0)|^{2M}$ 。相应的有效 -1 dB 带宽将减小。同时滤波造成的功率损失

$$P_{\text{filter}} = -10\log_{10} \left[|H_{\text{cross}}(0)|^{2N} |H_{\text{pass}}(0)|^{2M} \right] \quad (10)$$

也将增加。考虑两种特殊情况, 信号经历的全部是交换或通过状态。图 4 显示的是有效 -1 dB

带宽随 OXC 单元数目的变化。在经过最初 20 个 OXC 时, 带宽迅速减小。

3.4 串扰

3.4.1 2×2 交换单元中的串扰

由于光纤光栅并非理想的带通滤波器, 不能完全反射掉被选择信号, 对其它频率信号也存在微弱的反射, 因此 2×2 交换单元中必然存在串扰。有两类串扰, 一类是不同频率信道之间的串扰, 另一类是同一频率信道之间的串扰(简称信道内串扰)。对于图 1(b) 所示的交换单元, 因为信号没有下路, 串扰信号在复用进光纤后已分别叠加到各自同频率的信道上, 所以从 OXC 的输出来看, 不同频率信道之间的串扰不需考虑。以下只讨论信道内串扰, 并且忽略信号在光栅之间的多次反射, 只考虑一次反射和一次通过的情况。

对于通过信号, 信道内串扰来源于另一根光纤的各个光纤光栅的微弱反射, 主要是相邻的两个光纤光栅的微弱反射, 这一串扰已在公式(5)的左边给出。假如波长分配方案如式(7)所示, 即光栅调谐频移为信道间隔的一半, 利用(4)和(5)式, 信道内串扰 C_{pass} 可简化为

$$C_{\text{pass}} \approx 10 \log_{10} \left\{ 4 |R(\delta\nu)|^4 / [1 - 2 |R(\delta\nu)|^2] \right\} \quad (11)$$

对于交换信号, 信道内串扰 C_{cross} 来源于光纤光栅漏过的原有信号, 由(1)和(3)式可得到

$$C_{\text{pass}} \approx 10 \log_{10} \left\{ [1 - |\tanh(\kappa \cdot L)|^2] / |\tanh(\kappa \cdot L)|^4 \right\} \quad (12)$$

C_{cross} 只与乘积 $\kappa \cdot L$ 有关, 如图 5(a) 中 $N = 1$ 的曲线所示, 随着 $\kappa \cdot L$ 的增加而减小。这从光纤光栅的峰值反射率 $|R(0)|^2 = \tanh^2(\kappa \cdot L)$ 很容易看出, $\kappa \cdot L$ 越大, 反射率越高, 漏过的光越少, 对交换过来的信号串扰就越少。 C_{pass} 主要与频移 $\delta\nu$, 耦合系数 κ 有关, 当 κ 确定后, 通过增大 $\delta\nu$ 可显著地降低信道内串扰(如图 5(b) 中 $N = 1$ 的曲线所示)。式(11), (12) 实际上给出的是信号线宽 $\rightarrow 0$ 的情况, 而通常信号有一定的线宽, 特别是调制后。因此给出频率范围 B_{-1} 内串扰的最大值是必要的

$$C_{\text{max pass}} = 10 \log_{10} \left\{ [1 - |H_{\text{pass}}(\nu)|^2]^2 / |H_{\text{pass}}(\nu)|^2 \right\}_{\text{max}} \quad (13)$$

$$C_{\text{max cross}} = 10 \log_{10} \left\{ [1 - |R(\nu)|^2] / |H_{\text{cross}}(\nu)|^2 \right\}_{\text{max}} \quad \text{当 } |\nu - \nu_0| \leq B_{-1} \quad (14)$$

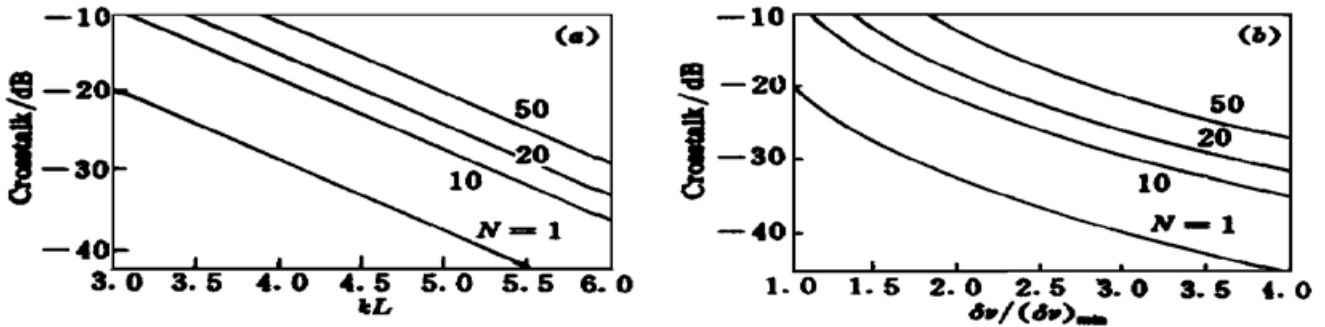


图 5 串联 OXC 的串扰与 OXC 参数的关系: (a) 交叉信号, (b) 通过信号。 $N = 1, 10, 20, 50$ 是串联 OXC 单元的数目。 $(\delta\nu)_{\min}$ 是对应 -20 dB 串扰的最小调谐频移

Fig. 5 Crosstalk of a series of OXC elements versus the parameter of the OXC for (a) cross signal, (b) pass signal. $N = 1, 10, 20, 50$ are the numbers of transfers. $(\delta\nu)_{\min}$ is the minimum tuning range corresponding to -20dB crosstalk

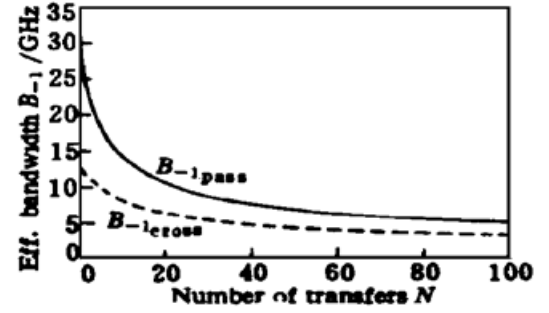


图 4 串联 OXC 的 -1 dB 带宽 B_{-1} 与串联单元数目的关系

Fig. 4 Dependence of effective -1 dB bandwidth B_{-1} of a series of OXC elements on the number of transfers N

3.4.2 交换单元串联时的串扰

信道内串扰在滤波时不能消除,而是逐渐累积。如果信号经过的全部是交换状态或通过状态,总的信道内串扰分别为 $10\log_{10}\{\beta \cdot [1/|H_{\text{cross}}(0)|^{2N} - 1]/[1 - |H_{\text{cross}}(0)|^2]\}$ 和 $10\log_{10}\{\alpha \cdot [1/|H_{\text{pass}}(0)|^{2N} - 1]/[1 - |H_{\text{pass}}(0)|^2]\}$ 。其中, N 为经过的交换单元数, $\alpha = [1 - |H_{\text{pass}}(0)|^2]^2$, $\beta = 1 - |R(0)|^2$ 。显然,信道内串扰在 OXC 的串联过程中逐渐增大。图 5(a) 显示的是信号经过 $N = 1, 10, 20, 50$ 个交换状态的 OXC 单元后,信道内串扰与光纤光栅参数 $\kappa \cdot L$ 的关系。例如,要想使在 $N = 20$ 时信道内串扰低于 -20 dB, $\kappa \cdot L$ 必须大于 4.5。图 5(b) 给出了信号经过 $N = 1, 10, 20, 50$ 个交换状态的 OXC 单元后,信道内串扰与光栅调谐频移的关系,其中采用了包络近似。只要 $\delta\nu = 2.2(\delta\nu)_{\text{min}}$, 经过 20 个 OXC 单元后,仍能保证串扰低于 -20 dB,但可容纳的信道数要减小。一般地,经过 $(N - M)$ 次通过和 M 次交叉后,信道内串扰的大小与经过通过和交叉的次序有关,但如果 $|H_{\text{pass}}(0)|^{2(N-M)} \approx 1$, $|H_{\text{cross}}(0)|^{2M} \approx 1$, 总信道内串扰 C_{total} 可近似为

$$C_{\text{total}} \approx 10\log_{10} \frac{(N - M) \cdot \alpha + M \cdot \beta}{|H_{\text{pass}}(0)|^{2(N-M)} |H_{\text{cross}}(0)|^{2M}} \quad (15)$$

参 考 文 献

- 1 G. R. Hill, P. J. Chidgey, F. Kaufhold *et al.*. A transport network layer based on optical network elements. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(5/6): 667~ 679
- 2 J. J. Jackel, M. S. Goodman, J. Gamelin *et al.*. Simultaneous and Independent switching of 8-wavelength channels with 2-nm spacing using a wavelength-dilated acoustooptic switch. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(11): 1531~ 1533
- 3 W. Weiershausen, R. Zengerle. Photonic highway switches based on ring resonators used as frequency-selective components. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(30): 5967~ 5978
- 4 M. Gustavsson, B. Lagerström, L. Thylen *et al.*. Monolithically integrated 4×4 InGaAsP/InP laser amplifier gate switch arrays. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(24): 2223~ 2225
- 5 J. J. Pan, Yuan Shi. Tunable Er^{3+} -doped fibre ring laser using fibre grating incorporated by optical circulator or fibre coupler. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(14): 1164~ 1165
- 6 L. Quetel, L. Rivoallan, E. Delevaque *et al.*. Programmable fiber grating based wavelength demultiplexer. in OFC'96, San Jose, CA, Feb. 25-Mar. 1, 1996, Technology Digest: 120~ 121
- 7 R. Kashyap. Optical fiber Bragg gratings for applications in telecommunications. in Proc. 21st Eur. Conf. on Opt. Comm. (ECOC'95), Brussels, 1995, 23~ 26
- 8 A. Yariv. Coupled-mode theory for guide-wave optics. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1973, **QE-9**(9): 919~ 933

Optical Cross-connect Networks Based on Fiber Gratings

Chen Zhangyuan Xu Anshi Wu Deming

(*Electronics Department, Peking University, National Laboratory on Local Fiber-optic Communication Networks & Advanced Optical Communication Systems, Beijing 100871*)

Abstract A novel optical cross-connect network, which uses fiber gratings as add/drop filters and switches through tuning fiber gratings, is proposed and its properties are analyzed. Characteristics such as channel bandwidth, channel spacing, tuning range required, and crosstalk behaviors of a single network and concatenated networks are analyzed.

Key words optical cross-connect, fiber grating, wavelength-division-multiplexing