

WDM 动态光学交叉互连中 同源串扰的研究*

陈雯路 张汉一 郭奕理 费运思 周炳琨

(清华大学电子工程系 北京 100084)

提要 研究了在波分复用(WDM)全光网中,串扰对动态路由光交叉互连(OXC)性能的影响。理论分析指出,在动态路由的 OXC 中,由于信号光泄漏后经过不同的光路而造成的同源串扰对系统性能的影响要比其他类型的串扰影响大。还提出了一种新的解决方案。理论计算表明,这种优化后的 OXC 结构能够有效地减小同源串扰的影响,从而以很小的硬件成本提高 OXC 的性能。

关键词 WDM 全光网,光交叉互连,同频串扰,同源串扰

1 引 言

随着光波分复用(WDM)技术的成熟,WDM 全光网已经成为世界各国研究机构和各大通信公司的研究热点,并且正逐步向着实用化和商业化方向发展^[1,2]。在 WDM 全光网中,光交叉互连(OXC)节点能够实现网间大容量信息交换和耦合,可以根据网络业务量的需求动态改变网络的拓扑结构,从而使网络功能更加灵活^[3]。

由于 WDM 器件的隔离度有限,在 OXC 中一个波长信道会泄漏到另一个信道中形成串扰。文献[4~6]指出 OXC 节点中同频串扰对系统的影响要比非同频串扰严重得多,而且 OXC 中非线性效应较弱。因此在本文的分析中将对同频串扰的影响进行研究。以往的分析主要集中在对串扰与信号是非同源的情况。本文分析指出,在同频串扰中,由于动态路由的 OXC 的特殊结构,使得信号光有一部分通过其他光路后重新加入到输出端,从而形成强相关串扰,即在 OXC 内部串扰与信号本身是同源的,本文称之为同源串扰。这种串扰对系统的影响要比其他类型的同频串扰大。针对这种情况,本文提出了一种优化的 OXC 结构,该优化方案能够以非常小的硬件成本,有效地减小同源串扰对系统性能的影响。

2 理论模型及公式推导

2.1 基本假设

动态路由 $N \times N$ 的 OXC 的基本结构如图 1 所示。有 N 对输入/输出光纤,每根光纤中均含 M 个波长的 WDM 信号 $\lambda_1 \sim \lambda_M$ 。第 n 路($n = 1, \dots, N$)的输入光中的 λ_m 信号($m = 1, \dots,$

* 国家自然科学基金、863 计划资助项目。

收稿日期: 1997-12-29; 收到修改稿日期: 1998-05-04

M) 进入第 n 个解复用器 DMUX[n] 后, 由其第 m 端口输出, 进入第 m 个光开关 SW[m] 的第 n 个端口, 再由这个光开关的第 i ($i = 1, \dots, N$) 个端口输出到第 i 个复用器 MUX[i] 的 m 输入端, 与其他信号合成 WDM 信号输出。OXC 的动态路由功能由光开关的不同状态实现, 由矩阵 $P[m, n]$ ($n = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M$) 来表示, 即 SW[m] 的 $P[m, n]$ 输入端是与其第 n 输出端是连通的。 $P[m, n]$ 的取值范围是 $1 \sim N$ 。可以证明, 矩阵 P 完全定义了光开关阵列的状态。图中 L_{nm} 为各信道等效光程差, 它将 OXC 复用/解复用及光开关引入的光程差也考虑在内。在以往的 OXC 结构设计中, 各信道的光程差均未考虑。本文分析指出, 合理设计 L_{nm} 可以优化系统的性能。

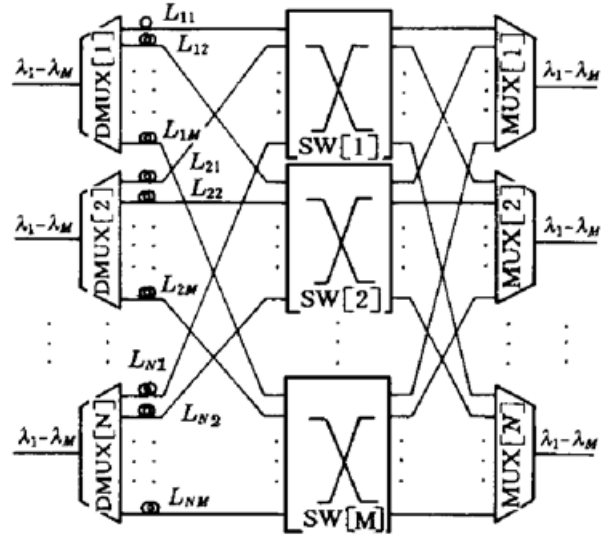


图 1 OXC 基本结构图

Fig. 1 The structure of OXC

在以下分析中假设各复用/解复用器以及光开关各信道的传输特性相同, 解复用器每路的串扰为 α , 光开关每路串扰为 β , 复用器每路串扰为 γ (功率串扰)。不失一般性, 考虑第一个解复用器 DMUX[1] 中波长为 λ_1 的信道, 并假设其光信号由第一个复用器 MUX[1] 输出, 即开关矩阵 $P[1, 1] = 1$ 。由于仅考虑同频串扰, 以下分析仅需考虑所有输入端波长为 λ_1 的信道经过不同的光路后, 对输出信号的影响。设 DMUX[n] 的 λ_1 分量的光场表达式为

$$E(n, t) = E_n \sin[\omega t + \phi_n(t)] \quad n = 1, \dots, N \quad (1)$$

可以得出, 第一个复用器输出的 λ_1 分量的场表达式为(省略损耗项)

$$\begin{aligned} E(t) = & E_1 \sin[\omega t + \phi_1(t) + \Delta\phi_1] + \\ & \sqrt{\beta} \sum_{n=2}^N E_n \sin[\omega t + \phi_n(t) + \Delta\phi_{n,1}] + \\ & \sqrt{\alpha\gamma} \sum_{m=2}^M E_{P[m,1]} \sin[\omega t + \phi_{P[m,1]}(t) + \Delta\phi_{P[m,1],m}] + \\ & \sqrt{\alpha\beta\gamma} \sum_{m=2}^M \sum_{n=2}^N E_{P[m,n]} \sin[\omega t + \phi_{P[m,n]}(t) + \Delta\phi_{P[m,n],m}] \end{aligned} \quad (2)$$

$\Delta\phi_{nm}$ ($n = 1 \sim N; m = 1 \sim M$) 为信号经过不同光路, 由输出于 MUX(n) 信号相对于其输入 DMUX(m) 的输入信号的相位差, 仅由 OXC 本身结构决定的数值。

由(2)式可以看出, 选用 β 值小的光开关是降低 OXC 串扰的关键。在系统设计中, 一般采用高隔离度的光开关, 第三项成为主要串扰项。而第二、第四项一般比第三项要小一至两个量级, 因此在本文中忽略它的影响。

2.2 同源串扰

考虑(2)式中的第三项。当 $P[m, 1] \neq 1$ 时, 串扰与信号来自不同的信号源, 因此它们之间的相位差是随机的, 在文献[4~6]中给出了详细的分析。而当 $P[m, 1] = 1$ 时, 串扰与信号来自同一输入信号, 是同源的。从物理上看, 是由于光波元件的泄漏, 同一输入信号, 经过其他光路也到达输出端, 从而形成同源串扰。它与信号间有一固定的光程差(取决于 OXC 的结构)。如果光程差小于相干长度, 则二者在输出端产生干涉。在系统设计的考虑中, 应该估算到最坏情况, 即相消干涉, 此时会使输出光强降低, 从而使信噪比下降, 误码率提高。

设串扰幅度为信号的 A 倍, 即 $A = E_i/E_1$, 则单路信号隔离度^[4] $R_c = E_i^2/E_1^2 = A^2$ 。

设信号的一个码长占时间为 T_0 , 同源串扰相对于信号的延时为 T_D , 定义延时比 ξ 为

$$\xi = T_D/T_0, \quad T_D < T_0 \quad \xi = 1, \quad T_D \geq T_0$$

考虑到同源串扰的影响, 系统最坏情况下的误码率公式为

$$\text{BER} = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left[\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{[1 + (1 - \xi/2)A \cdot M_1]^2 i_1 - i_D}{\sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_{\text{RIN}}^2 i_1^2}} \right] + \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left[\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{i_D - (\xi \cdot A \cdot M_1/2)^2 i_1}{\sigma_0} \right] \quad (3)$$

其中, σ_0^2 为接收机噪声功率; i_1 为“1”电平时探测器光电流; σ_{RIN}^2 为非同源串扰的相对噪声功率, 即 $\sigma_{\text{RIN}}^2 = \sum_{m=2}^M E_m^2/E_1^2 = R_c(M - M_1 - 1)$; i_D 为判决电平, 固定判决电平时取 $i_D = i_1/2$, 最佳判决电平时取 BER 为最小值时的 i_D 。

设开关阵列的情况决定了在 $M - 1$ 路同频串扰中, 有 M_1 路是同源串扰。

可以推出, 固定判决电平情况下, 由于串扰影响, 系统误码率为 10^{-9} 时功率代价 P_e 为

$$P_e = 10 \cdot \lg(Q'/Q) - 5 \cdot \lg[(2 \cdot \eta - 1)^2 - 4\sigma_{\text{RIN}}^2 Q^2] \quad (4)$$

其中, $\eta = |1 + M_1(1 - \xi/2)A \exp(j\theta)|^2$; $Q' = 5.9$; $Q = 6$ 。

同理可以得出最佳判决电平下相应的功率代价为

$$P_e = 10 \cdot \lg \eta - 10 \cdot \lg(\eta^2 - \sigma_{\text{RIN}}^2 Q^2) \quad (5)$$

如果同源串扰与信号间的光程差足够大, 以至于可以认为它们是非相干光, 则可以得到

$$P_e = 10 \cdot \lg \left[\frac{Q'}{Q} \right] - 5 \cdot \lg[1 - 4\sigma_{\text{RIN}}^2 Q^2] \quad (\text{固定判决电平}) \quad (6)$$

$$P_e = -10 \cdot \lg(1 - \sigma_{\text{RIN}}^2 Q^2) \quad (\text{最佳判决电平}) \quad (7)$$

其中 $\sigma_{\text{RIN}}^2 = M_1 R_c(2 - \xi) + R_c(M - M_1 - 1)$ (8)

此时, 计算公式与文献[4~6]中一致, 仅 σ_{RIN}^2 由于考虑了同源串扰而表示式有所不同。

3 计算结果及 OXC 结构的优化

3.1 计算结果及讨论

图 2 为根据以上推导的公式所得到的 P_e - R_c 曲线。其中 OXC 规模为 16×16 , 并假设 $\beta = -60$ dB, $\xi = 0$ 。随着 M_1 的增大, 曲线明显上升, 表明系统性能变坏。此时, 如果需要满足相同的通信质量要求, 则 M_1 增大后对器件的隔离度指标要求提高。这表明对于一个 OXC 节点来说, 如何减小同源串扰的影响将是提高系统性能的一个关键因素。

图 3 为相干情况下, $\xi = 0$ 及 $\xi = 1$ 的比较。 $M_1 = 0$ 时, $\xi = 0$ 及 $\xi = 1$ 的两条曲线是重合的, 这表明没有同源串扰时, ξ 对系统性能没有影响。而当 $M_1 = 15$ 时, 两条曲线差异很大, 明显可以看出, $\xi = 1$ 时系统的性能要好很多。可见如果能够保证系统的 $\xi = 1$, 则可以将同源串扰的影响大幅度降低。

在不相干情况下, 计算公式与文献[4]所给出的相同, 仅 σ_{RIN}^2 的表达式不同(不存在同源串扰时, $\sigma_{\text{RIN}}^2 = R_c(M - 1)$)。从公式中可以直接看出, P_e 也比不存在同源串扰时要大。与式(8)中 $\xi = 1$ 时相同, 而(8)中 ξ 的取值范围是[0, 1]。因此在不相干情况下, 同源串扰对系统的影响也比其他同频串扰的影响要大, 但 $\xi = 1$ 时仍可以有效地减小其影响。

从以上计算结果及其讨论均可得出, 无论同源串扰与信号是否在输出端相干, 它对系统的

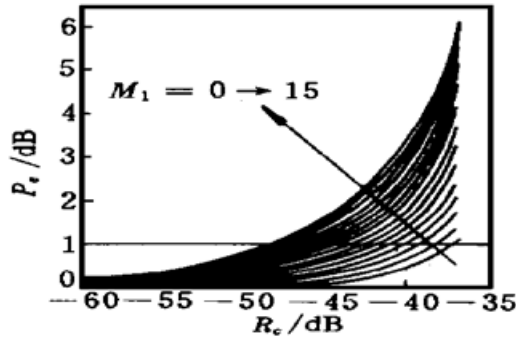


图2 同源串扰路数 M_1 对 $P_c \sim R_c$ 的影响
Fig. 2 Impact of number of same-source crosstalk M_1 on the $(P_c \sim R_c)$ curves

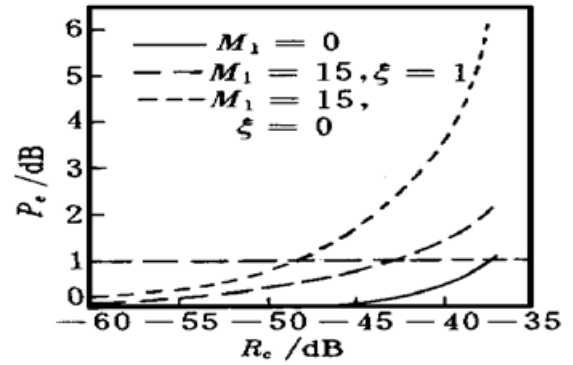


图3 ξ 取值及判决电平对系统的影响 ($N = 16$)
Fig. 3 Power penalty versus R_c for $\xi = 0$ and $\xi = 1$

影响要比非同源串扰的影响要大,因此在系统中应该予以重视。

3.2 OXC 结构优化设计

表 1 给出了不同规模的 OXC 在 10^{-9} 误码率、功率代价 1 dB 情况下对 R_c 的要求。很明显,在 $\xi = 1$ 时的系统在串扰性能方面要比 $\xi < 1$ 的系统要好。由于 ξ 由串扰与信号间的延时决定,针对 ξ 的影响,在 OXC 的设计中(图 1),引入各信道的不同延时,使每信道之间的光程差大于一个信号码长。即取光纤单位延时长度 $L_s \geq T \cdot c/n_{eff}$,在图 1 的 OXC 实现中,令

$$L_{nm} = [(m - 1) + (n - 1) \cdot M] \cdot L_s$$

即可以保证 $\xi = 1$,从而使系统同源串扰的影响最小,并且附加的硬件成本很小。对于一个 $N \times N, M$ 波长规模的 OXC 来说,第 NM 路与第一路相差的光程为 $(NM - 1) \cdot L_s$ 。而如果忽视同源串扰的影响,则可能造成在 OXC 设计中各路的 ξ 接近 0(即各路光程差相差不大),在输出产生相消干涉的情况下,系统性能会变坏。采用如上设计方案,所加的光纤长度不大,而且结构简单,不会对系统造成其他的不良影响,而 OXC 系统中同源串扰的影响得到明显抑制。

表 1 不同规模的 OXC 同源串扰影响的比较

Table 1 Requirement of R_c of different scales of OXC according to the impact of same-source crosstalk (BER= 10^{-9})

Condition N R_c /dB	Fixed decision-threshold			Optimized decision-threshold		
	$M_1 = 0$	$M_1 = M - 1; \xi = 0$	$M_1 = M - 1; \xi = 1$	$M_1 = 0$	$M_1 = M - 1; \xi = 0$	$M_1 = M - 1; \xi = 1$
8	- 33.9	- 41.9	- 35.8	- 30.9	- 36.2	- 30.6
16	- 37.3	- 48.5	- 42.5	- 34.2	- 42.8	- 37.2
64	- 43.3	- 61.0	- 55.0	- 40.4	- 55.2	- 49.7

此外表 1 还给出了最佳判决电平条件下相应 R_c 的数值。与固定判决电平情况比较可以看出,对于同源串扰而言,在接收端采用最佳判决电平,也能够使系统对器件的串扰要求降低,这一点与文献[4]中指出的相应同频串扰的情况是相同的。

参 考 文 献

- 1 Matthias Berger, Michel Chbat, Piet Demester *et al.*. Pan-European optical networking using wavelength division multiplexing. *IEEE Communications Magazine*, 1997, 35(4): 82~ 88
- 2 C. Konishi, T. Yoshida, S. Hamada *et al.*. Issues of Optical Networking Technologies. Proc. Conference Optical Fiber Communication (OFC'97), Dallas, Texas, USA: 1997. TuE p18~ 19
- 3 Eugenio Iannone, Roberto Sabella. Optical path technologies: a comparison among different cross-con-

- nect architectures. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(10): 2184~ 2196
- 4 Hiroshi Takahashi, Kazuhiro Oda, Hiromu Toba. Impact of crosstalk in an arrayed-waveguide multiplexer on $N \times N$ optical interconnection. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(6): 1097~ 1105
- 5 E. L. Goldstein, L. Eskildsen. Scaling limitations in transparent optical networks due to low-level crosstalk. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(1): 93~ 95
- 6 Christian Saxtoft, Peter Chidegey. Error rate degradation due to switch crosstalk in large modular switched optical networks. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(7): 828~ 831

Study of the Same-source Crosstalk of the Optical Cross-connection in WDM All Optical Networks

Chen Wenlu Zhang Hanyi Guo Yili Fei Yunsi Zhou Bingkun

(*Electronic Engineering Department, Tsinghua University, Beijing 100084*)

Abstract In this paper, the impact of crosstalk on the optical cross-connection of the WDM all optical networks is analyzed. The results show that in the dynamic OXC, there exists a kind of same-wavelength crosstalk, the same-source crosstalk. Its impact is more severe than that of other kinds of crosstalks. A new OXC structure to minimize its negative effect is proposed.

Key words WDM, all optical network, optical cross-connection, same-source crosstalk