

WDM 光网络中 OADM 的矩阵理论¹

方来付 王建全 林绵锋 纪越峰 顾晓仪

(北京邮电大学 128 信箱 北京 100876)

摘 要 该文用矢量和矩阵等数学工具对光网络中的 OADM(optical add-drop multiplexer) 节点进行了全面的系统的理论分析, 提出了一种新的 OADM 分析模型, 并应用这种模型对光网络上传输的信号进行了详细的分析推导, 得到了 OADM 环网中信号串扰的普适公式, 为 OADM 及全光网的设计和分析提供了一种新的方法。

关键词 光分插复用器 (OADM)、串扰、隔离度

中图分类号 TN919.1

1 前 言

近年来, WDM(wavelength division multiplexing) 系统取得了巨大的发展并在世界各地的骨干网中得到了大量的应用, WDM 光传输网络的研究和发展也已成为国内外的研究热点。OADM 作为光网络的核心节点, 在国内外已得到了大量的研究, 但却没有一种较系统的理论来对各种 OADM 进行系统的分析和评估。应用本文中提出的这种方法, 可以对 OADM 的串扰性能、损耗状况、泄漏性能以及信噪比等性能进行详细的定量分析。

OADM 的原理如图 1 所示, 它一般有解复用器、复用器和光交换单元组成, WDM 信号在解复用器中解开, 通过光交换单元来实现上下路或直通的目的。在本文中, 我们首先把解复用器, 光开关单元, 复用器, 上路信号和下路信号都用矩阵的形式描述出来, 然后对 WDM 信号在其中的上下路和直通进行了详细的推导, 得到了对 OADM 的普适公式。最后我们利用这些结论, 对一路信号从上路到经过 N 个节点最后下路的过程进行了理论分析, 得到了其光电流和信噪比。为已有的 OADM 的分析和新的 OADM 的设计, 提供了有力的理论指导。

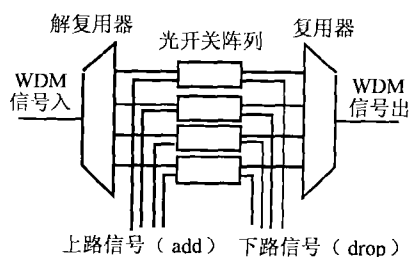


图 1 OADM 的基本原理图

2 各 OADM 单元的矢量和矩阵描述

WDM 信号的矩阵描述:

$$(h_1, h_2, h_3, \dots, h_M)^T \quad (1)$$

¹ 2000-04-30 收到, 2000-11-13 定稿

国家 863(307-1-1-1(04), 300-01-02-99) 计划, 国家自然科学基金 (69990540(3)), 高校博士专项基金 (1999001305) 资助项目

h_i 对应各个 λ_i 波长通道的幅值。 T 代表该矩阵为列矩阵。

解复用器的矩阵描述为

$$\begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1M} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{M1} & d_{M2} & \cdots & d_{MM} \end{pmatrix} \quad (2)$$

理想情况下

$$\begin{pmatrix} d_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & d_{22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & d_{MM} \end{pmatrix} \quad (3)$$

复用器的矩阵描述

$$\begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} & \cdots & t_{1M} \\ t_{21} & t_{22} & \cdots & t_{2M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_{M1} & t_{M2} & \cdots & t_{MM} \end{pmatrix} \quad (4)$$

理想情况下

$$\begin{pmatrix} t_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & t_{22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & t_{MM} \end{pmatrix} \quad (5)$$

M 个 2×2 光开关的并联矩阵

$$\begin{pmatrix} S_1 & & & \\ & S_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & S_M \end{pmatrix}, \quad S_m = \begin{pmatrix} S_{m11} & S_{m12} \\ S_{m21} & S_{m22} \end{pmatrix} \quad (6)$$

上路矩阵

$$(A_1 \ A_2 \ \cdots \ A_M)^T, \quad A_m = a_m e_m \quad (7)$$

下路矩阵

$$(Y_1 \ Y_2 \ \cdots \ Y_M)^T, \quad y_m = \sum_{i=1}^M y_{mi} e_i, \quad y_{mm} \gg y_{mi} \quad (8)$$

3 OADM 的矩阵法的理论推导

WDM 信号经解复用器后输出为

$$\begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1M} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{M1} & d_{M2} & \cdots & d_{MM} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{m=1}^M d_{1m} h_m \\ \sum_{m=1}^M d_{2m} h_m \\ \vdots \\ \sum_{m=1}^M d_{Mm} h_m \end{pmatrix} \quad (9)$$

经过光开关矩阵前, 与上路信号复合到一个列矩阵经过光开关矩阵, 输出为

$$\begin{pmatrix} \sum_{m=1}^M d_{1m}s_{111}h_m e_m + a_1s_{112}e_1 \\ \sum_{m=1}^M d_{1m}s_{121}h_m e_m + a_1s_{122}e_1 \\ \sum_{m=1}^M d_{2m}s_{211}h_m e_m + a_2s_{212}e_2 \\ \sum_{m=1}^M d_{2m}s_{221}h_m e_m + a_2s_{222}e_2 \\ \vdots \\ \sum_{m=1}^M d_{Mm}s_{M11}h_m e_m + a_Ms_{M12}e_M \\ \sum_{m=1}^M d_{Mm}s_{M21}h_m e_m + a_Ms_{M22}e_M \end{pmatrix} \quad (10)$$

其中下路矩阵为

$$\begin{pmatrix} \sum_{m=1}^M d_{1m}s_{121}h_m e_m + a_1s_{122}e_1 \\ \sum_{m=1}^M d_{2m}s_{221}h_m e_m + a_2s_{222}e_2 \\ \vdots \\ \sum_{m=1}^M d_{Mm}s_{M21}h_m e_m + a_Ms_{M22}e_M \end{pmatrix} \quad (11)$$

进入复用器并从复用器输出的矩阵为

$$\begin{pmatrix} \sum_{m \neq 1}^M d_{1m}t_{1m}s_{111}h_m e_m + d_{11}t_{11}s_{111}h_1 e_1 + t_{11}a_1s_{112}e_1 \\ \sum_{m \neq 2}^M d_{2m}t_{2m}s_{211}h_m e_m + d_{22}t_{22}s_{211}h_2 e_2 + t_{22}a_2s_{212}e_2 \\ \vdots \\ \sum_{m \neq M}^M d_{Mm}t_{Mm}s_{M11}h_m e_m + d_{MM}t_{MM}s_{M11}h_M e_M + t_{MM}a_Ms_{M12}e_M \end{pmatrix} \quad (12)$$

由于经过解复用器后的各个通道又进入了同一根光纤, 故实际的各个通道的信号和串扰分别为(每一列中有一项是主信号, 其余项为串扰项): 当光开关处于平行态时, 第一项为主项, 第二项为上路信号对通过该节点信号的同频串扰项(由光开关引入), 第三项为异频项; 当光开关处于交叉态时, 第二项为主项, 第一项为同频串扰项, 第三项为异频项。由于这些异频项在向下一个节点传输的过程时会合成为其它通道的同频串扰项, 因此, 第 m 个波长通道向下一节点传输时的真正的值的数值表示为

$$\begin{pmatrix} \sum_{m \neq 1}^M d_{m1}t_{m1}s_{m11}h_1 e_1 + d_{11}t_{11}s_{111}h_1 e_1 + a_1s_{112}e_1 \\ \sum_{m \neq 2}^M d_{m2}t_{m2}s_{m11}h_2 e_2 + d_{22}t_{22}s_{211}h_2 e_2 + a_2s_{212}e_2 \\ \vdots \\ \sum_{m \neq M}^M d_{mM}t_{mM}s_{m11}h_1 e_1 + d_{MM}t_{MM}s_{M11}h_M e_M + a_Ms_{M12}e_M \end{pmatrix} \quad (13)$$

对复用器输出的第 m 个信号为

$$S_{m11}t_{mm}d_{mm}h_m e_m + S_{m12}t_{mm}a_m e_m + \sum_{i=1, i \neq m}^M S_{i11}t_{im}d_{im}h_m e_m \quad (14)$$

当第一项为主项时, 第二项为同频串扰项, 第三项为相干串扰项; 当第二项为主信号时, 第一、第三项为同频串扰项, 这些项都将随主信号传输到下一个节点, 不能被滤波器过滤, 到达接收机形成对信号的影响。而且, 它将不断的积累。

对下路信号, 第 m 路的下路信号为

$$S_{m21} \sum_{i=1}^M d_{mi} e_i \sum_{j=1}^M h_j e_j + S_{m22} a_m e_m = S_{m21} \sum_{i=1}^M d_{mi} h_i e_i + S_{m22} a_m e_m \quad (15)$$

当光开关处于交叉态时, 上式中 $S_{m21} d_{mm} h_m e_m$ 是主信号, 其它为异频串扰, 第二项为同频串扰。

4 应用 OADM 的矩阵理论对一路信号的具体分析

下面我们根据上面的分析, 具体讨论一个信号在某一节点上路, 经过 N 个节点下路后进入接收机的信号质量。设上路信号 $a_m e_m$, 该信号从该节点输出的信号为

$$S_{m11} t_{mm} d_{mm} h_m e_m + S_{m12} t_{mm} a_m^0 e_m + \sum_{i=1, i \neq m}^M S_{i11} t_{im} d_{im} h_i e_i \quad (16)$$

其中, 第二项为主信号, 其它为同频串扰项。

当该信号经过第二个节点后, 其信号变为

$$\begin{aligned} & S_{m11} t_{mm} d_{mm} \left(S_{m11} t_{mm} d_{mm} h_m e_m + S_{m12} t_{mm} a_m^0 e_m + \sum_{i \neq 1}^M S_{i11} t_{im} d_{im} h_i e_i \right) e_m \\ & + S_{m12} t_{mm} a_m e_m + \sum_{i=1, j \neq m}^M S_{i11} t_{im} d_{im} \left(S_{m11} t_{mm} d_{mm} h_m e_m + S_{m12} t_{mm} a_m^0 e_m \right. \\ & \left. + \sum_{i \neq 1}^M S_{i11} t_{im} d_{im} h_i e_i \right) e_m = S_{m11} S_{m12} t_{mm}^2 d_{mm} a_m^0 e_m + S_{m11} t_{mm} d_{mm} \sum_{i=1}^M S_{i11} t_{im} d_{im} h_i e_i \\ & \quad + S_{m12} t_{mm} a_m e_m + \sum_{i=1, j \neq m}^M S_{i11} t_{im} d_{im} h_i e_m \end{aligned} \quad (17)$$

依次类推, 当经过 N 个节点后, 信号变为

$$\begin{aligned} & S_{m11}^{N-1} S_{m12}^N t_{mm}^N d_{mm}^{N-1} a_m^0 e_m \\ & + \left(S_{m11}^{N-1} t_{mm}^{N-1} d_{mm}^{N-1} \sum_{i=1, i \neq m}^M S_{i11} t_{im} d_{im} h_i + S_{m11}^{N-1} S_{m12}^N t_{mm}^N d_{mm}^{N-1} a_m \right) e_m \\ & + \left(S_{m11}^{N-2} t_{mm}^{N-2} d_{mm}^{N-2} \sum_{i=1, i \neq m}^M S_{i11} t_{im} d_{im} h_i + S_{m11}^{N-2} S_{m12}^N t_{mm}^{N-1} d_{mm}^{N-2} a_m \right) e_m \\ & + \cdots + \left(\sum_{i=1, i \neq m}^M S_{i11} t_{im} d_{im} h_i + S_{m12} t_{mm} a_m \right) e_m \end{aligned} \quad (18)$$

上式第一项为主信号, 下面的 $N-1$ 项为同频串扰项, 当它在第 $N+1$ 个节点下路时, 下路到接收机的信号为

$$\begin{aligned}
& S_{m21}d_{mmm}S_{m11}^{N-1}S_{m12}t_{mm}^Nd_{mm}^{N-1}a_m^0e_m \\
& + S_{m21}d_{mmm} \left(S_{m11}^{N-1}t_{mm}^{N-1}d_{mm}^{N-1} \sum_{i=1, i \neq m}^M S_{i11}t_{im}d_{im}h_i + S_{m11}^{N-1}S_{m12}t_{mm}^Nd_{mm}^{N-1}a_m \right) e_m \\
& + S_{m21}d_{mmm} \left(S_{m11}^{N-2}t_{mm}^{N-2}d_{mm}^{N-2} \sum_{i=1, i \neq m}^M S_{i11}t_{im}d_{im}h_i + S_{m11}^{N-2}S_{m12}t_{mm}^{N-1}d_{mm}^{N-2}a_m \right) e_m \\
& + S_{m21}d_{mmm} \left(S_{m11}^{N-3}t_{mm}^{N-3}d_{mm}^{N-3} \sum_{i=1, i \neq m}^M S_{i11}t_{im}d_{im}h_i + S_{m11}^{N-3}S_{m12}t_{mm}^{N-2}d_{mm}^{N-3}a_m \right) e_m \\
& + \dots \\
& + S_{m21}d_{mmm} \left(\sum_{i=1, i \neq m}^M S_{i11}t_{im}d_{im}h_i + S_{m12}t_{mm}a_m \right) e_m \\
& + \left(S_{m21} \sum_{i=1, i \neq m}^M d_{im}h_i e_i + S_{m22}a_m e_m \right)
\end{aligned} \tag{19}$$

经过 N 个节点 (包括上路节点), 在第 $N+1$ 个节点下路时到达接收机的信号如上式所示, 它包括 $N+1$ 项 (括号内看为整体一项), 第一项为我们所需的信号, 中间项为同频串扰项, 最后一项中, 第一项为异频串扰项, 第二项为同频串扰项。在上式中, 共有 $NM-M+1$ 个同频串扰项, $M-1$ 个异频串扰项。

在忽略损耗的前提下, 上式可以简写为

$$a_m^0 e_m + N \sum_{i=1, i \neq m}^M S_{i11} t_{im} d_{im} h_i e_m + N S_{m12} a_m e_m + \sum_{i=1, i \neq m}^M d_{mi} h_i e_m \tag{20}$$

第一项为上路时的信号, 也就是我们真正需要的信号, 第二项为信号通过 N 个节点时引入同频串扰的, 其中, 通过第一个节点时是同频非相干串扰, 其余 $N-1$ 个节点为相干串扰。第三项为由中间 N 个节点的第 m 个光开关引入的同频串扰, 最后一项为在信号的下路节点由于解复用器的泄露引入的异频串扰。由于第 m 个光开关的上路端口可能并无信号进入 (即并无上路信号), 而且, 光开关的串扰量一般也比较低。因此在这种情况下, 可忽略第三项, 则得

$$a_m^0 e_m + N \sum_{i=1, i \neq m}^M S_{i11} t_{im} d_{im} h_i e_m + \sum_{i=1, i \neq m}^M d_{mi} h_i e_m \tag{21}$$

上式给出了在忽略二阶以上微小量的前提下, 一路信号从上路经历 N 个节点到下路时, 其相干和非相干串扰的定量的结果。

5 结 论

本文提出了一种 OADM 的数学模型, 并对它进行了具体的理论推导和分析, 最后应用这种模型, 对具体的一路信号从上路到下路的整个过程进行了详细的推导和分析。该模型无论是对 OADM 的性能评估还是对光网络的系统仿真都具有很好的参考意义。

参 考 文 献

- [1] Chretien G. P. Herben, *et al.*, Crosstalk performance of integrated optical cross-connects, *Journal of Lightwave Technology*, 1999, 17(7), 1126-1134.
- [2] K. Okamoto, M. Okuno, *et al.*, 16-channel optical add/drop multiplexer consisting of arrayed waveguide gratings and double-gate switches, *Electron. Letter*, 1996, 32(16), 1471-1476.
- [3] 陈雯路, WDM 全光网单元技术研究, [博士论文], 清华大学电子工程系, 1998.

THE MATRIX THEORY OF OADM IN THE WDM OPTICAL NETWORK

Fang Laifu Wang Jianquan Lin Mianfeng Ji Yuefeng Gu Wanyi

(*Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China*)

Abstract Using matrix and vector the OADM nodes of WDM optical network have been researched and analyzed roundly and completely. A kind of analyzing model of OADM is proposed and the signal performance is analyzed with the novel OADM model when it is transited in the OADM ring network. The SNR of the signal is gotten. The model is very valuable to the analysis and design of the OADMs.

Key words OADM (optical add-drop multiplexer), Crosstalk, Isolation

方来付: 男, 1972 年生, 博士, 研究方向为光通信和光网络.

王健全: 男, 1975 年生, 博士, 研究方向为光网络中的 APS.

林锦峰: 男, 1972 年生, 博士, 研究方向为光通信和光网络.

纪越峰: 男, 研究员, 研究方向为光通信和光网络.

顾婉仪: 女, 博士生导师, 研究方向为 DWDM 光网络.