

# 光子交换网络实现三重分割复用的 图表分析法

张 杰 顾晓仪 李国瑞 徐大雄

(北京邮电大学电信工程学院 北京 100876)

**提要** 提出用连接逻辑图描述由单一的空分交换网络等价变换为三重分割复用光子交换网络的图解分析法,并具体讨论了一种基于 Benes 结构的  $8 \times 8$  空分多级光子交换网络实际的拓扑变换过程。

**关键词** 光子交换网络,空分复用,波分复用,时分复用,连接逻辑图

## 1 引 言

随着光子技术和光电混合集成技术的发展,光信号的密集波分复用技术已逐渐成熟,并开始走向商用化。同时,高速光时分复用技术也取得较大进展。为了适应高速、宽带业务发展的需求,对未来的通信网,光复用技术不仅在网络的传输系统,而且在网络的交换系统中都将扮演重要的角色。

针对光信号可以在空间域、时间域和波长域上独立地进行分割复用的特点,已经提出了基于不同复用域的光交换的原理与实现方案,包括同时实现光的空分复用、时分复用和波分复用或其中任意两种情况的复合方式光交换的概念<sup>[1,2]</sup>。根据目前的技术条件,光交换器件还要由电信号来控制,即属于电控光交换。

光子交换网络的拓扑结构可以是各种各样的。其中,由基本空分光交换单元按一定的连接方式级联构成的空间多级交换网络,可以通过时间域和波长域的再分割复用改变网络的实现。本文提出一种将空间多级光子交换网络等价变换为三重分割复用光子交换网络的图表分析方法。

## 2 基本光交换单元的实现

多级光子交换网络由基本光交换单元组成。由于信号复用方式的区别,光交换单元从功能上可以划分为两类:一类是仅在某一复用域上实现信道交换的单一型光交换单元;另一类是在不同的复用域上交换信号的复合型光交换单元。根据复用域的不同,单一型光交换单元又进一步细分为空分光交换单元、时分光交换单元和波分光交换单元。三种光交换方式的各种组合,构成了不同形式的复合型光交换单元。

任何类型的光交换单元从结构上看都可以用一个  $n \times m$  的交叉连接矩阵表示,  $n$  为入线数量,  $m$  为出线数量, 任意入线可以自由地选择任意出线。这里入线和出线的概念代表复用信道。如果对光子交换网络实现三重分割复用, 相应的基本光交换单元也必须同时满足时隙交换和波长交换的功能, 即在不同的“时隙, 波长”通道上呈现出不同的空间连接状态。遗憾的是, 目前还没有能够直接实现时分和波分复用的空间光开关器件, 但可以通过对不同类型的器件进行组合来满足要求, 具体的方法是将信号波长解复用后对每个波长分别应用时隙复用的空分交换器件, 或者将信号时隙解复用后对每个时隙应用波长复用的空分交换器件。文献[3]详细介绍了各种类型光交换单元的基本原理, 以及在现有技术条件下的实施方案。

### 3 光子交换网络拓扑变换的连接逻辑图分析法

假设已知某一空间结构的交换网络<sup>[4]</sup>, 希望构造一个三重分割复用的光子交换网络, 使得它与该已知的空分交换网络拓扑等价。首先, 构成网络各级的基本光交换单元必须满足在空间域、时间域和波长域上能够独立地进行信道交换, 即所谓理想的光交换单元。两级交换单元之间的连接可以是空间位置的变换、时隙互换和波长互换中任意一种或两种以上情况的组合。从现有的技术条件来看, 单一的空分光交换单元可以直接实现; 时分光交换和波分光交换都需要首先将信道(时隙或波长)展开, 然后对各信道逐一进行转换, 最后再重新复用; 复合方式的光交换单元实现最为复杂。因此, 为了使网络实现起来最为简单, 要求尽量避免信号在两级交换单元间的连接通道上既改变时隙又改变波长。

在不改变原有网络连接关系的前提下, 可以通过对网络的拓扑结构作适当变换获得最佳的实施方案。对网络结构作等价变换的具体方法陈述如下: (1) 任意交换同一基本光交换单元的入线位置或出线位置的操作不影响网络的整体拓扑结构; (2) 任意调整同级各交换单元的相邻关系, 得到的网络与原网络拓扑等价; (3) 对多级光子交换网络, 如果移动某一中间交换单元的位置, 将会引起相邻前后两级的基本交换单元连接关系发生变化。

以一个具体的空分多级光子交换网络为例, 假设构成网络的基本交换单元是  $N \times N$  的光交叉连接矩阵, 各级交换单元的数目均为  $M$ , 那么网络每一级的入线和出线数是  $N \times M$ , 说明网络各级的输入、输出在空间上被分割为  $N \times M$  个状态。仅考虑一种简单的情况, 即  $N, M$  分别是 2 的  $n, m$  次幂。如果引入在时间域和波长域的分割复用, 构造与上述空分光子交换网络结构等价的多重分割复用网络, 并假定该网络在空间域、时间域和波长域上的复用度依次为  $P, Q$  和  $R$  ( $P, Q, R$  依次为 2 的  $p, q, r$  次幂), 那么必然存在如下关系

$$P \times Q \times R = M \times N \quad \text{或} \quad p + q + r = m + n \quad (1)$$

$$P \geq N \quad \text{或} \quad p \geq n \quad (2)$$

对这样一个网络, 它在空间上分割复用的输入状态可以用  $p$  个逻辑变量表示, 记为  $S_i (i = 1, \dots, p)$ ; 在时间上分割复用的输入状态可以用  $q$  个逻辑变量表示, 记为  $T_j (j = 1, \dots, q)$ ; 在波长上分割复用的输入状态可以用  $r$  个逻辑变量表示, 记为  $W_k (k = 1, \dots, r)$ ; 网络所有可能的输入状态需要用波长、时隙和空间位置共同标识, 可以用上述逻辑变量按一定形式的组合表示。同理, 网络在空间上分割复用的输出状态可以用  $p$  个逻辑变量表示, 记为  $S_i' (i = 1, \dots, p)$ ; 在时间上分割复用的输出状态可以用  $q$  个逻辑变量表示, 记为  $T_j' (j = 1, \dots, q)$ ; 在波长上分割复用的输出状态可以用  $r$  个逻辑变量表示, 记为  $W_k' (k = 1, \dots, r)$ ; 网络所有可能的输出状态需要

用上述逻辑变量按一定形式的组合表示。如果给出下述规定, 当一对输入、输出之间存在连接通道时用逻辑状态“1”表示, 若无连接通道时用逻辑状态“0”表示, 那么交换网络的拓扑结构可以视作输入和输出状态之间的一种逻辑关系。由于网络的输入和输出可以用两组状态逻辑变量来表示, 所以网络的拓扑结构从数学意义上表示为状态逻辑变量的逻辑函数。这样, 我们就能够利用逻辑代数的方法描述和分析光子交换网络拓扑变换的过程。

首先, 可以构造出与数字逻辑电路设计中用到的逻辑卡诺图<sup>[5]</sup> 结构相似的一类图表, 用于分析多级光子交换网络的拓扑结构, 并命名为连接逻辑图。对某一级交换网络, 规定连接逻辑图的行代表输出状态, 列代表输入状态, 分别用三种状态逻辑变量的组合表示。列与行的交叉位置代表输入、输出间的连接关系, 根据网络的拓扑结构填入逻辑“1”或“0”。在表示网络的输入和输出状态时, 状态逻辑变量的组合可以有多种形式。这里规定状态逻辑变量按照波长、时隙、空间位置的顺序组合, 依循环二进制码由小到大排列并依次分配给各个状态, 即用逻辑变量组合  $W_r \cdots W_1 T_q \cdots T_1 S_p \cdots S_1$  的数值来表示各个状态。变换基本交换单元的位置, 或者单元内部入线、出线的顺序, 意味着原本属于某些状态的连接关系变换到其他的状态, 对应连接逻辑图中, 就是交换某些行(或列)的位置。由于连接逻辑图具有上述结构特点, 可以在它的上面进行网络的拓扑等价变换, 寻找易于实现多重分割复用的网络结构形式。我们称满足这种结构的连接逻辑图为原始连接逻辑图, 在它的基础上可以直接得到多种结构简化了的导出形式。前面曾经指出, 在构造多重分割复用光子网络时要尽量避免信号在同一内部交叉连接通道上同时改变时隙和波长, 这是进行网络拓扑结构变换必须遵循的准则。为此, 下面提出了几种特殊形式的导出连接逻辑图, 基于它们的网络变换可以更好地体现上述准则。

第一种在表示输入、输出状态的逻辑变量组合中去掉描述交换单元入线和出线位置的  $n$  个空间状态逻辑变量  $S_1 \cdots S_n$ , 这样状态的数量减少为原来的  $1/N$ 。这种导出连接逻辑图的列与行相当于原始连接逻辑图中只有表示交换单元入线和出线位置的逻辑变量存在变化, 其他状态变量相同的那些列的集合和行的集合, 行、列相交位置相当于由上述行集、列集交叉构成的一个方阵, 并规定当这一方阵中所有元素都为“0”时, 导出连接逻辑图中行、列相交位置填入“0”, 其他情况都填入“1”。这种导出连接逻辑图形式, 它的行与列实质上代表的是不同的基本光交换单元, 调整交换单元相邻关系的过程相当于在图中交换行或者列的位置。为了达到不对信道同时进行时分复用和波分复用的目的, 可以移动上述导出连接逻辑图中行和列的位置, 使得在时间和波长上分割复用状态同时发生变化的那些项都为“0”。最后根据变换的结果由各交换单元间在时间和波长上的连接关系确定采用何种类型的时隙互换器件或波长互换器件。一种特殊的情况是, 在由具有相同空间状态逻辑变量的行集和具有相同空间状态逻辑变量的列集交叉构成的方阵中, 要么只有代表时间分割复用状态的逻辑变量变化的项为“1”, 要么只有代表波长分割复用状态的逻辑变量变化的项为“1”。在这种情形下, 可以用  $Q \times Q$  时隙互换器件或者  $R \times R$  的波长互换器件实现时间或波长上的交换功能。经过上述变换后, 再根据行、列位置变换的次序调整原始的连接逻辑图中相应的行集与列集的位置。为了方便观察上述行列变换的结果, 建议在定义行与列的逻辑状态值时, 按照逻辑变量组  $S_p \cdots S_{p-n} W_r \cdots W_1 T_q \cdots T_1$  的结构, 依循环二进制码由小到大分配给各个状态。

从调整后的原始连接逻辑图中, 可以得到第二种导出连接逻辑图形式。具体的建立过程为, 在表示输入、输出状态的逻辑变量组合中去掉描述时间分割复用状态的逻辑变量  $T_1 \cdots T_q$ , 即按照  $W_r \cdots W_1 S_p \cdots S_1$  的结构分配状态, 状态的数量减少为原来的  $1/Q$ 。这种导出连接逻辑图

形式用于分析和设计在基本交换单元之间波长互换器件的接入位置。在图中交换列或行的操作, 相当于改变输入交换单元在任意时分复用状态下出线的顺序, 或者输出交换单元在任意时分复用状态下入线的顺序。最后需要根据变换的结果调整原始连接逻辑图的结构。

第三种与第二种的构造过程类似, 只是在表示输入、输出状态的逻辑变量组合中去掉描述波长分割复用状态的逻辑变量  $W_1 \cdots W_r$ , 即按照  $T_q \cdots T_1 S_p \cdots S_1$  的结构分配状态, 状态的数量减少为原来的  $1/R$ 。这种导出连接逻辑图形式用于分析和设计在基本交换单元之间时隙互换器件的接入位置。在图中交换列或行的操作, 相当于改变输入交换单元在任意波分复用状态下出线的顺序, 或者输出交换单元在任意波分复用状态下入线的顺序。最后需要根据变换的结果调整原始连接逻辑图的结构。

利用连接逻辑图这种数学表示工具, 就可以通过图表变换的方式模拟在空间、时间和波长上实现三重分割复用的光子交换网络的过程。下面通过一个简单的实例, 介绍运用连接逻辑图分析方法的一般步骤。

### 4 实例分析

图 1(a) 给出了一个经典的空间  $8 \times 8$  Benes 网络。这是一个由基本的 Beta 器件( $2 \times 2$  开关) 级联而成的多级网络, 图 1(b) 直观显示了各级节点间的互联情况。假设存在一个  $p = q = r = 1$  的三重分割复用的光子交换网络, 具有和图 1 中网络完全等效的交换连接关系, 我们的目标是寻找最佳的结构实现这一网络。因为该网络在空间、时间和波长上的复用度均为 2, 所以每种复用方式都可以仅用一个状态逻辑变量来表示, 定义它的输入状态用逻辑变量组合  $WTS$  表示, 输出状态用  $W'T'S'$  表示。基本光交换单元采用同时满足时分复用和波分复用的理想的光子 Beta 器件( $2 \times 2$  光交换开关)。

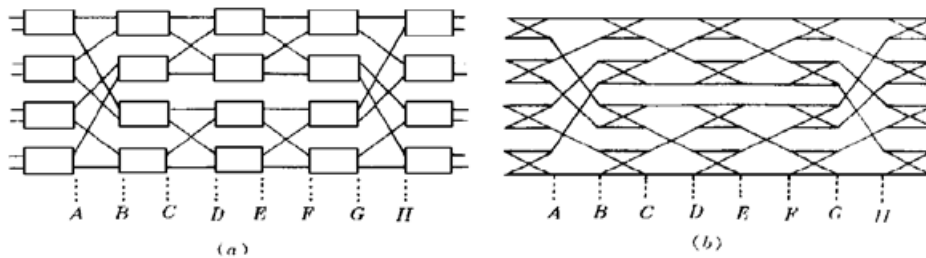


图 1 空间  $8 \times 8$  Benes 网络

Fig. 1 An  $8 \times 8$  Benes network in the space domain

首先, 考察  $A-B$  两级间的交换结构。如图 2(a) 所示, 作出相应的原始连接逻辑图。从原始连接逻辑图中可以得到第一种形式的导出连接逻辑图, 见图 2(b)。对该图的第二行和第三行进行交换得到图 2(c)。可以看到, 图 2(c) 中省却了波长上的交换功能。根据上面的行列变换结果调整原始连接逻辑图的结构, 具体的步骤是将原始连接逻辑图中第三和第四行构成的行集与第五和第六行构成的行集位置互换, 结果如图 2(d) 所示。由于不涉及波长变换, 因此在图 2(d) 的基础上只需建立第三种形式的导出连接逻辑图, 见图 2(e)。对其中第三行和第四行进行交换, 得到图 2(f)。据此调整图 2(d) 所示连接逻辑图的结构, 具体步骤是将图 2(d) 中第五和第六行构成的行集与第七和第八行构成的行集位置互换, 结果见图 2(g)。根据图 2(c) 和图

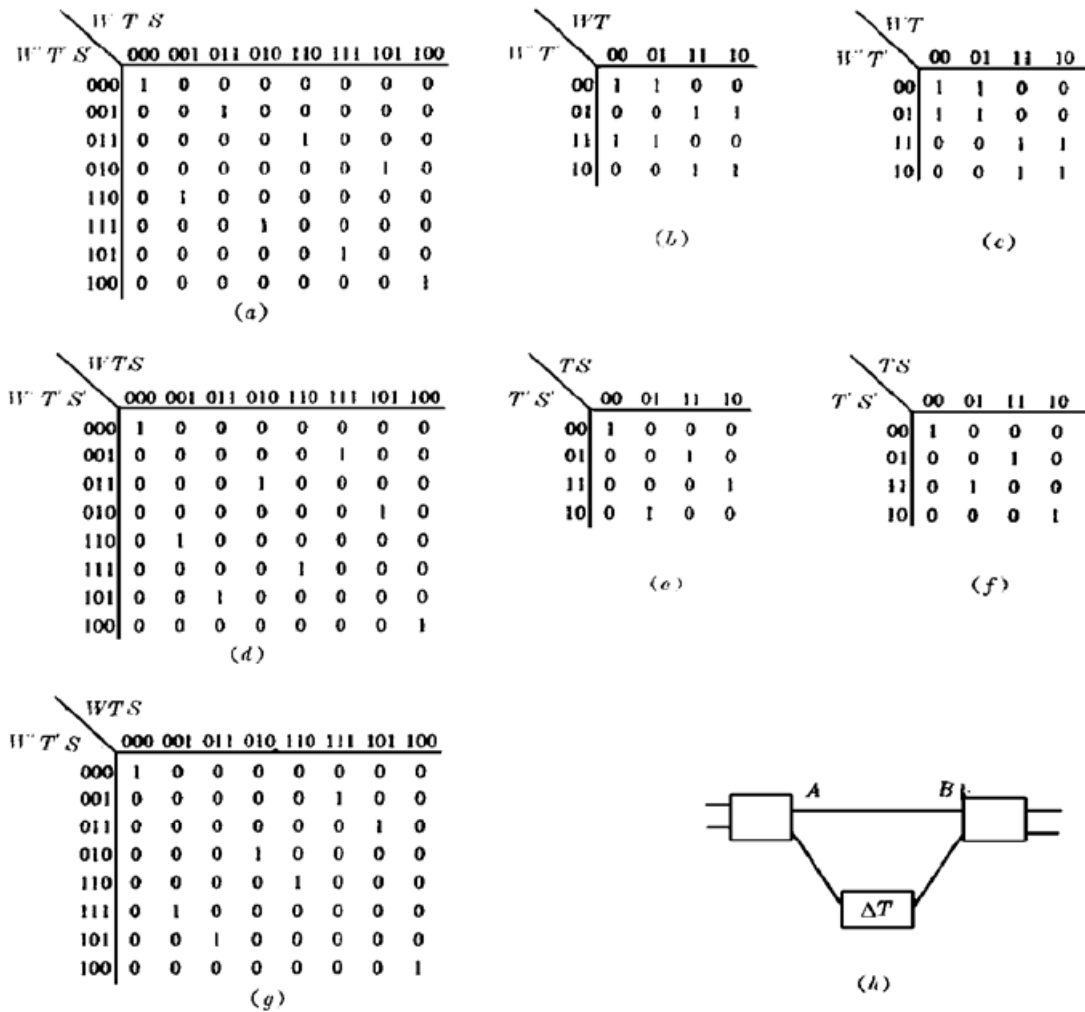


图 2 A-B 两级间交换结构变换的连接逻辑图分析过程

Fig. 2 Analysis of the alteration for the exchange configuration between A and B stages using connection logical maps

2(f) 可以确定最终得到 A-B 节点间互连网络实现三重分割复用的具体结构, 即由两级理想的光子 Beta 器件组成, 它们之间的连接不需要进行波长交换, 但要求在连接某一组空间端口时接入一个 2 × 2 时隙互换器件, 如图 2(h) 所示。图中的两个双端口器件代表两级可以同时进行时分和波分复用的 2 × 2 空间光交换开关, ΔT 表示 2 × 2 时隙互换器件。

利用同样的方法, 可以设计出 C-D, E-F, G-H 各级间的交换结构。设计过程中需要注意的是, 在 A-B 两级间进行连接逻辑图变换时, 由于图 2(a) 到图 2(d) 到图 2(g) 发生了两次行集间的交换, 说明 B 级交换单元的位置发生变化, 因此在设计 C-D 两级间交换结构时应首先对由图 1 显示的连接关系直接得到的原始连接逻辑图进行相应的列集变换(因为 C-D 间连接逻辑图的列变量对应 A-B 间连接逻辑图的行变量)。在其他节点组交换结构设计时也出现了类似的情况。

图 3 给出了最后得到的与图 1 中 8 × 8 Benes 网

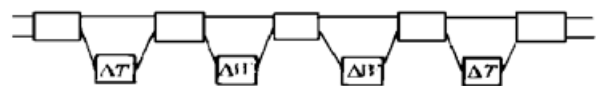


图 3 8 × 8 三重分割复用光子交换网络

Fig. 3 An 8 × 8 photonic switching network in three divisions

络,图中  $\Delta W$  代表  $2 \times 2$  波长互换器件。

综上所述,本文提出了一种利用连接逻辑图分析基于空间、时间和波长分割复用的光子交换网络的结构与特点的方法,它可以直观地帮助我们简化多重分割复用光子网络的实现。值得进一步研究的问题是,如何基于上面给出的简化过程建立通用的数学模型,找到解决这类问题的一般理论和算法。

### 参 考 文 献

- 1 R. A. Thompson, D. K. Hunter. Elementary photonic switching modules in three divisions. *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 1996, **14**(2): 362~ 373
- 2 H. Kobayashi, I. P. Kaminow. Duality relationships among “space”, “time”, and “wavelength” in all-optical networks. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(3): 344~ 351
- 3 Shen Yunfeng, Gu Wanyi. Theory and implementation of photonic switching. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 1997, **26**(7): 624~ 630 (in Chinese)
- 4 Chen Xisheng, Chen Changhao. Programmed Telephone and Traffic Theory. Beijing: People's Posts and Telecommunications Publishing House, 1994. 100~ 110 (in Chinese)
- 5 Wang Shufang, Xu Huimin. Digital Circuit and Logical Design. Beijing: People's Posts and Telecommunications Publishing House, 1995. 32~ 41 (in Chinese)

## Structural Analysis of the Photonic Switching Network in Three Divisions Using Diagrams

Zhang Jie Gu Wanyi Li Guorui Xu Daxiong

(College of Telecommunications Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

**Abstract** Photonic signals can be multiplexed independently in the space, time and wavelength domains. In this paper a new method using connection logical maps to describe the alteration of network structure from the space-division switching network to the photonic switching network in three divisions is proposed for the first time. As an example, a multistage photonic switching network with 8 input ports and 8 output ports in the space-only division, which matches Benes structure, is converted to another network in three divisions with the same connection structure by this method.

**Key words** photonic switching network, space-division multiplexing, wavelength-division multiplexing, time-division multiplexing, connection logical map