

## 波长二次重用的双向 WDM 星形单跳网<sup>1</sup>

甘朝钦 张明德 孙小茜

(东南大学电子工程系 南京 210096)

**摘 要** 针对有限的信道波长数对波分复用星形单跳网容量的限制问题, 文章提出了一种波长二次重用、单纤双向传输和多耦合器内连相结合的组网扩容解决方法。与常规波分复用星形网相比, 该方法不但将网络所支持的节点数增加了两倍; 而且网络的所有数据信道波长都得到二次重用, 网络最大吞吐量也增加了两倍; 在网络节点数不变的条件下, 不但可节省一半的光纤, 而且通过波长的二次重用, 可大大减小网络中通信节点的排队时延, 缓和各通信节点对数据信道波长使用权的竞争矛盾, 有效地改善网络性能。

**关键词** 星形网, 波分复用, 波长重用, 网络容量, 增益

**中图分类号** TN913.2

### 1 引 言

星形结构在当前的波分复用 (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 网络研究和应用中最受关注<sup>[1,2]</sup>。常规 WDM 星形网 (如图 1 所示) 主要由传输型无源星形耦合器构成, 每个节点通过两根光纤与星形耦合器的一对端口相连, 一根光纤传输该节点需要发送的信息, 另一根光纤传输发往该节点的信息。由于单跳网中同一时刻一个数据信道波长只能供一个节点使用, 而通常情况下网络中可供使用的信道波长数十分有限<sup>[3]</sup> (目前, 视不同情况为 4~32 个<sup>[1,3]</sup>), 即网络中可供使用的信道波长数通常小于网络所支持的节点数; 这样, 网络中要发送数据的各节点, 必须首先向控制系统提出申请, 通过排队和竞争, 才能根据控制系统指令取得某个给定数据信道波长的使用权, 从而进行通信。所以, 有限的信道波长数严格限制着常规 WDM 星形网的容量, 使其无法支持大量的节点。因此, 波长重用——同一个波长被网络中不同节点同时使用的研究成为当前的重要课题。

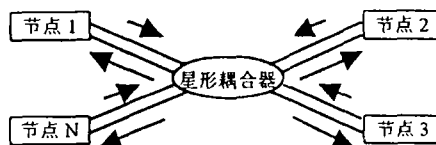


图 1 常规 WDM 星形网结构

以往, WDM 星形单跳网中波长重用的研究主要集中在双星结构<sup>[4-6]</sup>, 而且大多是部分波长重用<sup>[4,5]</sup>, 对于网络中所有数据波长的重用, 最多也只是重用一次<sup>[6]</sup>。本文针对 WDM 星形单跳网容量受有限信道波长数限制问题, 提出了一个波长二次重用、单纤双向传输及多耦合器内连相结合的有效解决方法——波长二次重用的双向 WDM 星形单跳网, 其特点在于: (1) 可将网络所支持的节点数——网络容量扩大两倍; (2) 网络的所有数据信道波长都得到二次重用, 网络的最大吞吐量也增加两倍; (3) 在网络节点数不变的条件下, 不但可节省一半的光纤, 而且通过波长的二次重用, 可大大减少网络中通信节点的排队时延, 缓和各通信节点对数据信道波长使用权的竞争矛盾, 有效地改善网络性能。

<sup>1</sup> 2000-10-16 收到, 2001-04-16 定稿

## 2 波长二次重用的双向 WDM 星形单跳网结构

具有波长二次重用特性的双向 WDM 星形单跳网的实现, 主要通过多个耦合器、可调波长选择路由器 (Tunable Wavelength Router, TWR)<sup>[1,7,8]</sup> 和光放大器 (Optical Amplifier, OA)<sup>[7,9]</sup> 等器件的合理连接构成。其中, 可调波长选择路由器起着关键作用。下面先就可调波长选择路由器的基本原理作简单介绍; 然后论述波长二次重用的双向网的结构体系。

### 2.1 可调波长选择路由器

可调波长选择路由器的基本原理如图 2 所示<sup>[1,7,8]</sup>, 图 2(a) 为可调波长选择路由器的基本单元—— $2 \times 2$  可调波长选择路由器<sup>[1,7]</sup>, 它有两个输入端 ( $P$  与  $Q$ ) 和两个输出端, 两个输出端输出波长的选择由控制系统决定, 所有被选定的波长, 其路由为交叉路由; 剩下未被选定的波长, 其路由为直通过路由。图中, 两输入端  $P$  和  $Q$  的第 1, 4 波长被选定, 它们的路由为交叉路由, 而第 2, 3 波长未被选定, 它们的路由为直通过路由。本文中所使用的  $1 \times 3$  可调波长选择路由器如图 2(b) 所示<sup>[1,8]</sup>, 它有一个输入端  $P$  和三个输出端: 1, 2 和 3; 图中第 2, 4 波长未被控制系统选定, 它们从输出端 1 输出; 第 1, 3 波长和第 5 波长被控制系统同时选定, 它们分别从输出端 2 和 3 输出。

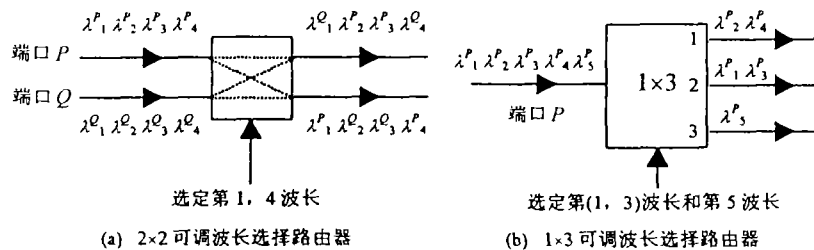


图 2 可调波长选择路由器原理

### 2.2 网络结构

波长二次重用的双向 WDM 星形单跳网结构如图 3 所示, 它主要由 3 个  $N \times 5$  耦合器、3 个  $1 \times 2$  可调波长选择路由器、3 个光放大器 (一般为 EDFAs) 和控制系统等连接构成。每个  $N \times 5$  耦合器提供一边的 5 个端口用于各器件之间的相互连接及与控制系统相连; 每个节点仅仅通过一根光纤与中心耦合器 (3 个  $N \times 5$  耦合器) 的一个端口相连; 整个网络所支持的节点数为  $3N$ 。这样, 该网络所支持的节点数达到常规 WDM 星形网的 3 倍。网络中, 每个节点配置两个收发机: 一个数据信道专用全频可调收发机 (即一个可调波长发射机<sup>[7,10]</sup> 和一个可调波长接收机<sup>[7,11]</sup>) 和一个控制信道专用固定波长收发机 (即一个固定波长发射机和一个固定波长接收机)。每个节点发送数据时, 其发射机调至哪个波长以及接收数据的接收机采用哪个波长均由控制系统决定。网络中设置一个固定的控制信道专用波长 ( $\lambda_K$ ), 为了充分利用 EDFA 带宽内有限的控制信道波长, 控制信道波长可采用带外波长方式; 欲发送数据的各节点向控制系统发出通信请求及控制系统向各节点发送同步控制指令均使用这个控制信道专用波长 ( $\lambda_K$ )。图中有 3 个反馈回路, 反馈回路 1 的作用在于: 使得与耦合器 1# 直接相连的  $N$  个节点之间的通信成为可能; 反馈回路 2, 3 有类似的作用。每个  $N \times 5$  耦合器都将其一边的 5 个端口中的一个与控制系统相连, 用于各节点通过控制信道向控制系统发出通信请求和控制系统向各节点发送控制指令。控制系统根据网络中各节点的通信请求状况, 将整个网络的数据信道波长分成  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  和  $\lambda_3$  3 个波长组, 发出同步指令, 使得 3 个可调波长选择路由器作出相应的参数设置且同

步运行; 以便  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  和  $\lambda_3$  3 个波长组顺利地从其相应的 1, 2 和 3 端口输出。同时, 网络中各通信节点通过各自的控制信道接收机接收到来自控制系统的控制指令, 也同步地将各自的数据信道全频可调收发机调至相应指定的波长进行通信。

从图 3 可以看出, 该网络是一个具有波长二次重用特性的双向 WDM 星形单跳网。

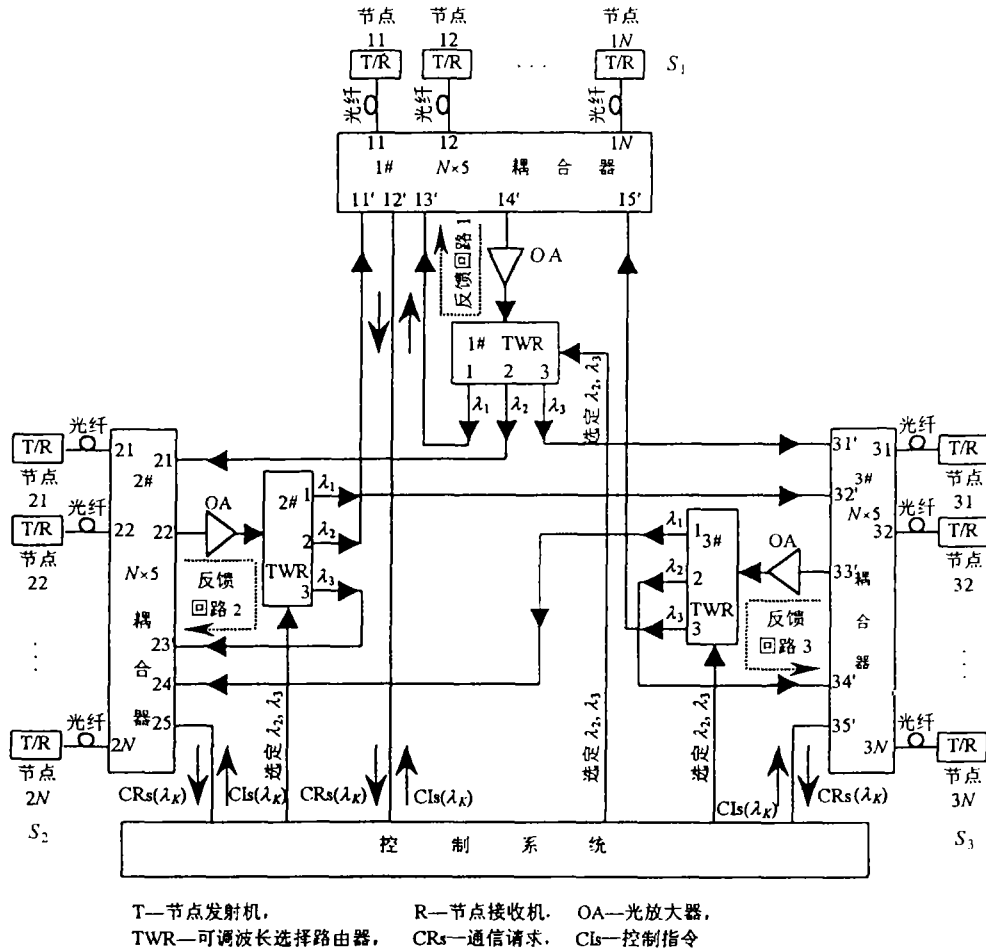


图 3 波长二次重用的双向 WDM 星形单跳网结构

### 3 网络数据波长的二次重用特性

网络中, 将  $3N$  个节点分成 3 个节点集 ( $S$ ), 设与耦合器 1# 相连的  $N$  个节点为第 1 节点集 ( $S_1$ ), 相应地有第 2 节点集 ( $S_2$ ) 和第 3 节点集 ( $S_3$ ), 如图 3 所示。由于通信既可在每个节点集内部各节点之间发生, 也可在任意两节点集之间的各节点之间发生, 因而又将每个节点集分为 3 个节点组。设  $S_1$  中, 仅与自身  $S_1$  内部其它节点发生通信的节点为第 11 节点组 ( $G_{11}$ ), 仅与  $S_2$  中的节点发生通信的各节点为第 12 节点组 ( $G_{12}$ ), 仅与  $S_3$  中的节点发生通信的各节点为第 13 节点组 ( $G_{13}$ )。同理,  $S_2$  中, 仅与自身  $S_2$  内部其它节点发生通信的节点为第 22 节点组 ( $G_{22}$ ), 仅与  $S_1$  中的节点发生通信的各节点为第 21 节点组 ( $G_{21}$ ), 仅与  $S_3$  中的节点发

生通信的各节点为第 23 节点组 ( $G_{23}$ )。  $S_3$  中, 仅与自身  $S_3$  内部其它节点发生通信的节点为第 33 节点组 ( $G_{33}$ ), 仅与  $S_1$  中的节点发生通信的各节点为第 31 节点组 ( $G_{31}$ ), 仅与  $S_2$  中的节点发生通信的各节点为第 32 节点组 ( $G_{32}$ ); 如图 4 所示。设整个网络可使用的数据信道波长数为  $m$ , 因网络的整个数据信道波长分成  $\lambda_1, \lambda_2$  和  $\lambda_3$  3 个波长组, 令其相应的波长数为  $a, b$  和  $c$ ; 则有  $m = a + b + c$ ,  $0 \leq a, b, c \leq m$ 。

数据波长的二次重用。如图 4 所示, 通信时,  $\lambda_1$  波长组可同时用于  $G_{11}$  节点组内部各节点之间的通信,  $G_{23}$  节点组向  $G_{32}$  节点组发送数据以及  $G_{32}$  节点组向  $G_{23}$  节点组发送数据;  $\lambda_2$  波长组可同时用于  $G_{22}$  节点组内部各节点之间的通信,  $G_{12}$  节点组向  $G_{21}$  节点组发送数据以及  $G_{21}$  节点组向  $G_{12}$  节点组发送数据;  $\lambda_3$  波长组可同时用于  $G_{33}$  节点组内部各节点之间的通信,  $G_{31}$  节点组向  $G_{13}$  节点组发送数据以及  $G_{13}$  节点组向  $G_{31}$  节点组发送数据。如此,  $\lambda_1, \lambda_2$  和  $\lambda_3$  波长组都得到二次重用, 即网络中每一个数据信道波长可被网络中的 3 个节点同时使用; 因此, 网络的最大吞吐量是图 1 中常规 WDM 星形网的 3 倍。这时, 欲通信的某节点对数据信道波长使用权的竞争只局限于本组节点内部波长使用权的竞争, 该节点不得使用相应波长组之外的波长发送数据。值得注意的是: 网络中各节点之间的通信情况是动态变化的, 因此, 每节点组中节点的数量及具体由哪些节点构成等也都是动态变化的; 此外, 由于网络的整个数据信道波长 ( $m$ ) 分成  $\lambda_1, \lambda_2$  和  $\lambda_3$  3 个波长组, 所以, 每个波长组中的波长数及具体由那些波长组成也都是动态变化的。但是, 所有这些变化均受控制系统控制, 由控制系统根据当时网络中各节点的通信情况决定。

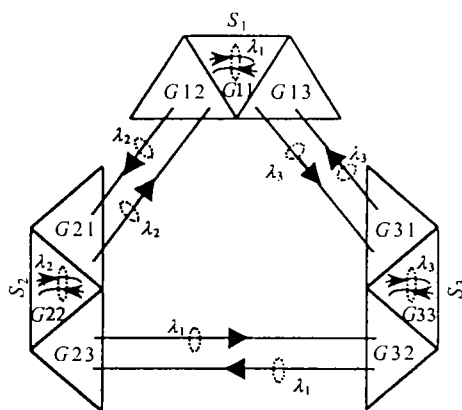


图 4 波长二次重用及节点分组示意图

从以上分析可知, 该组网方法使得网络所支持的节点数达到常规 WDM 星形网的 3 倍; 通过网络中所有数据信道波长的二次重用, 网络最大吞吐量也达到常规 WDM 星形网的 3 倍。在网络节点数不变时, 不仅可节省一半的光纤 (因每个节点仅通过一根光纤与中心耦合器相连), 而且通过所有数据信道波长的二次重用, 可大大减少网络中各通信节点的排队时延, 缓和各通信节点对数据信道波长使用权的竞争矛盾, 有效地改善网络性能。

#### 4 对光放大器的要求

波长二次重用的双向 WDM 星形单跳网的实现, 光放大器 (OA) 起着十分重要的作用, 它的性能 (如: 增益、输出功率和带宽等) 直接影响着网络对各节点发射机输出功率及接收机灵敏度的要求。为了简化讨论, 假设信息传输过程中信息从源节点到目的节点的光纤长度均取网络

中两节点光纤长度的最大值。这样, 根据图 3 所示结构的对等性可知, 网络中任意两节点之间的信息传输损耗均相同。下面以信息从节点 11 传输到节点 21 为例, 来分析对光放大器的增益和输出功率的要求。

#### 4.1 增益

考虑到每个节点仅通过一根光纤与耦合器的一个端口相连, 为了将节点发射机的输出光信号耦合到光纤中传给  $N \times 5$  耦合器以及将来自  $N \times 5$  耦合器的光信号耦合到节点的接收机中, 同时也使发射机和接收机之间得到良好的隔离, 需要在每个节点处增加一个  $Y$  形耦合器 (即  $1 \times 2$  耦合器)<sup>[8]</sup>。设  $N \times 5$  耦合器的分配损耗为  $L_{1S}$ , 附加损耗为  $L_{1X}$ , 功率损耗为  $L_1$ ;  $1 \times 2$  耦合器的分配损耗为  $L_{2S}$ , 附加损耗为  $L_{2X}$ , 功率损耗为  $L_2$ ; 各可调波长选择路由器的损耗相同为  $L_3$ ; 网络中具有最大光纤长度的两节点间光纤损耗为  $L_D$ ; 网络系统的冗余度为  $L_M$ ; 若各种损耗均以百分损耗计算, 则易推得:  $L_{1S} = 1 - N^{-1}$ ,  $L_{2S} = 1 - 2^{-1}$ ;  $L_1 = 1 - (1 - L_{1S})(1 - L_{1X})$ ,  $L_2 = 1 - (1 - L_{2S})(1 - L_{2X})$ ; 所以, 以下等式成立:

$$1 - L_1 = N^{-1}(1 - L_{1X}) \quad (1)$$

$$1 - L_2 = 2^{-1}(1 - L_{2X}) \quad (2)$$

设图 3 中网络所要求的光放大器增益为  $G$ ; 节点 11 的发射机输出功率为  $P_T$ , 节点 21 的接收机灵敏度为  $P_R$ ; 由此可推得

$$P_R = GP_T(1 - L_1)^2(1 - L_2)^2(1 - L_3)(1 - L_D)(1 - L_M) \quad (3)$$

将 (1), (2) 式代入 (3) 式即可得光放大器的增益  $G$  为

$$G = \frac{4N^2 P_R}{P_T(1 - L_{1X})^2(1 - L_{2X})^2(1 - L_3)(1 - L_D)(1 - L_M)} \quad (4)$$

取  $L_{1X} = 1\text{dB}$ ,  $L_{2X} = 0.1\text{dB}$ ,  $L_3 = 3.5\text{dB}$ ,  $L_D = 2\text{dB}$ ,  $L_M = 3\text{dB}$ ,  $P_R = -30\text{ dBm}$  和  $P_T = 0\text{dBm}$ ; 则当  $N = 64$  时,  $G = 22.8\text{dB}$ ; 当  $N = 128$  时,  $G = 28.9\text{dB}$ 。

#### 4.2 输出功率

设光放大器的输出功率为  $P_{\text{out}}$ , 输入功率为  $P_{\text{in}}$ ; 取节点 11 到端口 11 的连接光纤长度是网络中两节点间最大光纤长度的一半, 则易推得  $P_{\text{in}} = (1 - L_1)(1 - L_2)(1 - L_D)^{1/2}P_T$ , 而根据定义有  $P_{\text{out}} = GP_{\text{in}}$ ; 所以光放大器的输出功率  $P_{\text{out}}$  为

$$P_{\text{out}} = GP_T(1 - L_1)(1 - L_2)(1 - L_D)^{1/2} \quad (5)$$

将 (1), (2) 式及 (4) 式代入 (5) 式, 即可得光放大器的输出功率  $P_{\text{out}}$  为

$$P_{\text{out}} = \frac{2NP_R}{(1 - L_{1X})(1 - L_{2X})(1 - L_3)(1 - L_D)^{1/2}(1 - L_M)} \quad (6)$$

(6) 式中的光放大器的输出功率是单个数据信道波长情况下的推导结果, 在实际网络通信中,  $m$  个数据信道波长有可能被同时使用; 所以, 光放大器的最大输出功率为

$$P_{\text{out}} = \frac{2mNP_R}{(1 - L_{1X})(1 - L_{2X})(1 - L_3)(1 - L_D)^{1/2}(1 - L_M)} \quad (7)$$

即光放大器的最大输出功率  $P_{\text{max}}$  与  $m$ ,  $N$  的乘积成正比, 随该乘积的增大而增大。可见, 在  $N$  一定的条件下,  $m$  增大时, 若保持  $P_{\text{out}}$  不变, 则  $P_{\text{max}}$  将随  $m$  的增大而线性地增大到光

放大器的饱和输出功率, 如  $m$  需继续增大, 则对光放大器将提出更高的要求; 如  $m$  需继续增大, 而又要保持光放大器的饱和输出功率不变, 则  $P_{\text{out}}$  必然减小, 这样, 将对节点的发射机输出功率和接收机灵敏度提出更高要求; 所以, 光放大器的性能对网络的性能有着十分重要的影响。各参数取值同上, 若  $m = 50$ , 则当  $N = 64$  时,  $P_{\text{max}} = 16.7 \text{ dBm}$ ; 当  $N = 128$ ,  $P_{\text{max}} = 19.7 \text{ dBm}$ 。

## 5 网络的最大节点数

设网络所能支持的最大节点数为  $N_X$ , 光放大器的饱和增益为  $G_{\text{饱和}}$ , 因  $N_X = 3N_{\text{max}}$ ,  $G \leq G_{\text{饱和}}$ , 所以, 据此及 (4) 式即可推得网络的最大节点数  $N_X$  为

$$N_X = \left[ \frac{9G_{\text{饱和}}P_T(1-L_{1X})^2(1-L_{2X})^2(1-L_3)(1-L_D)(1-L_M)}{4P_R} \right]^{1/2} \quad (8)$$

各参数取值同上, 当  $G_{\text{饱和}} = 30 \text{ dB}$  时,  $N_X = 435$ ; 当  $G_{\text{饱和}} = 35 \text{ dB}$  时,  $N_X = 777$ 。

## 6 结 论

以上提出了一种 WDM 星形单跳网的组网新方法——波长二次重用的双向 WDM 星形单跳网。该组网方法使得网络所支持的节点数——网络容量达到常规 WDM 星形网的 3 倍; 网络中的每一信道数据波长都可同时供 3 个节点使用, 因而网络的最大吞吐量也相应达到常规 WDM 星形网的 3 倍。由于每个节点仅通过一根光纤与中心耦合器的一个端口相连, 因而在网络所支持的节点数相同时, 既可节省一半的光纤, 又可大大减轻网络的通信拥塞, 使网络性能得到有效地改善。由此可知, 该组网方法具有较高的实际应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] J. M. H. Elmirghani, H. T. Mouftah, Technologies and architectures for scalable dynamic dense WDM networks, IEEE Commun. Mag., 2000, 38(2), 58-66.
- [2] J. M. Senior, M. R. Handley, M. S. Leeson, Developments in wavelength division multiple access networking, IEEE Commun. Mag., 1998, 36(12), 28-36.
- [3] C. A. Brackett, Foreword is there an emerging consensus on WDM networking? IEEE/OSA J. of Lightwave Tech., 1996, 14(6), 936-941.
- [4] Chang-Joon Chae, H. Park, Y. Park, Hybrid optical star coupler suitable for wavelength reuse, IEEE Photon. Tech. Lett., 1998, 10(2), 279-281.
- [5] M. W. Janoska, T. D. Todd, Coupled reservation protocols for hierarchical single-hop photonic networks, IEE Proc. Commun., 1997, 144(8), 247-256.
- [6] Nen-Fu Huang, Huey-Ing Liu, An isochronous and asynchronous traffic scheduling algorithm for dual-star WDM networks, IEEE/OSA J. of Lightwave Tech., 1996, 14(3), 273-287.
- [7] M. S. Borella, et al., Optical components for WDM lightwave networks, Proc. IEEE, 1997, 85(8), 1274-1307.
- [8] R. D. Feldman, et al., An evaluation of architectures incorporating wavelength division multiplexing for broad-band fiber access, IEEE/OSA J. of Lightwave Tech., 1998, 16(9), 1546-1559.
- [9] P. Freeman, et al., High capacity EDFA with output power to support densely loaded channels, in Proc. Conf. Optic. Fiber Commun. OFC'97, Dallas, TX, Feb. 16~18, 1997, paper WA6.
- [10] M. Zirngibl, Multifrequency lasers and applications in WDM networks, IEEE Commun. Mag., 1998, 36(12), 39-41.

- [11] F. Tong, Multiwavelength receivers for WDM systems, IEEE Commun. Mag., 1998, 36(12), 42-49.

## BIDIRECTIONAL WDM STAR SINGLE-HOP NETWORKS WITH REUSING WAVELENGTHS TWICE

Gan Chaoqin      Zhang Mingde      Sun Xiaohan

(Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract** For enlarging the capacities of WDM star networks free from the number of limited wavelengths, a scheme of reusing wavelengths twice is proposed in this paper. According to the scheme, not only the number of nodes can be increased twice, but also all the data wavelengths can be reused twice in the network and the throughput of the network is increased twice. Under the same number of nodes, not only half of fibers can be saved, but also the delay of network can be greatly lowered and the properties of the network can be efficiently improved.

**Key words** Star network, WDM(Wavelength Division Multiplexing), Wavelength reuse, Network capacities, Gains

甘朝钦: 男, 1963 年生, 博士生, 目前主要从事波分复用, 光交叉连接和多波长全光网的研究.

张明德: 男, 1939 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事光电子技术, 光纤传输和光纤通信网等方面的研究.

孙小茜: 女, 1955 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事光电子技术, 工业控制网和光纤通信网等方面的研究.