

# 波分复用星形单跳网的波长二次重用扩容

甘朝钦, 张明德, 孙小菡  
(东南大学电子工程系, 江苏南京 210096)

**摘要:** 有限的信道波长数严格限制着波分复用星形单跳网容量, 对此, 本文提出了一种波长二次重用和多耦合器内连相结合的组网扩容方法. 和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两倍; 在网络节点数不变的条件下, 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. 此外, 该方法结构简单, 易于实施.

**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:** TN29; TN919.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2002)04-0556-04

## Expanding the Capacities of WDM Star Single-Hop Networks by Reusing Wavelengths Two Times

GAN Chao qin, ZHANG Ming-de, SUN Xiao-han  
(Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

**Abstract:** For expanding the capacities of WDM(Wavelength Division Multiplexing) star networks free from the number of limited wavelengths, a scheme of reusing wavelengths two times is proposed in this paper. According to the scheme, not only the number of nodes can be increased two times, but also all the data wavelengths can be reused two times in the network and the throughput of the network is increased two times. Under the same number of nodes, the delay of network can be greatly lowered and the properties of the network can be efficiently improved. Besides, through the network structure proposed is simple, and the scheme can be easy implemented in practice.

**Key words:** star network; WDM(wavelength division multiplexing); wavelength reuse; network capacities; gains

### 1 引言

在波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)网络中, 当前研究和应用中最受关注的是星形结构<sup>[1,2]</sup>, 常规WDM星形网(如图1所示, 其中:T—节点发射机, R—节点接收机)主要由传输型星形耦合器构成. 它最多能连接 $N$ 个节点. 受星形耦合器所能提供的端口数及网络中有限的信道波长数双重限制, 常规WDM星形网无法支持大量的节点. 一方面, 由于 $N \times N$ 星形耦合器的固有分配损耗特性, 使其无法提供大量的端口数, 从而限制了WDM星形网所支持的节点数. 另一方面, 由于是单跳网, 网络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是十分有限的<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, 信道波长数的多少, 决定着网络容量的大小. 然而, 相对通信业务的需求, 可用的信道波长数总是有限的<sup>[1,3]</sup>. 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.

针对WDM星形单跳网容量受星形耦合器所能提供的端口数及网络中有限的信道波长数双重限制, 本文提出了一个波长二次重用和多耦合器内连相结合的有效解决方法——波长二次重用的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, 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; (4) 结构简单, 易于实施.

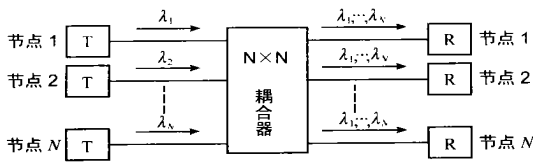


图 1 常规 WDM 星形网组网结构

### 2 波长二次重用的 WDM 星形单跳网结构

波长二次重用的 WDM 星形单跳网结构如图 2 所示。它主要由 3 个  $N \times 2$  耦合器、3 个  $4 \times N$  耦合器、3 个可调多波长选择路由器 (Tunable Wavelength Router, TWR)<sup>[1, 4, 5]</sup>、3 个光放大器 (Optical Amplifier, OA)<sup>[4, 6]</sup> 和控制系统等连接构成。每个  $N \times 2$  耦合器提供一边的 2 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  $4 \times N$  耦合器提供一边的 4 个端口用于各器件之间的相互连接及与控制系统相连; 与图 1 所示的常规 WDM 星形单跳网类似, 每个节点通过两根光纤与中心耦合器 (3 个  $N \times 2$  耦合器和 3 个  $4 \times N$  耦合器) 的一对端口相连; 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 星形网的三倍。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

从图 2 可以看出, 网络的中心部分实际上是一个内连型  $(3N) \times (3N)$  星形耦合器, 所以, 该网络是一个具有波长二次重用特性的 WDM 星形单跳网。

### 3 网络波长的二次重用特性

为了便于分析, 将网络中  $3N$  个节点分成 3 个节点集 ( $S$ ), 设与耦合器 1# 及 1' 相连的  $N$  个节点为第 1 节点集 ( $S1$ ), 与耦合器 2# 及 2' 相连的  $N$  个节点为第 2 节点集 ( $S2$ ), 与耦合器 3# 及 3' 相连的  $N$  个节点为第 3 节点集 ( $S3$ ), 如图 2 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  $S1$  中, 仅与自身  $S1$  内部其它节点发生通信的节点为第 11 组节点 ( $G11$ ), 仅与  $S2$  中的节点发生通信的各节点为第 12 组节点 ( $G12$ ), 仅与  $S3$  中的节点发生通信的各节点为第 13 组节点 ( $G13$ )。同理,  $S2$  中, 仅与自身  $S2$  内部其它节点发生通信的节点为第 22 组节点 ( $G22$ ), 仅与  $S1$  中的节点发生通信的各节点为第 21 组节点 ( $G21$ ), 仅与  $S3$  中的节点发生通信的各节点为第 23 组节点 ( $G23$ )。  $S3$  中, 仅与自身  $S3$  内部其它节点发生通信的节点为第 33 组节点 ( $G33$ ), 仅与  $S1$  中的节点发生通信的各节点为第 31 组节点 ( $G31$ ), 仅与  $S2$  中的节点发生通信的各节点为

可调多波长发射机<sup>[4, 7]</sup>和一个可调多波长接收机<sup>[4, 8]</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, 其发射机调至那个波长以及接收数据的接收机采用那个波长均由控制系统决定。每个  $N \times 2$  耦合器都将其一边的 2 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; 每个  $4 \times N$  耦合器都将其一边的 4 个端口中的一个与控制系统相连, 用于控制系统向各节点发送控制指令。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 带宽内有限的数据信道波长, 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。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  $\lambda^A$ 、 $\lambda^B$  和  $\lambda^C$  三个波长组, 发出同步指令, 使得三个 TWR 作出相应的参数设置且同步运行; TWR 的工作原理为<sup>[1, 4, 5]</sup>: 未被控制系统选定的波长  $\lambda^A$ , 从输出端口 A 输出; 被控制系统分别依次选定的波长  $\lambda^B$  和  $\lambda^C$ , 则分别从相应的输出端口 B、C 输出。与此同时, 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。

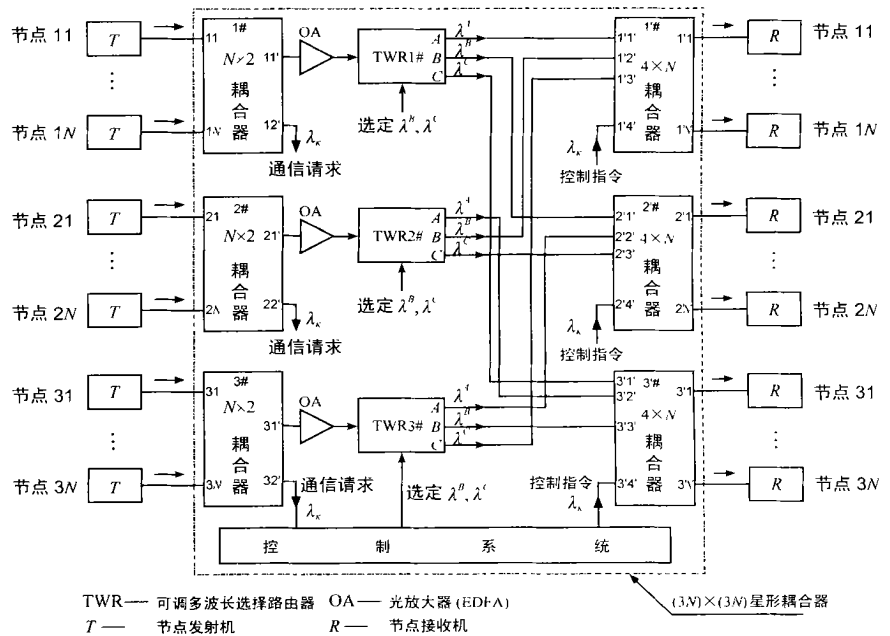


图 2 波长二次重用的 WDM 星形单跳网结构

第 32 组节点 ( $G32$ ), 如图 3 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  $\lambda^A$ 、 $\lambda^B$  和  $\lambda^C$  三个波长组, 令其相应的波长数为  $a$ 、 $b$  和  $c$ ; 则有  $m = a + b + c$ ,  $0 \leq a, b, c \leq m$ 。

波长的二次重用。通信时,  $\lambda^A$  可同时用于  $G11$  组节点内部各节点之间的通信,  $G23$  组节点向  $G32$  组节点发送数据以及  $G32$  组节点向  $G23$  组节点发送数据;  $\lambda^B$  可同时用于  $G22$  组节点内部各节点之间的通信,  $G12$  组节点向  $G21$  组节点发送

数据以及  $G_{21}$  组节点向  $G_{12}$  组节点发送数据;  $\lambda^C$  可同时用于  $G_{33}$  组节点内部各节点之间的通信,  $G_{31}$  组节点向  $G_{13}$  组节点发送数据以及  $G_{13}$  组节点向  $G_{31}$  组节点发送数据. 如此,  $\lambda^A$ 、 $\lambda^B$  和  $\lambda^C$  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三个节点同时使用(如图 3). 因此, 网络的最大吞吐量是常规 WDM 星形网的三倍. 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不断变化的, 因此, 每组节点中节点的数量及具体由那些节点构成等都是动态变化的. 由于网络的整个数据信道波长 ( $m$ ) 分成  $\lambda^A$ 、 $\lambda^B$  和  $\lambda^C$  三个波长组, 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.

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 星形网的三倍; 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 星形网的三倍. 在网络节点数不变时, 通过波长的二次重用, 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.

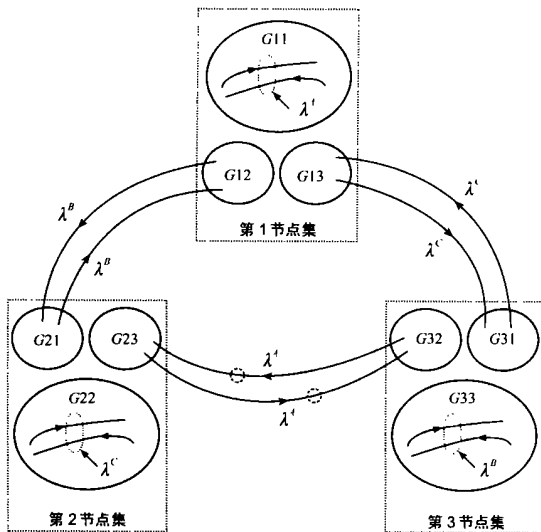


图 3 波长二次重用及节点分组示意图

## 4 对光放大器的要求

波长二次重用的 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 2 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

假定耦合器 ( $N \times 2$ ) 和 ( $4 \times N$ ) 有相同的内部结构(如: 它们都由  $\log_2 N$  级  $2 \times 2$  耦合器阵列构成<sup>[9]</sup>), 则每个耦合器的各种相应参数均相同. 设  $N \times 2$  耦合器的分配损耗为  $L_{1S}$ , 附加损耗为  $L_{1X}$ , 功率损耗为  $L_1$ ; 三个可调多波长选择路由器的损耗相同为  $L_2$ ; 网络中具有最大光纤长度的两节点间光纤损耗为  $L_D$ ; 网络系统的富裕度为  $L_M$ ; 若各种损耗均以百分损耗计算; 则易推得:  $L_{1S} = 1 - N^{-1}$ ,  $L_1 = 1 - (1 - L_{1S})(1 - L_{1X})$ ; 所以以下等式成立

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

设图 2 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:

$$P_R = G * P_T * (1 - L_1)^2(1 - L_2)(1 - L_D)(1 - L_M) \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)即可得光放大器的增益  $G$  为:

$$G = \frac{N^2 P_R}{P_T(1 - L_{1X})^2(1 - L_2)(1 - L_D)(1 - L_M)} \quad (3)$$

由上式可知, 光放大器的增益  $G$  与  $N^2$  成正比, 随  $N^2$  的增大而增大. 若取  $L_{1X} = 1\text{dB}$ ,  $L_2 = 3.5\text{dB}$ ,  $L_D = 2\text{dB}$ ,  $L_M = 3\text{dB}$ ,  $P_T = 0\text{dBm}$  和  $P_R = -30\text{dBm}$ ; 则: 当  $N = 64$  时,  $G = 16.6\text{dB}$ ; 当  $N = 128$  时,  $G = 22.6\text{dB}$ ; 当  $N = 256$  时,  $G = 28.7\text{dB}$ .

### 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, 且其光纤损耗为  $L_D^1$ , 则易推得:  $P_{\text{in}} = (1 - L_1)(1 - L_D^1)P_T$ , 而根据定义有:  $P_{\text{out}} = G * P_{\text{in}}$ ; 所以光放大器的输出功率  $P_{\text{out}}$  为:

$$P_{\text{out}} = G * P_T * (1 - L_1)(1 - L_D^1) \quad (4)$$

将式(1)、(3)代入式(4), 即可得光放大器的输出功率  $P_{\text{out}}$  为:

$$P_{\text{out}} = \frac{NP_R}{(1 - L_{1X})(1 - L_2)(1 - L_D^1)(1 - L_M)} \quad (5)$$

式(5)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:

$$P_{\text{max}} = m * P_{\text{out}} \quad (6)$$

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. 取  $L_D^1 = 1\text{dB}$ , 其它各参数取值同上, 若  $N = 64$ , 则当  $m = 50$  时,  $P_{\text{max}} = 13.6\text{dBm}$ ; 当  $m = 100$  时,  $P_{\text{max}} = 16.6\text{dBm}$ . 若  $N = 128$ , 则当  $m = 50$  时,  $P_{\text{max}} = 16.6\text{dBm}$ ; 当  $m = 100$  时,  $P_{\text{max}} = 19.6\text{dBm}$ . 若  $N = 256$ , 则当  $m = 50$  时,  $P_{\text{max}} = 19.6\text{dBm}$ ; 当  $m = 100$  时,  $P_{\text{max}} = 22.6\text{dBm}$ .

### 5 网络的最大节点数

设网络所能支持的最大节点数为  $N_{\text{节点max}}$ , 光放大器的饱

和增益为  $G_{\text{饱和}}$ , 因  $N_{\text{节点max}} = 3N_{\text{max}}$ ,  $G \leq G_{\text{饱和}}$ , 所以, 据此及式

(3) 即可推得网络的最大节点数  $N_{\text{节点max}}$  为:

$$N_{\text{节点max}} = \left[ \frac{9G_{\text{饱和}}P_T(1-L_1)^2(1-L_2)(1-L_D)(1-L_M)}{P_R} \right]^{1/2} \quad (7)$$

若各参数取值同上, 则当  $G_{\text{饱和}} = 30\text{dB}$  时,  $N_{\text{节点max}} = 894$ ; 当  $G_{\text{饱和}} = 35\text{dB}$  时,  $N_{\text{节点max}} = 1590$ .

## 6 网络的最大信道波长数

波长二次重用的 WDM 星形单跳网中可利用的信道波长数主要由光放大器的性能(如饱和特性、带宽等)决定, 下面仅就光放大器的饱和特性对网络可利用信道波长数的限制问题进行讨论. 设光放大器的饱和输出功率为  $P_{\text{饱和}}$ , 由于  $P_{\text{max}} \leq P_{\text{饱和}}$ ,  $G \leq G_{\text{饱和}}$ , 由此及式(3)、(6)即可推得网络可利用的最大信道波长数  $m_{\text{max}}$  为:

$$m_{\text{max}} = \left[ \frac{P_{\text{饱和}}^2(1-L_2)(1-L_M)}{G_{\text{饱和}}P_T P_R} \right]^{1/2} \quad (8)$$

若取  $G_{\text{饱和}} = 30\text{dB}$ , 其它参数取值同上; 则当  $P_{\text{饱和}} = 20.0\text{dBm}$  时,  $m_{\text{max}} = 47$ ; 当  $P_{\text{饱和}} = 23.0\text{dBm}$  时,  $m_{\text{max}} = 94$ ; 当  $P_{\text{饱和}} = 26.0\text{dBm}$  时,  $m_{\text{max}} = 188$ .

## 7 结论

本文提出了一个波长二次重用和多耦合器内连相结合的 WDM 星形单跳网组网扩容方法: 波长二次重用的 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 星形网的三倍; 网络中的所有数据信道波长都得到二次重用, 因而网络的最大吞吐量也达到常规 WDM 星形网的三倍; 在网络节点数不变的条件下, 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. 此外, 该网络结构简单, 易于实现. 由上可知, 该组网方法具有较高的实际应用价值.

## 参考文献:

- [ 1 ] Jaafar M H Elmoghani, Hussen T Moufah. Technologies and architectures for scalable dynamic dense WDM networks [ J ]. IEEE Commun Mag, 2000, 38(2): 58-66.

- [ 2 ] John M Senior, Michael R Handley, Mark S Leeson. Developments in wavelength division multiple access networking [ J ]. IEEE Commun Mag, 1998, 36(12): 28-36.
- [ 3 ] Charles A Brackett. Foreword is there an emerging consensus on WDM networking? [ J ]. IEEE J Lightwave Tech, 1996, 14(6): 936-941.
- [ 4 ] M S Borella, et al. Optical components for WDM lightwave networks [ J ]. IEEE Proc, 1997, 85(8): 1274-1307.
- [ 5 ] Robert D Feldman, Senior Member, IEEE, et al. An evaluation of architectures incorporating wavelength division multiplexing for broad band fiber access [ J ]. IEEE/OSA J Lightwave Tech, 1998, 16(9): 1546-1559.
- [ 6 ] Paul Freeman, et al. High capacity EDFA with output power to support densely loaded channels [ A ]. Proc Conf Optic Fiber Commun OFC 97 [ C ]. Dallas: TX, 1997.
- [ 7 ] Martin Zimgibl. Multifrequency lasers and applications in WDM networks [ J ]. IEEE Commun Mag, 1998, 36(12): 39-41.
- [ 8 ] Frank Tong. Multiwavelength receivers for WDM systems [ J ]. IEEE Commun Mag, 1998, 36(12): 42-49.
- [ 9 ] Ting Kuang Chiang, Sanjay K Agrawal, et al. Implementation of STARTNET: A WDM computer communications network [ J ]. IEEE J Selected Areas Commun, 1996, 14(5): 824-838.

## 作者简介:



甘朝钦 男, 1963 年生于江西省奉新县, 1990 年获江西师范大学物理专业学士学位, 1998 年获东南大学电子材料与元器件专业硕士学位, 现为东南大学物理电子学与光电子学专业博士研究生, 主要从事波分复用、波分复用局域网结构、光交叉连接和全光网的研究工作; 目前, 已在 IEEE 等国际、国内核心期刊上发表论文十余篇.