

文章编号 : 0253-2239(2001)09-1123-05

新型大规模全光星形耦合器

甘朝钦 孙小菡 张明德

(东南大学电子工程系 , 南京 210096)

摘要 : 提出了一种新型大规模全光星形耦合器。这种星形耦合器不但能提供巨大的端口数 , 而且由其构成的波分复用(WDM)星形网具有极大的组网灵活性 , 能方便地实现网络的在线扩容、升级 , 满足未来超大规模双向波分复用网络系统的需求 , 同时也适用于目前广泛应用的单向波分复用网络系统。

关键词 : 星形耦合器 ; 反馈回路 ; 连接通路 ; 分配比 ; 增益

中图分类号 : TN915.02 文献标识码 : A

1 引 言

随着社会经济的不断发展 , 各行各业对通信的需求量急剧增长 , 原有通信系统的低容量已成为当前和未来信息业务发展的“瓶颈”。为了解决这一问题 , 除急需对原有光纤传输系统进行扩容、升级改造外 , 还需要建设新的高速、大容量通信网络。波分复用(WDM , wavelength division multiplexing)技术以其所具有的优异特征 , 成为最佳的技术选择 , 波分复用网络正在迅速推广。为了与未来社会的发展相适应 , 波分复用网络要实现的目标是 : 建立一个具有数百甚至数千个节点、对数据格式具有透明性的超大容量全光通信网络。

波分复用网络的物理拓扑结构有 : 星形、总线形、环形和树形等。目前研究及应用最多的是星形结构。当前应用最广泛的波分复用星形网是由传输型星形耦合器构成的 , 其星形耦合器的每对端口连接一个节点 , 其中一个端口输入该节点发送的信息 , 另一端口输出往该节点的信息 , 一个 $N \times N$ 星形耦合器可连接 N 个节点 , 是一个单纤单向波分复用系统 , 星形网所能容纳的节点数——网络容量 , 由星形耦合器的端口数决定。在这种网络中 , 由于单个星形耦合器所能提供的端口数有限 , 限制了网络容量 , 使其不能满足网络规模不断扩大的需求 ; 另外 , 由于光信号仅在星形耦合器中单向传输 , 没能利用无源对称传输型星形耦合器为可逆性光器件这一重要特性。为了扩大网络容量 , 解决星形耦合器的端口数有限问题 , 人们做了大量工作 , 也取得了一定的进展^[1-3]。在文献 [1, 2] 中 , 通过多个耦合器的组合 , 虽

然增加了网络所连接的节点数 , 但网络容量仍然十分有限 ; 在文献 [3] 中 , 由其构成的网络虽能提供大的网络容量 , 但所用光放大器太多 , 网络成本过高 , 性能价格比太低 , 并且它仅适用于单纤单向波分复用网络系统。为了克服上述缺陷 , 本文充分利用无源对称传输型星形耦合器为可逆性光器件这一重要特性 , 提出了一种新的大规模全光星形耦合器 , 它不但能提供巨大的端口数 , 而且由其构成的波分复用网络具有极大的组网灵活性 , 可方便地实现网络的在线扩容、升级 , 满足未来超大规模单纤双向波分复用网络系统的需求 ; 并同时适用于目前广泛应用的单纤单向波分复用网络。

文章首先介绍了这种大规模全光星形耦合器的结构 , 分析了它的性能 , 然后对其结构中所要求的功率分路器分配比进行了计算 ; 最后计算了其结构中所要求的光放大器的增益和功率。

2 大规模全光星形耦合器结构

大规模全光星形耦合器结构如图 1 所示 , 它是由一个 $(m+2) \times (m+2)$ 星形耦合器、 m 个 $N \times N$ 星形耦合器及其它器件构成的对称传输型 $[m(N-2)] \times [m(N-2)]$ 星形耦合器。它大大扩展了原有星形耦合器的端口数 , 并保留了光可逆性特征 , 每个端口既可作输入又可作输出 , 能满足单纤双向波分复用星形网的需要。在单纤双向大容量波分复用星形网中 , 星形耦合器的每个端口通过一根光纤连接一个节点 , 一般每个节点的收发器采用固定发射机 / 可调接收机方式^[4] , 即每个节点发射机顺次发射唯一固定的波长 , 可调接收机根据需要能接收网中任意一节点所发射的波长。图中 I/O 为星形耦合器输

入/输出端口,端口 $13 \sim 1N$ 为第 1 组端口(G_1)对应输入的波长为第 1 组波长 λ_{G1} ;同理有第 2、...、 $m, 1', \dots, m'$ 组端口,及相应的 $\lambda_{G2}, \dots, \lambda_{Gm}, \lambda_{G2'}, \dots, \lambda_{Gm'}$ 波长组; λ_{ij} 代表第 $i(1 \leq i \leq m)$ 组端口中,第 $j(3 \leq j \leq N)$ 个端口输入的波长;OA1、OA2 为光放大器,一般为宽带掺铒光纤放大器(EDFA); $1 \times (m+1)$ 为功率分路器,它将功率按一定分配比例输出,并使进入各 $N \times N$ 星形耦合器端口的功率相等;BPF1、BPF2、...、BPF m , BPF1', BPF2', ...、BPF m'

及 BPF1', 2', ... , m')和(BPF1', 2', ... , m')为带通滤波器;带通滤波器 BPF1 只允许第 1 组波长 λ_{G1} 通过,阻止其它组波长通过;带通滤波器(BPF1', 2', ... , m')只允许第 1、...、 m 组波长 $\lambda_{G1}, \dots, \lambda_{Gm}$ 通过,阻止其它组波长通过;其余可同理类推。BSF1、BSF2、...、BSF m , BSF1', BSF2', ...、BSF m' 为带阻滤波器;带阻滤波器 BSF1 阻止第 1 组波长 λ_{G1} 通过,允许其它组波长通过;其余可同理类推。

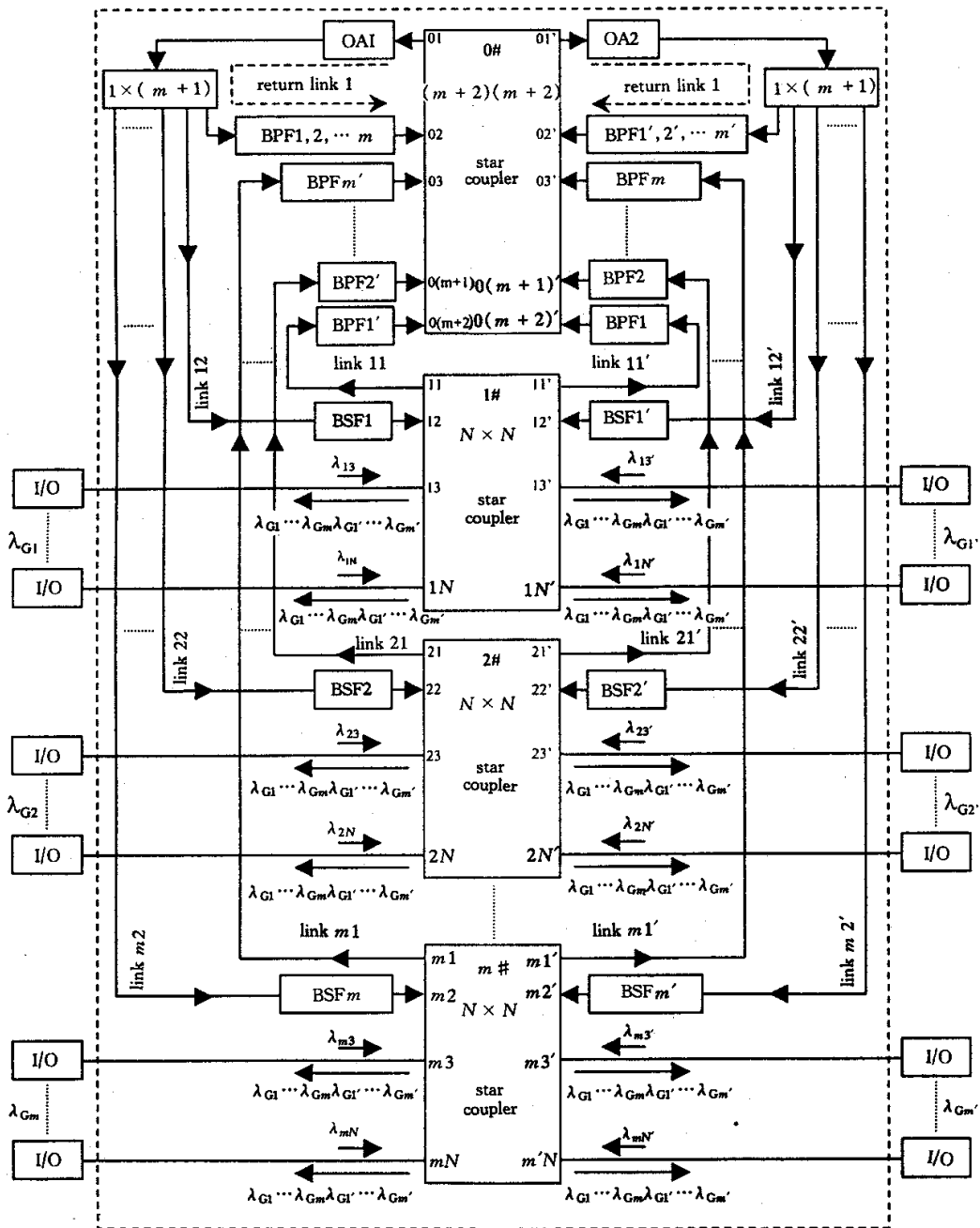


Fig. 1 The structure of large-scale all-optical $[m(N-2)] \times [m(N-2)]$ star coupler

该大规模全光星形耦合器结构分为四部分：1) 中间部分为 1 个 $(m+2) \times (m+2)$ 星形耦合器和 m 个 $N \times N$ 星形耦合器。它们均为无源对称传输型星形耦合器，其中耦合器 $0^\#$ 为连接耦合器，它的 2 对端口用于构成自身的反馈回路及与其它耦合器之间的连接通路，另外 m 对端口用于与 m 个 $N \times N$ 星形耦合器构成连接通路；这 m 个 $N \times N$ 星形耦合器都处于同等地位，它们各自将 2 对端口分别用于与星形耦合器 $0^\#$ 构成连接通路，但彼此之间并未直接相连，在各自的其余 $(N-2)$ 对端口中，每个端口连接 1 个节点，这样，每个星形耦合器可连接 $\chi(N-2)$ 个节点，同时与其它 $(m-1)$ 个 $N \times N$ 星形耦合器并行连接。2) 端口。共有 $2m(N-2)$ 组端口在双向波分复用星形网中，每个端口既作输入又作输出，可连接一个节点。3) 反馈回路。耦合器 $0^\#$ 的两边各有一个互相对称的反馈回路，反馈回路 1 由端口 01 、光放大器(OA1)、功率分路器 $[1 \times (m+1)]$ 、带通滤波器(BPF1, 2, ..., m)和端口 02 构成；反馈回路 2 的结构类似。下面以反馈回路 1 及第 1、1' 组端口为例来说明反馈回路的作用。由于第 1 组端口中任何一个端口可将信息发向第 1' 组端口中的所有端口，但却不能发向同是第 1 组端口中的另外 $(N-3)$ 个端口，同时，第 1 组端口中的任何一个端口可收到来自第 1' 组端口中所有端口的信息，但却无法收到来自同是第 1 组端口的另外 $(N-3)$ 个端口的信息。为此，在星形耦合器 $0^\#$ 的两边，各留有两个端口，分别形成了两个反馈回路 1、2。第 1 组端口中第 j 个端口 1_j 输入的信息进入星形耦合器 $1^\#$ 后再从端口 $11'$ 输出，经连接通路 $11'$ 从端口 $(m+2)$ 输入到耦合器 $0^\#$ 并经其从端口 01 输出，经反馈回路 1 将信息再反馈回耦合器 $0^\#$ 中，再经其从端口 $01'$ 输出，经连接通路 $12'$ 进入端口 $12'$ 而回到耦合器 $1^\#$ 中，由此即可将信息发向第 1 组端口中的其它 $(N-3)$ 个端口，同理，反馈回路 2 起类似的作用。为了避免产生循环反馈形成振荡及滤除带外的放大自发发射(ASE)，在每个反馈回路中分别接入了一个光带通滤波器。考虑到反馈回的光波要多次通过耦合器而存在功率损耗及光滤波器的插入损耗，在每个反馈回路中分别接入了一个光放大器进行功率补偿。4) 连接通路。将 m 个 $N \times N$ 星形耦合器连接到耦合器 $0^\#$ 的连接通路共有 $4m$ 条，即每个 $N \times N$ 星形耦合器通过 4 条连接通路与耦合器 $0^\#$ 相连，以星形耦合器 $1^\#$ 为例：连接通路 12 由端口 01 、光放大器(OA1)、功率分路器 $[1 \times (m+1)]$ 、带通滤波器

(BPF1, 2, ..., m)、带阻滤波器(BSF1)和端口 12 构成。其它的连接通路结构类似，它们的作用是显然的。

从上述大规模全光 $[m(N-2)] \times [m(N-2)]$ 星形耦合器的结构易见，由其构成的波分复用星形网的优点在于：1) 充分利用了星形耦合器为可逆性光器件这一重要特性，使同一星形耦合器所连节点数增加了近一倍；2) 通过多个星形耦合器的组合连接，能最大限度地扩展网络容量，方便、平滑地对网络进行扩容、升级，满足通信业务的目前和未来的发展需要；这样，能有效地解决网络容量问题。3) 它不仅能提供巨大的网络容量，且由于其只需用两个光放大器而大大降低了网络成本，有效地提高了网络的性能价格比。

3 性能分析

下面就各端口之间的信息传输情况进行分析。

3.1 第 1 组端口内部任意两端口之间的信息传输

设第 1 组端口中从第 j ($3 \leq j \leq N$) 个端口 1_j 输入的波长为 λ_{1j} ，从第 k ($3 \leq k \leq N, k \neq j$) 个端口 1_k 输入的波长为 λ_{1k} ；从端口 1_j 输入的光载波 λ_{1j} 经星形耦合器 $1^\#$ 后从端口 $11'$ 输出，过连接通路 $11'$ 从端口 $(m+2)$ 输入到耦合器 $0^\#$ ，然后从端口 01 输出，由反馈回路 1 将光载波 λ_{1j} 再反馈回耦合器 $0^\#$ 中，再从端口 $01'$ 输出，经过连接通路 $12'$ 从端口 $12'$ 再回到耦合器 $1^\#$ 中，由此即可将光载波 λ_{1j} 传送到端口 1_k ；同理，从端口 1_k 输入的光载波 λ_{1k} 亦可传至端口 1_j ；因此，第 1 组端口内部任意两端口之间可相互进行信息传输。同理，其余各组端口中，各自内部任意两端口之间亦可相互进行信息传输。

3.2 第 1 组端口与第 1' 组端口之间的信息传输

由于是传输型星形耦合器，因此，两组端口之间的信息传输没有任何困难，这里不再详述。第 m 组端口与第 m' 组端口之间的信息传输亦可同理类推。

3.3 第 1 组端口与第 m 组端口之间的信息传输

从端口 1_j 输入的光载波 λ_{1j} 经与它直接相连的星形耦合器 $1^\#$ 进入连接通路 $11'$ ，并进入星形耦合器 $0^\#$ ，再由耦合器 $0^\#$ 传至与其相连的反馈回路 1，经反馈后，光载波 λ_{1j} 再次通过耦合器 $0^\#$ ，且由此进入连接通路 $m2'$ ，最后到达星形耦合器 $m^\#$ ，并传至第 m 组端口中的端口 mn ($3 \leq n \leq N$)。同理，从端口 mn 输入的光载波 λ_{mn} 亦可到达端口 1_j ；因此，第

1 组端口中任一端口与第 m 组端口中任一端口之间可相互进行信息传输。同理,第 1' 组端口中任一端口与第 m' 组端口中任一端口亦可相互进行信息传输。

第 1 组端口与第 m' 组端口之间的信息传输与此类似。

由上可知,大规模全光 $[m(N-2)] \times [m(N-2)]$ 星形耦合器中任意两端口之间均可相互进行信息传输,它充分利用并保留了原有 $N \times N$ 星形耦合器为可逆性光器件的特性,对大容量双向波分复用星形网而言,是一较理想的选择器件,自然也适用于单向波分复用星形网等其它通信系统。从图 1 可知,这种星形耦合器还有一个十分重要的特点:只要 $1 \times (m+1)$ 功率分路器预留足够的端口数,则由其构成的波分复用星形网就可根据需要轻易地实现网络的在线扩容、升级,因而具有极大的组网灵活性,这在实际应用中具有十分重要的意义。

4 功率分路器的分配比

在这种大规模全光星形耦合器中, m 个 $N \times N$ 星形耦合器是核心部件,而光功率分路器、光放大器等也起重要作用。图 1 中,有两个相同的 $1 \times (m+1)$ 功率分路器,它们的作用也相同;为使 m 个 $N \times N$ 星形耦合器中与节点相连的每个端口输出的功率相同,功率分路器的分配比应适当设置,下面就两功率分路器的分配比要求进行分析。

设从与节点相连的某端口输入的光功率为 P_0 ,功率分路器 $1 \times (m+1)$ 的附加损耗为 L_{fa} ,分向星形耦合器 $0^\#$ 的分配比为 C_{FR}^0 ,则相应的分配损耗为 $L_{fa}^0 = 1 - C_{\text{FR}}^0$,分配的功率为 P ;分向 m 个 $N \times N$ 星形耦合器的分配比相同为 C_{FR}^1 ,则相应的分配损耗相同为 $L_{fs}^1 = 1 - C_{\text{FR}}^1$,分配的功率为 P' ;星形耦合器 $0^\#$ 的分配损耗为 L_{0s} ,附加损耗为 L_{0a} ,功率损耗为 L_0 , $N \times N$ 星形耦合器的分配损耗为 L_{1s} ,附加损耗为 L_{1a} ,功率损耗为 L_1 ;带通滤波器(BPF1、BPF2、...、BPF m)和(BPF1'、BPF2'、...、BPF m')的损耗相同为 L_{p1} ,带通滤波器(BPF1 2 ... m)(BPF1' 2' ... m')的损耗相同为 L_{p2} ,带阻滤波器(BSF1、BSF2、...、BSF m)和(BSF1'、BSF2'、...、BSF m')的损耗相同为 L_s ;由于现有光纤的损耗低,光纤段又不太长,因而光纤段的损耗可以忽略不计,若各种损耗均以百分损耗计算,易推得:

$$L_0 = 1 - (1 - L_{0s}) \prod (1 - L_{0a}),$$

$$L_1 = 1 - (1 - L_{1s}) \prod (1 - L_{1a}).$$

由于

$$C_{\text{FR}}^0 = P / (P + mP'),$$

$$C_{\text{FR}}^1 = P' / (P + mP'),$$

且从 m 个 $N \times N$ 星形耦合器中与节点相连的每个端口输出的功率相同,因而由图 1 可推得

$$P' = P_0(1 - L_s),$$

$$P = P_0(1 - L_1) \prod (1 - L_{p1}) \prod (1 - L_{p2}),$$

若从端口 12' 输入的光功率为 $P_{12'}$,端口 22 输入的光功率为 P_{22} ,则必有 $P_{12'} = P_{22} = P_0$ 。由此,可推出功率分路器的分配比为

$$C_{\text{FR}}^0 = \frac{(1 - L_1) \prod (1 - L_{p1}) \prod (1 - L_s)}{(1 - L_1) \prod (1 - L_{p1}) \prod (1 - L_s) + m(1 - L_{p2})}, \quad (1)$$

$$C_{\text{FR}}^1 = \frac{1 - L_{p2}}{(1 - L_1) \prod (1 - L_{p1}) \prod (1 - L_s) + m(1 - L_{p2})}. \quad (2)$$

由于 $N \times N$ 星形耦合器的分配损耗 L_{1s} 为^[4]: $L_{1s} = 1 - N^{-1}$,附加损耗 L_{1a} 为^[5]: $L_{1a} = 1 - N^{-[\beta(10 \lg 2)]}$,其中 β 为每个 2×2 耦合器单元的附加损耗。所以, $1 - L_1 = N^{-[1 + \beta(10 \lg 2)]}$;同理有: $1 - L_0 = (m + 2)^{-[1 + \beta(10 \lg 2)]}$ 。一般取 $L_{p1} = L_{p2} = L_s = 5 \text{ dB}$, $\beta = 0.1$,若 $N = 64$,则

$$\text{当 } m = 5 \text{ 时, } C_{\text{FR}}^0 = 0.0009, C_{\text{FR}}^1 = 0.1998;$$

$$\text{当 } m = 10 \text{ 时, } C_{\text{FR}}^0 = 0.0004, C_{\text{FR}}^1 = 0.0999;$$

若 $N = 128$,则

$$\text{当 } m = 5 \text{ 时, } C_{\text{FR}}^0 = 0.0004, C_{\text{FR}}^1 = 0.1999;$$

$$\text{当 } m = 10 \text{ 时, } C_{\text{FR}}^0 = 0.0002, C_{\text{FR}}^1 = 0.0001.$$

5 光放大器的增益和输出功率

在这种大规模全光星形耦合器结构中,光放大器扮演了重要角色,显然,它应有高增益和高输出功率等性能,下面仅对增益和输出功率进行讨论。

5.1 增益

光放大器的增益 G 应适当设置,以使从 m 个 $N \times N$ 星形耦合器中与节点相连的每个端口输出的功率相同,即 $P_{12'} = P_{22} = P_0$;由此可推得光放大器的增益 G 为

$$G = (m + 2)^{[1 + \beta(10 \lg 2)]} N^{[1 + \beta(10 \lg 2)]} \times$$

$$[(1 - L_{fa}) \prod (1 - L_s) \prod (1 - L_{p1}) \prod (1 - L_{fs}^1)]^{-1}, \quad (3)$$

将(2)式及 $L_{fs}^1 = 1 - C_{\text{FR}}^1$ 代入(3)式,可得

$$G = (m + 2)^{1 + \beta(10 \lg 2)} \times \left\{ [(1 - L_{fa})(1 - L_{p2})]^1 + (m + 2)N^{[1 + \beta(10 \lg 2)]} \times [(1 - L_{fa})(1 - L_s)(1 - L_{p1})]^1 \right\}. \quad (4)$$

取 $L_{fa} = 1$ dB, 其它参数取值同上; 若 $N = 64$ 则: 当 $m = 5$ 时, $G = 46.8$ dB, 当 $m = 10$ 时, $G = 51.6$ dB; 若 $N = 128$ 则: 当 $m = 5$ 时, $G = 50.0$ dB, 当 $m = 10$ 时, $G = 54.7$ dB.

5.2 输出功率

设光放大器 OA1、OA2 的输入功率相同为 P_{in} , 输出功率相同为 P_{out} , 从图 1 可知

$$P_{in} = (1 - L_0)(1 - L_1)(1 - L_{p1})P_0,$$

而 $P_{out} = GP_{in}$, 所以, 光放大器的输出功率 P_{out} 为

$$P_{out} = G(1 - L_0)(1 - L_1)(1 - L_{p1})P_0, \quad (5)$$

(4) 式代入 (5) 式, 即得光放大器的输出功率 P_{out} 为

$$P_{out} = P_0 \left\{ m[(1 - L_{fa})(1 - L_s)]^1 + (1 - L_{p1})[(1 - L_{fa})(1 - L_{p2})] \times N^{[1 + \beta(10 \lg 2)]} \right\}^1. \quad (6)$$

取 $P_0 = 1$ mW, 其它各参数取值同上; 若 $N = 64$, 则: 当 $m = 5$ 时, $P_{out} = 19.98$ mW, 当 $m = 10$ 时, $P_{out} = 39.83$ mW; 若 $N = 128$ 则: 当 $m = 5$ 时, $P_{out} = 19.92$ mW, 当 $m = 10$ 时, $P_{out} = 39.82$ mW.

结论 波分复用网络要实现的目标是建立一个具有数百甚至数千个节点的超大容量全光传输网络。本文提出的大规模全光 $[m(N - 2)] \times [m(N - 2)]$

星形耦合器, 充分利用并保留了原有 $N \times N$ 星形耦合器为可逆性光器件的特性, 在单纤双向波分复用星形网中可连接 $2m(N - 2)$ 个节点, 能较好地解决波分复用星形网的网络容量受限问题, 满足通信业务的实际和未来网络规模发展的需要; 由其构成的波分复用星形网具有极大的组网灵活性, 可根据需要方便地实现网络的在线扩容、升级, 同时它也适用于目前广泛应用的单向波分复用星形网。此外, 由于其只需两个光放大器而大大降低了网络成本, 有效地提高了网络的性能价格比。

参 考 文 献

- [1] Irshid M, Kavehard M. Distributed optical passive star couplers. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1991, 3(3): 247 ~ 249
- [2] Saleh A A M, Kogelnik H. Reflective single-mode fiber-optic passive star couplers. *J. Lightwave Technol.*, 1988, 6(3): 392 ~ 398
- [3] Irshid M, Kavehrad M. Star couplers with gain using fiber amplifiers. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1992, 4(1): 58 ~ 60
- [4] Borella A, Cancellieri G, Chiaraluce F. Wavelength division multiple access optical networks. *Artech House Optoelectronics Library*, 1998. 27 ~ 131
- [5] Chiang Ting-kuang, Agrawal S K, Mayweather D T et al.. Implementation of STARTNET: A WDM computer communications network. *IEEE J. Selected Areas Commun.*, 1996, 14(5): 824 ~ 838
- [6] Irshid M I, Kavehard M. Expansion of FDM/WDM star networks using high power erbium-doped fiber amplifiers. *J. Opt. Commun.*, 1993, 14(3): 106 ~ 113

A Novel Large Scale All-Optical Star Coupler

Gan Chaoqin Sun Xiaohan Zhang Mingde

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

(Received 13 March 2000; revised 6 September 2000)

Abstract: A novel large scale all-optical star coupler is presented. This star coupler can provide not only a great number of ports for very large scale bidirectional WDM network systems in future, but also the WDM star networks composed of this star coupler have the great flexibility of networking. Its capacities can be expanded conveniently and smoothly on line. At the same time, it also can be adapted in unidirectional WDM network systems used extensively now.

Key words: star coupler; return link; links; distribution ratios; gains