

# 基于光纤四波混频效应的新型组播方法<sup>\*</sup>

苗向蕊 高士明<sup>†</sup> 高莹

(浙江大学光及电磁波研究中心 现代光学仪器国家重点实验室 杭州 310058)

(2008 年 1 月 8 日收到, 2008 年 8 月 1 日收到修改稿)

组播是波长路由光通信网络中的一项重要功能. 提出并实验实现了基于高非线性光纤四波混频效应的全光组播方法. 将一束载有数据的输入信号光和一束抽运光一起入射到一段高非线性光纤中, 通过两个简并四波混频过程产生了两个携带该数据信息的闲频光, 从而实现了单一信号的两信道组播, 同时抽运光也会受到数据信息的调制. 该方法的优点在于组播的实现只需要单一的抽运光源, 而不需要再提供其他输入光. 结构简单, 组播光信号功率均匀、波长可调, 并且具有进一步增加组播信道的能力.

关键词: 组播, 四波混频, 高非线性光纤

PACC: 4265M, 4280S

## 1. 引言

组播是将输入信号拷贝多份以便成组地将输入信号所携带的数据信息并行发送给多个目的节点<sup>[1]</sup>, 这是光通信网络中一项必不可少的重要功能. 在这样的操作中, 数据的目的地为一个组播组, 组中的所有接收者都可接收到该数据拷贝, 而组外的其他用户则接收不到. 当需要将数据信息发送给网络中的多个用户而非所有用户时, 组播技术比传统的单播、广播更有优势. 组播技术实现了网络中点到多点的高效数据传送, 能够大量节约网络带宽、降低网络负载, 而且可以用于提供一些增值业务, 如在线直播、网络电视、远程教育、远程医疗、网络电台、实时视频会议等. 在波长路由的波分复用光网络中, 为了实现组播功能, 需要将输入信号光所携带的数据同时复制到其他多个指定波长的光波上面.

早期的光学组播主要通过光电转换来实现, 不但需要昂贵的高频电子设备, 而且带宽的增加也受到了电子瓶颈的限制. 因此, 人们开始试图采用全光方法实现组播技术, 常用方法包括半导体光放大器中的交叉增益调制<sup>[2]</sup>、交叉相位调制<sup>[3]</sup>、四波混频(FWM)<sup>[4]</sup>以及电吸收调制器中的交叉吸收调制<sup>[5]</sup>和光纤中的 FWM<sup>[6-8]</sup>等. 和其他几种方法相比, 光纤

FWM 具有响应速度快、宽带平坦、噪声低、调制格式和比特率透明等优点, 成为最受关注的组播方法. 现已提出的光纤 FWM 组播方案主要有以下两类: 一类是采用单一抽运光, 待组播信号加载在抽运光上, 同时和多个连续光并行发生 FWM, 实现多个信道的组播输出, 组播信道数和提供的辅助连续光个数相同<sup>[6]</sup>. 另一类是采用双抽运或三抽运结构, 通过带有数据信息的信号光与抽运光之间的多个 FWM 过程产生若干个带有组播信息的新频率光波, 完成组播过程<sup>[7,8]</sup>. 在上述方案中, 不管采用单抽运还是双抽运的方案, 为实现组播过程均需要三个或三个以上不同波长的激光器, 这不但会提高成本, 而且会增加系统结构的复杂度. 鉴于这一情况, 我们基于光纤 FWM 效应提出了一种新的组播方法, 在光纤零色散波长附近, 同时提高抽运光和信号光的输入功率, 以便在光纤中同时发生两个甚至多个 FWM 过程, 产生两个或更多的新频率光波(习惯上称其为闲频光), 从而只利用一个抽运光和一个信号光而不需其他光波的辅助即可获得多信道组播信号.

## 2. 理论分析

在通常情况下, 当一束高功率的抽运光  $\lambda_p$  和一束较低功率的信号光  $\lambda_s$  共同入射到高非线性光纤

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号 60708006)和高等学校博士学科点专项科研基金(批准号 20070335118)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: gaosm@zju.edu.cn

中,将会发生 FWM 效应,在抽运光的一侧产生一个闲频光.根据能量守恒定律,新产生的闲频光波长为<sup>[9]</sup>

$$\lambda_{11} = \frac{1}{2/\lambda_p - 1/\lambda_s}. \quad (1)$$

但是,如果入射到光纤中的信号光功率也足够强,除了上述 FWM 过程以外,还会以信号光  $\lambda_s$  作为抽运,与抽运光  $\lambda_p$  相互作用在信号光的一侧得到另外一个闲频光,其波长为

$$\lambda_{12} = \frac{1}{2/\lambda_s - 1/\lambda_p}. \quad (2)$$

基于上述原理,我们提出了一种新型的基于光纤 FWM 的组播方案,如图 1 所示.

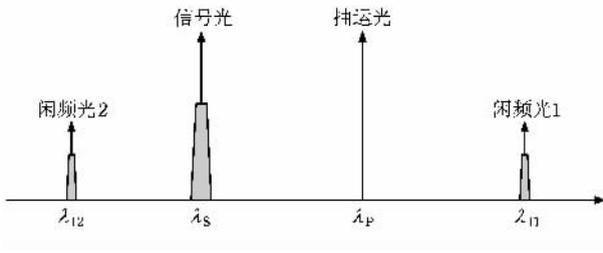


图 1 FWM 实现组播过程的原理示意图

假设携带了待组播信息的信号光  $\lambda_s$  和连续抽运光  $\lambda_p$  经过放大以后共同入射到高非线性光纤中,两个简并 FWM 过程将同时发生,得到波长分别如 (1) 和 (2) 式所示的两个闲频光.在慢变振幅近似的条件下,上述 FWM 过程可以用以下的耦合波方程进行描述<sup>[10]</sup>:

$$\begin{aligned} \frac{dE_p}{dz} &= i\gamma E_p^* E_s E_{11} \exp(i\Delta k_1 z) \\ &+ i\gamma E_s^2 E_{12}^* \exp(-i\Delta k_2 z) - \frac{\alpha_p}{2} E_p, \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_s}{dz} &= i\gamma E_p^2 E_{11}^* \exp(-i\Delta k_1 z) \\ &+ i\gamma E_s^* E_p E_{12} \exp(i\Delta k_2 z) - \frac{\alpha_s}{2} E_s, \quad (4) \end{aligned}$$

$$\frac{dE_{11}}{dz} = i\gamma E_p^2 E_s^* \exp(-i\Delta k_1 z) - \frac{\alpha_{11}}{2} E_{11}, \quad (5)$$

$$\frac{dE_{12}}{dz} = i\gamma E_s^2 E_p^* \exp(-i\Delta k_2 z) - \frac{\alpha_{12}}{2} E_{12}. \quad (6)$$

这里  $E_j (j = P, S, 11, 12)$  分别表示信号光、抽运光以及闲频光 1 和闲频光 2 的光场,  $\alpha_j$  为光纤的损耗,  $\gamma$  为光纤的非线性系数,  $\Delta k_1$  和  $\Delta k_2$  分别代表两个 FWM 过程的相位失配,即

$$\Delta k_1 = 2k_p - k_s - k_{11}, \quad (7)$$

$$\Delta k_2 = 2k_s - k_p - k_{12}, \quad (8)$$

式中  $k_j (j = P, S, 11, 12)$  为相应光波的波数.当入射的抽运光和信号光位于光纤的零色散波长附近时,  $\Delta k_1$  和  $\Delta k_2$  均较小,可以保证两个 FWM 过程充分发生.由 (5) 和 (6) 式可知,通过 FWM 效应产生的闲频光振幅正比于参与作用的信号光和抽运光的振幅,当信号光上通过强度调制加载了数据信号以后,信号光强度将随数据发生变化,从而使得产生的闲频光 1 和闲频光 2 的强度也随之发生变化.利用这一原理,即可将信号光携带的数据并行复制和组播到闲频光上.由于 FWM 过程伴随着能量交换,根据 (3) 式可知,抽运光一方面将一部分功率转移到信号光和闲频光上去,另一方面也会从信号光获得一部分功率.在实现组播的同时,抽运光功率也会受到加载数据的调制.

(3)–(6) 式的耦合波方程可以通过数值迭代法方便地进行求解.在模拟计算中,采用的高非线性光纤参数如下:非线性系数为  $10.5 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ ,零色散波长为  $1553.35 \text{ nm}$ ,损耗为  $0.5 \text{ dB/km}$ ,长度为  $500 \text{ m}$ .假设入射的抽运光为连续光,功率为  $25 \text{ mW}$ ,波长为  $1554.7 \text{ nm}$ ;信号光为一个重复频率为  $1 \text{ GHz}$ 、脉冲宽度为  $160 \text{ ps}$ 、峰值功率为  $50 \text{ mW}$  的高斯脉冲序列,波长为  $1548.57 \text{ nm}$ .该信号光的时域波形模拟如图 2(a) 所示.由于信号光脉冲宽度较宽,近似作为准连续光处理,FWM 过程中的时间效应可以忽略.将上述参数代入 (3)–(6) 式进行数值求解,即可得到闲频光的输出光场,计算得到的闲频光 1 和闲频光 2 的时域波形分别如图 2(b) 和 (c) 所示.

从图 2 可以看出,信号光上所携带的数据可以有效地复制到两个闲频光上.根据 (5) 和 (6) 式,  $E_{11}$  正比于  $E_s$ , 闲频光 1 的脉冲宽度与信号光相同;而  $E_{12}$  正比于  $E_s^2$ , 因而闲频光 2 的脉冲宽度在 FWM 过程中将被压缩.

### 3. 实验装置及结果

基于光纤 FWM 效应实现组播的实验装置如图 3 所示.在光通信网络中,不同码型的数据信息一般通过强度调制、相位调制等方式加载到光波上面.为方便起见,本实验的输入信号光由一个自制的锁模脉冲激光器提供,从形式上相当于一个归零的全“1”数据序列调制到光载波上.该脉冲激光器的结构如图 3 中虚线框所示,掺铒光纤放大器、隔离器、光纤

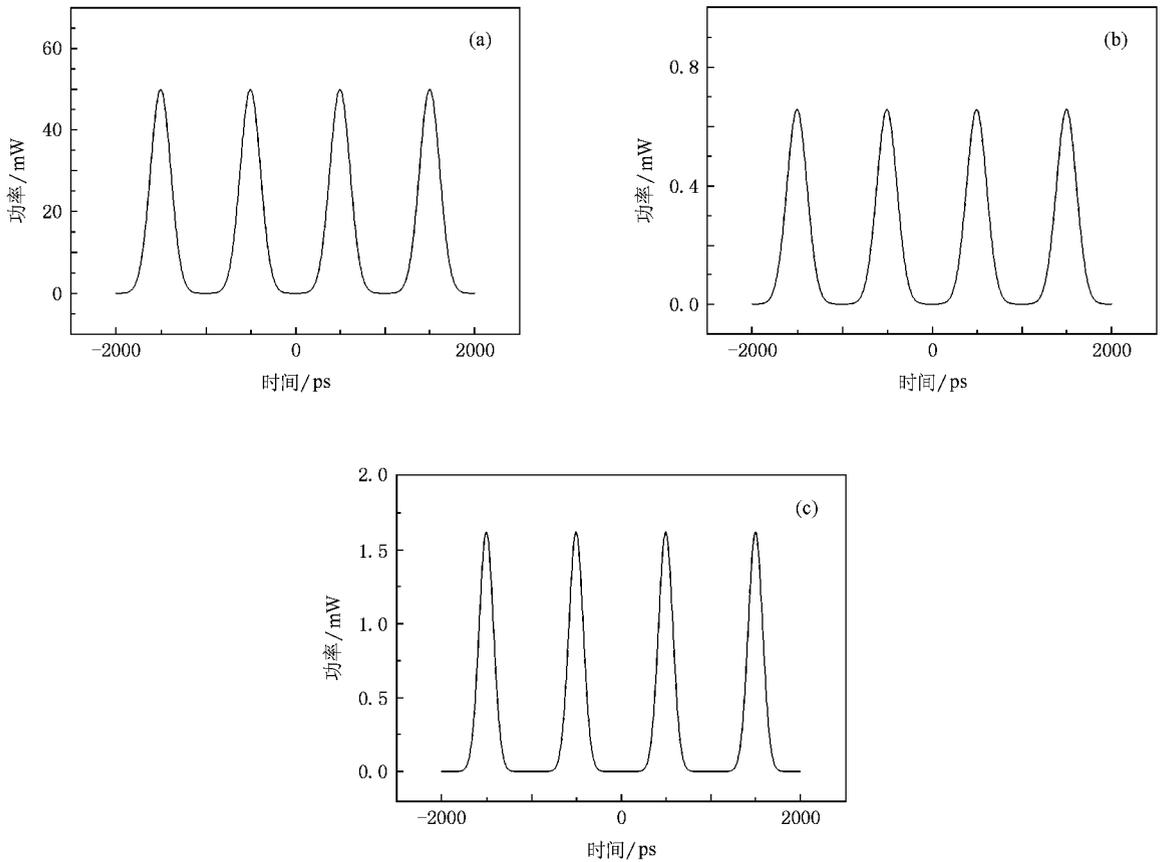


图2 组播过程的数值模拟结果 (a) 初始信号光的时域波形 (b) 闲频光 1 的时域波形 (c) 闲频光 2 的时域波形

布拉格光栅滤波器和调制器共同组成环形谐振腔。掺铒光纤放大器由波长为 980 nm 的激光二极管抽运，光纤光栅的反射峰位于 1548.57 nm，因而只有该波长的激光可以从谐振腔中输出。利用 Agilent E8257D 型信号发生器产生频率为 1 GHz 的正弦信号，并加载到电光调制器上发生锁模，即可获得重复频率为 1 GHz 的脉冲光序列，腔内振荡产生的脉冲激光经过一个 10:90 耦合器输出腔外。利用 Agilent

86142B 型光谱仪测得的脉冲激光输出光谱如图 4 (a) 所示，激光的中心波长为 1548.57 nm，半高全宽约为 0.2 nm。图 4 (b) 给出了 Agilent 86100A 型眼图仪上测得的输出激光的眼图，脉冲的重复频率与调制器上的电信号频率一致，均为 1 GHz。

抽运光由一个半导体激光器产生，其波长为 1554.7 nm。为了增大 FWM 效应，抽运光和输入信号光经一个 50:50 耦合器耦合以后，利用一个高功率

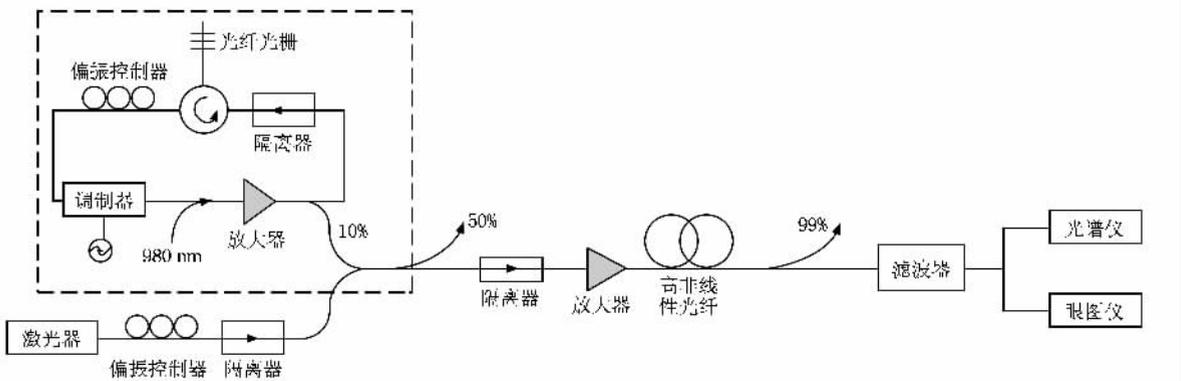


图3 利用光纤 FWM 效应实现组播的实验装置示意图

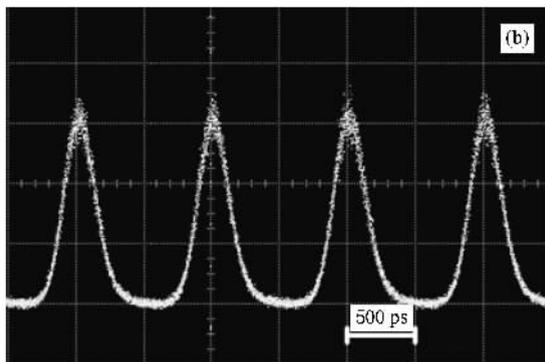
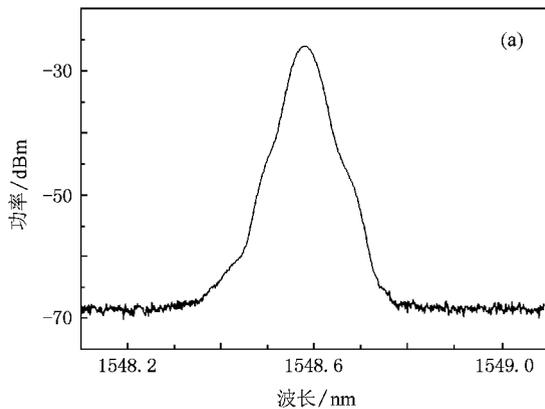


图4 作为输入信号的脉冲光序列测量结果 (a)脉冲激光输出光谱 (b)脉冲激光输出眼图

掺铒光纤放大器对其进行有效放大,然后再入射到500 m长的高非线性光纤中(光纤参数如上所述).根据上述理论分析,在高非线性光纤中会同时发生两个简并FWM过程,产生两个新频率的闲频光.图5给出了FWM发生后高非线性光纤末端的输出光谱,与图1理论分析相符合,两个闲频光的波长测量值分别为1540.91和1564.16 nm.需要说明的是,为了保护测试仪器,在测量光谱之前首先经过了一个1:99耦合器对各个光波进行了大幅度衰减,因而测得光谱中所示的光功率比实际值小20 dB左右.

为了验证组播的效果,我们需要检测两个闲频光上是否携带了原来的数据信息,因此需要将FWM后产生的闲频光逐一分离出来并观察它们的时域特性.为此,我们采用Santec OTF-30M型可调谐滤波器将各个光波分别滤出,该滤波器的带宽为1 nm,工作范围为1535—1565 nm,输出信噪比约为50 dB,满足本实验的要求.用眼图仪分别测量了闲频光1和闲频光2的时域特性,测得的眼图如图6所示.从图6可见,原来输入信号光上所携带的信息被清晰地复制到了两个闲频光上,两者的调制频率完全一致.

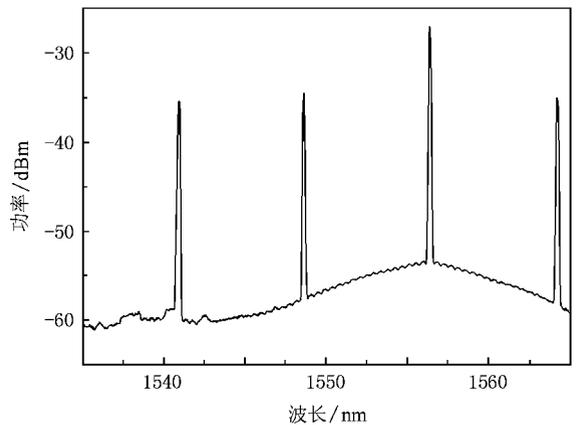


图5 高非线性光纤末端FWM输出光谱的测量结果

因此,利用该方案通过单一抽运光和单一信号光的FWM作用即可实现两信道的组播功能.而且,由于FWM具有非线性增益,信号光一侧的闲频光脉冲宽度比原始的输入脉冲窄,在组播的同时还实现了输入脉冲的整形,这与理论分析的结果一致.

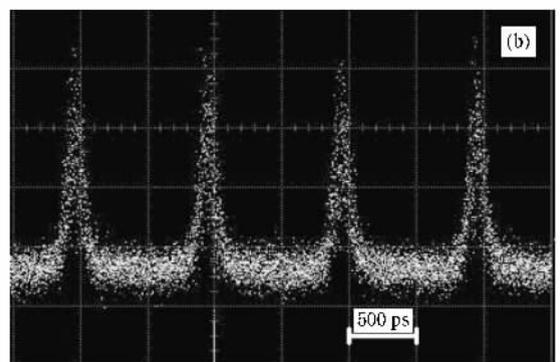
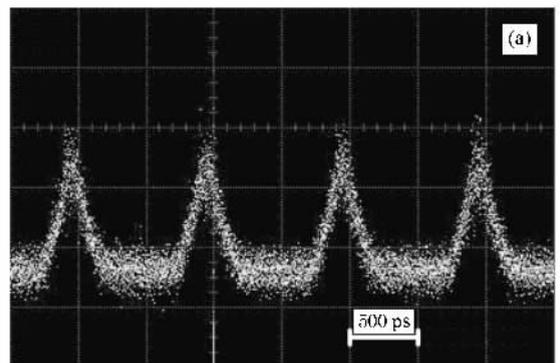


图6 FWM后闲频光的时域特性 (a)闲频光1的眼图 (b)闲频光2的眼图

根据(3)–(6)式可知,不但通过FWM效应产生的闲频光会携带数据信息,抽运光在这一过程中也将受到该数据信息的调制.抽运光的眼图如图7所

示和闲频光的眼图有所不同,对应闲频光脉冲峰值的位置抽运光的眼图均存在一个凹陷.这说明同样实现了数据的调制,只是具有相反的相位.

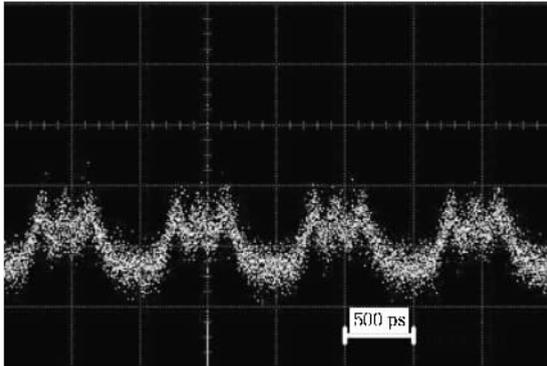


图7 FWM后抽运光的眼图

理想的组播技术要求输出光的各波长在一定范围内可调并且功率一致.在我们提出的组播方案中,输出光的波长可以通过改变抽运光激光器的波长方便地进行调节.而且,当光纤中的FWM效应充分发生时,抽运光和信号光功率大量消耗的同时闲频光功率迅速上升,FWM效应本身即具有功率均衡的效

果<sup>[11]</sup>经过FWM以后从高非线性光纤中输出的各个光波具有近似的功率.从图5可以看出,去除基底的影响,两个闲频光之间的功率差别在1 dB之内.另外,如果进一步增大入射到光纤的抽运光和信号光功率,则闲频光与抽运光、闲频光与信号光以及两个闲频光之间还会进一步发生FWM效应,产生更多具有新频率的闲频光,它们将同样携带信号光所携带的数据信息.因此,该组播方案还具备进一步增加组播信道的能力.

## 4. 结 论

本文提出并实验实现了一种基于高非线性光纤FWM效应的全光组播方法.该方法不但具有通常FWM型组播方案响应时间快、宽带且平坦、噪声低、调制格式及比特率透明等一般特点,而且结构简单,仅使用单一抽运源与单一信号源即可实现输入光信号的两信道组播.该方案各个组播光信号功率均匀、波长可调,还具有进一步增加组播信道的能力,在未来的全光通信网络中极具应用潜力.

- [1] Rouskas G N 2003 *IEEE Network* **17** 60
- [2] Contestabile G, Calabretta N, Proietti R, Ciarabella E 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 181
- [3] Chung H S, Inohara R, Nishimura K, Usami M 2005 *Electron. Lett.* **41** 432
- [4] Contestabile G, Presi M, Ciarabella E 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 1775
- [5] Chow K K, Shu C 2003 *Electron. Lett.* **39** 1395
- [6] Yan N, Teixeira A, Silveira T, Belevi G M T, Curti F, Forin D, Longa F D, Monroy I T, Monteiro P, Koonen T 2007 *IEEE Microw. Opt. Technol. Lett.* **49** 1067
- [7] Wang Y, Yu C Y, Luo T, Yan L S, Pan Z Q, Willner A E 2005 *J. Lightwave Technol.* **23** 3331
- [8] Fok M P, Shu C 2007 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **19** 1166
- [9] Shao Z H 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 73 (in Chinese) [邵钟浩 2001 物理学报 **50** 73]
- [10] Agrawal G P 2001 *Nonlinear Fiber Optics* (San Diego: Academic) p393
- [11] Liu X, Lu C 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 2541

# A multicasting method based on four-wave mixing in highly nonlinear fibers<sup>\*</sup>

Miao Xiang-Rui Gao Shi-Ming<sup>†</sup> Gao Ying

( Centre for Optical and Electromagnetic Research , State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation ,  
Zhejiang University , Hangzhou 310058 , China )

( Received 8 January 2008 ; revised manuscript received 1 August 2008 )

## Abstract

Multicasting is an important function of wavelength-routing optical communication networks. An all-optical multicasting is presented and experimentally demonstrated based on four-wave mixing ( FWM ) in highly nonlinear fibers. An input signal with data information together with a pump are injected into a highly nonlinear fiber and two idlers with new frequencies can be generated through two degenerate FWM processes , which carry the same data information as the input signal. The single input signal is copied to two channels and the pump can also be modulated by this data. The advantage of this scheme consists in the simple configuration , where only a single pump is needed and no other injected lights are required , the uniform powers and tunable wavelengths of the multicasting signals , and the capacity to further increase multicasting channel number.

**Keywords** : multicasting , four-wave mixing , highly nonlinear fiber

**PACC** : 4265M , 4280S

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China( Grant No. 60708006 ) and the Doctoral Program Foundation of Institution of Higher Education of China( Grant No. 20070335118 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : gaosm@zju.edu.cn