

# 双向使用高非线性光纤实现同时解复用出两路 10 Gbit/s信号\*

贾楠 李唐军 孙剑 钟康平 王目光†

(北京交通大学光波技术研究所, 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

(2013年8月23日收到; 2013年10月15日收到修改稿)

提出一种利用双向使用高非线性光纤 (HNLF) 实现同时解复用出两路信号的全光解复用方案. 将复用信号和控制光的混合信号从 HNLF 的两端同时注入, 复用信号中的某一路信号通过交叉相位调制使控制光产生蓝移或红移, 在 HNLF 的输出端用窄带滤波器将控制光的蓝移或红移部分滤出从而同时实现两路信号解复用. 理论分析了信号光和控制光在 HNLF 中的相互作用和解复用原理. 搭建 80 Gbit/s 光时分复用系统, 对双向使用 HNLF 的解复用结构进行了实验研究. 在 HNLF 的两个输出端同时实现不同信道的无误码解复用, 其中信道解复用的最大功率代价为 2.6 dB.

**关键词:** 光纤通信, 光时分复用, 高非线性光纤, 全光解复用

**PACS:** 42.15.Eq, 42.79.Sz, 42.81.Uv

**DOI:** 10.7498/aps.63.024201

## 1 引言

提高干线通信容量一直是光传输领域发展的主要目标. 随着高速无线业务和在线高清多媒体业务的迅速推广, 干线传输对带宽的需求更是呈现出指数式增长. 光时分复用 (OTDM) 技术可以轻松地摆脱电子器件瓶颈的限制从而成为国际上增加干线传输容量的热门研究之一<sup>[1-7]</sup>. OTDM 的关键之一是解复用技术. 通常实现高速解复用功能主要是基于半导体光放大器、电吸收调制器和高非线性光纤 (HNLF) 的全光开关来完成<sup>[8-16]</sup>. 随着 HNLF 性能的改善, 诸如非线性系数的提高以及色散斜率的减小, 减少了所需光纤的长度, 增强了解复用器的稳定性. 这些优点使得采用商用 HNLF 实现高速 OTDM 信号全光解复用变得简单高效. 利用 HNLF 进行全光解复用的物理机理有交叉相位调制<sup>[10,11]</sup> 和非线性偏振旋转<sup>[12,13]</sup>. 为了把时分复用信号中的基带信号逐一解复用出来, 每路基带信号需要相应使用一个独立的解复用器. 但是随着时

分复用信号信道数量的增加, 接收端所需要的解复用器个数也相应增加, 这样就造成了接收端成本增加以及维护复杂度的提高. 因此, 寻求一种能降低接收端所需解复用器个数以及简化维护复杂度的方案具有很高的研究价值.

本文所采用的全光解复用器由一段双向使用的 HNLF 和其后续联的两个窄带滤波器组成. 实验结果表明, 本文所采用的解复用结构仅使用单一波长的脉冲光源和一段 HNLF 就可以实现从 80 Gbit/s 的光时分复用信号中同时解复用出两路 10 Gbit/s 信号的功能. 与传统的解复用结构相比, 此解复用器性能稳定. 在降低接收端成本的同时简化了管理和维护复杂度.

## 2 工作原理

两个不同波长的光脉冲在光纤中的传输可以用下列耦合非线性方程组描述<sup>[16]</sup>:

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{1}{v_{g1}} \frac{\partial A_1}{\partial t} + \frac{i\beta_{21}}{2} \frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2} + \frac{\alpha_1}{2} A_1$$

\* 国家自然科学基金 (批准号: 60807003)、教育部新世纪优秀人才支持计划 (批准号: NCET-09-0209) 和北京市高等学校青年英才计划项目 (批准号: YETP0528) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: mgwang@bjtu.edu.cn

$$=i\gamma_1(|A_1|^2 + 2|A_2|^2)A_1, \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial z} + \frac{1}{v_{g2}} \frac{\partial A_2}{\partial t} + \frac{i\beta_{22}}{2} \frac{\partial^2 A_2}{\partial t^2} + \frac{\alpha_2}{2} A_2$$

$$=i\gamma_2(|A_2|^2 + 2|A_1|^2)A_2, \quad (2)$$

其中,  $A_j$  是慢变振幅,  $v_{gj}$  是群速度,  $\beta_{2j}$  是色散系数,  $\alpha_j$  表示损耗系数,  $\gamma_j$  是光纤的非线性系数,  $j = 1, 2$ . (1) 和 (2) 式中包含了群速度失配效应、色散效应、自相位调制效应及交叉相位调制效应. 若忽略光纤损耗, 则方程 (1) 和 (2) 进一步简化为

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{i\beta_{21}}{2} \frac{\partial^2 A_1}{\partial T^2}$$

$$=i\gamma_1(|A_1|^2 + 2|A_2|^2)A_1, \quad (3)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial z} + d \frac{\partial A_2}{\partial T} + \frac{i\beta_{22}}{2} \frac{\partial^2 A_2}{\partial T^2}$$

$$=i\gamma_2(|A_2|^2 + 2|A_1|^2)A_2. \quad (4)$$

这里  $T$  是以速度  $v_{g1}$  和脉冲一起运动的参考坐标系中的时间度量, 参量  $d$  是两脉冲间群速度失配的度量,

$$T = t - \frac{z}{v_{g1}},$$

$$d = \frac{v_{g1} - v_{g2}}{v_{g1}v_{g2}}. \quad (5)$$

通常两脉冲有不同的宽度, 以波长为  $\lambda_1$  的第一个脉冲宽度  $T_0$  作为参考, 引入走离长度  $L_w$  和色散长度  $L_d$  为

$$L_w = T_0/|d|,$$

$$L_d = T_0^2/|\beta_{21}|. \quad (6)$$

当  $L_w < L \ll L_d$  时 ( $L$  为光纤长度), 可忽略 (3) 和 (4) 式中的色散项, 但要表示群速度失配的参量  $d$  考虑在内. 此时 (3) 和 (4) 式可解析求解, 得到  $z = L$  处的通解<sup>[11]</sup>

$$A_1(L, T) = A_1(0, T) e^{i\phi_1},$$

$$A_2(L, T) = A_2(0, T - dL) e^{i\phi_2}, \quad (7)$$

其中,

$$\phi_1(T) = \gamma_1 \left( L|A_1(0, T)|^2 + 2 \int_0^L |A_2(0, T - dL)|^2 dz \right), \quad (8)$$

$$\phi_2(T) = \gamma_2 \left( L|A_2(0, T)|^2 + 2 \int_0^L |A_1(0, T - dL)|^2 dz \right). \quad (9)$$

从 (8) 和 (9) 式可以看出两个脉冲的相位均来自两方面的贡献, (8) 和 (9) 式中的第一项源于脉冲的自相位调制, 第二项源于脉冲间的交叉相位调制. 由于群速度失配, 交叉相位调制的贡献沿光纤长度方向是变化的, 总的交叉相位调制的贡献可以通过在光纤长度上的积分得到.

假设两个具有相同  $T_0$  的无啁啾高斯脉冲的初始振幅为

$$A_1(0, T) = \sqrt{P_1} e^{-\frac{T^2}{2T_0^2}},$$

$$A_2(0, T) = \sqrt{P_2} e^{-\frac{(T - T_d)^2}{2T_0^2}}, \quad (10)$$

其中,  $P_1$  和  $P_2$  是峰值功率,  $T_d$  是两个脉冲间的初始时间延迟. 将 (10) 式代入 (8) 式, 得到

$$\phi_1(\tau) = \gamma_1 L \left( P_1 e^{-\tau^2} + P_2 \frac{\sqrt{\pi}}{\delta} [\text{erf}(\tau - \tau_d) - \text{erf}(\tau - \tau_d - \delta)] \right), \quad (11)$$

其中  $\text{erf}(x)$  表示误差函数,

$$\tau = T/T_0,$$

$$\tau_d = T_d/T_0,$$

$$\delta = dL/T_0. \quad (12)$$

由交叉相位调制效应对脉冲 1 造成的感应频率啁啾为

$$\Delta v_1(\tau) = -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial \phi_1}{\partial T} = \frac{\gamma_1 L}{\pi T_0} \left[ P_1 \tau e^{-\tau^2} - \frac{P_2}{\delta} \times (e^{-(\tau - \tau_d)^2} - e^{-(\tau - \tau_d - \delta)^2}) \right]. \quad (13)$$

当  $\tau_d = 0$  和  $|\delta| \ll 1$  ( $L \ll L_w$ ) 时, 得到脉冲的频率啁啾的近似表达式

$$\Delta v_1(\tau) \approx \frac{\gamma_1 L}{\pi T_0} e^{-\tau^2} [P_1 \tau + P_2 (2\tau - \delta)], \quad (14)$$

$$\Delta v_2(\tau) \approx \frac{\gamma_2 L}{\pi T_0} e^{-\tau^2} [P_2 \tau + P_1 (2\tau + \delta)]. \quad (15)$$

当两个脉冲具有一个相对的时间延迟  $\tau_d$  并满足  $P_1 \ll P_2$  时, 可以忽略自相位调制的贡献. 此时抽运光脉冲对探测光脉冲的感应啁啾为

$$\Delta v_1(\tau) = \text{sgn}(\delta) \frac{\gamma_1 L P_2}{\pi T_0 |\delta|} \times [e^{-(\tau - \tau_d)^2} - e^{-(\tau - \tau_d - \delta)^2}]. \quad (16)$$

(16) 式给出了感应频移与时间延迟  $T_d$  之间的关系. 对于给定的时间延迟  $T_d$ , 感应频移最大值发生在  $\tau = 0$  附近, 即

$$\Delta v_1 = \text{sgn}(\delta) \frac{\gamma_1 L P_2}{\pi T_0 |\delta|} [e^{-\tau_d^2} - e^{-(\tau_d + \delta)^2}]. \quad (17)$$

通过上述分析可以得到如下结果: 设  $P_1 = P_c$ ,  $P_2 = P_s$ . 当  $P_c \ll P_s$ , 且信号光脉冲和控制光脉冲存在一定的相对时间延迟时, 由于交叉相位调制的作用, 信号光中的“1”码会使控制光信号产生一个大小为  $\Delta v_1$  的频移, 而信号光中的“0”码由于功率太低几乎不会使控制光信号产生频移. 因此, 在信号光脉冲和控制光脉冲经过非线性光纤之后, 选择合适的滤波器滤去未发生频移的控制光脉冲, 同时使得发生频移的控制光脉冲通过. 这样就可以将时分复用的光脉冲信号中的某一路上的信息转换到控制光波长上, 最终实现解复用的功能. 若  $P_c \approx P_s$ , 控制光和信号光之间的交叉相位调制作用, 引起信号光和控制光彼此产生频移. 混合信号通过 HNLF 后, 被  $1 \times 2$  耦合器分成两路. 对其中一路中的控制光进行滤波, 可以得到被解复用的一路 OTDM 信号, 实现下话路. 对另外一路中的信号光进行滤波, 可以得到其余的  $(N - 1)$  路 OTDM

信号; 然后利用耦合器和可调光时延线将另一支路信号与  $(N - 1)$  路 OTDM 信号复用, 实现上话路<sup>[11]</sup>. 若要对  $N$  路 OTDM 信号进行完全解复用, 只需要  $N/2$  个此结构的解复用器, 因此可以节省一半的解复用资源.

基于上述思想, 本文提出了一种基于双向使用 HNLF 的全光解复用器. 这种解复用结构可以同时实现两路基带信号的解复用. 如图 1 所示, 控制光脉冲经过耦合器 1 后分成两路信号, 然后经过偏振控制器和光可调时延线, 再通过耦合器 3 和耦合器 4, 分别与被耦合器 2 分成两路的时分复用信号耦合成两路混合信号. 两路混合信号分别通过环形器 1 (图 1 中  $a \rightarrow b \rightarrow c$ ) 和环形器 2 (图 1 中  $d \rightarrow e \rightarrow f$ ) 进入到 HNLF 中并发生交叉相位调制作用. 通过调节光可调时延线和选择合适的滤波器参数, 滤出控制光的蓝移或红移部分, 在  $f$  处和  $c$  处同时得到光时分复用信号中的任意两路基带信号.

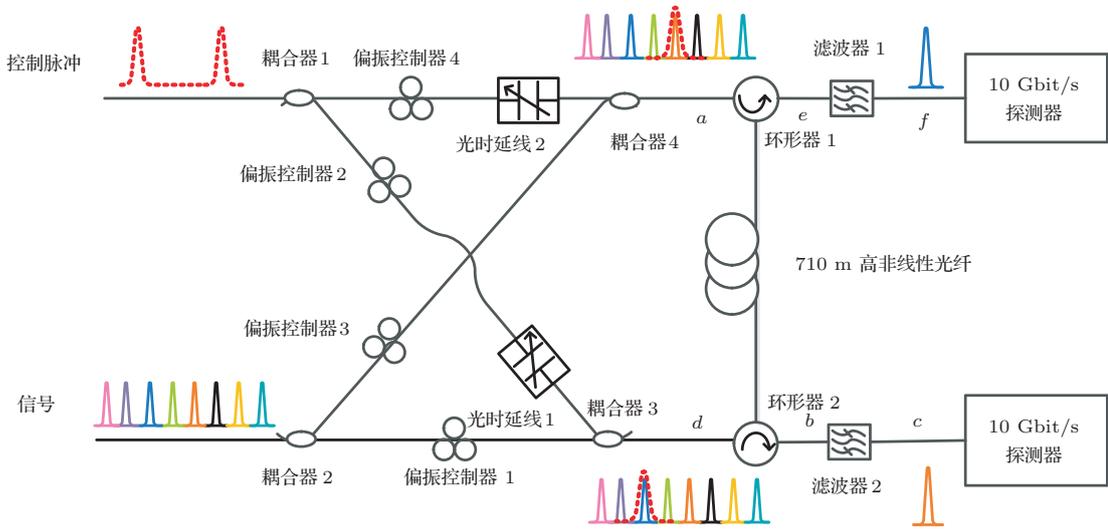


图 1 双向使用 HNLF 解复用器的结构图

双向使用 HNLF 解复用器的功率传输函数如图 2 所示. 在图 2(a) 中圆点曲线表示  $a \rightarrow b$  和  $d \rightarrow e$  两个方向的光同时相向传输时在图 1 中的  $b$  点处测得的输出功率随  $a$  点处输入功率的变化, 而方点曲线表示只有  $a \rightarrow b$  方向的光传输时在图 1 中的  $b$  点处测得的输出功率随  $a$  点处输入功率的变化. 在图 2(b) 中, 圆点曲线表示  $d \rightarrow e$  和  $a \rightarrow b$  两个方向的光同时相向传输时在图 1 中的  $e$  点处测得的输出功率随  $d$  点处输入功率的变化, 而方点曲线表示只有  $d \rightarrow e$  方向的光传输时在图 1 中的  $e$  点处测得的输出功率随  $d$  点处输入功率的变化曲线. 从图 2 可以看出, 当输入功率在  $-5 \sim 15$  dBm 范围内时, HNLF 中双向传输的信号对彼此之间的功率几

乎没有影响.

### 3 实验系统与测量结果

#### 3.1 实验系统结构

图 3 给出了采用双向使用 HNLF 解复用器的实验系统结构图. 如图 3 所示, Calmar Optcom 公司生产的 PSL-10-1T 型皮秒脉冲光源产生出重复频率为 10 GHz、波长为 1555.5 nm、脉冲半高全宽为 1.8 ps、输出功率为 14.9 dBm 的短脉冲. 之后短脉冲进入零色散波长为 1558 nm 的色散位移光纤 (DSF). 由于入射光脉冲波长在 DSF 零色散波长附

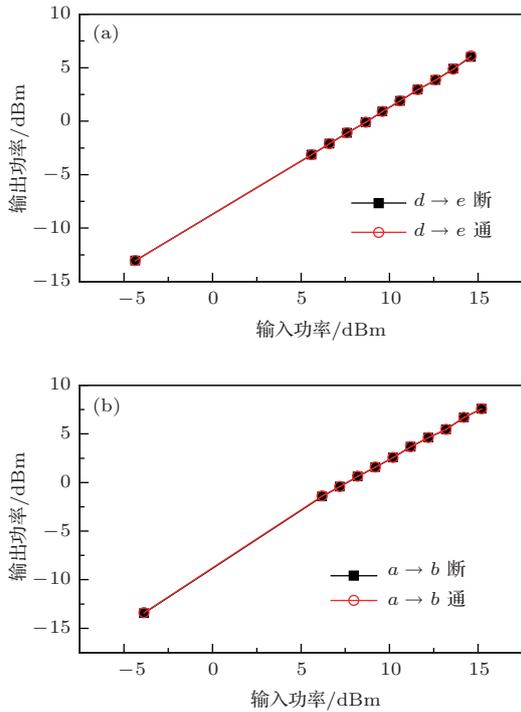


图2 双向使用HNLF解复用器的功率传输函数 (a)  $a \rightarrow b$  方向的功率函数; (b)  $d \rightarrow e$  方向的功率函数

近导致光纤非线性占主要作用, 因此入射光脉冲

的频谱在光纤非线性的作用下发生展宽. 频谱展宽后的光脉冲信号经过带宽为 0.8 nm 的固定滤波器 1 和滤波器 2 滤出两路不同波长的光脉冲信号. 其中一路中心波长在 1553 nm, 用来做控制光脉冲; 另外一路中心波长在 1557.6 nm, 其经过放大后进入铌酸锂调制器加载 10 Gbit/s 的伪随机码 (随机发生器的型号为 Agilent N4901B, 码长为  $2^{23} - 1$ ). 经过调制后的 10 Gbit/s 信号通过自制的光时分复用器复用成 80 Gbit/s 信号. 复用信号光和控制光分别被放大器 2 和放大器 3 放大后进入双向使用 HNLF 的解复用器, 再通过对可调时延线 1 和可调时延线 2 进行调节后就可以实现选路功能. 最后, 解复用出的 10 Gbit/s 基带信号进入光电探测器后进行误码测试.

### 3.2 实验结果及分析

图 4 是在解复用结构各处测得的光谱图. 图 4(a) 和 (d) 分别是控制光和信号光混合后在图 3 中的  $a$  处和  $d$  处测得的光谱图. 图 4(b) 和 (e) 是两路信号同时在 HNLF 中相向传输时, 在解复用

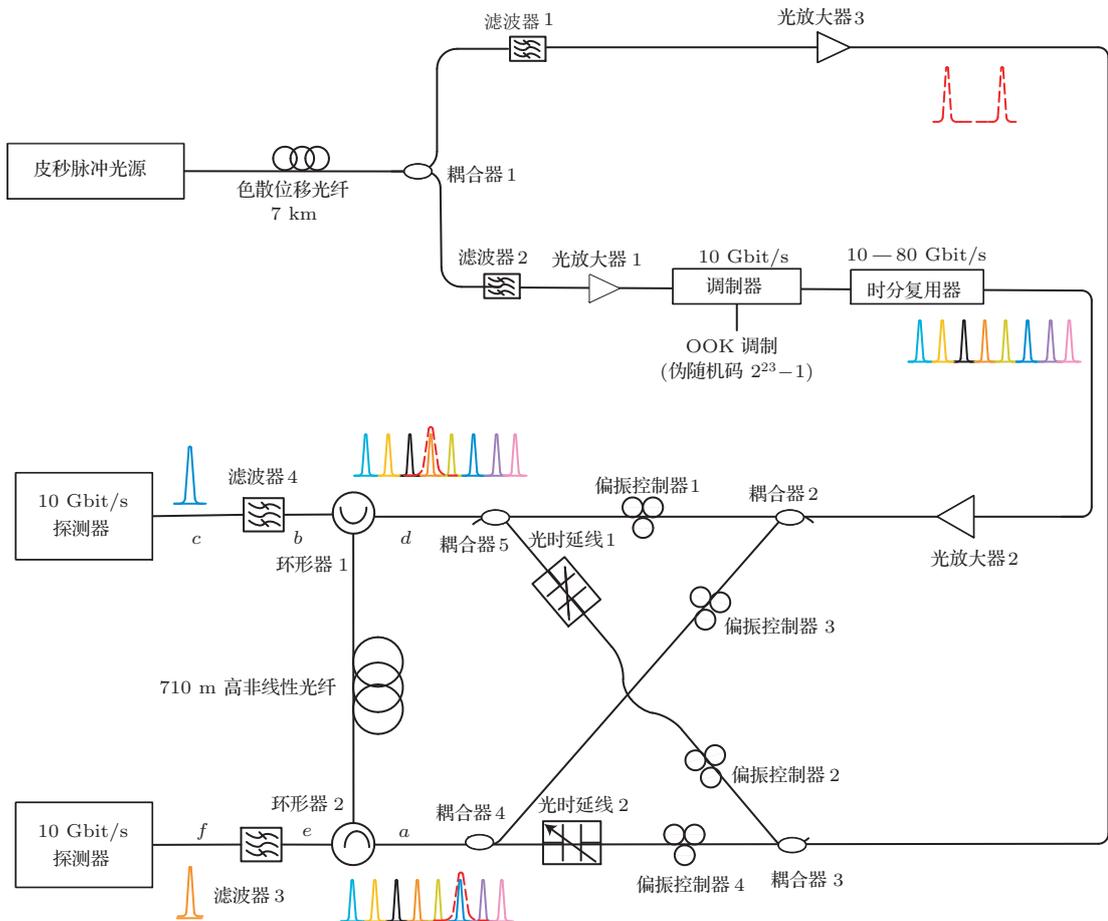


图3 采用双向使用HNLF解复用器的实验系统结构图

结构中的 *b* 处和 *e* 处测得的光谱图. 对比输入光谱, 在经过 HNLF 后信号光和控制光的光谱发生展宽. 当控制光功率远远小于信号光功率, 并且复用信号中某一路信号在时域上与控制光信号交叠时, 由于交叉相位调制效应控制光信号的频谱会产生频移, 即在控制光频谱两边形成两个边峰, 左峰是控制光中心波长蓝移造成, 右峰是控制光中心波长红移造成. 而信号光频谱的展宽是由自相位调制造成. 在 HNLF 的两个输出端分别用带宽为 0.35 nm 的窄带滤波器将控制光信号的蓝移部分滤出, 即可得到此路信号所携带的信息. 图 4(c) 和 (f) 分别是在经过滤波器 3 和滤波器 4 之后, 在图 3 中的 *c* 处和 *f* 处测得的光谱. 需要说明的是, 图 4(c) 和 (f) 的光谱峰

值功率比图 4(b) 和 (e) 的光谱峰值功率高出 10 dB 左右. 这是因为在实验中放大后的信号光和控制光合成一路信号后功率超出光谱仪输入端的最大输入功率, 为了保护光谱仪输入探头不被烧坏, 在解复用结构中的 *b* 处和 *e* 处进行光谱测量前使用衰减器对混合信号衰减.

图 5(a) 和 (b) 分别是在系统结构中的 *c* 处和 *f* 处测得的 80 Gbit/s OTDM 解复用信号的误码测试结果. 误码测试结果表明, 双向使用 HNLF 的解复用结构可以同时实现不同信道的无误码解复用. 当误码率为  $10^{-12}$  时在 *c* 处和 *f* 处测得的最大功率代价分别为 2.4 和 2.6 dB. 其中线路中放大器的自发辐射噪声是造成功率代价的主要原因.

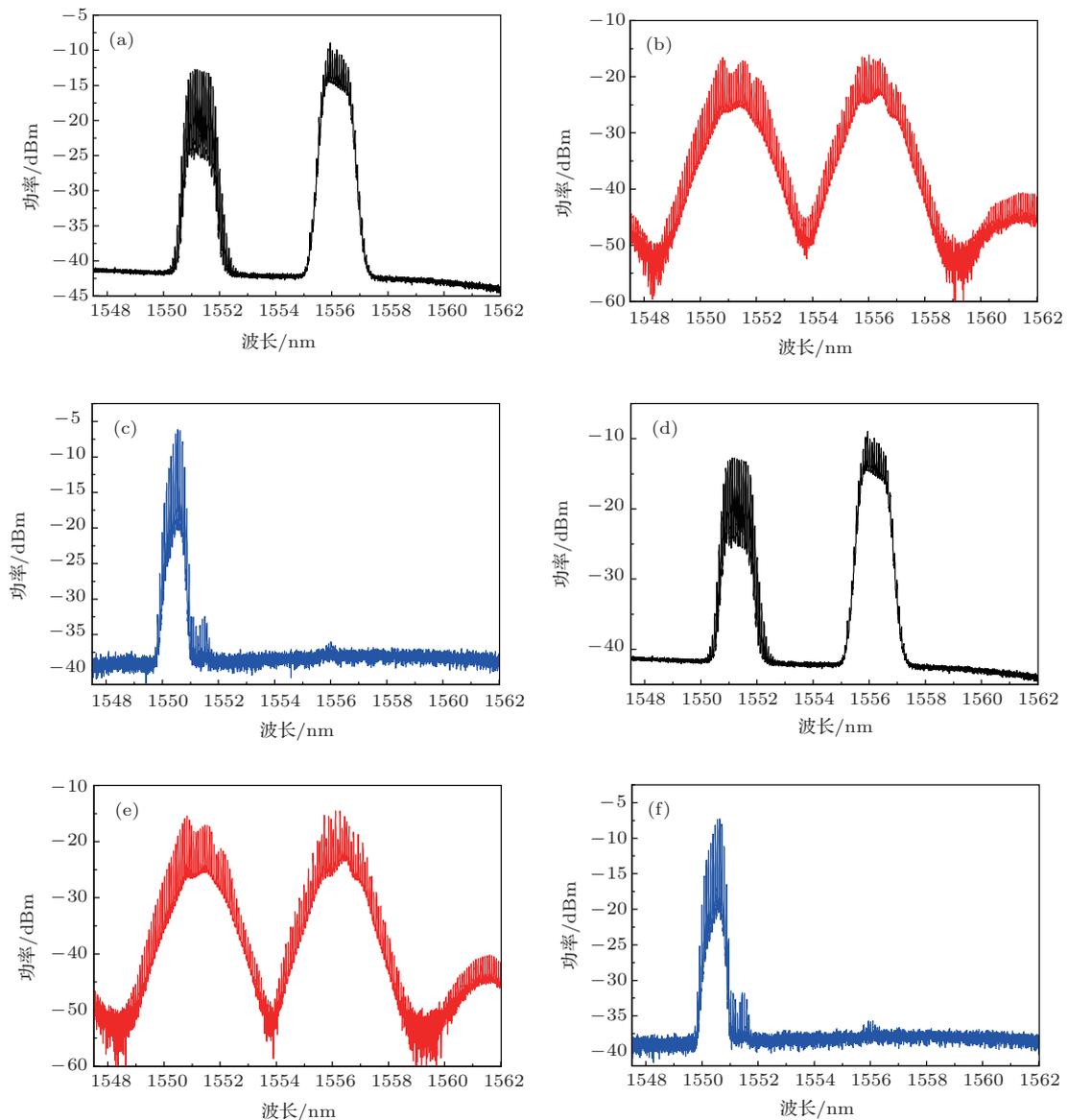


图 4 在解复用器结构不同位置处测得的光谱图 (a) *a* 点; (b) *b* 点; (c) *c* 点; (d) *d* 点; (e) *e* 点; (f) *f* 点

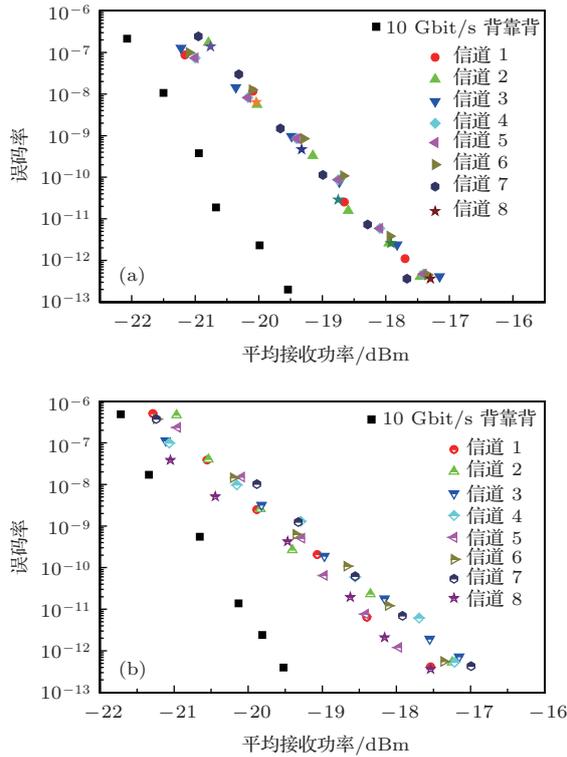


图5 在不同位置处 80 Gbit/s 到 10 Gbit/s 解复用的误码测试结果 (a) 在系统结构中的 c 处; (b) 在系统结构中的 f 处

## 4 结 论

本文研究了基于双向使用 HNLF 的全光解复用器的解复用原理. 搭建了 80 Gbit/s OTDM 系统, 实验研究了双向使用 HNLF 解复用器的解复用性能. 测试得到了两个信号相向传输和单个信号传输时的传输函数. 测量结果表明, 当输入功率在  $-5\text{--}15\text{ dBm}$  范围内时, HNLF 中双向传输的信号对彼此之间的功率没有影响. 误码率测试结果表明, 双向使用 HNLF 解复用器可以同时实现从 80 Gbit/s 到 10 Gbit/s 两个信道的无误码解复用, 其中信道解复用的最大功率代价为 2.6 dB. 与传统的解复用结构相比, 此解复用器性能不仅稳定而且在降低接收端成本的同时简化了管理和维护复杂

度. 由于光纤对信号的响应可以达到飞秒量级, 合理优化后此结构还可以实现更高速率的解复用.

## 参考文献

- [1] Blank L, Bryant E, Lord A, Boggis J, Stallard W 1987 *Electron. Lett.* **23** 977
- [2] Tucker R, Eisenstein G, Korotky S, Buhl L, Veselka J, Raybon G, Kasper B, Alferness R 1987 *Electron. Lett.* **23** 1270
- [3] Wang M G, Li T J, Lou C Y, Jian S S, Huo L, Yao H J, Zeng L, Cui J, Diao C 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2774 (in Chinese)[王目光, 李唐军, 娄采云, 简水生, 霍力, 姚和军, 曾丽, 崔杰, 刁操 2005 物理学报 **54** 2774]
- [4] Lou C Y, Zhang E Y, Zeng L 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1241 (in Chinese)[娄采云, 章恩耀, 曾丽 2005 物理学报 **54** 1241]
- [5] Yan F P, Tong Z, Wei H, Pei L, Ning T G, Fu Y J, Zheng K, Wang L, Li Y F, Gong T R, Jian S S 2007 *Chin. Phys.* **16** 1700
- [6] Xu H, Li X Y, Xiao X, Li Z Y, Yu Y D, Yu J Z 2013 *Chin. Phys. B* **22** 114212
- [7] Feng C F, Wu J, Zhang J Y, Xu K, Lin J T 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1000
- [8] Jia N, Li T J, Zhong K P, Wang M G, Chen M, Li J, Chi J F 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 114213
- [9] Chen M, Lu D, Gong T R, Lü B, Wang M G, Li T J, Jian S S 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 74211
- [10] Olsson B E, Blumenthal D J 2001 *Photon. Technol. Lett.* **13** 875
- [11] Li J, Olsson B E, Karlsson M 2005 *J. Lightwave Technol.* **23** 2654
- [12] Yamamoto T, Yoshida E, Nakazawa M 1998 *Electron. Lett.* **34** 1013
- [13] Phillips I, Gloag A, Kean P, Doran N, Bennion I, Ellis A 1997 *Opt. Lett.* **22** 1326
- [14] Lee J H, Tanemura T, Kikuchi K, Nagashima T, Hasegawa T, Ohara S, Sugimoto N 2005 *Opt. Lett.* **30** 1267
- [15] Morioka T, Kawanishi S, Takara H, Saruwatari M 1994 *Electron. Lett.* **30** 1959
- [16] Agrawal G P 2007 *Nonlinear Fiber Optics* (4th Ed.) (San Diego: Clai) p179

# Simultaneous demultiplexing into two 10 Gbit/s using a bidirectionally operated highly nonlinear fiber\*

Jia Nan Li Tang-Jun Sun Jian Zhong Kang-Ping Wang Mu-Guang<sup>†</sup>

(Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

( Received 23 August 2013; revised manuscript received 15 October 2013 )

## Abstract

A simultaneous two-channel optical time division multiplexing (OTDM) demultiplexing is proposed and experimentally demonstrated by using a bidirectionally operated highly nonlinear fiber followed by a narrow-band offset filter. The performance of the proposed demultiplexer is evaluated in an 80 Gbit/s OTDM transmission system. A maximum power penalty of 2.6 dB is obtained for the worst demultiplexed channel. The proposal might be interesting since it offers a powerful tool for developing ultrafast photonic networks.

**Keywords:** optical fiber communication, optical time division multiplexing, highly nonlinear fiber, all-optical demultiplexing

**PACS:** 42.15.Eq, 42.79.Sz, 42.81.Uv

**DOI:** [10.7498/aps.63.024201](https://doi.org/10.7498/aps.63.024201)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60807003), the Program for the New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education, China (Grant No. NCET-09-0209), and the Beijing Higher Education Young Elite Teacher Project, China (Grant No. YETP0528).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [mgwang@bjtu.edu.cn](mailto:mgwang@bjtu.edu.cn)