

新型的光纤耦合器环状连接法产生时分复用信号的实验研究*

魏道平 赵玉成 裴 丽 江中澳 简水生

(北方交通大学光波技术研究所 北京 100044)

提要 将单模光纤耦合器的一个输入端和一个输出端连接起来构成光纤环路,并使光纤环路的时延为输入光脉冲半周期的奇数倍,这样,在耦合器的另一个输出端口就可获得倍乘重复率的光脉冲信号。采用三级环状连接的光纤耦合器,产生了八倍频($8 \times 2.5 \text{ Gb/s}$)的时分复用信号。实验结果表明,这一时分复用信号产生方案具有脉冲的幅度和间隔易于调节、输出信号的功率大、成本低且易于实验室控制等优点。

关键词 光时分复用, 光纤耦合器, 光脉冲重复率倍乘, 环状连接

1 引 言

目前,如何利用光纤网实现更高速率的信息传输已成为全球性的研究热点^[1,2],而高码率数字脉冲信号的产生是进行高速光通信研究的基本条件。一般来说,获得高码率数字脉冲有如下两种途径:一种是提高信号源本身的性能,即通过提高电调制信号的频率并对二极管激光器的结构进行调整来获得直接强度调制方式下的高速脉冲,或通过改善外调制器来获得外调制的高速脉冲;另一种途径是通过对较低重复率的光脉冲进行光时分复用(OTDM)或使输入脉冲发生分裂来获得高速光脉冲信号。

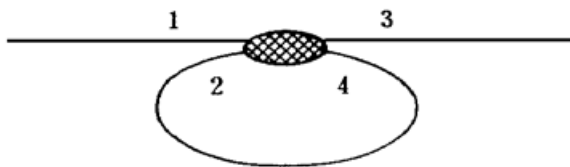


图 1 光纤耦合器环状连接法

Fig. 1 Loop-connecting fiber coupler

由于通过第一种途径进行直接强度调制难于产生重复率高于约 10 Gb/s 的光脉冲信号,外调制法则成本高、插入损耗大且较复杂,于是人们针对第二种途径提出了各种各样的技术方案^[3-6]。在这里,我们将 2×2 单模光纤耦合器的一个输入端和一个输出端连接起来构成如图 1 所示的光纤环路,使环路的

时延为输入光脉冲半周期的奇数倍,实现了光脉冲重复率的倍乘。采用三级环状连接的光纤耦合器,我们实现了光脉冲的八倍频。实验结果表明,采用这种方案来产生时分复用信号,具有成本低、易于实验室控制、插入损耗小、调节方便且调节精度高等优点,其产生的时分复用信号可以满足基础应用研究的要求。

* 国家 863 高技术基金、北方交通大学攀登计划(论文)基金资助项目。

2 光纤耦合器环状连接法基本原理

光纤耦合器环状连接法如图 1 所示。耦合器两输出端的光场 E_3, E_4 与输入端的光场 E_1, E_2 的关系为^[7]

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \| T \| \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中

$$\| T \| = \begin{bmatrix} \sqrt{\alpha} & i\sqrt{\beta-\alpha} \\ i\sqrt{\beta-\alpha} & \sqrt{\alpha} \end{bmatrix} \quad (2)$$

为光纤耦合器的传输矩阵, α 为端口 1 至 3 或 2 至 4 的光功率耦合系数, $\beta \leq 1$ 为与耦合器插入损耗 β_{dB} 有关的参量。假设从输入端 1 输入光载频为 ω_0 的光场

$$E_1 = f_0(t) \exp(j\omega_0 t) \quad (3)$$

式中高斯型复包络

$$f_0(t) = \exp[-t^2/2\tau_0^2 + i\Phi_0(t)] \quad (4)$$

τ_0 为光脉冲 $1/e$ 处的半宽, 相位调制

$$\Phi_0(t) = b_0 t^2 + \mathcal{R}(t) \quad (5)$$

b_0 为光源啁啾率, \mathcal{R} 为每一光脉冲的随机初相, 其相干时间取决于光源谱宽。

由图 1 可见, 从输入端 1 输入的光场一部分直通到输出端 3, 一部分则耦合到输出端 4, 经光纤环路的传输后又回到输入端 2。回到端 2 的光场一部分耦合到端口 3 参与输出, 一部分直通到端口 4 后再继续回传到端口 2, 如此循环往复, 在输出端 3 将获得一系列新的脉冲。若光纤环路的时延 D 恰为输入脉冲列半周期的奇数倍, 则新的脉冲列是经光纤环奇数次循环和经光纤环偶数次循环(包括未经光纤环的零次直通)脉冲列的无穷叠加。由于光纤环对光场的作用不仅有时延, 还有光纤的色散和非线性, 以及光纤制作缺陷、弯曲和可能受到的应力, 因此这一光场的矢量叠加过程十分复杂。如果将偏振和啁啾变化的影响都看作是对光脉冲相位的影响, 是对随机初相 \mathcal{R} 的扰动, 且假设时延 $2D$ 大于光源的相干时间, 则光场的矢量叠加将变为随机相位的矢量叠加, 其效果等于功率的标量叠加, 这样, 在输出端口 3

$$P_3 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \alpha f(t-nT) + \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} (\beta-\alpha)^2 \alpha^{m-1} f(t-nT, mD) \quad (6)$$

式中

$$\begin{aligned} f(t-nT) &= |f_0(t-nT)|^2 \\ f(t-nT, mD) &= |A_m(t-nT-mD)|^2 \\ A_m(t) &= \exp[-t^2/2\tau_m^2 + i\Phi_m(t)] \end{aligned} \quad (7)$$

其中 τ_m, Φ_m 分别为绕环 m 圈后, 时延了的光脉冲脉宽及啁啾相位, T 为输入脉冲周期, n 为整数。

忽略光纤环路色散与非线性对脉宽的影响。虽然光纤环路传输循环次数 m 越大脉宽变化也越大, 但其脉冲幅度随 $(\beta-\alpha)^2 \alpha^m$ 而迅速递降即贡献越小, 因此此时可得解析解。于是设 $\tau_m = \tau_0$, 且令

$$D = \left[k + \frac{1}{2} \right] T + \delta \quad (8)$$

δ 为实际光纤环时延对所需时延的偏差, 并将(7) 式中 $m = 2p, m = 2p + 1$ 项相分离, 有

$$P_3 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\alpha f(t - nT) + \frac{(\beta - \alpha)^2}{\alpha} \sum_{p=1}^{\infty} \alpha^{2p} f[t - (n + p + k)T - 2p\delta] \right] + \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[(\beta - \alpha)^2 \sum_{p=0}^{\infty} \alpha^{2p} f \left[t - (n + p + k)T - \frac{T}{2} - (2p + 1)\delta \right] \right] \quad (9)$$

式中第一项给出了与输入脉冲列同步的脉冲子列, 第二项给出了延时近似半周期的脉冲子列。

忽略脉冲函数 $f(t)$ 边缘的贡献, 则(9) 式成一几何级数, 其中第一项的幅度为

$$A = \alpha + (\beta - \alpha)^2 \alpha / (1 - \alpha^2) \quad (10)$$

第二项的幅度为

$$B = (\beta - \alpha)^2 / (1 - \alpha^2) \quad (11)$$

倍频脉冲要求两个子脉冲列等幅, 则耦合比与插入损耗的关系为

$$\alpha = \beta^2 / (1 + 2\beta) \quad (12)$$

令输入脉冲峰值功率为 1, 将(12) 式代入(10), (11) 式, 可得输出脉冲峰值功率为

$$A = B = \frac{\beta^2}{1 + 2\beta - \beta^2} \quad (13)$$

当耦合器插入损耗为零, 即 $\beta_{dB} = 0$ 时, 由(12) 式可得耦合比 $\alpha = 1/3$ 。此时 $A = B = 1/2$, 即无插入损耗时倍频脉冲子列功率均分。一般情况下, 由于脉冲循环通过耦合器受插入损耗的多次影响, 输出脉冲子列的峰值功率应小于 $\beta/2$ 。

对以上的分析用计算机进行了模拟计算, 以验证理论的正确性。模拟计算时采用(9) 式, 即忽略了时延光纤环路的非线性、色散和衰减, 并设从端口 1 输入的是高斯型脉冲序列, 输入脉冲的半极大处脉宽取 40 ps, 周期 T 取 400 ps, $\alpha = 1/3, \beta = 1$ 即损耗 $\beta_{dB} = 0$, 结果如图 2 所示。

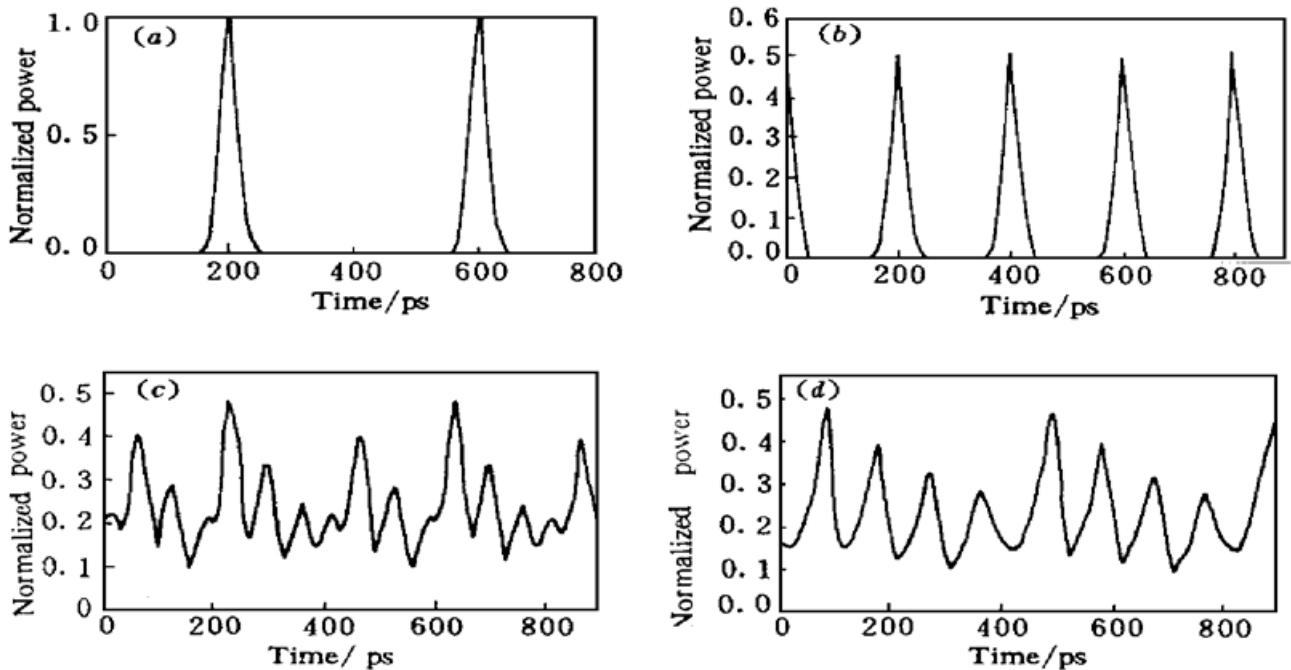


图 2 理论分析结果

(a) 输入的原脉冲序列; (b) 二倍频脉冲序列;

(c) 时延偏差 $\delta = 50$ ps 时的倍频脉冲序列; (d) 时延偏差 $\delta = -110$ ps 时的倍频脉冲序列

Fig. 2 Theoretical results

(a) Input original pulses; (b) Multiplying repetition rate pulses; (c) Multiplying repetition rate pulses with

delay deviation $\delta = 50$ ps; (d) Multiplying repetition rate pulses with delay deviation $\delta = -110$ ps

图 2(a) 是输入的高斯型脉冲序列, (b) 是取光纤环路的时延为输入脉冲半周期奇数倍时(取为 3 倍) 倍频了的脉冲序列, 可以看出当 $\alpha = 1/3$ 且损耗 $\beta_{dB} = 0$ 时, 倍频脉冲子列功率均分, 各为输入脉冲功率的一半, 这与理论分析相一致。(c) 是当光纤环时延偏差 $\delta = \frac{1}{8} \cdot T = 50 \text{ ps}$ 时(即时延偏大时) 从输出端口 3 输出的倍频脉冲序列, 图中幅度最大的为同步脉冲子列, 幅度次大的为时延脉冲子列, 但时延脉冲子列发生了严重畸变, 导致了若干个幅度更小的子峰的产生, 并可以观察到同步脉冲子列中脉冲右侧的间隔宽一些。(d) 是当光纤环时延偏差 $\delta = -\frac{11}{40} \cdot T = -110 \text{ ps}$ 时(即时延偏小时) 从输出端口 3 输出的倍频脉冲序列, 同步脉冲子列中脉冲左侧的间隔宽一些。

仔细观察图 2(c), (d) 可以发现, 时延脉冲子列严重畸变导致若干子峰的产生是存在一定的规律的, 这很容易由光纤耦合器环状连接法产生时分复用信号的基本原理来得出。由以上分析还可以推断, 在实验中, 可以通过观察环形光纤耦合器时分复用输出口脉冲波形的形态和平整性来判断光纤环路的时延是否调整到输入脉冲半周期的奇数倍。

3 实 验

实验装置如图 3 所示。光源采用 Santec 公司生产的 TSL-210pulse 型可调谐激光器, 中心波长调谐到 1550 nm。实验中, 利用 2.5 Gb/s 微波脉冲发生器驱动 TSL, 使之产生脉冲半宽为 38 ps, 脉冲周期为 $T = 400 \text{ ps}$ (2.5 Gb/s) 的光脉冲信号。光脉冲信号经放大器放大后, 在 a 点用 Tektronix 公司生产的 CSA 803A 通信信号分析仪进行了测量, 测得的原始脉冲波形如图 4(a) 所示。

三只单模光纤耦合器是我们自己采用熔融拉锥法制作的。如前所述, 由于在假定耦合器插入损耗为零时, 要使耦合器输出的两脉冲子列等幅, 耦合器的直通耦合比应为 $\alpha = 1/3$, 因此考虑到插入损耗的实际存在, 在耦合器的控制过程中, 将耦合器的直通耦合比制作成稍稍小于 1/3, 这样就可以使耦合进光纤环路的光功率较假定插入损耗为零时的计算值稍稍大一些, 则输出的两脉冲子列才会等幅, 或时延的脉冲子列的幅度比与输入脉冲列同步的脉冲子列的幅度大, 因而就容易通过对光纤环路强迫微弯增加泄漏来对时延的脉冲子列进行幅度调节。

实验中, 首先将一只光纤耦合器(DC1) 环状连接产生二倍频的脉冲信号。为此, 光纤环路的时延应为原始脉冲列半周期 $\frac{T}{2} = 200 \text{ ps}$ 的奇数倍, 时延调节和两脉冲子列幅度调节的过程采用 CSA 803A 通信信号分析仪在 b 点进行监测。时延的精确控制是通过对光纤环路长度的精确控制来实现的, 我们采用巧妙的切割方法, 可以使时延达到约 1 ps 的精度。由于在耦合器制作过程中对耦合比的控制, 使得时延的脉冲子列的幅度比与原脉冲列同步的脉冲子列的幅度稍大, 通过对光纤环路进行微弯达到了对两脉冲子列幅度的精确调节。在 b 点测得的二倍频

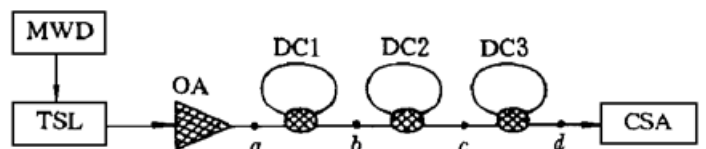


图 3 实验装置

MWD: 微波驱动器; TSL: 波长可调谐光源; OA: 光放大器;
DC: 单模光纤耦合器; CSA: 通信信号分析仪

Fig. 3 Experimental setup

MWD: microwave driver; TSL: laser source with tunable wavelength; OA: optical amplifier; DC: single-mode fiber coupler; CSA: communication signal analyzer

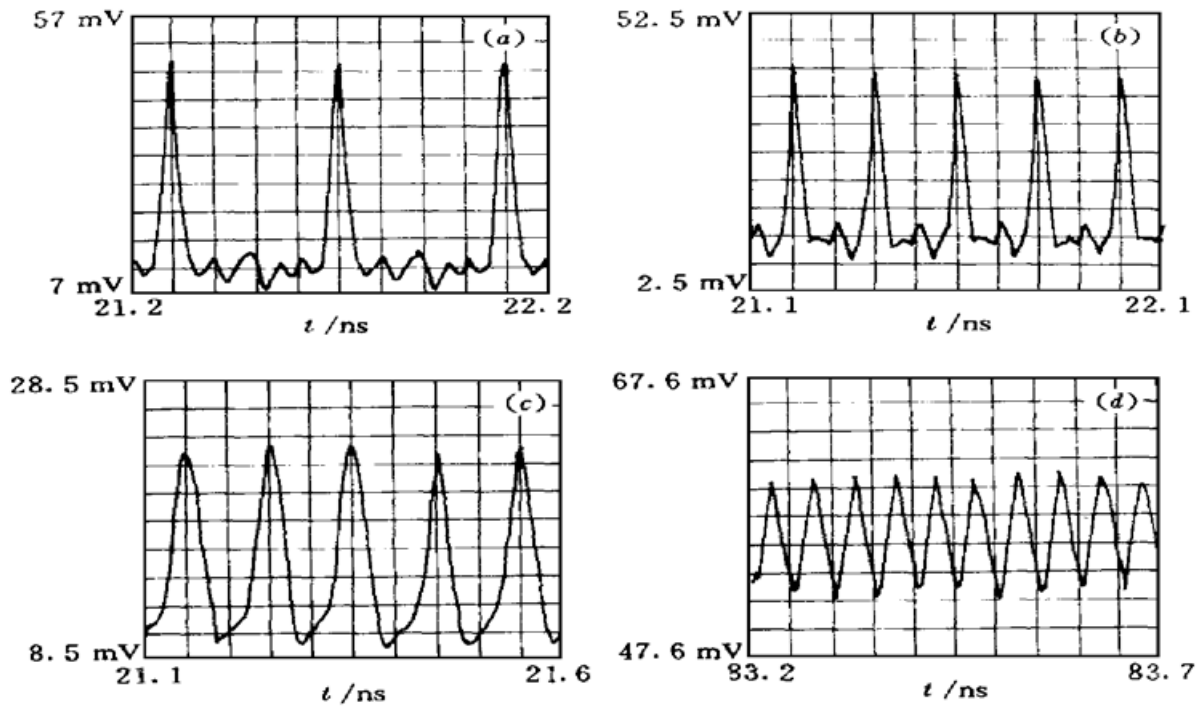


图 4 实验结果

- (a) 原始脉冲序列(2.5 Gb/s); (b) 二倍频(2×2.5 Gb/s) 脉冲序列;
(c) 四倍频(4×2.5 Gb/s) 脉冲序列; (d) 八倍频(8×2.5 Gb/s) 脉冲序列

Fig. 4 Experimental results

- (a) Input original pulses (2.5 Gb/s); (b) Multiplying repetition rate (2×2.5 Gb/s) pulses;
(c) Four times repetition rate (4×2.5 Gb/s) pulses; (d) Eight times repetition rate (8×2.5 Gb/s) pulses

在二倍频的基础上,按照以上方法将另一只光纤耦合器(DC2)环状连接后级联在DC1之后,产生了四倍频(4×2.5 Gb/s)的光脉冲信号,在c点的测量结果如图4(c)所示。注意此时光纤环路的时延应为二倍频后脉冲信号半周期的奇数倍,即为 $\frac{1}{2} \cdot \frac{T}{2} = 100$ ps的奇数倍。

同理,将耦合器DC3环状连接后级联在DC2的后面,产生了八倍频(8×2.5 Gb/s)的光脉冲信号,在d点的测量结果如图4(d)所示。DC3光纤环路的时延应为四倍频后光脉冲信号半周期的奇数倍,即为 $\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{T}{2} = 50$ ps的奇数倍。

实验中发现,光纤环路的时延是否调准,可以通过观察环形光纤耦合器时分复用输出口脉冲波形的形态和平整性来判断。当时延偏大时,同步脉冲子列中脉冲右侧的间隔宽一些,而当时延偏小时,左侧的间隔宽一些,这与我们的理论分析完全一致。图5就是在调节耦合器DC1光纤环路的时延过程中(产生二倍频信号)时延调节不准确时的记录,其中(a)为环路时延偏差为 $\delta = 50$ ps时的记录图,(b)为环路时延偏差为 $\delta = -110$ ps时的记录图。图中两同步脉冲间除时延脉冲外还出现了若干个幅度较小的脉冲,是由于此时光纤环路的时延偏差较大,时延脉冲的多次循环叠加导致了多个时延子脉冲的出现,随着时延的进一步调准,子峰会逐渐合并。

对比图5与图2(c),(d)看出,实验结果与理论分析存在一些差异,这是因为在理论分析时忽略了光纤时延环路的损耗、色散及非线性对倍频信号产生的影响,而在实际中,这些因素不可避免地会影响到信号的产生,从而导致了理论与实验之间的差异。

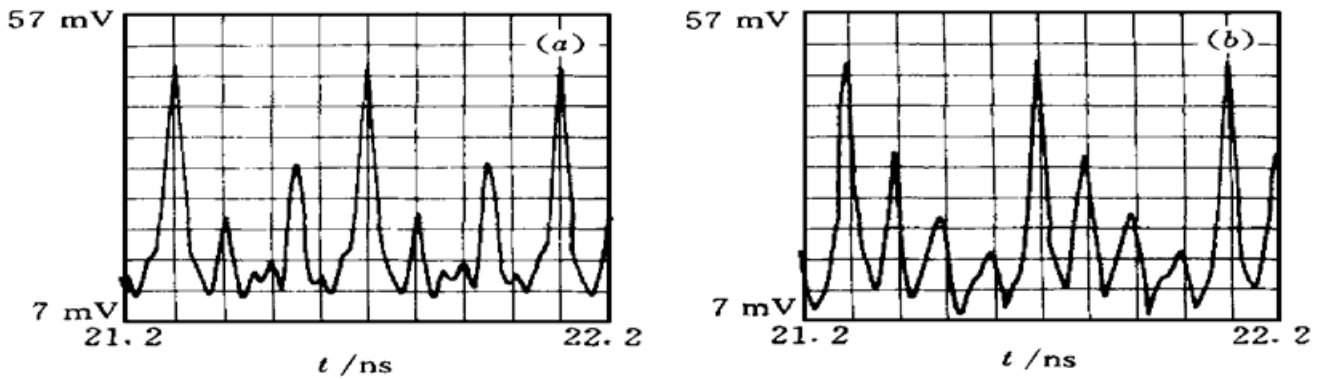


图 5 时延调节不准确时的输出脉冲波形

(a) 时延偏差 $\delta = 50$ ps 时的输出脉冲波形; (b) 时延偏差 $\delta = -110$ ps 时的输出脉冲波形

Fig. 5 Output pulse shapes with unsuitable time delay

(a) Output pulse shapes with delay deviation $\delta = 50$ ps; (b) Output pulse shapes with delay deviation $\delta = -110$ ps

4 结 论

采用三级环形连接的光纤耦合器, 我们获得了八倍频的时分复用信号。与马赫-陈德尔接法或 Sagnac 环的方法相比, 这一时分复用信号产生方案仅有一路信号输出, 因此输出功率自然有 3 dB 的得益。另外, 马赫-陈德尔接法要求所用光纤耦合器的分光比严格为 50·50, 否则会造成复用脉冲信号幅度的不均匀^[8], 而这一方案对耦合器的分光比没有那么苛刻的要求。实验结果表明, 这种新型的采用环形连接光纤耦合器产生时分复用信号的方案具有脉冲的间隔和幅度易于调节、成本低、易于实验室控制、输出功率高等优点, 对较窄脉宽的脉冲源能较方便地根据需提高其脉冲重复率, 所产生的时分复用信号可以为时分复用通信提供待加载信息的基本光脉冲, 或为未来的高速全光通信提供时钟信号, 也可用于微波与光波相结合技术的研究, 以借助于光脉冲产生超窄的电脉冲。

参 考 文 献

- 1 A. R. Charaplyvy, A. H. Gnauck, R. W. Tkach *et al.*. 1-Tb/s transmission experiment. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(9): 1264~ 1266
- 2 D. Garthe, W. S. Lee, R. A. Saunders *et al.*. Demonstration of 80 Gbit/s WDM transmission over 537 km of non-zero dispersion shifted fibre without in-line dispersion management or gain equalisation. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(13): 1217~ 1218
- 3 D. M. Spirit, G. E. Wichens, T. Widdowson *et al.*. 137 km, 4×5 Gbit/s optical time division multiplexed unrepeated system with distributed erbium fibre preamplifier. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(13): 1218~ 1220
- 4 Chun-Kit Chan, Lian-Kuan Chen. Theoretical analysis of high-repetition rate optical-pulse multiplication using fiber-coupler loop configuration. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(10): 1145~ 1147
- 5 S. Kawanishi, H. Takara, K. Uchiyama *et al.*. Fully time-division-multiplexed 100 Gbit/s optical transmission experiment. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(25): 2211~ 2212
- 6 S. Kawanishi, H. Takara, T. Morioka *et al.*. 200 Gbit/s, 100 km time-division-multiplexed optical transmission using supercontinuum pulses with prescaled PLL timing extraction and all-optical demultiplexing. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(10): 816~ 817
- 7 Jiang Zeming, Huang Zhaoming, Zhang Minghua *et al.*. Analysis of a novel fiber-coupler loop-connecting method for multiplying optical-pulse repetition rates based on TDM. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(5): 591~ 598 (in Chinese)

an full optical fiber time division multiplexer. *J. of the China Railway Society* (铁道学报), 1998, 20 (4): 66~ 69 (in Chinese)

Experimental Study of a Novel Fiber-coupler Loop-connecting Method for Generating Optical Time Division Multiplexing Signal

Wei Daoping Zhao Yucheng Pei Li Jiang Zhongao Jian Shuisheng

(*Institute of Lightwave Technology, Northern Jiaotong University, Beijing 100044*)

Abstract Connecting an input port and an output port of a single-mode fiber coupler to form a fiber-loop, and making the time delay of the fiber-loop odd times the half-period of the input optical pulses, optical pulses with a multiplying repetition rate at the other output port of the coupler were obtained. Utilizing three loop-connecting fiber couplers concatenated, optical pulses with an eight-times repetition rate were obtained. Experimental results show that, this scheme has several advantages, such as easy adjusting for pulse amplitude and pulse interval, large output power, low cost and easy fabrication.

Key words optical time division multiplexing, fiber coupler, multiplying optical-pulse repetition rate, loop-connecting