

时分复用倍乘光脉冲重复率的 新型光纤耦合器环状连接法分析*

蒋泽明 黄肇明 张明华 姚寿铨

(上海大学通信与信息工程学院, 上海 201800)

摘 要 提出并详细分析了一种基于时分复用技术倍乘光脉冲重复率的方法: 在 2×2 光纤耦合器的一个输入口与一个输出口间, 接入时延为脉冲列半周期奇数倍的一段光纤使之形成环状连接循环耦合, 而在另一输出口获得光脉冲。详细分析了该系统中光纤耦合器耦合比、插入损耗、时延光纤长度的要求, 偏差的影响及其调节法, 给出了理论公式、结果的计算机模拟与实验介绍; 与经典的马赫-陈德尔干涉仪接法及近年提出的 Sagnac 环接法进行了比较。该方法特别适用于对窄脉冲列进行串接复用实现重复率的多次倍乘, 从而得到数千兆赫至上百千兆赫的高重复率光脉冲。

关键词 光脉冲重复率的倍乘, 光纤耦合器的应用, 时分复用。

1 引 言

高码率数字脉冲的产生是高速光通信研究的基本条件。国外已在数百至数千公里的光纤传输中, 应用 20~ 250 Gb/s 的皮秒脉冲进行光纤传输特性如色散补偿与光孤子传输的研究^[1~ 6]; 然而我国目前最高码率为清华的 7.5 GHz 光脉冲源^[7]。提高光脉冲码率的方法有两种: 一是提高源的性能, 即提高电调制信号的频率并进行二极管激光器结构的调整来获得直接强度调制方式下的高速脉冲, 或改善外调制器来获得外调制的高速光脉冲; 二是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。第一种方法中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, 外调制法则成本高、插耗大且较复杂。第二种方法已报道的有三条途径: 1) 用两个光纤耦合器光纤接成马赫-陈德尔干涉仪, 利用其两臂的时延差完成 OTDM^[1~ 4]; 2) 用环光纤将光纤耦合器的两个端口接成 Sagnac 镜^[8, 9], 利用其比光脉冲谱宽更窄的复数频应特性使通过脉冲发生分裂完成重复率的倍乘; 3) 用集成光器件如平面光波线路(PLC)波导臂时延完成 OTDM^[5, 6], 集成光波导可准确到 $1 \mu\text{m}$ ^[10], 是高频 OTDM 的理想方法, 但有插入损耗且制作工艺复杂; Sagnac 法只适用于脉宽 1 ps 以下、重复频率 250 GHz 以上脉冲列的倍率^[8, 9]。途径 1) 具有成本低、插入损耗小、易于实验室控制等优点, 但是每一级倍率必同时生成两路等幅信号, 在连续倍率时输出信号的幅度递

* 上海市自然科学基金、上海交通大学区域光通信网与新型光通信系统国家重点实验室基金资助。

收稿日期: 1996 年 12 月 31 日; 收到修改稿日期: 1997 年 3 月 13 日

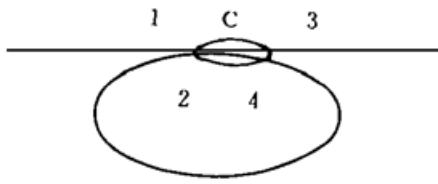


Fig. 1 Schematic connecting method

降太快,而且时延光纤较难按设计长度切割准,且无法控制焊点长度的随机起伏从而限制了其在频率上端的应用^[9, 10]。本文提出第4种途径,用环光纤构成如图1所示的环路连法,克服了上述缺点,成本低而频率响应好,预计可由数千兆赫的输入光脉冲倍至十个千兆赫或数百千兆赫。

本方法与 Sagnac 法均只能用于产生输入光脉冲的倍率光脉冲。但 Sagnac 法只能产生重复频率为 250 GHz 以上的脉冲列,而本文的方法产生重复频率约几千兆赫至 300 GHz 的脉冲列,与前者互补。可为光时分复用通信提供待加载信息的基本光脉冲,为未来高速全光通信提供钟信号,也可用于微波与光波相结合技术研究,借助光脉冲产生超窄超高速电脉冲。

2 工作原理

2×2 的光纤耦合器出口的光场 E_3 、 E_4 与输入口光场 E_1 、 E_2 (见图 1) 具有如下关系:

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

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} 有关的参数。设口 1 输入光场为

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

式中 ω_0 为光载频,而高斯型复包络

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

式中 τ_0 为光脉冲 $1/e$ 处的半宽,相位调制

$$\Phi_0(t) = b_0 t^2 + \varphi_0(t) \quad (5)$$

b_0 为光源啁啾率, φ_0 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 所示,在口 4 与口 2 间接入时延为 D 的光纤(实际仅有一个光接头),则进入 1 的光场除经‘=’耦合部分进入 3 外,还有部分经‘X’耦合进入 4,后者经光纤环的传输又回到 2;而此场又经‘X’耦合和‘=’耦合继续分解,前者参与输出,后者继续回传,如此循环往复在输出口 3 将获得一新的脉冲列。如时延 D 恰为脉冲列半周期的奇数倍,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耦)脉冲列的无穷叠加。这一光场的矢量叠加十分复杂,因为环光纤对光脉冲场的作用不仅只有时延,还有光纤色散与非线性造成光脉冲脉宽和啁啾的变化,还有光纤制作缺陷、弯曲和可能受到的应力,使光脉冲的偏振产生不确定变化。为求此和,将偏振与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 φ_0 的扰动。如果设时延 $2D$ 大于光源相干时间,或

$$2D > \frac{1}{\Delta B} \quad (6)$$

式中 ΔB 为光源谱宽, 它与测得的谱线宽 $\Delta \lambda$ 有关系

$$\Delta B = \frac{c \Delta \lambda}{\lambda^2} \quad (7)$$

此时场的向量叠加将变为周知的随机相位矢量(phasor)叠加, 其效果等于功率的标量叠加,

$$P_3 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(t - nT) + \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} (\beta - \alpha)^2 \alpha^{m-1} f(t - nT, mD) \quad (8)$$

式中

$$\begin{aligned} f(t - nT) &= |f_0(t - nT)|^2, \\ f(t - nT, mD) &= |A_m(t - nT - mD)|^2 \\ A_m(t) &= \exp[-t^2/2\tau_m^2 + i\Phi_m(t)] \end{aligned} \quad (9)$$

而 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 为脉冲周期, n 为整数。忽略光纤损耗及非线性, 有^[11]

$$\begin{aligned} \Phi_m(t) &= b_m t^2 + \Phi_0(t), \\ \tau_m &= \tau_0 \sqrt{[1 + b_0^2 \tau_0^4 (1 - l_m/l_{\min})^2]/(1 + b_0^2 \tau_0^4)} \\ l_{\min} &= \pi c \tau_0^4 b_0 / [D_F \lambda^2 (1 + b_0^2 \tau_0^4)] \end{aligned} \quad (10)$$

b_m 为经 m 周环光纤后光脉冲的啁啾率, D_F 为光纤色散系数, 对单模光纤为正, $l_m = mL_D$, 为 m 周环光纤长。注意光源啁啾为红移, 即 $b_0 < 0$ 。 l_{\min} 为最小脉宽所在距离, 现为负(无意义, 脉宽单调递增)。如要计及光纤损耗及非线性, 需用薛定谔方程的数值解。

3 环路工作参数研究

3.1 环路光纤长 L_D

选 L_D 使时延 D 为脉冲列半周期的奇数倍 $2k + 1$, 并满足(5)式, 即

$$L_D = (k + \frac{1}{2}) T \frac{c}{n_0} > \frac{\lambda^2}{2n_0 \Delta \lambda} \quad (11)$$

或

$$F < \frac{(2k + 1)c \Delta \lambda}{\lambda^2} \quad (12)$$

式中 F 为光脉冲重复频率, c 为自由空间光速, n_0 为光纤线性折射率, $k = 0, 1, 2, 3 \dots$ 。对分布反馈激光器, 谱波长宽约为 0.05 nm , 由(12)式可知, 当重复率低于 13 GHz 的 $1.5 \mu\text{m}$ 光脉冲列倍率时, 光纤环的时延用脉冲的半周期即可, 高于该重复率时, 需用一个半周期; 用足够大的 k 时, 对任何窄线谱的光源或高重复率的脉冲都可满足不相干条件。

3.2 耦合器参数的影响

先忽略环光纤色散与非线性对脉宽的影响。因为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, 此时可得解析解。于是设 $\tau_m = \tau_0$, 再令

$$D = (k + \frac{1}{2}) T + \delta \quad (13)$$

δ 为实际光纤时延对所需时延的偏差, 并将(9)式中 $m = 2p$, $m = 2p + 1$ 项相分离, 有

$$\begin{aligned} P_3 &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[g(t - nT) + \frac{(\beta - \alpha)^2}{\alpha} \sum_{p=1}^{\infty} \alpha^{2p} f[t - (n + p + k)T - 2p\delta] \right] \\ &+ \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[(\beta - \alpha)^2 \sum_{p=0}^{\infty} \alpha^{2p} f[t - (n + p + k)T - \frac{T}{2} - (2p + 1)\delta] \right] \end{aligned} \quad (14)$$

(14) 式中第一项给出与原脉冲列同步的脉冲子列, 第二项给出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(14)式成一几何级数, 其中第一项的幅度为

$$A = \alpha + (\beta - \alpha)^2 \alpha / (1 - \alpha^2) \tag{15}$$

第二项的幅度为

$$B = (\beta - \alpha)^2 / (1 - \alpha^2) \tag{16}$$

倍频脉冲列要求两个子脉冲列等幅, 给出耦合比与插入损耗的关系为

$$\alpha = \beta^2 / (1 + 2\beta) \tag{17}$$

当 $\beta_{dB} = 0$ 即无插入损耗时, $\alpha = 1/3$ 。 α 与 β 的关系曲线给出不同插入损耗时耦合比的设计要求。由图 2 可见, 即使插入损耗高达 10 dB, 对应的耦合比仍有意义。将(17)式代入(15)式、

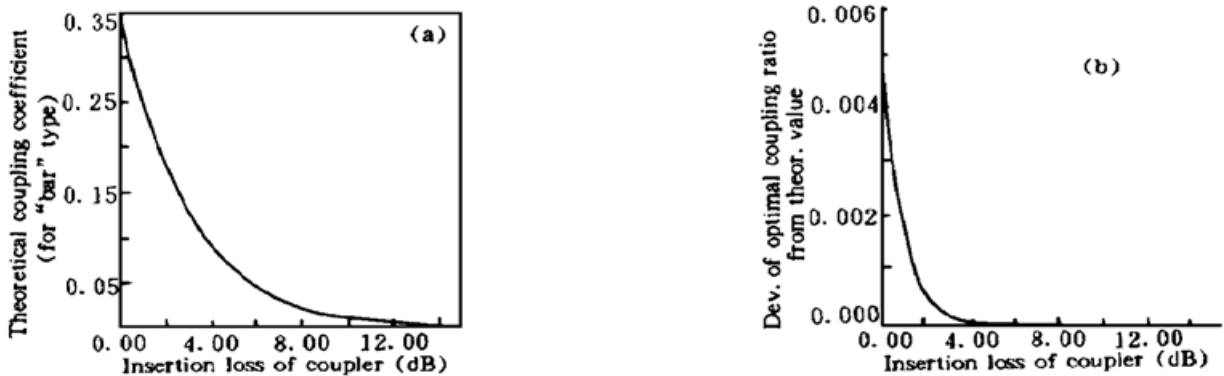


Fig. 2 (a) Coupling coefficient of fiber coupler as a function of its insertion loss, (b) The deviation of optimal coupling coefficient apart from eq. (17) for different coupler's insert loss given by numerical computing

(16) 式, 得有损耗时的输出脉冲峰值功率为[输入脉冲峰值功率为 1, 参见(4) 式]

$$A = B = \frac{\beta^2}{1 + 2\beta - \beta^2} \tag{18}$$

当 $\beta_{dB} = 0$ 时, $A = B = 1/2$, 即无插入损耗时倍频脉冲列功率均分。一般情况下脉冲峰值功率小于 $\beta/2$, 是由于脉冲循环通过耦合器受插耗的多次影响。脉冲列幅度和插耗的关系如图 3 所示; 图 3(a) 纵座标为输出幅度与输入之比, 而图 3(b) 的纵座标为输出幅度与 $\beta/2$ 之比(dB 值)。由图可见脉冲虽循环通过耦合器受插耗多次影响, 但额外损耗小于 β_{dB} 或总损耗小于 $2\beta_{dB}$ 。

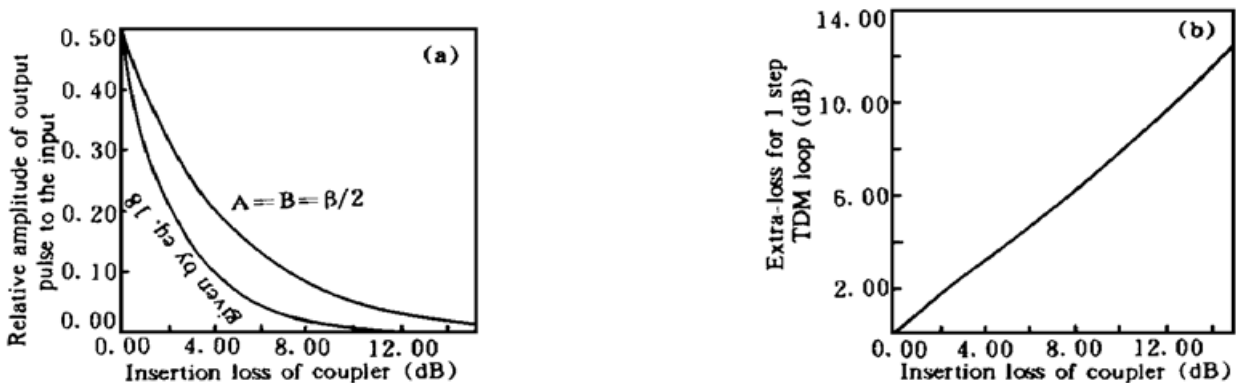


Fig. 3 (a) The influence of coupler's loss on amplitude of TDM output-pulses from loop fiber, (b) Dependence of the attenuation of output-pulse power on coupler's insertion loss

3.3 复用频率的上限

上述研究仅给出了二倍率的结果。重复串接应用图 1 的接法 N 次, 可获得 2^N 倍率。直观

地将环路光纤的时延 D 减少为 $T/4$, 并不能获得 4 倍率的输出, 因为数学上解不出(14)式处处等幅的条件, 即输出得不到幅度齐整的脉冲列。限制倍率的因素主要有: 光纤耦合器的通过带宽; 时延光纤的色散与非线性; 时延光纤长度的精度与稳定性。由于光纤耦合器通常易于做到通过带宽约 200 nm, 故只需考虑后两个因素。时延光纤的色散与非线性影响不是取决于环路光纤长 L_D , 而是 m 倍的 L_D , 此处 m 为对输出有主要贡献的周数。由(14)式估算, m 如取为 100, 与无穷级数已无实际差异。取 $L_D = 20$ cm(是为便于工程操作, 相干长度比它还小得多), 容易证明对高达 2 THz 的脉冲列其影响也可忽略。所以本法限制复用频率的因素, 实际与光纤耦合器的马赫-陈德尔接法相同, 是时延光纤长度的精度与稳定性 ζ 。设 ζ 引起的时间误差为脉冲列周期的 0.1, 以 $\zeta \approx 30 \mu\text{m}$ 计, 最高二倍率为 1 THz。取 $\zeta \approx 0.1$ mm, 可不必考虑环境温度变化的影响, 最高二倍率可达 300 GHz。

4 结果的计算机模拟

为了验证以上分析的正确性, 编程模拟当端口 1 输入高斯型脉冲序列时, 输出端口 3 的脉冲序列形状及它们如何随光纤环的长度而变。采用(14)式忽略时延光纤的非线性以及衰减。输入脉宽的半极大处的全宽取为 50 ps, $1/T$ 取 1.244 GHz(OC-24 标准), $\alpha = 1/3$, $\beta_{\text{dB}} = 0$ 。结果示于图 4。图 4(a) 为输入的高斯型脉冲序列, 图 4(b)~ 图 4(d) 及图 5 中 5(a)~ 5(e) 分别对应于光纤的时延偏差 δ 为脉冲半极大处全宽的 -0.3 、 -0.2 、 -0.1 、 0 、 0.1 、 0.4 、 0.8 、 1.2 、 1.6 、 2.0 倍时, 输出口脉冲列的各种情况。结果表明, 环状光纤耦合器时分复用输出口脉冲波形的形态和幅度的平整性, 本身就是光纤时延是否调准的良好标志。当时延偏差大于 0.4 脉宽时, 波形显著畸变, 甚至出现双峰(见图 5)。

进一步数值计算时延偏差与脉冲列幅度不均

匀性的关系, 如图 6 所示。结果表明 $\delta = 0$ 时, 如取理论值 $\alpha = 1/3$ 两脉冲子列的幅度 A 与 B 不完全相等(曲线 a), 有约 2.5% 相对功率差异。它可归因于高斯脉冲列远处边缘值的影响(矩形脉冲列无此差异), 它对数字通信的影响虽可忽略不计, 但如这样的脉冲列用作采样, 就会产生一与钟信号同步的约 -17 dB 的调制噪声。数值计算给出, 最佳耦合系数相对于理论值有一偏差, 它与插耗的关系示于图 2(b), 当 $\beta_{\text{dB}} = 0$ 时, 只要将 α 提高约 0.006 即取约 0.339 即可消除此差异[参见图 6(b)]。此差异随 β_{dB} 的增大而迅速减小, 根据图 2(b) 曲线, 当 $\beta_{\text{dB}} > 4$ dB 时, 理论结果(17)、(18)式与数值结果已无差异。

根据图 6 的曲线, 如假设在光信号分析器屏幕上能分辨出 10% 的幅度差异, 则保证时延可调整至约 0.1 脉宽。进一步观察图 4 中(b)到(d)以及图 5 中(a)到(b)曲线, 发现当时延偏大时, 同步脉冲子列中脉冲右侧波形变宽, 而当时延偏小时, 波形左侧变宽。这一不对称性与物理分析完全一致。

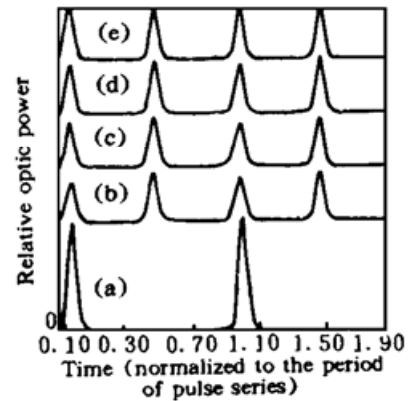


Fig. 4 Output pulse shapes for different values of adjusted delay deviation δ for loop fiber (1)
(a) input pulses, (b) $\delta = -0.3$, (c) $\delta = -0.2$, (d) $\delta = -0.1$, (e) $\delta = 0$

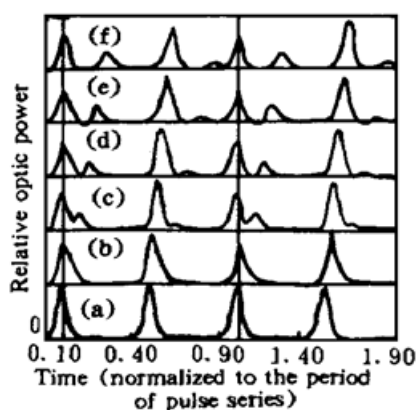


Fig. 5 Output pulse shapes for different values of adjusted delay deviation δ for loop fiber
 (a) $\delta = 0.1$, (b) $\delta = 0.4$, (c) $\delta = 0.8$, (d) $\delta = 1.2$,
 (e) $\delta = 1.6$, (f) $\delta = 20$

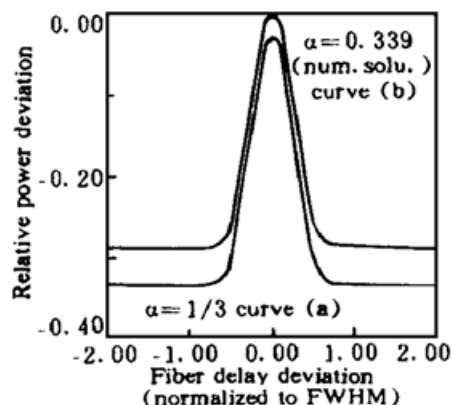


Fig. 6 Uneven amplitudes of pulse train caused by delay deviation of loop fiber for a coupler without insertion loss
 curve a: Case for theoretical optimal coupling coefficients, neglecting the effect of tail of Gaussian pulses,
 curve b: Case for optimal coupling coefficients given by numerical solution

5 实验概况

实验系统框图如图 7 所示, 其中高稳定的频率综合器 FS 给出稳定的 OC-24 正弦信号, 触发梳状波发生器产生同步的梳状脉冲, 对分布反馈激光器进行直接强度调制产生啁啾光脉冲, 再经正常色散光纤消啁啾同时压缩脉宽, 可得半高全宽为 46 ps 重复率为 1.244 GHz 的高斯脉冲序列。光纤耦合器用熔融拉锥按设计自制, $\alpha \approx 0.3$, $\beta_{\text{dB}} \approx 0.2$ dB; 输出的倍率脉冲列用 Tektronix 公司的 CSA-803 通信信号分析仪(上升时间 17 ps) 直接观测; 光纤环路的精确调整用类似于千分尺的螺旋微调(可调 10^{-5} 至 10^{-2} m) 牵引器结合火焰熔融来实现。实验结果与图 4、图 5 十分吻合。 β 与 α 的最佳关系可通过对环路光纤强迫微弯增加泄漏, 从而微量增加 β_{dB} 来得到。

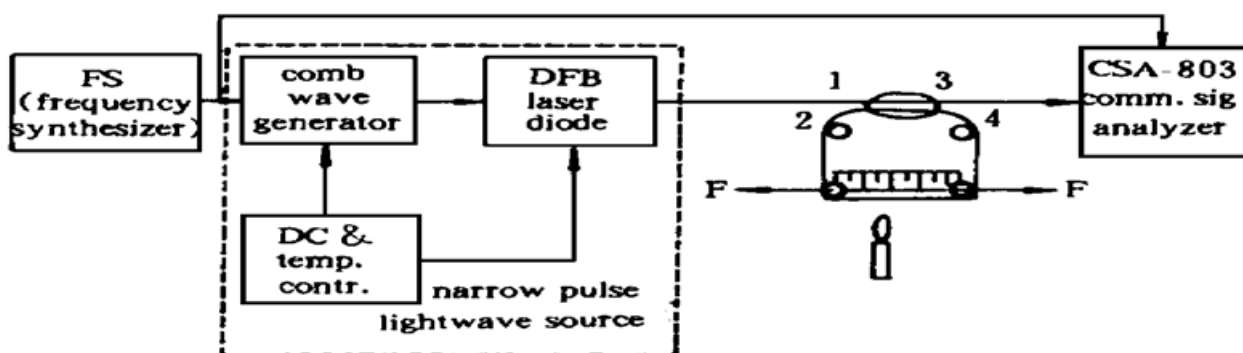


Fig. 7 Block diagram for the experiment

6 讨论与结论

6.1 输出功率

目前发表的产生倍率重复脉冲的方法, 无论是马赫-陈德尔接法还是 Sagnac 环的方法均为两路输出, 本文提出的方法则仅为一路输出, 因此输出功率自然有 3 dB 的得益(输出功率

可为输入的一半)。此外,马赫-陈德尔接法需用两个耦合器,每次复用受两次插耗,而本文的方法仅用一个耦合器,成本也低。虽然本法中脉冲在循环通过耦合器时受到插耗的多次影响,但实际上输出脉冲峰值功率的损耗不到插耗分贝值的 2 倍(参见 3.2 节)。以一级时分复用插耗为 0.2 dB 计,十级时分复用输出功率仅比应得的小约 4 dB,或输入脉冲列的-24 dB,只相当于六级理想无耗的、或五级实际同耗的马赫-陈德尔接法输出。

6.2 时延调整精度

马赫-陈德尔接法和 Sagnac 接法完全取决于仪器对时延测定的精度,而本法能从波形和脉冲幅度的均匀性方面反映出比脉宽约小一个量级的时延调整精度,无精密时延参照亦可优于 0.1 脉宽。

6.3 重复率范围

Sagnac 环法仅适用于重复率高于 100 GHz 脉宽小于 1 ps 的极窄超高频脉冲列,一级时延最大值取决于耦合器的拉锥长度,或通过带宽的倒数^[9],调节极为困难。据作者的经验最大可用时延只能做到约 0.8 ps (最窄 10 nm)^[12];虽可通过多级串联增加时延,但不能连续调整,且必然也增加插耗。本法在数百千兆赫以下实际上无脉宽和频率限制,如设法提高时延光纤的牵引精度及温控精度,有希望进一步提高频率上限。

综上所述,本文提出的环状连接循环耦合法,既有成本低、插耗小、易于实验室控制等光纤耦合器的优点,又有输出功率高(平均功率比输入低不到 2 倍耦合器插耗)、频率响应宽、时延调整精度自然地优于脉宽一个量级等特点,特别适合我国目前已具备较窄脉宽脉冲光源的研制能力但重复率较低的现状,预计会在产生高重复率光脉冲的领域发挥其应有的作用。

参 考 文 献

- [1] A. Takara, M. Kawanishi, 100 Gbit/s optical signal generating by time-division multiplication of modulated and compressed pulses from gain-switched distributed feedback (DFB) laser diode. *Electron. Lett.*, 1988, **24** (23): 1406~1408
- [2] G. E. Wickens, D. M. Spirit, L. C. Blank, 20 Gbit/s 205 km optical time-division multiplexed transmission system. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(11): 973~974
- [3] D. M. Spirit, G. E. Wickens, 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] S. Kawanishi, H. Takara, K. Uchiyama *et al.*, 100 Gbit/s, 50 km, and non-repeated optical transmission employing all-optical multi/demultiplexing and PLL timing extraction. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(12): 1075~1077
- [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): 856~857
- [7] 娄采芸, 钟山, 刘军等, 7.5 GHz 可调谐主动锁模光纤环形激光器. *中国激光*, 1996, **23**(5): 395~397
- [8] C. K. Chan, L. K. Chen, High repetition rate optical pulse train generation using optical loop mirrors. *CLEO/Eur.'94*, Amsterdam, the Netherlands, 1994, paper Cth18
- [9] Chun Kit Chan, Liarr Kuan Chen, Theoretical Analysis of high repetition rate optical-pulse multiplication using fiber-coupler loop configuration. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1995, **7**(10): 1145~1147

- [10] P. R. Prucnal, Time-division optical micro-area networks. *Proc. SPIE*, 1990, **1389**: 462~ 476
- [11] S. A. Planas N. L. Pires Mansw, C. H. Brito Cruz *et al.*, Spectral narrowing in the propagation of chirped pulses in single-mode fiber. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(9): 699~ 701
- [12] 姚寿铨, 王 勇, 陆善达, 熔锥直线型 33 单模光纤定向耦合器的光功率耦合分析. *光学学报*, 1990, **10**(11): 1040~ 1046

Analysis of a Novel Fiber-Coupler Loop-Connecting Method for Multiplying Optical-Pulse Repetition Rates Based on TDM

Jiang Zeming Huang Zhaoming Zhang Minghua Yiao Shouqian

(*School of Communication and Information Engineering, Shanghai University 201800*)

(Received 31 December 1996; revised 13 March 1997)

Abstract A novel connecting method for multiplying optical-pulse repetition rate based on TDM (time division multiplexing) has been proposed and analyzed in detail. How to design the coupler's coupling ratio as a function of its insertion loss, to select the length of loop fiber used as time delay line, to predict the effect of fiber length deviation from designed value and how to adjust precisely the loop-fiber length have been indicated. Theoretical formulae, computer simulation to analyzed results and brief description of the experiment are given. The comparisons of the present connecting with the classical Mach-Zehnder interferometer connecting and the Sagnac connecting exhibit that the present one has several advantages and superior behaviors, with which the high repetition rate of optical pulses from some giga Hertz to hundreds of giga Hertz can be better achieved by using the present method in series.

Key words multiplying optical-pulse repetition rate, application of fiber coupler, time division multiplexing.