

文章编号: 0258-7025(2005)02-0216-05

光纤光脉冲分路-延迟器及其优化研究

酆 达¹, 李 铮¹, 陈宇晓²

(¹ 北京航空航天大学电子信息工程学院光电与信息工程系, 北京 100083)
² 中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 针对高速光脉冲测量系统提出了一种用于高速模拟脉冲信号复制的光纤光脉冲分路-延迟器结构。与其他结构的光纤光脉冲分路-延迟器相比,该结构具有损耗低、输出周期脉冲系列等幅性好的优点。同时,对该结构输出的脉冲功率及其影响因素进行了理论分析。仿真及优化分析表明,通过合理选择各 2×2 耦合器的均匀性并适当安排它们之间的连接顺序,可以增大最小输出脉冲的幅度及减小由于各耦合器的均匀性不为零而引起的输出脉冲幅度系数不等的程度,从而使该结构输出脉冲的参数得到优化。

关键词 集成光学; 高速光脉冲; 光纤耦合器; 光延迟; 脉冲测量

中图分类号 TN 253 **文献标识码** A

An Optical Pulse Splitting-Delaying Device Based on Optical Fiber and Its Optimization

FENG Da¹, LI Zheng¹, CHEN Yu-xiao²

(¹ Department of Photonics and Information Engineering, School of Electrical Engineering, BUAA, Beijing 100083, China)
² Institute of Electronic Engineering of CAEP, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract An optical pulse splitting-delaying device based on optical fiber was proposed for the replication of a high-speed analog pulse in the measurement system for high-speed optical pulses. Comparing with other optical pulse splitting-delaying devices, its virtues are low loss and small amplitude deviation between pulses. In the following, the power of output pulses from the device and its affect factors are analyzed theoretically. Simulation and optimal analyses indicate that the amplitude of the minimal output pulse can be increased and the amplitude deviation between pulses as a result of nonzero uniformity can be decreased by choosing appropriately uniformity of each 2×2 fiber coupler and arranging reasonably the connection order of those fiber couplers.

Key words integrated optics; high-speed optical pulses; fiber couplers; optical delay-time; measurements of optical pulses

1 引 言

“微带横断面取样法”是目前测量高速单次(光)脉冲的重要方法之一。但是,由于微带线取样端连接有多个取样门,该方法时间分辨率受取样门导通时间限制,对皮秒脉冲多点密集同时取样时,会导致取样相关而使数据处理复杂化;同时,由于多个取样门性能可能不一致,也会造成取样信号的失真^[1],这

些机理性的实际因素都限制了该方法的使用。因此在被测光脉冲的稳定性较差或者重复频率非常低,甚至为单次瞬变光脉冲的情况下,通常采用等效时间取样的方法,但必须将被测单次脉冲复制成周期脉冲。目前常见的光纤光脉冲分路-延迟器有两种结构:一种为循环式光纤延迟线结构,该结构可以实现精确的等延迟,但由于输出脉冲间幅度相差很大,

收稿日期:2003-11-06; 收到修改稿日期:2004-04-01

基金项目:国家自然科学基金-中国工程物理研究院联合基金(10176001)资助项目。

作者简介:酆 达(1974—),男,天津人,北京航空航天大学博士研究生,主要从事光纤、光电信息与测量系统研究。

E-mail: fanta99@sina.com

一般 PIN 的动态范围很难满足要求；另一种为 $1 \times N$ 耦合器和 $N \times 1$ 耦合器级联结构，但 $1 \times N$ 耦合器与 2×2 耦合器相比插入损耗太大。

本文提出了一种用于高速模拟脉冲信号复制的光纤光脉冲分路-延迟器结构，给出了该结构输出脉冲功率及其影响因素的理论分析，并对它进行了仿真及优化研究。

2 输出脉冲功率的理论计算及影响因素分析

如图 1 所示，光纤光脉冲分路-延迟器由若干 2×2 光纤耦合器和不等臂光纤级联组成，单端输入单端输出。其原理是：通过精确控制 2×2 耦合器的分光比和两输出端光纤长度差以及其他补偿方法对光脉冲的延迟和幅度进行控制，使光纤中时间分布的单次光脉冲变换为空间分布的等延迟间隔的周期光脉冲（与光时分复用（OTDM）中的数字应用不同^[2]，在模拟应用中不仅要求脉冲间等延迟，同时要求脉冲功率的等幅性，因此难度将更大）。

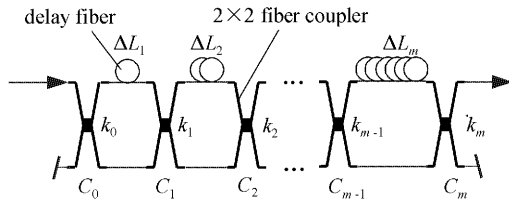


图 1 光纤光脉冲分路-延迟器

Fig. 1 An optical pulse splitting-delaying device based on optical fiber

光信号经过光纤产生的时间延迟可由下式表示

$$\Delta L_i = \Delta \tau_i \frac{c}{n_1}, \quad (1)$$

其中 ΔL_i 表示第 i 级不等臂光纤的上、下臂的长度差 ($i = 1, 2, 3, \dots, m$), $\Delta \tau_i$ 为对应的时间延迟差; c 为真空中的光速; n_1 为光纤纤芯的折射率。

当第 i 级不等臂光纤的上臂延迟时间比下臂长 $2^{i-1} T$ 时 (T 为输出光脉冲序列的周期), 设经第 $1 \sim m$ 级不等臂光纤的下臂输出的脉冲延时为 0 (影响延迟的是上下臂光纤的长度差), 则经第 1 级不等臂光纤的上臂、第 2 ~ m 级的下臂输出的脉冲延时为 T , 经第 1 级不等臂光纤的下臂、第 2 级的上臂、第 3 ~ m 级的下臂输出的脉冲延时为 $2T$, ..., 依此类推, 输入单个光脉冲就可由 m 级光纤光脉冲分路-延迟

器 ($m+1$ 个 2×2 耦合器, m 对不等臂光纤) 得到 2^m 个等延迟间隔为 T 的光脉冲序列。

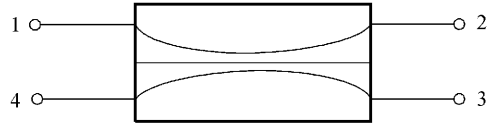


图 2 2×2 光纤耦合器

Fig. 2 2×2 fiber coupler

设光纤光脉冲分路-延迟器中耦合器 C_0, C_1, \dots, C_m 的端口 1 至 3 (如图 2 所示) 的功率耦合系数分别为 $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m$, 它们的附加损耗分别为 $\alpha_{e0}, \alpha_{e1}, \dots, \alpha_{em}$, 则耦合器 C_i 的功率传输矩阵 T_{ci} 可表示为

$$T_{ci} = \begin{bmatrix} \gamma_i - \alpha_i & \alpha_i \\ \alpha_i & \gamma_i - \alpha_i \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中 $\gamma_i \leq 1$ 为与耦合器 C_i 附加损耗有关的参数

$$\gamma_i = 10^{-0.1\alpha_{ei}}. \quad (3)$$

相应的耦合器 C_i 两输出端口的插入损耗分别为

$$IL_{12i} = -10 \lg(\gamma_i - \alpha_i), \quad IL_{13i} = -10 \lg \alpha_i. \quad (4)$$

因用于延迟的光纤长度很短, 其传输损耗可以忽略不计。光在第 i 级不等臂光纤中传输时, 其损耗主要是四个光纤接头 (上、下臂各 2 个) 的损耗。设每个光纤接头的损耗系数为 A , 则第 i 级不等臂光纤的传输矩阵 T_{fi} 可表示为

$$T_{fi} = \begin{bmatrix} (1-A)^2 z^{-2^{(i-1)}T} & 0 \\ 0 & (1-A)^2 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

在 z 变换中, $z^{-2^{(i-1)}T}$ 代表时延 $2^{(i-1)} T$ 。

因此整个光纤光脉冲分路-延迟器的传输矩阵为

$$T = T_{c0} \prod_{i=1}^m T_{fi} T_{ci}. \quad (6)$$

设输入脉冲为 $P_{in}(t)$, 则光纤光脉冲分路-延迟器输出的 2^m 个等延迟间隔的脉冲 $P_{out}(t)$ 可表示为

$$P_{out}(t) = [1 \ 0] \cdot \left\{ T \cdot \begin{bmatrix} P_{in}(t) \\ 0 \end{bmatrix} \right\}, \quad (7)$$

将式 (7) 展开整理, 可改写为下面的形式

$$P_{out}(t) = \sum_{i=0}^{2^m-1} p_i \cdot p_{in}(t - iT), \quad (8)$$

式中 p_i 为光纤光脉冲分路-延迟器冲击响应第 $i+1$ 个脉冲的幅度系数。为了便于分析, 令 $m = 5$, 根据式 (8) 可得这 32 个脉冲的幅度系数分别为

$$\begin{cases} p_0 = \alpha_0(\gamma_1 - \alpha_1)(\gamma_2 - \alpha_2)(\gamma_3 - \alpha_3)(\gamma_4 - \alpha_4)\alpha_5(1 - A)^{10} \\ p_1 = (\gamma_0 - \alpha_0)\alpha_1(\gamma_2 - \alpha_2)(\gamma_3 - \alpha_3)(\gamma_4 - \alpha_4)\alpha_5(1 - A)^{10} \\ \vdots \\ p_{31} = (\gamma_0 - \alpha_0)(\gamma_1 - \alpha_1)(\gamma_2 - \alpha_2)(\gamma_3 - \alpha_3)(\gamma_4 - \alpha_4)(\gamma_5 - \alpha_5)(1 - A)^{10} \end{cases} \quad (9)$$

若要输出等幅脉冲序列,只要满足条件 $p_0 = p_1 = p_2 = \dots = p_{31}$,即

$$\gamma_i = 2\alpha_i, \quad i = 1, 2, 3, 4, 5. \quad (10)$$

根据分光比 k 的定义

$$k(\%) = [(\gamma - \alpha)/\gamma] \times 100. \quad (11)$$

此时有 $k_0 = k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = k_5 = 50\%$ (即 2×2 耦合器端口 1 输入一信号时,端口 2 和端口 3 输出功率相等)。推广到任意 m 的情况可以得出,当耦合器分光比 $k_i = 50\%$ 时,输出的脉冲序列为等幅脉冲序列,其幅度系数 p 为

$$p = \frac{(1 - A)^{2m}}{2^{m+1}} \prod_{i=0}^m 10^{-\frac{\alpha_i}{10}}, \quad (12)$$

可以看出,等幅脉冲序列幅值系数的大小由光纤光脉冲分路-延迟器中 $m+1$ 个耦合器的附加损耗,光纤接头损耗及不等臂光纤的级数决定。

对于分光比标称为 50/50 的耦合器,实际上两端口输出的功率并不严格相等,这主要是因为制作耦合器的过程中,不同的耦合引入不同的插入损耗。为了描述 50/50 耦合器这种分光的不等性,定义了均匀性(Uniformity)这个特性参数 U (dB)。对于 2×2 耦合器来说,其表达式为^[3]

$$U = IL_{\max} - IL_{\min}, \quad (13)$$

其中 IL_{\max} 和 IL_{\min} 分别为耦合器的最大插入损耗和最小插入损耗。 U 越小,说明耦合器的分光均匀性越好。

根据式(4)和(11)得

$$\begin{aligned} U &= |-10\lg(\gamma - \alpha) - (-10\lg\alpha)| = \\ &|10\lg[(\gamma - \alpha)/\alpha]| = |10\lg[k/(1 - k)]|, \end{aligned} \quad (14)$$

其中 k 为分光比标称为 50/50 耦合器的真实分光比。

利用符号函数 $\text{sgn}(t) = \begin{cases} 1 & (t > 0) \\ -1 & (t < 0) \end{cases}$, 并令

$$U' = [\text{sgn}(k - 0.5)]U, \text{ 可将式(14) 改写为} \quad \gamma - \alpha = 10^{0.1U'}\alpha. \quad (15)$$

当 $m = 5$ 时,设光纤光脉冲分路-延迟器中耦合器 $C_0 \sim C_5$ 的均匀性分别为 $U_0 \sim U_5$ 。记

$$\begin{aligned} \xi &= \alpha_0\alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4\alpha_5(1 - A)^{10} = \\ &(1 - A)^{10} \left[\prod_{i=0}^5 \frac{\gamma_i}{(10^{0.1U'_i} + 1)} \right], \end{aligned} \quad (16)$$

则由式(9)和(15)可得输出的 32 个脉冲的幅度系数分别为

$$\begin{cases} p_0 = \xi 10^{0.1(U'_1+U'_2+U'_3+U'_4)} \\ p_1 = \xi 10^{0.1(U'_0+U'_2+U'_3+U'_4)} \\ \vdots \\ p_{31} = \xi 10^{0.1(U'_0+U'_1+U'_2+U'_3+U'_4+U'_5)} \end{cases} \quad (17)$$

联合式(16)和(17)可以看出,各耦合器附加损耗的不同并不改变脉冲序列的等幅性,只影响它们最终幅度的大小,而各耦合器的均匀性不为零才是引起输出脉冲幅度系数不等幅的根本原因。为了描述光纤光脉冲分路-延迟器输出脉冲的这种不等幅性,定义了脉冲幅度偏差 Δp 这个参数为

$$\Delta p = \Sigma(p_i - \bar{p})^2, \quad (18)$$

其中 \bar{p} 为输出脉冲的平均幅度系数。

3 优化研究与仿真分析

该光纤光脉冲分路-延迟器设计的好坏,可以从两个方面评判:一是从节约光源功率的角度看,输出脉冲中幅度最小的脉冲 p_{\min} 的幅度越大越好;另一是从输出脉冲的等幅性看,输出脉冲的幅度偏差 Δp 越小越好。以这两个判据为依据,本文采用穷举法在 U 可取值的范围内找到各耦合器均匀性的最佳组合。

对于常用的 2×2 光纤耦合器,均匀性 U 的取值范围为 $0.5 \sim 0.9$ dB,即 $U'_0 \sim U'_5$ 可取的数值范围为 $-0.9 \sim -0.5$ 和 $0.5 \sim 0.9$ 。在程序中,仅取 32 个脉冲中的前 20 进行优化计算,循环步长取为 0.01 dB。不失一般性,设各个耦合器的附加损耗均为 0.1 dB,每个光纤接头的损耗为 0.1 dB,则程序输出的最优 17 组结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出,前 4 组两项指标都最好,后面依次次之。归纳该算例和其他算例可得出:要想使 p_{\min} 和 Δp 这两项指标最小, $U'_0 \sim U'_5$ 之间的绝对值必须相等才有可能,并且该绝对值越小越好(当 $U_0 \sim U_5$ 均取 0.6 dB 时, $p_{\min} = 0.009281$, $\Delta p = 0.000058$);而当 $U'_0 \sim U'_5$ 之间的绝对值不等时, p_{\min} 和 Δp 这两项指标都将恶化。图 3 所示为 $U'_0 \sim U'_4$ 分别取 $0.50, -0.50, -0.50, 0.50, 0.50$, 而 U'_5

表 1 优化程序最优的前 17 组输出

Table 1 Top seventeen groups output of the program for optimization

Number	U'_0	U'_1	U'_2	U'_3	U'_4	U'_5	p_{\min}	Δp
1	0.50	-0.50	-0.50	0.50	-0.50	-0.50	0.009539	0.000039
2	-0.50	0.50	-0.50	0.50	-0.50	-0.50	0.009539	0.000039
3	-0.50	-0.50	0.50	0.50	-0.50	-0.50	0.009539	0.000039
4	0.50	0.50	0.50	0.50	-0.50	-0.50	0.009539	0.000039
5	-0.50	-0.50	-0.50	0.50	0.50	-0.50	0.009539	0.000045
6	0.50	0.50	-0.50	0.50	0.50	-0.50	0.009539	0.000045
7	0.50	-0.50	0.50	0.50	0.50	-0.50	0.009539	0.000045
8	-0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	-0.50	0.009539	0.000045
9	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	0.009539	0.000045
10	0.50	0.50	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	0.009539	0.000045
11	0.50	-0.50	0.50	-0.50	-0.50	-0.50	0.009539	0.000045
12	-0.50	0.50	0.50	-0.50	-0.50	-0.50	0.009539	0.000045
13	0.50	-0.50	-0.50	0.51	-0.50	-0.51	0.009538	0.000040
14	0.50	0.50	0.50	0.51	-0.50	-0.51	0.009538	0.000040
15	-0.50	0.50	-0.50	0.51	-0.50	-0.51	0.009538	0.000040
16	-0.50	-0.50	0.50	0.51	-0.50	-0.51	0.009538	0.000040
17	-0.50	-0.50	-0.50	0.51	0.50	0.51	0.009538	0.000045

的值从(a) $-0.9 \sim -0.5$, (b) $0.5 \sim 0.9$ 之间变化时对应的 p_{\min} 和 Δp 变化曲线, 当 U'_5 的绝对值越接近 0.5, p_{\min} 越大, 而 Δp 越小。这主要是因为级联的

耦合器上下臂都有输入, U'_5 越大, 对某一臂来说输出就大, 但对另一臂来说输出必然就小; 输出脉冲幅度波动较大, 从而 Δp 也就越大。

表 1 前 4 组数据说明达到最优输出的均匀性组合有多种。计算表明, 对于 m 级光纤光脉冲分路-延迟器来说, 当取输出的全部 2^m 个脉冲进行优化计算时, 这种最佳组合有 2^{m-1} 种。

比较组 1 和组 5 可以看出, $U'_0 \sim U'_5$ 即使选用相同均匀性的 6 个耦合器 (都是 2 个 0.50, 4 个 -0.50), 但由于它们之间的组合顺序不同, 最终的 p_{\min} 和 Δp 也不一定相等 (组 1 和组 5 的 p_{\min} 相等但 Δp 不等), 同样组 16 和组 17 也可以证明这一点。另外, 当 $U'_0 \sim U'_5$ 依次取 $-0.50, -0.50, 0.50, -0.50, -0.50, 0.50$ 时 (同样包括 2 个 0.50, 4 个 -0.50), 通过计算此时有 $p_{\min} = 0.007577, \Delta p = 0.000037$, 与组 1 和组 5 的 p_{\min} 和 Δp 都不等。这说明通过合理安排 6 个耦合器之间的连接顺序, 可以增大最小输出脉冲的幅度以及减小由于各耦合器的均匀性不为零而引起输出脉冲幅度系数不等的程度。

根据表 1 中第 1 组的数据, 选取 $U'_0 \sim U'_5$ 均为 0.5 dB, 即 $U'_0 \sim U'_5$ 分别为 0.5, $-0.5, -0.5, 0.5, -0.5, -0.5$ 。输入单次光脉冲的根部宽度取为 1 ns, $T = 1.5$ ns, 通过 Optiwave 的 OptiSystem 软件建模与仿真, 得到此时光纤光脉冲分路-延迟器输出的前 20 个脉冲的幅度系数如图 4 所示。

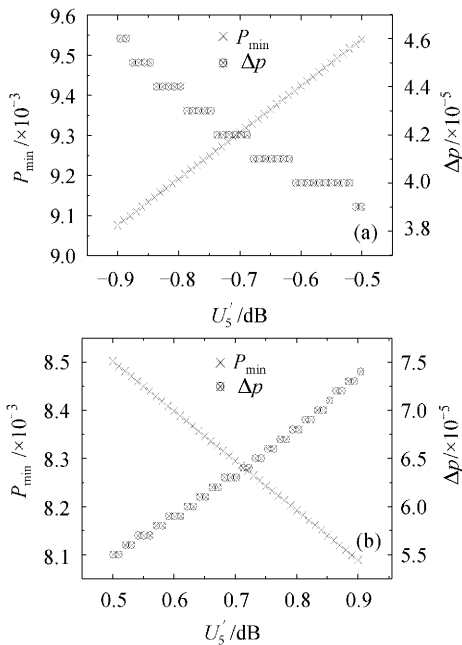


图 3 $U'_0 \sim U'_4$ 分别取 0.50, $-0.50, -0.50, 0.50, 0.50$, 而 U'_5 变化时的 p_{\min} 和 Δp 的变化曲线

(a) U'_5 在 $-0.9 \sim -0.5$ 之间变化; (b) U'_5 在 $0.5 \sim 0.9$ 之间变化

Fig. 3 Curves of p_{\min} and Δp versus U'_5 , When $U'_0 \sim U'_4$ are 0.50, $-0.50, -0.50, 0.50, 0.50$, respectively

(a) variation of U'_5 between -0.9 and -0.5 ;

(b) variation of U'_5 between 0.5 and 0.9

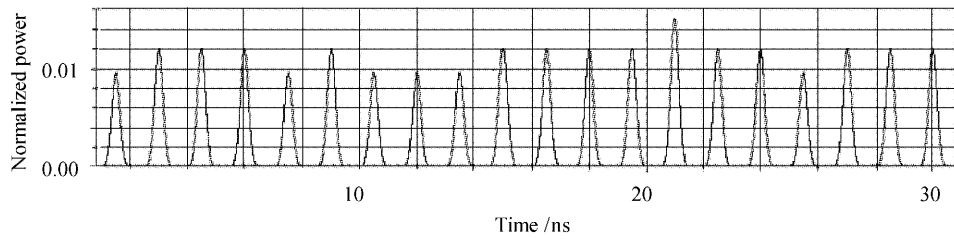


图 4 5 级光纤光脉冲分路-延迟器输出的前 20 个光脉冲

Fig. 4 Amplitude of the first twenty pulses from 5 stages optical pulse splitting-delaying device based on optical fiber

由图 4 可以看出,由于 50/50 耦合器的均匀性 $U \neq 0$, 造成输出的脉冲幅度不同。20 个脉冲中最大和最小相差约为 1.58 倍, 脉冲幅度偏差为 3.9×10^{-5} , 其中幅度系数最小的脉冲约为输入单脉冲幅度的 1/105。当该光纤光脉冲分路-延迟器结构确定以后, 输出脉冲间的幅度偏差为定值, 对周期采样得到的数字化采样值乘以相应的补偿加权系数就可以消除这些偏差。

4 结 论

提出了一种用于高速模拟脉冲信号复制的光纤光脉冲分路-延迟器结构, 给出了该结构输出脉冲功率及其影响因素的理论分析。分析得到, 其中各耦合器的均匀性不为零才是引起输出脉冲幅度系数不等幅的根本原因。根据优化及仿真结果, 要使最小

脉冲幅度系数最大和脉冲幅度偏差最小, 必须同时满足两点: 1) 各 2×2 光纤耦合器 U' 值的绝对值相等, 并且该绝对值越小越好; 2) 这些 2×2 光纤耦合器之间的连接顺序要安排合理, 当取输出的全部 2^m 个脉冲进行优化计算时, 这种合理组合共有 2^{m-1} 种。

参 考 文 献

- 1 Feng Da, Li Zheng, Tang Dan. Measurement methods for high speed optical pulses [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(9):863~868
鄯 达, 李 铮, 唐 丹. 高速光脉冲的测量方法[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(9):863~868
- 2 K.-L. Deng, K. I. Kang, I. Glesk *et al.*. Optical packet compressor for ultra-fast packet-switched optical networks [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(14):1237~1239
- 3 Djafar K. Mynbaev, Lowell L. Scheiner. *Fiber-Optic Communications Technology* [M]. Beijing: Science Press, 2002. 586~595