

文章编号: 1001-3806(2005)06-0604-04

## 光脉冲光纤周期复制技术研究

陈宇晓<sup>1,3</sup>, 鄢 达<sup>2</sup>, 李 铮<sup>2</sup>, 郑 铮<sup>2</sup>, 杨谟华<sup>3\*</sup>, 唐 丹<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院 电子工程研究所, 绵阳 621900; 2 北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083; 3 电子科技大学 微电子与固体电子学院, 成都 610054)

**摘要:** 针对常用的多路高速光脉冲复制系统可能的实现形式进行了研究, 根据各种应用中所需的插入损耗、输出脉冲周期性、功率稳定性等性能要求, 对多种光纤光脉冲复制结构的特点进行了分析比较。通过对各种结构的输出脉冲功率、周期性及其影响因素的理论分析, 论述了使各种结构的输出脉冲优化的可能性与方法。指出了有源循环式光纤延迟脉冲复制器适合于产生重复周期准确、输出功率大的光脉冲序列。

**关键词:** 高速光脉冲; 光脉冲复制器; 光纤耦合器; 光延迟

中图分类号: TN253 文献标识码: A

### Study on the fiber-optic periodic pulse replication techniques

CHEN Yu-xiao<sup>1,3</sup>, FENG Da<sup>2</sup>, LI Zheng<sup>2</sup>, ZHENG Zheng<sup>2</sup>, YANG Mo-hua<sup>3</sup>, TANG Dan<sup>1</sup>

(1. Institute of Electronic Engineering CAEP, Mianyang 621900, China; 2. School of Electrical and Information Engineering Beijing University of Aeronautics and Astronautics Beijing 100083 China; 3. College of Microelectronics and Solid Electronics UESTC, Chengdu 610054, China)

**Abstract** Current fiber-optic pulse replication techniques for generating high-speed optical pulse patterns are studied. The characteristics of different implementation of the fiber-optic pulse replicators based on different techniques are compared according to the different performance requirements of insertion loss, periodicity and power stability of the output pulses in various applications. Through the theoretical analyses of the key parameters of the replicated pulse output from these devices and their limiting factors, the feasibility and methods for further optimization of the output are presented. The optical pulse active circulating replicator using optical amplifier is suitable for generating a sequence of pulse trains with precise periodicity and high output power.

**Key words** high-speed optical pulses; optical pulse replicator; fiber couplers; optical delay-time

### 引 言

随着光电及光通讯技术的迅猛发展, 超短光脉冲及其产生与测量技术不仅日益成为重要的研究课题而且具有越来越重要的应用价值。光脉冲复制器是一种可以将单次光脉冲信号输入转换为具有特定时域分布与强度分布的多个光脉冲序列输出的器件, 在光脉冲技术中具有多种应用前景。例如, 在对低重复频率或单次的短脉冲测量中, 可以使用脉冲复制器将输入的脉冲无失真地复制成一周期脉冲序列, 然后利用采用等效时间取样的方法来获取脉冲波形。脉冲复制技术在光通讯领域中, 如超高速光时分复用技术、光码分复

用技术等方面<sup>[1]</sup>, 得到了广泛的应用。但目前国内外对于该技术用于模拟光脉冲复制的论述却几乎没有, 基于此, 作者拟对多路高速模拟光脉冲复制系统可能的实现形式进行研究。

与高速电脉冲信号复制器相比, 由于光纤具有宽带、低损耗、低色散的传输特性, 用它可获得比其它电信号延迟媒质(如同轴电缆、CCD器件、SAW器件等)大得多的延迟时间带宽积(时间带宽积  $time-bandwidth\ product$ , TB), 从而以光的形式可以进行更短脉冲的高精度复制。光纤同时具有很好的安全性、可靠性、电磁兼容性、抗干扰能力等优点, 使得光纤脉冲复制系统将越来越显示出在宽带信号处理中的重要作用。

作者系统地介绍了目前 3 种主要的基于光纤延迟的脉冲复制技术, 即树形复制器、前馈式复制器与循环式复制器。在分析了其工作机理和实现技术的基础上, 进行了各结构输出脉冲功率及其影响因素的理论分析与研究。对使用各类技术实现高速脉冲信号复制的关键问题与技术难点进行了较深入的总结与分析, 并指出了进一步优化的可能技术方法。

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

作者简介: 陈宇晓(1972-), 男, 工程师, 博士研究生, 主要从事皮秒光电子学和军控电子学研究。

\* 通讯联系人。E-mail: myhang@uestc.edu.cn

收稿日期: 2004-09-07; 收到修改稿日期: 2004-10-12

### 1 树形耦合器光纤延迟脉冲复制器

如图 1 所示, 树形耦合器光纤延迟脉冲复制器是一种结构上最直接明了的脉冲复制器形式。其工作原理是: 由 1 个  $1 \times N$  光纤耦合器将输入的光脉冲信号在空间上分为  $N$  路, 在对各路信号进行不同的光纤延迟后, 再以另一个  $1 \times N$  光纤耦合器将空间上  $N$  路脉冲信号合并成一路, 从其输出端依次输出, 从而得到时域上的  $N$  个复制光脉冲。各脉冲的时间间隔由各路光纤延迟线的长度差决定。

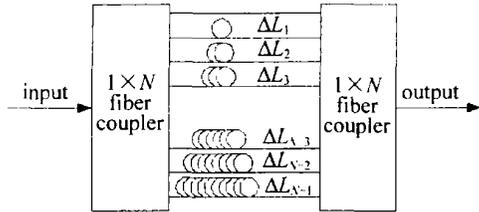


Fig 1 Fiber-optic pulse replicator made of two concatenated  $1 \times N$  tree couplers

首先将  $1 \times N$  光纤耦合器的一路输出与另一个  $1 \times N$  光纤耦合器的一路输入直接熔接在一起, 则其第  $i$  路引入的相对光纤长度差  $\Delta L_i$  应严格满足:

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

式中,  $T$  为脉冲时间间隔,  $c$  为真空中的光速,  $n_1$  为延迟光纤纤芯的折射率。注意这里的相对长度差与延迟差都是相对最短的一路 ( $i = 0$ ) 来说的。

当  $N$  较大时, 直接实现树形  $1 \times N$  光耦合器较为困难, 一种实现方式是以端口数少的耦合器组成阵列来实现。例如, 可以  $2 \times 2$  耦合器为基本单元, 由  $N - 1$  个  $2 \times 2$  耦合器串接而成。应合理设计每个  $2 \times 2$  耦合器的耦合比及生产工艺, 只有这样才能使得整个耦合器达到最佳的性能指标及稳定性。

标准树形  $1 \times N$  光耦合器的主要参数有最大插入损耗  $L_{in,max}$  和均匀性  $U_N$ 。第  $i$  端的插入损耗为总输入光功率  $P_{in}$  和第  $i$  端的输出光功率  $P_{out,i}$  之比。由于制造工艺的原因, 多端耦合器功率在各输出端间难以均匀分配。其均匀性  $U_N$  则代表了这一偏差的严重程度, 由各输出端间的最大插入损耗之差表示。

以产生 32 个脉冲的脉冲串的复制器为例, 现常用的  $1 \times 32$  光耦合器的  $L_{in,max}$  的范围为 17.0 dB ~ 18.5 dB,  $U_N$  的取值范围为 2.2 dB ~ 5.0 dB, 取两个光耦合器的  $L_{in,max} = 18.5$  dB,  $U_N = 5.0$  dB, 每个光纤接头的损耗系数为  $A = 0.1$  dB, 则树形复制器输出的脉冲功率幅值的可能最大值和最小值相差的倍数为 10 倍, 而可能的最大和最小的脉冲幅度系数分别为  $1.905 \times 10^{-3}$  和  $1.905 \times 10^{-4}$ , 即大约为输入单脉冲功率幅值的 1/525 和 1/5248。

此脉冲复制技术的优点是脉冲的分路和延迟可独立调节。在加工工艺精度允许的范围内, 通过对各段光纤长度的调整, 可以实现任意脉冲间隔的组合。若在各延迟线中加入衰减器则可实现任意形式的相对脉冲强度输出。其缺点是: 对脉冲复制数量较大, 即  $N$  较大时,  $1 \times N$  光纤耦合器的插入损耗较大, 若不加以控制, 则插入损耗的均匀性较差。同时, 要对  $N$  个延迟线的长度进行精确控制, 实现的难度较大。

### 2 前馈式光纤延迟脉冲复制器

图 2 是由  $2 \times 2$  光纤耦合器和不等臂光纤级联组成的一种前馈式光纤光脉冲复制器结构<sup>[1]</sup>。与图 1 不同, 它由  $m$  级延迟线结构组成, 而每级由  $2 \times 2$  耦合器与上下臂两条光纤延迟线构成。整个复制器共有  $m + 1$  个  $2 \times 2$  耦合器,  $m$  对不等臂光纤, 其输出脉冲序列的时间间隔和幅度可通过控制  $2 \times 2$  耦合器的分光比和两输出端光纤长度差及其它补偿方法来实现。

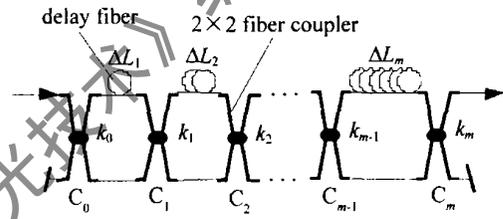


Fig 2 Fiber-optic pulse replicator based on a passive feed-forward fiber-optic delay line structure

为了产生  $N = 2^m$  个等幅的周期脉冲, 要求各耦合器的分光比严格为 50:50 且两输出端上、下臂光纤延迟时间差为  $2^{i-1}T$  ( $i$  为相应的级数,  $i = 1 \dots, m$ )。图 2 中耦合器  $C_j$  ( $j = 0 \dots, m$ ) 的功率传输矩阵可表示为:

$$T_{C_j} = \begin{bmatrix} \gamma_j - \alpha_j & \alpha_j \\ \alpha_j & \gamma_j - \alpha_j \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $\alpha_j$  为耦合器  $C_j$  的功率耦合系数,  $\gamma_j = 10^{-0.1\alpha_{c_j}}$  (其中,  $\alpha_{c_j}$  为以 dB 表示的耦合器  $C_j$  的附加损耗) 反映了耦合器输出偏离理想情况的程度。在理想情况下, 耦合器的输出功率总和应等于输入功率, 有  $\gamma = 1$ 。

在延迟光纤长度较短, 其传输损耗可忽略。如果以下臂光纤为时间参考, 则第  $i$  级不等臂光纤  $\Delta L_i$  的传输矩阵可表示为:

$$T_{\Delta L_i} = \begin{bmatrix} \exp[-j\omega 2^{(i-1)}T] & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,  $\omega$  代表光信号的角频率, 而  $\exp[-j\omega 2^{(i-1)}T]$  代表了  $2^{(i-1)}T$  的时延。

因此, 整个光脉冲复制器的传输矩阵为:

$$T = T_{C_0} \prod_{i=1}^m T_{\Delta L_i} T_{C_i} \quad (4)$$

由此分析可知, 当耦合器分光比为理想情况时, 不考虑

每个光纤接头的损耗,则输出的等幅脉冲序列的脉冲幅度与输入脉冲幅度之比为:

$$p = \frac{1}{2^{m+1}} \prod_{i=0}^m \gamma_i \quad (5)$$

当耦合器的均匀性  $U \neq 0$  即实际分光比偏离 50:50 时,会引起输出脉冲序列不等幅<sup>[2]</sup>。

此脉冲复制技术的优点是:与前者树形耦合器光纤延迟脉冲复制器相比,插入损耗大大降低,理想的输出脉冲幅度与输入脉冲幅度之比由  $N^2$  变为  $2N$ 。同时,仅要求对  $\log_2 N$  个而非  $N$  个延迟线组的长度进行精确控制,实现的工艺难度相对降低。其缺点是:脉冲的分路和延迟不可独立调节。改变光纤间的相对长度,难以实现任意脉冲间隔的组合。对于  $2 \times 2$  耦合器的分光比偏离 50:50 所造成的输出脉冲的不等幅,无法较简单地补偿,所以在实际应用中不可避免地会产生幅度非均匀的脉冲输出的问题。对于这一问题,需根据所用器件进行优化设计以尽量减小其影响<sup>[2]</sup>。

### 3 循环式光纤延迟脉冲复制器

如图 3 所示,无源循环式光纤延迟脉冲复制器主要由一个  $2 \times 2$  单模光纤耦合器和一段单模光纤组成,其中耦合器的 2 端和 4 端通过光纤连接成一个环,其延迟时间为  $T$  (远大于脉冲宽度)。其基本原理是使延迟光纤输出端的输出光信号通过光学方法延迟后反馈到延迟光纤的输入端,再作为输入信号经延迟光纤传输至输出端,如此多次往复循环,得到光脉冲序列输出。因环内的损耗(对于无源情况主要是耦合器损耗),生成的脉冲系列强度依次递减。

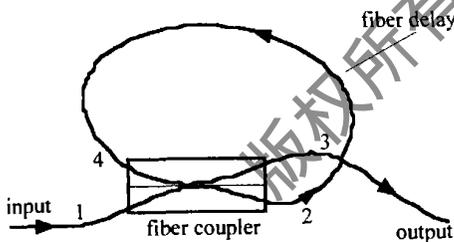


Fig 3 Passive pulse replicator based on a fiber circulating delay line structure

设输入脉冲为  $p_{in}(t)$ , 则脉冲复制器的输出为:

$$p_{out}(t) = \sum_{i=0}^{\infty} p_i \cdot p_{in}[t - iT] \quad (6)$$

式中,  $p_i$  为脉冲复制器冲击响应第  $i+1$  个脉冲的功率幅值系数,其大小由脉冲复制器中耦合器的功率耦合系数和附加损耗以及光纤延迟环的损耗决定:

$$\begin{cases} p_0 = \alpha \\ p_1 = (\gamma - \alpha)^2 (1 - \alpha_f) \\ p_n = p_{n-1} \alpha (1 - \alpha_f), (n = 2, 3, 4, \dots) \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $\alpha$  和  $\gamma$  的定义参照 (2) 式,  $\alpha_f$  为光纤延迟环内的其它损耗的损耗系数,由 (7) 式递推可得:

$$p_n = \alpha^{n-1} (\gamma - \alpha)^2 (1 - \alpha_f)^n, (n > 0) \quad (8)$$

为了便于光电检测,一般希望第  $n+1$  个脉冲的功率幅值越大越好 ( $n$  可为无穷大,可利用光开关等方法截取为一有限序列)。(8) 式两边分别对  $\alpha$  求导,并令  $\partial p_n / \partial \alpha = 0$  可求出  $p_n$  取最大值时对应的耦合器功率耦合系数,称之为最佳功率耦合系数。经推导得其表达式为:

$$\alpha_{opt} = \frac{n-1}{n+1} \cdot \gamma \quad (9)$$

将  $\alpha_{opt}$  代入 (8) 式可得第  $n+1$  个脉冲功率幅值的最大值为:

$$p_{n \max} = \frac{4(n-1)^{n-1}}{(n+1)^{n+1}} \cdot \gamma^{n+1} (1 - \alpha_f)^n \quad (10)$$

例如,取  $n=19$ , 当耦合器的功率耦合系数  $\alpha = 0.9\gamma$ , 即分光比  $k=1/9$  时,第 20 个脉冲功率幅值取得最大值:  $P_{19 \max} \approx 1.50095 \times 10^{-3} \gamma^{20} (1 - \alpha_f)^{19}$ 。取耦合器附加损耗  $\alpha_e$  (其值介于 0.06dB~0.15dB 之间) 为典型值 0.1dB, 则  $\gamma \approx 0.97724$ 。此时  $\alpha = 0.9\gamma \approx 0.87951$ 。设光纤延迟环内的损耗为 0.2dB, 则  $\alpha_f \approx 0.04501$ 。根据 (8) 式可求得该复制器输出的 20 个脉冲中功率幅值系数最小的为  $0.3948 \times 10^{-3}$ , 约等于输入单脉冲功率幅值的  $1/2533$ 。

此脉冲复制技术的优点是:与前两种光纤延迟脉冲复制器相比,脉冲重复周期准确,不存在脉冲间延迟时间不同而需要调整的问题。由于无源其输出脉冲的强度变化规律很容易确定。缺点是:与前述两种方法比较,产生的最小脉冲的幅度较小。对于长脉冲序列来说,各脉冲的幅度变化的动态范围很大。

对于无源循环式脉冲复制器输出脉冲不等幅的问题,由于主要是由环内及耦合器的损耗造成的,一种可行的解决方案就是在光纤环中提供光学放大,用其增益补偿信号的衰减,当放大器提供的增益与信号在环内的损耗相等时,脉冲绕环一周后恢复到原有的能量,因此,可输出等幅的周期脉冲序列。有关类似的结构已应用于光数据存储<sup>[3]</sup>、长途光数字传输测试系统<sup>[4]</sup> 等应用中,亦应用于量子光通讯等领域,用于相干单光子脉冲源的产生<sup>[5]</sup>,但在光脉冲复制器的应用中存在的不同的技术要求与难点。例如,当复制模拟光脉冲信号时,对于保持脉冲形状、减小输出脉冲序列间的失真提出了更高的要求。

目前,可采用的光放大器主要有掺铒光纤放大器 (EDFA) 和 SOA, 而由于 SOA 具有体积小、增益谱宽、易于与其它半导体器件集成和极快的开关特性等优点,更适用于高重复频率的光脉冲复制器。在无源复制器中,光纤延迟线、衰减器与分路器等不会对脉冲本身的波形形状产生影响(对所讨论的情况,光纤的色散与非线性作用可忽略)。而光放大器的特性可在以下几方面对有源复制器的性能产生很大影响。一方

面,由于光放大器的平均增益受输入光的平均功率、偏振态等影响,当一个光脉冲在光纤环内循环并多次经过放大器而其偏置等状态可能发生改变时,它每次经历的增益可能不同,从而使脉冲在环内经历的净增益(或损耗)发生变化,造成输出脉冲间的幅度存在差异。由于光脉冲在光纤中传输时偏振态等的变化具有的随机性,这种脉冲幅度的变化不像无源循环式复制器的输出那样具有明显的规律性。另一方面光放大器内部的非线性光学过程可能造成复制脉冲的波形失真<sup>[6]</sup>。在放大器工作于饱和状态下时,其瞬时增益受增益介质增益饱和作用的影响会随着脉冲的输入发生快速变化,从而使脉冲的不同部位经历不同增益,从而引起脉冲产生较大的非线性畸变。对超短脉冲来说,光放大器内的其它非线性光学效应<sup>[7]</sup>,如载流子加热(CH)、谱烧孔(SHB)、双光子吸收(TPA)以及非线性折射率(NR)等,亦会引起脉冲波形失真。此外,放大器引入的光噪声逐渐积累也会引起输出信号信噪比的降低,这一效应对于长序列产生的影响更加显著<sup>[3]</sup>。

以上问题,可采用多种技术加以控制和解决。例如,采用保偏光纤,可大大减小由于偏振态变化造成的输出信号的幅度波动。使放大器工作在小信号区域或用外加信号使其处于深度饱和状态<sup>[8]</sup>,可有效减小放大器瞬时增益变化引起的脉冲失真。以上不同方法往往会复制器的其它性能产生影响,因此,需要根据具体应用的要求综合加以考虑以实现最优化的设计。

## 4 结 论

综合考虑上述 3 种结构脉冲复制器的优缺点,作者认为:对于需要产生任意脉冲间隔或脉冲幅度分布的应用或对复制后脉冲的均匀性有很高要求的应用来说,树形光纤延迟脉冲复制器结构是最佳选择。由

于此结构在延时或功率分配上各路误差相互独立不会积累,因此,其输出的延迟误差将与每路的精度一致,其代价是相对较大的信号能量损耗。

若要利用无源器件产生幅度均匀的周期脉冲序列,则前馈式光纤延迟复制器结构可产生较大功率的脉冲序列,但耦合器的均匀性不为 0 会使得它们不严格等幅;同时由于各级光纤延迟的误差积累,使得这种级联结构延迟精确调整十分困难。相比之下,有源循环式光纤延迟脉冲复制器,在放大器引入的增益漂移、非线性失真与光噪声得到较好控制的情况下,可以产生重复周期严格准确、输出功率较大的光脉冲序列。

## 参 考 文 献

- [1] DENG K L, KANG K I, GLESK I *et al* Optical packet compressor for ultra-fast packet switched optical networks [J]. *Electron Lett* 1997, 33(14): 1237~1239.
- [2] 鄢 达, 李 铮, 陈宇晓. 光纤光脉冲分路——延迟器及其优化研究 [J]. *中国激光*, 2005, 32(2): 216~220.
- [3] PIEPER W, ESSELT M, GROSSKOPF G *et al* Investigation of crosstalk interference in a fiber loop optical buffer [J]. *Electron Lett* 1994, 30(5): 435~436.
- [4] HOLZBOHNER R, EREIFEJ H N, GRIGORYAN V S *et al* Experimental and theoretical characterization of a 40Gbit/s long-haul single-channel transmission system [J]. *IEEE J Lightwave Technol* 2002, 20(7): 1124~1131.
- [5] BUTTLER W T, HUGHES R J, KWAT P G *et al* Free space quantum-key distribution [J]. *Phys Rev*, 1998, A 57(4): 2379~2382.
- [6] AGRAWAL G P, OLSSON N A. Self phase modulation and spectral broadening of optical pulses in semiconductor laser amplifiers [J]. *IEEE J Q E*, 1989, 25(11): 2297~2306.
- [7] TANG J M, SHORE K A. Optical pulse propagation in semiconductor optical amplifiers at transparency [J]. *IEEE J Q E*, 1998, 34(7): 1263~1268.
- [8] SUN Y, SRIVASTAVA A K, BANERJEE S *et al* Error-free transmission of  $32 \times 2.5$  Gbit/s DWDM channels over 125km using cascaded inline semiconductor optical amplifiers [J]. *Electron Lett* 1999, 35(10): 1863~1865.
- [4] 张 伟, 范剑英. 光学薄膜的各向异性折射率 [J]. *激光技术*, 1989, 13(3): 35~39.
- [5] HOLMES D A, FEUCHT D L. Electromagnetic wave propagation in birefringent multilayers [J]. *JO S A*, 1966, 56(12): 1763~1769.
- [6] BERREMAN D W. Optics in stratified and anisotropic media: 4 × 4 matrix formulation [J]. *JO S A*, 1972, A62(4): 502~510.
- [7] HODGKINSON I J, KASSAM S, WU Q H. Eigen-equations and compact algorithms for bulk and layered anisotropic optical media: reflection and refraction at a crystal-crystal interface [J]. *J Comput Phys* 1997, 133(1): 75~83.
- [8] HODGKINSON I J, WU Q H. Birefringent thin films and polarizing elements [M]. Singapore: World Scientific Publishing, 1998. 255~323.
- [9] HODGKINSON I J, WU Q H, HAZEL J C. Empirical equations for the principal refractive indices and column angle of obliquely deposited films of tantalum oxide, titanium oxide, and zirconium oxide [J]. *Appl Opt* 1998, 37(13): 2653~2659.

(上接第 603 页)

了各向同性入射媒质-双轴各向异性膜层-各向同性基底薄膜系统的计算结果,证明该方法是一种高效可行的计算方法。利用双折射薄膜可以实现一些以前无法实现的光学功能,为薄膜器件设计和应用开拓了新的领域。

## 参 考 文 献

- [1] MOTOHRO T, TAGA Y. Thin film retardation plate by oblique deposition [J]. *Appl Opt* 1989, 28(13): 2466~2482.
- [2] HODGKINSON I J, WU Q H. Serial bileposition of anisotropic thin films with enhanced linear birefringence [J]. *Appl Opt* 1999, 38(16): 3621~3625.
- [3] HODGKINSON I J, WU Q H. Birefringent thin-film polarizers for use at normal incidence and with planar technologies [J]. *A P L*, 1999, 74(13): 1794~1796.