有源光纤环脉冲复制器系统误差分析

杨 义 郑 铮 李 铮 陈宇晓

(北京航空航天大学 电子信息工程学院，北京 100083) (中国工程物理研究院 电子工程研究所，绵阳 621900)

摘 要：借助半导体光放大器(SOA，Semiconductor Optical Amplifier)动态噪声模型结合蒙特卡罗方法对有源光纤环脉冲复制器的复制误差特性进行了研究.对复制误差与环内衰减器衰减、SOA偏置电流、环内注入直流光波长与被复制脉冲幅度等各项参数之间的关系进行了研究.仿真结果表明，较小的环内衰减与较大的偏置电流有助于抑制复制误差，而环内注入直流光波长则应选择较长的波长.通过这些仿真结果探讨了减小复制误差的手段.根据分析结果建立了实验系统，验证了有源光纤环脉冲复制器的低失真复制特性.实验证明有源光纤环脉冲复制器可以对脉冲进行有效的低失真复制.

关 键 词：非线性光学；误差分析；有源光纤环脉冲复制器；半导体光放大器

中图分类号：TN 253

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2008)05-0495-04

Studies on error of active optical pulse replicator

Yang Yi Zheng Zheng Li Zheng

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Chen Yuxiao

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: The replicating errors of active fiber loop replicator (AFLR) were discussed by using a dynamic model of noisy of semiconductor optical amplifier(SOA) and Monte-Carlo method. The replicating error changing due to the attenuation in fiber loop, the bias current of SOA, wavelength of assist light and peak power of replicated pulse were analyzed. The results show that low attenuation and middle bias current are preferred to achieve low replicating error. And the assist light should choose long wavelength. The methods to minimize replicating error were given by using numerical analysis. An experimental study about replicating performance of AFLR was presented at end. Experiment shows that AFLR can replicate pulse with low error.

Key words: nonlinear optics; error analysis; active fiber loop replicator; semiconductor optical amplifier

随着待测信号带宽的加大，传统的电等效时间采样方法已经不能满足对高速瞬态光脉冲波形测量的要求.由于可以突破电采样的带宽限制，瞬态光脉冲全光等效时间采样技术得到了快速发展[1-2].在进行光学等效时间采样时，需要在采样器前将被测瞬态脉冲复制为一等间隔脉冲序列.以往系统中多使用基于光耦合器网络的脉冲复制器.这类复制器损耗大、对各耦合器的分光比要求严格.为了弥补复制器固有损耗还需外接光放大器.使用半导体光放大器(SOA，Semiconductor

收稿日期：2007-03-19

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资助项目(10176001)；新世纪优秀人才支持计划资助项目；教育部留学回国人员科研启动基金资助项目

作者简介：杨 义(1978—)，男，四川成都人，博士生，opticark@163.com.

Optical Amplifier)的有源光纤环脉冲复制器具有结构简单、易于调整、复制脉冲数量可控、便于进行片上集成等优点,在作为光学采样器的前端复制器方面具有广阔的前景[3].

1 系统结构与数学模型

1.1 系统的基本结构

有源光纤环脉冲复制器由经单模光纤依次连接的光耦合器、半导体光放大器、光隔离器、衰减器和光滤波器组成.脉冲由输入输出耦合器进入复制器内,并在环行过程中得到复制.当其每一次环行经过输入输出耦合器时部分能量输出环外,由此产生一个时间上等间隔的脉冲序列,以便后端采样器对其进行采样.一直流光激光器向环内注入大幅度直流光使SOA处于深度饱和状态下,以抑制SOA的非线性增益与ASE(Amplified Spontaneous Emission)噪声.该系统结构如图1所示.

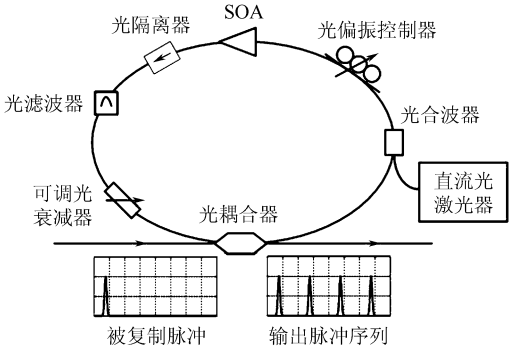


图1 有源光纤环脉冲复制器原理图

1.2 系统的数学模型

如果要令信号脉冲在复制器内能够得到平衡复制,则需要由SOA产生的环内增益能平衡环内固有损耗.SOA对输入信号的放大作用可以用下式表示:

$$\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}\tau}=\frac{g_0L-h}{\tau_c}-\frac{P}{P_{\mathrm{sat}}\cdot\tau_c}[\exp(h)-1] \quad (1)$$

式中,τ_c为载流子寿命;g_0为小信号增益系数;h为积分增益系数,$h=\int_0^L g(z,t)\mathrm{d}l$;$P$为SOA的输入信号包络功率;$L$为SOA的长度;$P_{\mathrm{sat}}$为增益系数饱和功率,它为令SOA中增益系数变为小信号增益系数1/2时的输入功率.SOA中输入信号的传输过程可以用下式表示[4]:

$$\frac{\partial P(\tau,z)}{\partial z}=g(\tau,z)P(\tau,z)+\sigma^2(g(\tau,z)+\Gamma aN_T)+2\sigma\sqrt{P(\tau,z)(g(\tau,z)+\Gamma aN_T)}\,n_P(\tau,z) \quad (2)$$

式中第一项表示了SOA对输入信号的放大作用,后两项为SOA在输入信号上叠加的噪声.式中,Γ为模式限制因子;a为差分增益系数;N_T为透明载流子密度;$\sigma=0.5h_P\omega_0B_0$,h_P为普朗克常数,ω_0为信号光频率,B_0为噪声带宽;n_P为一零均值高斯白噪声.为了能够较为精确地对复制器的复制误差进行分析,借助蒙特卡罗方法对复制误差分布进行研究,找出误差的极限分布[5].本系统模型中,信号脉冲在每一次环行经过SOA的过程中所叠加的噪声都为高斯白噪声形式,其均值和方差可以确定[4].复制器输出脉冲序列在时域上各点的噪声可以看作是由一系列高斯白噪声源叠加产生的.仿真中使用Matlab为每一个等效时间采样点生成一个样本容量为N的高斯白噪声序列,然后带入系统模型,求得最终合成的一组样本容量同样为N的随机噪声序列.

2 系统误差特性仿真分析

在仿真中使用了宽度为1 ns的高斯脉冲作为被采样信号.复制器每次输出由20个脉冲组成的等间隔脉冲序列,对每一组脉冲序列进行步长为50 ps的等效时间采样,采样窗口为宽度10 ps的理想采样窗口.将得到的采样结果与原始脉冲对应处的波形进行比较,得到各点误差.仿真中所需要的各项SOA参数取值与计算可参考文献[4,6].

对于峰值幅度较小的脉冲信号,在其复制过程产生的非线性误差较小,误差主要由SOA噪声造成.对于峰值幅度较大的脉冲其失真主要由非线性增益引起.介于这两种峰值幅度之间的脉冲由于其脉冲幅度比小信号输入为大,从而提高了信噪比,但是又没有达到产生严重非线性误差的功率,所以对于这一部分信号,其误差比上两种情况都要小.总之,在输入直流光功率和SOA偏置电流一定的情况下,采样误差会随着输入脉冲峰值功率先减小再增大.

复制器复制误差和衰减器衰减的关系如图2所示.随着环内衰减器衰减的增大,为了平衡环内逐渐增加的损耗,须增大SOA的增益.在SOA注入电流恒定的情况下,只有通过减少注入直流光的方法来实现,如此一来必然会增加SOA的非线性失真.所以,环内衰减器的衰减值不能过大.在SOA深度饱和的情况下,增益系数和常数项ΓaN_T相比较小,所以整个SOA的输出噪声幅度随衰减器变化较为缓慢.当输入脉冲幅度较大时,复制误差随衰减器衰减的增大而增加;而对于

小幅度的输入脉冲可以其复制误差随着衰减器衰减的减小而略有下降.

当 SOA 偏置电流发生变化时,SOA 小信号增益增加,这样为了达到环内平衡状态就需要更大功率的直流光注入. 复制器误差体现出对于较小幅度信号的复制误差随 SOA 偏置电流减少,而对于较大幅度的输入脉冲信号其复制误差随偏置电流增大则略有增大. 这一变化规律如图 3 所示.

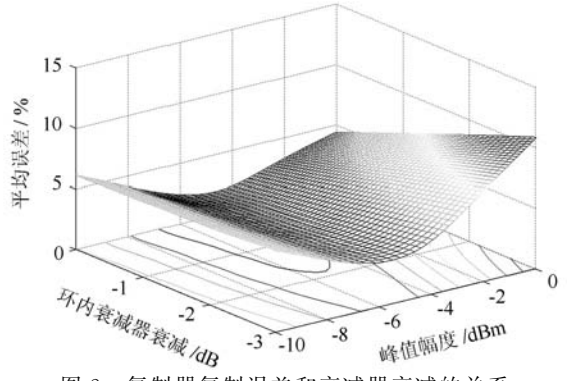


图 2　复制器复制误差和衰减器衰减的关系

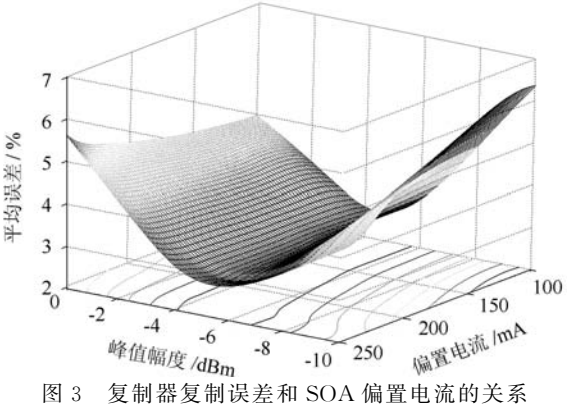
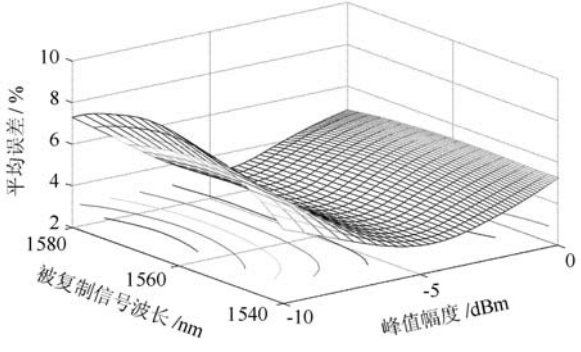


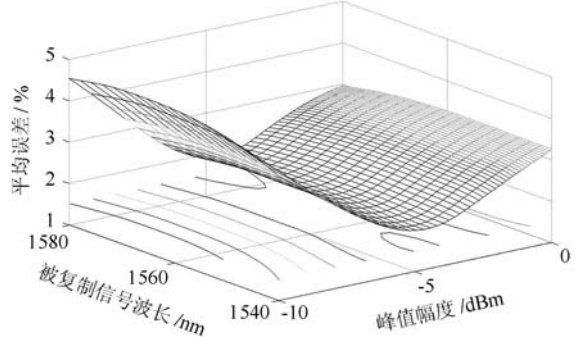
图 3　复制器复制误差和 SOA 偏置电流的关系

对于小信号增益较大的波长,其增益系数随载流子密度的变化相对较大. 由于仿真中所用 SOA 在没有信号输入时,其增益峰值位于 1 480 nm附近. 在所要分析的 1 540～1 580 nm 波长上,小信号增益是随波长的增加呈单调递减趋势,各波长上的增益系数变化速度也是随波长递减. 从图 4 中可以看出 SOA 对各波长上的脉冲信号产生的非线性增益误差也体现出这一随着信号脉冲波长增加而减少的趋势.

在 1 540 nm 与 1 580 nm 波长处注入辅助直流光时的复制误差分别如图 4a 与图 4b 所示. 当有较大直流光注入 SOA 时,SOA 的增益峰值向长波长方向发生漂移. 对于波长位于增益峰附近的脉冲信号,就需要较大功率的直流光令其达到环内平衡状态. 所以对于复制波长范围内的输入脉冲信号,其所需要的环内注入直流光功率也随波长的变化而改变. 由于 ASE 噪声和 SOA 中输入光场之间发生作用,产生相位噪声的功率随着 SOA 中光场能量的增大而增大,所以复制器的噪声误差也体现出这一规律. 另外,由于此时 SOA 在1 580 nm处的增益大于1 540 nm处的增益,所以使用波长为 1 580 nm 的直流光注入不仅效率更高,而且会令 SOA 中载流子分布更为理想,从而降低非线性失真和噪声误差. 复制器误差体现出对于较小幅度信号的复制误差随 SOA 增益变化而变化,而对于较大幅度的输入脉冲信号,其复制误差随信号波长的增加则略有减小.



a　1 540 nm 波长



b　1 580 nm 波长

图 4　复制器复制误差和 SOA 偏置电流的关系

3　实验结果和讨论

为了降低有源光纤环脉冲复制器的复制误差,就需要合理选择环内衰减器、SOA 偏置电流和注入直流光波长. 在构建实验系统时,衰减器的衰减值越小对抑制误差越有效. 但是为了在环内平衡状态波动时提供一定的保护,所以衰减器的衰减值应该被定位在略大于 0 dB. 由于要使复制器对各幅度的输入脉冲都有较小的复制误差,所以 SOA 的偏置电流不应该过大或过小. 而注入直流光波长应该选择在靠近所需波长复制窗口的长波长边界附近.

在实验中选择一脉冲半波全宽约为 1 ns、峰值幅度为－5 dBm 的脉冲进行复制. 随着复制次

数的增加,脉冲部分波形幅度出现了细微的失真,波形上叠加的噪声幅度也有所增加,这主要是由于SOA非线性增益与产生的ASE噪声引起的.图5中示出了使用示波器测量的输出脉冲序列中各脉冲半波全宽和脉冲的上升下降沿时间.由图中可以看出,脉冲循环复制中由于非线性增益产生的误差,各脉冲的半波全宽和脉冲的上升下降沿时间略有增加,而脉冲下降沿的失真要小于脉冲上升沿.以上实测结果同样由于复制器中产生的随机噪声的影响而体现出一定的随机性.

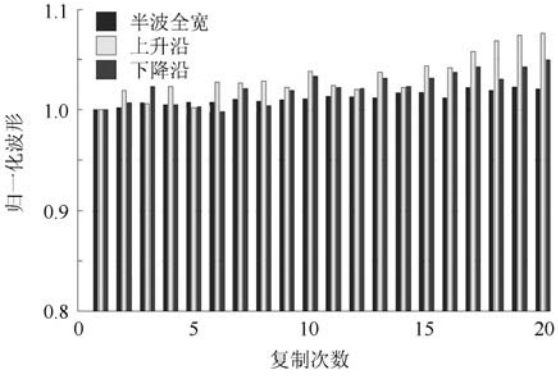


图5 输出序列中脉冲半波全宽和波形上升沿下降沿的变化

4 结束语

使用SOA动态模型对有源光纤环脉冲复制器的误差特性进行了仿真,对不同系统参数下误差产生的原因进行了分析.由分析可知,较大的环内衰减器值和较长的注入直流光波长对抑制复制误差较为有利;而为了保证不同幅度的脉冲都具有较小的复制误差,SOA应该选择较为适中的偏置电流.根据分析结果,构建了实验系统对系统的复制特性进行了验证,实验结果说明有源光纤环脉冲复制器可以在失真较小的情况下对输入脉冲进行复制.

参考文献(References)

[1] Westlund M, Andrekson P, Sunnerud H, et al. High-performance optical-fiber-nonlinearity-based optical waveform monitoring [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(6):2012-2022

[2] Jiang L A, Ippen E P, Feiste U, et al. Sampling pulse with semiconductor optical amplifiers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2001, 37(1):118-126

[3] 酆达,李铮,郑铮,等.基于光纤延迟的光脉冲有源复制器[J].北京航空航天大学学报,2005,31(2): 212-217
Feng Da, Li Zheng, Zheng Zheng, et al. Optical pulse active replicator ba sed on fiber-optic delay-time [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005,31(2): 212-217 (in Chinese)

[4] Bilenca A, Eisenstein G. Statistical noise properties of an optical pulse propagating in a nonlinear semiconductor optical amplifier [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2005,41(1):36-44

[5] 徐钟济.蒙特卡罗方法[M].上海:上海科学技术出版社,1985:246-260
Xu Zhongji. Monte Carlo method [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1985:246-260(in Chinese)

[6] Connelly M J. Wideband semiconductor optical amplifier steady-state numerical model [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics 2001, 37(3):439-447

(责任编辑:娄 嘉)