

文章编号: 0258-7025(2009)04-0862-05

基于半导体光放大器光纤环形腔的光数据包复制器的噪声特性研究

王亚平 吴重庆 王拥军 王雪 程木

(北京交通大学光信息科学与技术研究所 发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要 利用半导体光放大器(SOA)光纤环形腔实现重复周期准确、信号脉冲功率较大且几乎一致的光数据包复制。提出了一种注入非循环直流辅助光的方法,既有效抑制了放大自发辐射(ASE)噪声,又避免了环形腔内谐振。利用简化模型,从理论上对复制器输出噪声与信噪比(SNR)进行分析及仿真,得到复制器输出信噪比与复制次数的变化关系,并详细分析了注入直流辅助光功率及衰减系数对输出信噪比的影响。实验测得数据与理论结果一致。进一步对实验进行优化,在输出端口利用半导体光放大器对输出信号进行功率均衡,获得数据包信噪比下降小于 3 dB 且脉冲光功率几乎一致的 15 次以上复制。

关键词 光通信; 光数据包复制器; 光纤环形腔; 半导体光放大器; 信噪比

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093604.0862

Noise Analysis of Optical Packet Replicator Based on the Semiconductor Optical Amplifier Fiber Ring Cavity

Wang Yaping Wu Chongqing Wang Yongjun Wang Xue Cheng Mu

(*Institute of Optical Information Science and Technology, Key Laboratory on Luminescence and Optical Information Technology, Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*)

Abstract Optical packet replication with accurate cycle and consistent pulse power is realized by using the semiconductor optical amplifier (SOA) optical fiber ring cavity. In order to suppress the amplified spontaneous emission (ASE) noise and avoid the ring cavity resonance, the method of introducing non-circulation assistant light is proposed. Using the simplified model, the theoretical analysis and the simulation for the output noise and the signal-to-noise ratio (SNR) are carried out. The relation between output SNR and the duplication times is obtained. The impact of assistant light and attenuation coefficient upon SNR is analyzed in detail. The experiment results are consistent with theoretical results. In order to make the output pulse power of optical packet replication consistent, a SOA is used for the power equilibrium of the output packet. 15 times duplication with the SNR declining less than 3 dB and the pulse power keeping nearly consistent is implemented.

Key words optical communication; optical packet replication; fiber ring cavity; semiconductor optical amplifier; signal-to-noise ratio

1 引言

正如电信号复制是电子信息技术的基本技术一样,光信号复制可广泛应用于高速光 A/D 转换、超

高速光时分复用、光码分复用及超短脉冲测量,在光纤传感、同一信息的多用户分发、全光帧同步、光弹性分组环的帧头识别方面也有重要的应用价

收稿日期: 2008-03-21; **收到修改稿日期**: 2008-08-18

基金项目: 国家自然科学基金(60877057, 60672004)资助课题。

作者简介: 王亚平(1981—),女,博士研究生,主要从事全光帧同步及光纤通信等方面的研究。

E-mail: 05121783@bjtu.edu.cn

导师简介: 吴重庆(1944—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤通信、光纤传感、全光网络及全光信号处理等方面的研究。

E-mail: cqwu@bjtu.edu.cn

值^[1,2]。目前,实际应用的脉冲复制都是基于光纤延迟技术的,例如:1×N 耦合器构成的树形复制器、多个 2×2 耦合器级联构成的前馈式复制器^[3]。其中,树形复制器对数据包长度没要求,各路延时可分别调节,产生任意重复周期及脉冲幅度的复制数据包。但当复制次数较多时,要求输入数据包功率较大,且每路延时都要精确调节。前馈式复制器相对树形复制器需要调节延时的路数减少,而且可产生较大功率的复制数据包,但不能实现各路独立延时调节,且受耦合器分光比影响较大。近几年,由于有源光纤环形腔具有易于调整、体积小、易于集成等优点而得到广泛的关注^[4,5]。鄢达等^[6]提出了基于光纤延迟的光脉冲有源复制器,只进行了理论分析及仿真,而且装置采用由耦合器输入端口注入直流辅助光,可导致光信号在环形腔内谐振。

本文提出了一种注入非循环直流辅助光的方法,既能抑制放大自发辐射(ASE)噪声,又不会引起谐振,实现了一种基于半导体光放大器(SOA)光纤环形腔的光数据包复制器。即输入数据包在环形腔内每绕行一周,便可从耦合器输出一次同样格式的数据,使输入的一组数据复制成多组同样的数据。利用此装置可实现重复周期严格准确、脉冲幅度较大且几乎一致的复制数据包。为了补偿耦合器分光比引起的复制脉冲幅度下降,在环形腔内串入半导体放大器实现光功率补偿。但在补偿光功率的同时也引入噪声。在复制器中前一次复制输出的噪声将会成为此次复制的输入噪声,且当信号经过一次 SOA 就会引入新的噪声。随着复制次数的增加,噪声不断积累,使复制信号信噪比(SNR)下降,成为限制复制次数的关键性问题。本文就装置的噪声问题进行理论分析,并讨论了影响输出信噪比的因素。通过实验验证了理论的正确性,并对实验装置进行了优化处理。

2 噪声及信噪比分析

基于 SOA 光纤环形腔的光数据包复制器原理图如图 1 所示。光数据包复制器由分光比为 1:1 耦合器、半导体光放大器、可调衰减器、窄带滤波器、波分复用器(WDM)组成。其中,半导体光放大器用于补偿环路光功率,由于光纤环形腔的谐振特性,可调衰减器用于调节环形腔内光功率避免谐振;波分复用器用于引入非循环直流辅助光,减小 SOA 噪声^[7],这种注入直流辅助光的方式可有效避免由直流光引起的环形腔谐振;窄带滤波器用于滤除

SOA 的噪声及直流辅助光。复制数据包的周期由光纤环形腔的长度决定。由于环形腔内的噪声主要来自 SOA 的噪声,为了简化分析,仅考虑 SOA 的噪声。窄带滤波器带宽内输出的噪声光子数方差可表示为(散粒噪声, ASE 噪声, 差拍噪声和 ASE 噪声的平方四项之和)^[8]:

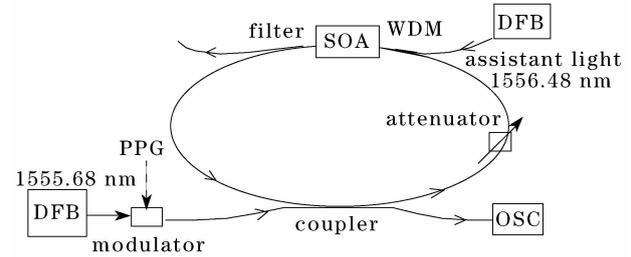


图 1 光数据包复制器结构图

Fig. 1 Configuration of the replicator

$$\sigma_{out}^2 = G \langle n'_{in} \rangle + (G-1)n_{sp} + 2G(G-1)n_{sp} \langle n'_{in} \rangle + (G-1)^2 n_{sp}^2 \quad (1)$$

其中 $\langle n'_{in} \rangle = P_{in}/h\nu\Delta\nu$ 为“滤波器带宽内”输入的光子数, $\Delta\nu$ 是滤波器对应带宽; n_{sp} 为自发辐射因子; G 是数据包经过 SOA 时所对应的增益。当考虑吸收损耗后^[9]

$$\lg G = 0.434L(G_0 - \alpha) + 0.434G_0/\alpha \times \ln \left[1 + \frac{\alpha(1-G)P_{in}}{(G_0 - \alpha)P_{sat} - \alpha P_{in}} \right],$$

其中 G_0 是 SOA 小信号增益, P_{sat} 为饱和功率。数据包经过 SOA 及 50 GHz 窄带滤波器后,输出噪声功率为

$$P_n = \sqrt{P_o P_{in}} [G + 2G(G-1)n_{sp}]^{1/2}, \quad (2)$$

其中, $P_o = h\nu\Delta\nu$ 为窄带滤波器带宽内的光子平均光功率。

令 $P_{in,m} = P_{cw} + P_{s,m-1} + P_{n,m-1}$ 及 G_m 分别为数据包第 m 次经过 SOA 时的输入信号及增益,则此次复制产生的新噪声输出为

$$P_{nm} = k/2 \times \sqrt{P_o P_{in,m}} \times [G_m + 2G_m(G_m - 1)n_{sp}]^{1/2}, \quad (3)$$

式中 k 为可调衰减器衰减系数, P_{cw} 为注入辅助直流光功率, $P_{s,m-1}$, $P_{n,m-1}$ 分别为数据包经 $(m-1)$ 次复制后输出噪声及信号脉冲光功率。由于光信号在环形腔内被循环复制,每次复制产生的新噪声也在环形腔内循环放大,导致噪声在腔内累积。如果输入数据包信噪比为 $SNR_{in} = 10 \lg(P_{s0}/P_{n0})$, 其中, P_{s0} , P_{n0} 分别为输入信号脉冲功率与噪声功率,光信号经过 m 次复制后,输出噪声功率与光信号脉冲功率分别为

$$P_{n,m} = (k/2)^m G_m G_{m-1} \cdots G_2 G_1 P_{n0} + (k/2)^m \cdot G_m G_{m-1} \cdots G_2 P_{n1} + (k/2)^{m-1} G_m G_{m-1} \cdots G_3 P_{n2} + (k/2)^{m-2} G_m G_{m-1} \cdots G_4 P_{n3} + \cdots + (k/2)^2 G_m P_{n(m-1)} + (k/2) P_{nm} \quad (4)$$

$$P_{s,m} = (k/2)^m G_m G_{m-1} \cdots G_2 G_1 P_{s0} \quad (5)$$

由(4),(5)式,得出光数据包经 m 次复制后输出信噪比为

$$\text{SNR}_{\text{out},m} = 10 \lg(P_{s,m}/P_{n,m}). \quad (6)$$

3 仿真结果及分析

由文献[9]对实际测量曲线进行拟合,设定输入数据包脉冲光功率为 2.6 mW,信噪比为 20 dB,SOA 饱和功率为 11 mW,耦合器分光比为 1:1,可得到复制数据包经 SOA 的增益随复制次数的变化

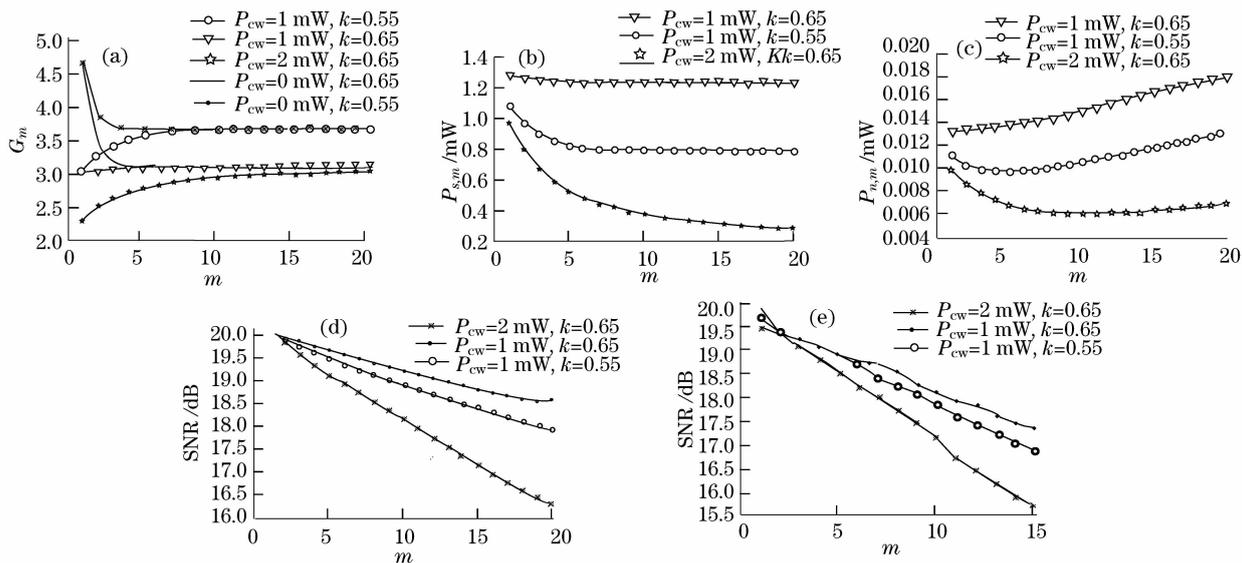


图2 复制数据包经 SOA 增益(a),复制器输出信号功率(b),复制器输出噪声(c),复制器输出信噪比(d)和实测复制器输出信噪比(e)随复制次数变化的曲线

Fig. 2 The gain (a), the output power (b), the output noise (c), the output SNR (d) and measurement the output SNR (e) against replication times

由公式(4),得到如图 2(c)所示复制器输出噪声随复制次数变化曲线。 $P_{cw}=1 \text{ mW}, k=0.65$ 时, G_m 与 $k/2$ 乘积小于 1,且一直在 1 附近。由于噪声累积,随复制次数增加噪声一直呈增加趋势。 $P_{cw}=1 \text{ mW}, k=0.55$ 与 $P_{cw}=2 \text{ mW}, k=0.65$ 时,前几次复制 G_m 与 $k/2$ 乘积明显小于 1,使得噪声呈下降趋势,随着 G_m 与 $k/2$ 乘积趋于 1,噪声累积也呈增加趋势。

图 2(d)为复制器输出信噪比随复制次数的变化曲线。复制器输出信噪比随复制次数增加而降低。从理论上推导,利用此装置适当选取注入直流辅助光功率及衰减系数,既可有效避免环形腔内谐振,又可实现信号脉冲光功率几乎一致的数据包复

曲线,如图 2(a)所示。 P_{cw} 为零时, G_m 与 $k/2$ 乘积大于 1,环形腔成为谐振腔会产生谐振; P_{cw} 为 1 mW, 2 mW 时, G_m 与 $k/2$ 的乘积均小于 1,环形腔内不会谐振。相同衰减系数情况下,增益 G 随复制次数的增加逐渐趋于一个稳定的值,即 G_m 与 $k/2$ 的乘积趋于 1。

图 2(b)为复制器输出信号脉冲功率随复制次数的变化曲线。由于 $P_{cw}=0$ 时,环形腔内谐振,不予考虑这种情况。由公式(5),由于 $P_{cw}=1 \text{ mW}$, $P_{cw}=2 \text{ mW}$ 时, G_m 与 $k/2$ 乘积均小于 1,且逐渐趋于 1,复制数据包脉冲功率随复制次数增加而下降,且下降趋势逐渐变缓。当 $P_{cw}=1 \text{ mW}, k=0.65$ 时,可实现信号脉冲功率几乎一致的数据包复制。

制。只是由于 SOA 的 ASE 噪声在环中不断累积,导致信噪比下降。

4 实验结果

实验装置如图 1 所示。光源为半导体激光器,输出连续光波长为 1555.68 nm。进入光纤环形腔光数据包格式由码型发生器(PPG)驱动铌酸锂外调制器产生,形成速率为 2.5 Gb/s 光数据包。光纤环长 10 m,分光比为 50:50 的宽带耦合器。采用饱和功率为 11 mW,小信号增益可达 30 dB 的 SOA 对环内信号进行功率补偿。为了避免 SOA 的自发辐射引起输出信号信噪比下降,注入 1556.48 nm

辅助直流光,并在其输出端加一个 $\Delta\nu=50$ GHz 窄带滤波器。输入数据包信噪比为 20 dB。图 2(e)为注入不同直流辅助光功率及不同衰减系数下,经实验测得的复制器输出信噪比随复制次数的变化曲线。比较图 2(d)和(e),实验结果与理论仿真结果变化趋势一致。但由于这种环形腔结构的复制器还受输入数据包消光比的影响^[10],使得实验测得的信噪比下降比只考虑噪声引起信噪比下降的仿真结果有所恶化。

图 3 为 $P_{cw}=1$ mW, $k=0.65$ 时,示波器对复制

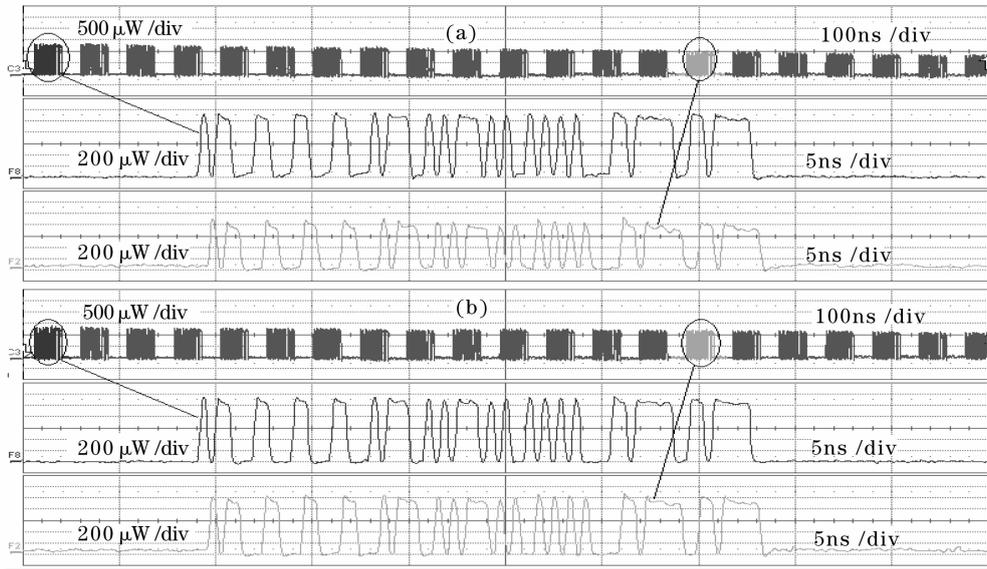


图 3 利用 SOA 功率均衡前后的输出波形图

Fig. 3 Zoon-in view of the packet replicator without (a) and with (b) power equilibrium based on SOA

5 结 论

通过注入非循环直流辅助光,利用 SOA 光纤环形腔实现了光数据包复制器。这种结构通过精确调节环长就能实现重复周期严格相等、脉冲功率较大的复制数据包。但数据包长度要小于环长,且随复制次数增加,信噪比有所下降。利用简化噪声模型对基于 SOA 光纤环形腔的复制器输出噪声及信噪比进行了理论分析和实验研究。实验结果与理论相一致,证明了该模型的正确性。实验结果表明,适当地注入直流光及调节衰减系数,并在输出端口利用 SOA 对输出信号进行功率均衡,可实现数据包信噪比下降小于 3 dB 且脉冲光功率几乎一致的 15 次以上复制。

参 考 文 献

1 K. L. Deng, K. I. Kang, I. Glesk *et al.*. Optical packet compressor for ultra-fast packet-switched optical networks[J].

器输出的采样波形图。(a)为复制器直接输出波形,细节图分别为数据包被复制 1 次及 15 次结果。其脉冲光功率及信噪比比理论值均有所下降,原因在于器件的连接损耗、耦合器分光比不均匀及输入信号消光比不够高。(b)为利用 SOA 增益饱和对复制数据包进行功率均衡后得到的波形图,细节图仍分别为数据包被复制 1 次及 15 次结果。经过功率均衡,脉冲光功率下降明显有所改善,使得复制器可实现数据包信噪比下降小于 3 dB 且脉冲光功率几乎一致的 15 次以上复制。

Electron. Lett., 1997, **33**(14): 1237~1239

- 2 J. M. Tank, K. A. Shore. Optical pulse propagation in semiconductor optical amplifiers at transparency[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(7):1263~1268
- 3 Chen Xiaoyu, Feng Da, Li Zheng *et al.*. Study on the fiber-optic periodic pulse replication techniques[J]. *Laser Tech.*, 2005, **29**(6):604~607
陈晓宇, 鄆达, 李铮等. 光脉冲光纤周期复制技术研究[J]. 激光技术, 2005, **29**(6):604~607
- 4 Song Fang, Xu Wencheng, Chen Weicheng *et al.*. 78 fs passively mode-locked Er³⁺-doped fiber ring laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9):1174~1177
宋方, 徐文成, 陈伟成等. 78 fs 被动锁模掺 Er³⁺ 光纤激光器[J]. 中国激光, 2007, **34**(9): 1174~1177
- 5 Teng Xiang, Zhang Hanyi, Guo Yili *et al.*. Performance optimization of the wavelength converter based on cross-polarization-modulation in SOA[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6): 810~814
滕翔, 张汉一, 郭奕理等. 基于半导体光放大器中交叉偏振调制效应的波长转换器[J]. 中国激光, 2005, **32**(6): 810~814
- 6 Feng Da, Li Zheng, Zheng Zheng. Optical pulse active replicator based on fiber-optic delay-time[J]. *J. Beijing University of Aeronautics and Astronautic*, 2005, **31**(2):212~217
鄆达, 李铮, 郑铮. 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

- 7 Li Yajie, Wu Chongqing, Li Yun *et al.*. New method for power equilibrium in re-circular all-optical buffer based on semiconductor optical amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10):1469~1473
李亚捷,吴重庆,李 贇等. 基于半导体光放大器的环路型全光缓存器中功率均衡的新方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(10): 1469~1473
- 8 Mukai T., Yamamoto Y., Kimura T.. S/N and error rate performance in AlGaAs semiconductor laser preamplifier and linear repeater systems[J]. *Quantum Electron*, 1982, **18**(10): 1560~1568.
- 9 Peng Peng, Wu Chongqing, Tian Changyong *et al.*. Parallel buffering of dual-wavelength packets data [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 835~839
彭 鹏,吴重庆,田昌勇等. 双波长数据包并行缓存[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 835~839
- 10 Wang Yaping, Wu Chongqing, Zhao Yang. The extinction ratio of the input signal influence on copying signal based on fiber ring cavity[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(7):914~917
王亚平, 吴重庆,赵 阳. 输入信号消光比对光纤环形腔实现光信号复制的影响[J]. *光电子 • 激光*, 2008, **19**(7):914~917