文章编号:1001-5078(2011)11-1226-05

·光电技术与系统·

有源光纤环路脉冲复制特性的研究

黄 震,王 颖,卢启柱,李季辉,刘 彬
(燕山大学信息科学与工程学院,河北 秦皇岛 066004)

摘 要:理论分析和实验验证了一种提高有源光纤环路脉冲复制性能的解决方案。首先,经过理论分析推导出决定脉冲复制性能的主要参数是光放大器增益的动态特性。其次,理论分析得出通过改变环路衰减,利用光纤环路内的放大自发辐射噪声光信号调整光放大器工作状态,减小光放大器增益的动态范围。最后,通过实验测量复制脉冲序列波形,验证了光放大器工作在深度饱和状态可以提高有源光纤环路脉冲复制的性能。并且通过实验测量光纤环路光谱,进一步分析证明光放大器饱和状态是指相应频带的饱和。因此使用光滤波器对光纤环路频带进行限制是非常必要的。

关键词:有源光纤环路;脉冲复制;放大自发辐射噪声;掺铒光纤放大器;饱和状态
中图分类号:TN253;TN929.11 **文献标识码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2011.11.012

Research on the pulse replication performance of active fiber loops

HUANG Zhen, WANG Ying, LU Qi-zhu, LI Ji-hui, LIU Bin
(College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: A scheme of improving pulse replication performance of active fiber loops is analyzed theoretically and is proven experimentally. Firstly, the pulse replication performance confined by the dynamic features of optical amplifiers' gain is deduced through theoretical analysis. Secondly, the working state is set by ASE noise through adjusting the loop attenuation in order to decrease the dynamic range of the gain. At last, it is proven by experiments that the deep saturation state of the optical amplifiers can improve the pulse replication performance. Further study indicates that the saturation state of the optical amplifiers means the saturation in the corresponding frequency band. So, it is prerequisite for the loop to use an optical filter with proper frequency features.

Key words: active fiber loop; pulse replication; ASE; EDFA; saturation state

1 引 言

有源光纤环路是光信息处理[1]、光存储[2]、光学检测[3]等应用场合常见结构,其主要的功能是将输入的激光脉冲复制成等周期脉冲序列,或者存储一段时间。复制脉冲个数(即脉冲序列长度)或者存储时间是衡量光纤环路脉冲复制性能的主要参数之一。目前北京交通大学[4-5]、北京航空航天大学[6-7]和上海理工大学[8],在以半导体光放大器(semiconductor optical amplifier, SOA)或掺铒光纤放大器(erbium-doped fiber amplifier, EDFA)为核心的有源光纤环路脉冲复制特性方面做了大量的研究工作,并取得了一定的成绩。

本文对有源光纤环路脉冲复制特性进行了理论分析和实验研究,给出了较完整的系统模型和提高脉冲复制性能的解决方案。实验证明了光放大器(optical amplifier, OA)的饱和工作状态,即减小增益的动态范围是提高光纤环路脉冲复制性能的关键因

基金项目:秦皇岛市科学技术研究与发展计划(No. 201001A047);燕山大学博士基金(No. B511)资助。

作者简介:黄 震(1976-),男,博士,讲师,主要研究方向光电检测技术。E-mail:hans@ysu.edu.cn

收稿日期:2011-05-12

素。并且指出饱和状态是指有用信号所在频带的饱和,因此利用光滤波器对光纤环路频带进行限制是非常必要的,是提高脉冲复制性能的另一个重要因素。

2 理论分析

有源光纤环路结构如图 1 所示。图中 G 为光放大器增益;T 为光纤环路衰减传输系数,包括除耦合器分光衰减之外的所有衰减,如可调衰减器、光纤和光滤波器衰减,以及各部件之间的连接衰减等;2×2 耦合器的分光比为 α。

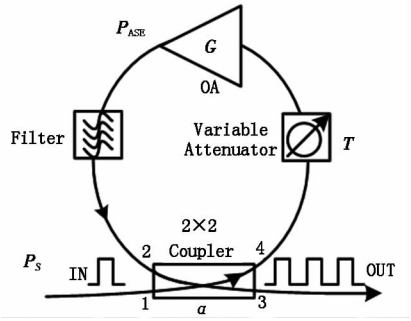


图 1 有源光纤环路原理图

Fig. 1 schematic diagram of the active fiber loop

根据光纤耦合器定理,对于分光比为 α:(1 − α)的 2×2 耦合器,在无光放大、无损耗情况下,耦合器各端口之间的功率关系分别为:

$$\begin{pmatrix} P_3 \\ P_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha & 1-\alpha \\ 1-\alpha & \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \end{pmatrix} \tag{1}$$

式中,$P_i(i=1,2,3,4)$ 表示各端口光功率。整理式(1)得:

$$\begin{cases} P_3 = \alpha P_1 + (1-\alpha) P_2 \\ P_4 = (1-\alpha) P_1 + \alpha P_2 \end{cases} \tag{2}$$

为了分析方便,下面用 $P_{p,q}$ 表示耦合器 p 端口在激光脉冲沿光纤环路循环传输 q 次后的功率。

2.1 有用光信号在光纤环路中的演变

当忽略光放大器的 ASE 噪声时,功率为 P_S 的有用信号由端口 1 输入,此时有 $P_{1,0}=P_S$,$P_{2,0}=0$。这是光纤环路的初始状态。通过递推计算得到有用信号沿光纤环路 N 次循环传输后,耦合器输出端口光功率分别为:

$$\begin{cases} P_{3,N} = (1-\alpha) P_{2,N} = P_S (GT\alpha)^N (1-\alpha)^2/\alpha \\ P_{4,N} = \alpha P_{2,N} = P_S (GT\alpha)^N (1-\alpha) \end{cases} \tag{3}$$

式(3)中除了 $(GT\alpha)^N$ 项,其他数值都是有界的。显然,光纤环路状态如果是稳定的,则必然要求光纤环路净增益 $GT\alpha<1$。否则,有源光纤环路会进入振荡的不稳定状态。设激光脉冲在光纤环路中 N 次循环传输后的输出功率 $P_N=P_{3,N}$。整理式(3)中的 $P_{3,N}$ 得:

$$N = \log\left[\frac{\alpha}{(1-\alpha)^2}\frac{P_N}{P_S}\right] / \log GT\alpha \tag{4}$$

式(4)说明激光脉冲信号 P_S 在光纤环路循环传输次数 N 主要取决于 $GT\alpha$ 的数值和输出脉冲功率与输入脉冲功率的比值。本文暂且只考虑表示系统净增益的 $GT\alpha$ 参数。当 $GT\alpha$ 接近 1 时,系统净损耗最小,可以产生较长的脉冲序列。由此可以总结出,要保证足够长的脉冲序列输出,要尽可能的减小系统净损耗,即 $GT\alpha$ 参数尽可能趋向于 1。当使用的是 3 dB 耦合器时,即 $\alpha=1/2$,此时要求 GT 尽可能趋向于 2。

因为环路衰减传输系数 T 可以认为是定值,所以得出决定脉冲复制次数 N 的主要因素是 OA 的增益 G。而决定增益 G 的主要因素除了增益介质特性、泵浦功率等参数之外,还有光纤环路内的平均光功率。而环内光功率主要包括两部分,一部分是刚刚分析过的有用光信号,而另一部分则是 OA 产生的 ASE 噪声光信号。下面开始分析 ASE 信号在环路内变化规律。

2.2 ASE 噪声信号的演变

仅考虑 ASE 噪声信号时,耦合器端口 1 输入光功率 P_1 始终为 0,即没有输入信号。此时 OA 的 ASE 噪声信号 P_{ASE} 相当于系统初始信号,即 $P_{2,0}=P_{ASE}$,并假设 P_{ASE} 数值恒定。

根据式(2),经过第 1 次耦合后,耦合器输出分别为:

$$\begin{cases} P_{3.0} = (1-\alpha) P_{2.0} = (1-\alpha) P_{ASE} \\ P_{4.0} = \alpha P_{2.0} = \alpha P_{ASE} \end{cases} \tag{5}$$

通过递推计算得到经过 N 次循环传输后,耦合器输出端口功率分别为:

$$\begin{cases} P_{3,N} = \alpha P_{ASE} \sum_{r=0}^{N-1} (GT\alpha)^r \\ P_{4,N} = (1-\alpha) P_{ASE} \sum_{r=0}^{N-1} (GT\alpha)^r \end{cases} \tag{6}$$

式中,自发辐射输出功率 P_{ASE} 数值是有界的。显然只有当 $GT\alpha<1$ 的时候,系统才能收敛到稳定状态,否则也会产生振荡。此时式(6)中的求和,相当于是一个公比为 $GT\alpha$ 且小于 1 的等比数列求和,取其极限为 $1/(1-GT\alpha)$,代回式(6)整理分别得:

$$\begin{cases} P_3 = P_{ASE}\alpha/(1-GT\alpha) \\ P_4 = P_{ASE}(1-\alpha)/(1-GT\alpha) \end{cases} \tag{7}$$

式(6)和式(7)表明 ASE 噪声引起的环内光功率按照指数规律快速增长到一定程度之后,会进入

稳定状态基本保持不变。这个现象在实验中得到印证。这点也是和直链模型差异较大的地方。在直链模型中,认为有用信号和 ASE 信号同时出现并传输。而实际的光纤环路中,在有用信号输入之前,ASE 信号在光纤环路已经达到某种平衡的稳定状态了。换句话说,有源光纤环路脉冲复制性能的约束,并不是 ASE 与有用信号竞争 OA 的增益,而是取决 OA 本身的增益特性。

上述分析都是在忽略光纤环路内光滤波器的条件下进行的。一般光源谱线宽度要远远小于滤波器谱宽,且中心波长基本一致,所以可以认为光滤波器不会影响有用信号。光滤波器对光环路带宽的限制,使 ASE 输出功率减小。所以在包含光滤波器的光纤环路中,需要对式(7)中的 P_{ASE} 参数进行修正,即乘以归一化系数:

$$b = B_O/\Delta\nu \tag{8}$$

式中,B_O 是光滤波器带宽;$\Delta\nu$ 是 ASE 噪声带宽。

2.3 光放大器工作状态

在没有外部输入信号情况下,经过阻尼振荡后,光纤环路趋向于稳定状态,根据式(7)可得此时光放大器输入光功率,即耦合器 4 号端口输出为:

$$P_0 = bP_{\mathrm{ASE}}(1-\alpha)/(1-G_0T\alpha) \tag{9}$$

当 EDFA 工作在饱和状态,此时放大器增益可以描述为[9]:

$$G = G_{\max}\exp[(1-G)P_{\mathrm{in}}/P_{\mathrm{sat}}] \tag{10}$$

式中,$G_{\max}$ 为 EDFA 的小信号增益,可以认为是定值;P_{sat} 是 EDFA 饱和功率;P_{in} 表示输入信号功率。将式(9)带入式(10),可以求得在稳定状态,即没有信号输入时,EDFA 光纤环路稳态功率 P_0 对应的稳态增益 G_0 为:

$$G_0 = G_{\max}\exp\left[\frac{(1-G_0)(1-\alpha)b}{1-G_0T\alpha}\frac{P_{\mathrm{ASE}}}{P_{\mathrm{sat}}}\right] \tag{11}$$

式(11)说明 EDFA 泵浦功率 P_P 一定时,光纤环路的增益最终取决于环路衰减传输系数 T。通过 Matlab 计算证实在静态时,$G_0T\alpha$ 都能保证很接近 1。所以可以推断出决定复制脉冲序列长度的主要因素是 EDFA 增益 G 的动态特性。

EDFA 增益 G 与输入光功率关系如图 2 所示。EDFA 增益 G 会随环内平均光功率的增加而减小,在小信号和临近饱和的 AB 区域尤为明显。$GT\alpha$ 参数动态减小限制了脉冲复制次数。所以为了提高光纤环路脉冲复制次数或者存储时间,就要保证 EDFA 增益系数 G 的动态变化范围尽可能小。也就是说,需要设定 EDFA 工作在深度饱和状态的 BC 区域。

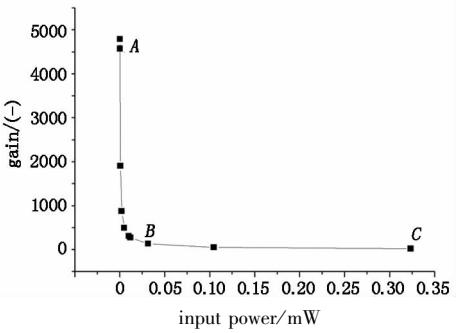


图 2 EDFA 在 16.0 mW 泵浦功率下的增益与输入功率的关系曲线

Fig. 2 curve between EDFA's gains and input powers with the pump power 16.0 mW

要使 EDFA 工作在深度饱和状态主要有两种方法。一种是加大输入激光脉冲功率,但这种方法增加了光源的设计难度和成本,另外饱和状态不能持续。另一种办法是引入直流光输入作为偏置,使 EDFA 工作在深度饱和区。注入的直流光可以是来自光纤环路之外的连续光,但这样会增加系统复杂度。而更简单的方案是根据式(9)减小环路衰减来增加耦合器环路输出 P_O,以维持 EDFA 的深度饱和工作状态,减小增益 G 的动态范围。

3 实验结果

实验原理如图 3 所示。PD 是 NewFocus 公司带宽为 1 GHz 的 PIN 光探测器模块 1611,提供交流和直流两路电信号输出。实验使用光纤为 G. 652 标准单模光纤,采用 FC/APC 连接器,以减小回波噪声。光纤环路周期大约为 138 ns。EDFA 泵浦波长为 980 nm,泵浦功率 PP 设定为 16.0 mW。LD 为单脉冲半导体激光光源,可以输出单个激光脉冲,中心波长为 1550.60 nm,3 dB 线宽为 0.013 nm,脉冲宽度为 15 ns,峰值功率大约为 0.2 mW。光滤波器中心波长为 1550.12 nm,3 dB 线宽为 0.62 nm。主要测量仪器为泰克 500 MHz 带宽示波器 TDS3052 和安腾光谱仪 AQ6317B。

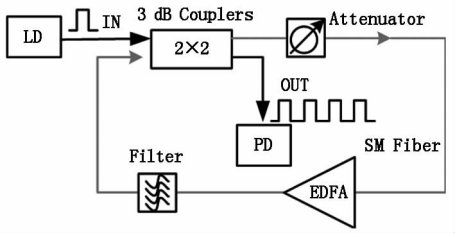
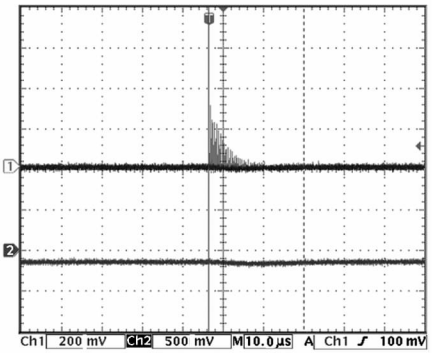


图 3 实验原理图

Fig. 3 schematic diagram of the experiment

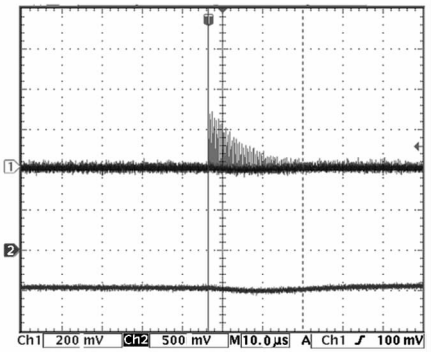
一个激光脉冲由光源耦合入光纤环路,并在环路中循环传输或称复制而形成等周期脉冲序列。在不同环路衰减情况下,测得的脉冲序列波形如图 4 所示(4 幅图中,第"1"路的横坐标都是 200 mV/格,

纵坐标都是 10 μs/格)。



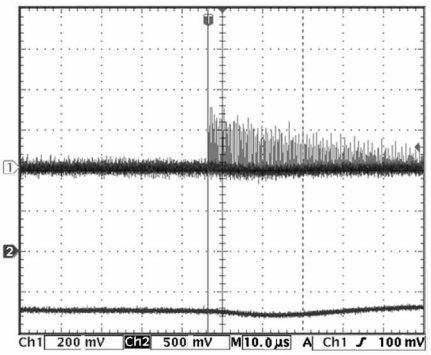
(a)环路衰减 32.5 dB

(a) with 32.5 dB attenuation



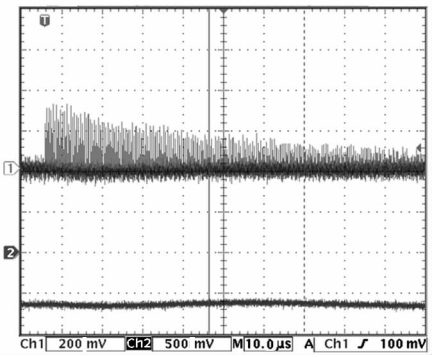
(b)环路衰减 26.3 dB

(b) with 26.3 dB attenuation



(c)环路衰减 23.9 dB

(c) with 23.9 dB attenuation



(d)环路衰减 21.3 dB

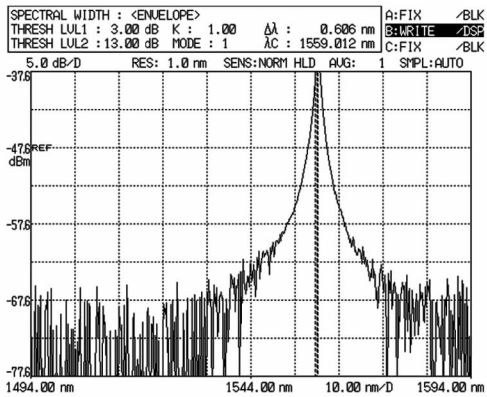
(d) with 21.3 dB attenuation

图 4　有源光纤环路脉冲序列波形图

Fig. 4　waveforms of pulse sequence from the active fiber loop

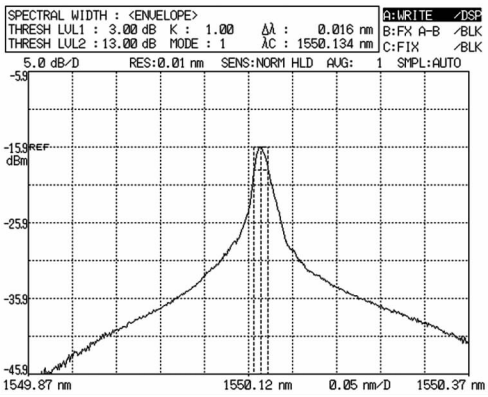
图 4 每个子图都显示了两路信号波形,第"1"路是脉冲序列信号波形。第 2 路(下侧信号)是直流分量波形,表征了光纤环路内的平均功率(这路信号也是由光探测器模块 1611 输出的)。从图中可以明显看出,随着环路衰减减小,有源光纤环路的复制脉冲序列长度由 32.5 dB 衰减时的近 10 μs 增加到 21.3 dB 时的 90 μs,即复制脉冲个数由 70 多个增加到 650 多个(光环路周期约为 138 ns)。这印证了通过减小环路衰减耗,设置 EDFA 工作中深度饱和状态,即减小增益 G 的动态范围,可以提高脉冲序列长度或存储时间的推论。

光纤环路内光滤波器的作用是限制信号频带,保证 EDFA 相应频带深度饱和状态。如果光纤环路内没有光滤波器,并且如果 EDFA 增益是绝对平坦的,也可以通过 ASE 设定 EDFA 深度饱和状态的方式提高脉冲序列长度。但事实上,EDFA 增益是不平坦的。因此构成光纤环路后,由于模式竞争,ASE 光谱被压缩,如图 5(a)所示。环路的 ASE 光谱压缩后,3 dB 谱宽为 0.606 nm,中心波长在 1559.012 nm。



(a)无光滤波器情况

(a) without filters



(b)有光滤波器

(b) with a filter

图 5　有源光纤环路 ASE 信号光谱图

Fig. 5　spectral diagram of ASE of the active fiber loop

偏离了有用信号的频带(1550.60 ±0.013)nm,所以脉冲复制性能提升不明显。因为在有用信号频带饱和之前,ASE 压缩频带早已进入饱和状态,继续减小环路衰减,将会使环路进入不稳定的自脉冲振荡状态。另外,ASE 压缩频带的中心波长和谱线宽度也会随输入信号功率发生变化,还可能出现双峰等现象。因此,环路内光滤波器的存在是非常必要的。

实验中使用的光滤波器的 3 dB 谱宽为 0.62 nm,但从图 5(b)可以看出,构成环路后 ASE 光谱 3 dB 谱宽为 0.016 nm。也就是说即使环路内使用了光滤波器,ASE 光谱也存在压缩现象。只不过,其压缩频带被滤波器限制在有用信号频带范围内,所以对脉冲复制性能影响较小。

4 结 论

EDFA 的增益 G 随输入光功率增加而按指数规律减小。因此为了获得更长的脉冲序列或存储时间,需要设置光放大器工作在深度饱和状态,以保证增益 G 的在较小的范围内动态变化。实验证明了通过减小环路衰减,设置 EDFA 工作在深度饱和状态以提高复制脉冲序列长度。但环路衰减不能无限制减小,否则会引起有源光纤环路自脉冲振荡现象。自脉冲现象虽然也会产生等周期脉冲序列,但与输入信号无关,因此会严重影响有源光纤环路脉冲复制性能,是光信息处理和光存储应用场合不希望出现的现象。但是可以利用自脉冲序列的等周期特性实现时间、距离等物理量的计量。这部分内容将另文介绍。

参考文献:

[1] Yang Zhenming, Chen Baoxue, Fu Changsong, et al. Output characteristics of active recirculating optical pulse replicator[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(2): 269 – 274. (in Chinese)
杨臻明,陈抱雪,傅长松,等. 有源循环式光脉冲复制系统的输出特性研究[J]. 光子学报,2008,37(2):269 – 274.

[2] Wang Yaping, Wu Chongqing, Wang Yongjun, et al. Noise analysis of optical packet replicator based on the semiconductor optical amplifier fiber ring cavity[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(4): 862 – 866. (in Chinese)
王亚平,吴重庆,王拥军,等. 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[J]. 中国激光,2009,36(4):862 – 866.

[3] Liu Bin, Huang Zhen, Wang Ying, et al. Improved scheme and mathematical model for measuring the time-of-flight in pulse laser ranging[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2009, 20(11): 1483 – 1485. (in Chinese)
刘彬,黄震,王颖,等. 脉冲测距时间间隔测量的数学模型及改进方案[J]. 光电子 · 激光,2009,20(11):1483 – 1485.

[4] 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. (in Chinese)
李亚捷,吴重庆,李赟,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.

[5] Peng Peng, Wu Chongqing, Tian Changyong, et al. Parallel buffering of dual-wavelength packets data[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(5): 835 – 839. (in Chinese)
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.

[6] Yang Yi, Zheng Zheng, Li Zheng, et al. Experiment study on active fiber loop replicator[J]. Laser Technology, 2008, 32(3): 228 – 239. (in Chinese)
杨义,郑铮,李铮,等. 有源光纤环脉冲复制器工作特性分析[J]. 激光技术,2008,32(3):228 – 239.

[7] Yang Yi, Zheng Zheng, Li Zheng, et al. Studies on error of active optical pulse replicator[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(5): 495 – 498. (in Chinese)
杨义,郑铮,李铮, 等. 有源光纤环脉冲复制器系统误差分析[J]. 北京航空航天大学学报,2008,34(5):495 – 498.

[8] Zhang Jianbin, Chen Baoxue, Yand Zhenming, et al. An optical buffer unit design based on active optical fiber loop[J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(2): 137 – 140. (in Chinese)
张建彬,陈抱雪,杨臻明,等. 基于有源光纤环路的光缓存单元[J]. 光电工程,2010,37(2):137 – 140.

[9] C R Giles, E Desurvire. Propagation of signal and noise in concatenated erbium-doped fiber optical amplifiers[J]. J. Lightwave Technology, 1991, 9(2): 147 – 154.