

文章编号: 0258-702X(2002)03-0243-06

级联环腔增益箝制掺铒光纤放大器中的拍频现象及其抑制

陈怡然, 张 峯, 范崇澄
(清华大学电子工程系, 北京 100084)

提要 利用简化的 Giles 模型在理论上得到了级联环腔箝制掺铒光纤放大器(EDFA)中在信道数目发生变化时可能发生的剩余信道功率的拍频现象的解释和一般规律, 并通过数值模拟和实验验证了这一结果。考虑到其对在网络管理方案中广泛采用的调顶技术下可能对系统误码有较大的影响, 给出了避免这一现象发生的方法。

关键词 掺铒光纤放大器, 增益箝制, 环腔箝制

中图分类号 TN 722.3+2 文献标识码 A

Beat Phenomena and Its Suppression in Cascaded Ring-cavity Gain-clamping EDFAs

CHEN Yi-ran, ZHANG Lun, FAN Chong-cheng

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract Analytical expressions, basic rules and physical interpretation of beat phenomena during channel add/drop in cascaded ring-cavity GC-EDFAs are obtained and agree well with experimental results. Measures to depress or avoid this beat phenomena are proposed for systems using tone modulation technique, where this beat phenomena may lead to severe BER degradation.

Key words EDFA, gain-clamping, ring-clamping

1 引 言

在波分复用(WDM)系统中,为了防止由于信道增减而引起剩余信道增益变化,工程上往往采用增益箝制技术来保证信道数目变化前后剩余信道的增益不变。级联环腔增益箝制是长距离光通信系统中常用的增益箝制方案^[1]。该方案中通过一个回路将掺铒光纤放大器(EDFA)两端相连形成反馈,产生“箝制激光”,并在回路中接入滤波器来选择其波长。信道增减时,箝制激光功率将自动调整以补偿输入功率的变化,各剩余信道增益则维持不变。环腔增益箝制方案中的特点是全光结构,简单、可靠、不改变 EDFA 的内部结构。

已知单级环腔增益箝制下,EDFA 内部的箝制激光和输出的剩余信道的瞬态过程都是衰减正弦^[2],其振荡频率和箝制激光的稳态输出功率、饱和

功率以及环腔长度有关。对于级联的环腔增益箝制 EDFA 系统,虽然前级 EDFA 中的箝制激光不会被漏到后级,但如果后级 EDFA 的本征振荡频率与前级相近,则会通过剩余信道的耦合产生拍频现象。

本文由简化 Giles 模型^[3]出发,给出了这种现象的理论分析和数值模拟,并对其进行了实验验证。理论预期和实验结果相符合。同时通过理论模拟预测了多级级联后剩余信道功率的复杂性。文中还提出了抑制拍频现象的方法。

2 拍频现象的理论分析和数值模拟

根据文献[4],对于第一级环腔增益箝制 EDFA,相对于稳态的平均反转度扰动 $\Delta \overline{N}_2(t)$ 和箝制激光扰动 Δy_i 满足

收稿日期 2000-12-11;收到修改稿日期 2001-03-26

作者简介 陈怡然(1976—)男,清华大学电子系硕士生,在校期间主要从事光放大器及光通讯系统研究。现在美国 Purdue 大学攻读博士学位。E-mail: yc@ecn.purdue.edu

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta \overline{N}_{21} \\ \Delta y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(1 + F_{s1}) \nu \tau_0 & -(G_{l10} - 1) h \nu_{l1} \zeta L_1 \tau_0 \\ y_{10} \zeta L_1 (P_{l1}^{IS} \tau_{rl}) & \ln(G_{l10}^{rt}) \nu \tau_{rl} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \overline{N}_{21} \\ \Delta y_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中下标 1 代表第一级, τ_0 为上能级自发辐射寿命, h 为普朗克常数, ν_{l1} 为箝制激光频率, ζ 为 Giles 饱和参数, L_1 为掺铒光纤的长度, τ_{rl} 为信号绕环路一圈的时间, G_{l10}^{rt} 为箝制激光的稳态环腔增益, G_{l10} 为箝制激光稳态增益, P_{l1}^{IS} 为箝制激光的本征饱和功率, y_{10} 为箝制激光稳态输入功率

$$F_{s1} = \sum_k \frac{P_{k10}^{out}}{P_{k1}^{IS}} \quad (2)$$

为 EDFA 的饱和系数, 其中 P_{k10}^{out} 为第 k 个信道的稳态输出功率, P_{k1}^{IS} 为各信道本征饱和功率, 并且有

$$\overline{N}_{21}(t) = \overline{N}_{21} [1 + \Delta \overline{N}_{21}(t)] \quad (|\Delta \overline{N}_{21}(t)| \ll 1) \quad (3)$$

$$y_1(t) = y_{10} |1 + \Delta y_1(t)| \quad (\Delta y_1(t) \ll 1) \quad (4)$$

(1) 式为常数一阶线性微分方程, 其解为

$$\begin{bmatrix} \Delta \overline{N}_{21}(t) \\ \Delta y_1(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} \\ b_{11} \end{bmatrix} \cos(2\pi f_1 t) + \begin{bmatrix} a_{12} \\ b_{12} \end{bmatrix} \sin(2\pi f_1 t) \exp(-\Gamma_{d1} t) \quad (5)$$

其中环腔箝制 EDFA 的本征振荡频率和阻尼系数分别为

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{G_{l10} y_{10}}{P_{l1}^{IS} \tau_0 \tau_{rl}} + \frac{(1 + F_{s1}) x_{10}}{\tau_0 \tau_{rl}} - \Gamma_{d1}} y_{10}} \quad (6)$$

$$\Gamma_{d1} = \frac{(1 + F_{s1})}{2\tau_0} + \frac{x_{10}}{2\tau_{rl}} \quad (7)$$

考虑到一般情况下 $F_{s1} \gg 1$, 而外部微小扰动 $x_{10} \ll y_{10}$, 则(6)(7)可化简为

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{G_{l10} y_{10}}{P_{l1}^{IS} \tau_0 \tau_{rl}}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{P_{l10}^{out}}{P_{l1}^{IS} \tau_0 \tau_{rl}}} \quad (8)$$

$$\Gamma_{d1} = (1 + F_{s1})/2 \quad (9)$$

对于级联环腔增益箝制 EDFA 的情况, 为求得基本规律, 假设系统中只存在两路信号(掉信道信号

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta \overline{N}_{22} \\ \Delta y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(1 + F_{s2}) \nu \tau_0 & -(G_{l20} - 1) h \nu_{l2} \zeta L_2 \tau_0 \\ y_{20} (\alpha_2 + g_s^*) L / \tau_{rl} & \ln(G_{l20}^{rt}) \nu \tau_{rl} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \overline{N}_{22} \\ \Delta y_2 + \Delta y_{2s} \end{bmatrix} \quad (18)$$

(18) 式方程形式与(1) 相同, 只是初始条件不同. 根据微分方程的求解理论(18) 的解具有如下的形式

$$\Delta y_2 = \exp(-\Gamma_{d2} t) [H_1 \sin \omega_1 t + H_2 \cos \omega_1 t] + \exp(-\Gamma_{d2} t) [H_3 \sin \omega_2 t + H_4 \cos \omega_2 t] \quad (19)$$

其中 $H_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 为常数, ω_2 和 Γ_{d2} 分别为第二级环腔箝制 EDFA 的本征振荡角频率和阻尼系数,

(Dropped signal) 和剩余信道信号 (Surviving signal), 并且只考虑两级 EDFA 的情况. 第一级 EDFA 的剩余信道输出为

$$P_{s1}^{out}(t) = P_{s10}^{out} [1 + \Delta x_{s1}(t)] \quad (\Delta x_{s1} \ll 1) \quad (10)$$

下标 s 表示剩余信道, 且

$$\Delta x_{s1}(t) = \exp[(\alpha_s + g_s^*) \overline{N}_{210} \Delta \overline{N}_{21}(t) L_1] - 1 \quad (11)$$

其中 α 和 g^* 分别为剩余信道的 Giles 吸收系数和增益系数.

微扰条件下 $\Delta \overline{N}_{21}(t) \ll 1$ (11) 式简化为

$$\Delta x_{s1}(t) = (\alpha + g^*) \overline{N}_{210} \Delta \overline{N}_{21}(t) L_1 = (\alpha + g^*) \overline{N}_{210} L_1 \cdot a_{12} \sin \omega_1 t \exp(-\Gamma_{d1} t) \quad (12)$$

其中

$$\omega_1 = 2\pi f_1 \quad (13)$$

对于第二级 EDFA, 剩余信道输入功率为

$$P_{s2}^{in}(t) = P_{s20}^{in} [1 + x_{s1}(t)] = P_{s20}^{out} [1 + x_{s1}(t)] / H_{span} \quad (14)$$

这里 H_{span} 为两级 EDFA 间传输损耗. 下标中的 2 表示为第二级 EDFA 的有关参数.

可以将第二级 EDFA 输入端剩余信道的扰动折合成箝制激光的输入扰动

$$\frac{y_{20} \Delta y_{2s}(t) G_{l20}}{h \nu_{l2}} = \frac{P_{s20}^{in} \Delta x_{s1}(t) G_{s20}}{h \nu_s} \quad (15)$$

由此

$$\Delta y_{2s} = E \{ \exp[-(\Gamma_{d1} + j\omega_1)t] - \exp[-(\Gamma_{d1} - j\omega_1)t] \} / 2j \quad (16)$$

其中

$$E = \frac{a_{12} P_{s20}^{in} (\alpha_s + g_s^*) \overline{N}_{210} L_1 G_{s20} \nu_{l2}}{y_{20} \nu_s G_{l20}} \quad (17)$$

由以上各式得到第二级环腔箝制 EDFA 的瞬态微分方程组

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta \overline{N}_{22} \\ \Delta y_2 + \Delta y_{2s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(1 + F_{s2}) \nu \tau_0 & -(G_{l20} - 1) h \nu_{l2} \zeta L_2 \tau_0 \\ y_{20} (\alpha_2 + g_s^*) L / \tau_{rl} & \ln(G_{l20}^{rt}) \nu \tau_{rl} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \overline{N}_{22} \\ \Delta y_2 + \Delta y_{2s} \end{bmatrix} \quad (18)$$

表达式由(6)(7) 式给出. 由(19) 式可以看出, 当 ω_1 和 ω_2 相近时, 箝制激光的输出功率就可能发生拍频现象.

同法可得到平均翻转度扰动 $\Delta \overline{N}_{22}(t)$ 为

$$\Delta \overline{N}_{22}(t) = \exp(-\Gamma_{d2} t) [K_1 \sin \omega_1 t + K_2 \cos \omega_1 t] + \exp(-\Gamma_{d2} t) [K_3 \sin \omega_2 t + K_4 \cos \omega_2 t] \quad (20)$$

其中 $K_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 为常数. 经推导可以得出剩

余信道功率扰动在微扰情况下也具有拍频特性的结论。但由于相位的不一致,并不一定在箝制激光拍频显著的时候剩余信道拍频现象也显著。

直接由 Giles 模型^[3]出发进行数值模拟,也得到

了拍频现象,典型结果示于图 1,与实验结果(见 3.2)定性相符,说明在求得解析解过程中所作的简化是合理的。

在多级 EDFA 级联的情况下,剩余信道功率的

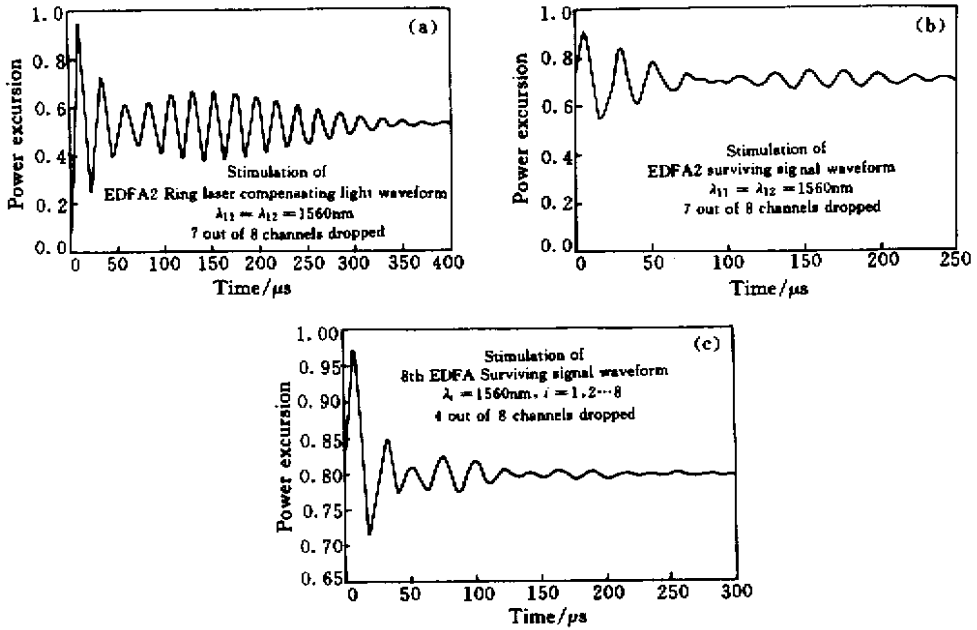


图 1 级联环腔增益箝制 EDFA 中拍频现象的模拟结果

掉信道与剩余信道功率比 7:1 箝制激光波长 = 1560 nm 时,第 2 级 EDFA 中拍频现象。(a)箝制激光 (b)剩余信道, (c)掉信道与剩余信道功率比 1:1 箝制激光波长 = 1560 nm 时,第 8 级 EDFA 中的剩余信道拍频现象

Fig. 1 Simulation results of beat phenomena in cascaded ring-cavity GC-EDFAs

(a) clamping laser, (b) surviving channel. Ratio of dropped signal power and surviving signal power equal to 7:1, wavelength of clamping laser = 1560 nm; (c) simulation results of beat phenomena in 8th of cascaded ring-cavity GC-EDFAs, ratio of dropped signal power and surviving signal power equal to 1:1, wavelength of clamping laser = 1560 nm

拍频现象可能会比较复杂,因为级联输出的结果会包含前面各级的本征频率。图 1(c)为给出了数值模拟的 8 个信道中掉 4 个的情况下,经过 8 级 EDFA 后剩余信道的拍频现象。

在实际工程中,各级 EDFA 的参数和工作点基本一致,因此其本征频率也很接近,故拍频现象很容易发生。而消除拍频的主要做法是使各级环腔箝制 EDFA 具有不同的箝制激光波长和/或环腔长度,使二者的本征频率错开。

3 拍频现象的产生、基本规律及其抑制

3.1 实验光路图

验证级联环腔箝制 EDFA 中拍频现象的实验光

路如图 2 所示,两个彼此独立可调的环腔箝制 EDFA (EDFA1 和 EDFA2)的两端分别用耦合器 COUP2/3 和 COUP5/6 形成环腔,环腔长度、箝制激光波长(通过滤波器 OBPF1 和 OBPF2)和环腔损耗(通过衰减器 ATT3 和 ATT5)均可调节。衰减器 ATT2 和 ATT4 用来调节 EDFA1 和 EDFA2 的信道输入功率。掉信道(波长 1554.94 nm)通过声光调制器 AOM 的通断调制产生信道数目增减的效果。剩余信道(波长 1549.88 nm)和掉信道的功率比用衰减器 ATT1 调节,从而模拟不同的掉信道数目。EDFA1 输出信号经过解复用器 DMUX 滤掉箝制激光(使之不泄漏至 EDFA2)后,经衰减作为 EDFA2 的输入。滤波器 OBPF3 从 EDFA2 输出信号中滤出所需信号,经光探测器 PIN 接收后在示波器 OSC 上显示。

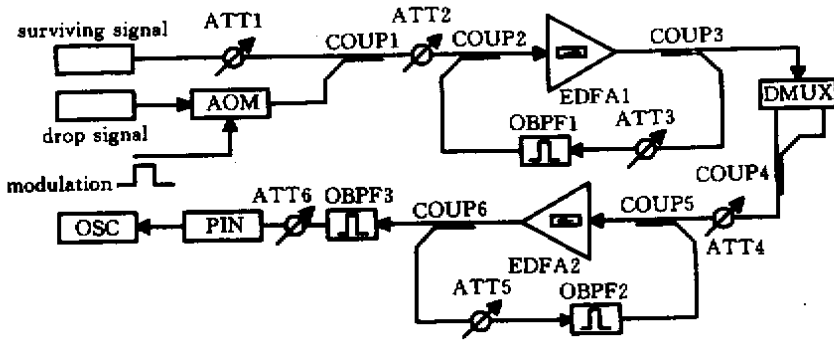


图2 级联环腔增益箝制 EDFA 拍频现象产生及其抑制实验光路图

Fig. 2 Experimental setup to investigate the beat phenomena in cascaded RLSC-EDFAs

surviving signal : 1549.88 nm ; doped signal : 1554.94 nm ; AOM : acousto-optic modulator ; ATT1 ~ 6 : attenuator ; COUP1 4 6 : 1:1 coupler ; COUP2 : 4 : 1 coupler ; COUP3 5 : 9:1 coupler ; OBPF 1 ~ 3 : optical band-pass filter (BW = 1 nm) ; DMUX : demultiplexer ; PIN : O/E converter ;
 OSC : digital oscilloscope

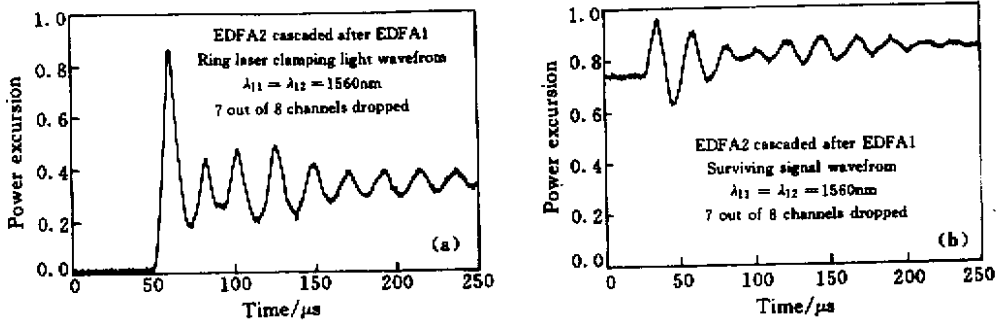


图3 掉信道与剩余信道功率比 7:1 箝制激光波长 = 1560 nm 时 ,第 2 级 EDFA 中的拍频现象
 (a) 箝制激光 (b) 剩余信号

Fig.3 Typical beat phenomena of (a) clamping laser light and (b) surviving signal. 7 out of 8 channels are dropped

3.2 实验结果

3.2.1 拍频现象的产生

图3给出了掉信道与剩余信道功率比为7:1,且两级EDFA箝制激光波长均为1560nm时,EDFA2的箝制激光瞬态和剩余信道瞬态。可以看到明显的拍频现象,与模拟结果(图1)相符。由于剩余信道振幅一般较小,下面主要给出箝制激光瞬态结果。

取剩余信道功率和掉信道功率比为7:1,以模拟8个信道中掉7个的情况。其中EDFA1和EDFA2的箝制激光波长均为1545nm时,二者单级箝制激光的瞬态特性示于图4。EDFA1和EDFA2的本征频率分别为52.5kHz和57.1kHz,其相对差 $\Delta f = |f_1 - f_2| / [(f_1 + f_2) / 2] = 8.4%$ 。EDFA1和EDFA2级联后的箝制激光瞬态如图5(a)所示,可以明显看出拍频现象的发生。图中同时得到拍频的包络振荡频率约为 $f_b = 2.17$ kHz。另一方面, $\Delta f =$

$|f_1 - f_2| = 2.3$ kHz,可见确实是一种与两级EDFA箝制激光本征频率相关的拍频现象。

当掉信道与剩余信道功率比为15:1以模拟16个信道中掉15个的情况时,EDFA1/EDFA2箝制激光本征频率分别为53.3kHz和55.2kHz,相对差 $\Delta f / f = 3.5%$ 。因为剩余信道占总功率的比例太小,产生拍频的两个振荡函数的振幅差别过大,使得拍频现象并不显著,而是以第二级的本征箝制激光瞬态为主,见图5(b)。同理,当掉信道与剩余信道功率比为4:4,EDFA1和EDFA2箝制激光本征频率相对差 $\Delta f / f = 8.0%$,但由于箝制激光稳态功率和剩余信道的稳态功率相差不多,拍频现象仍较显著,如图5(c)。

通常情况下,箝制激光的本征振荡频率约在数十千赫,相邻环腔箝制EDFA瞬态发生拍频时的包

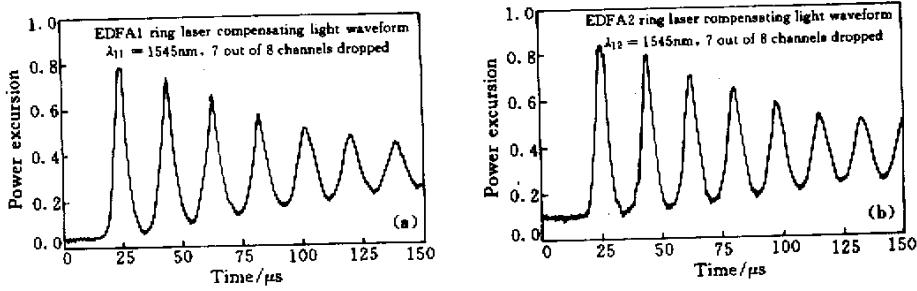


图 4 环腔增益箝制 EDFA 中 8 信道掉 7 信道时的箝制激光波形
 (a) EDFA1 本征频率 $f_1 = 52.5 \text{ kHz}$ (b) EDFA2 本征频率 $f_2 = 57.1 \text{ kHz}$

Fig.4 Clamping laser light waveform in EDFA1 and EDFA2 7 out of 8 channels are dropped
 (a) EDFA1 : eigen frequency = 52.5 kHz ;(b) EDFA2 : eigen frequency = 57.1 kHz

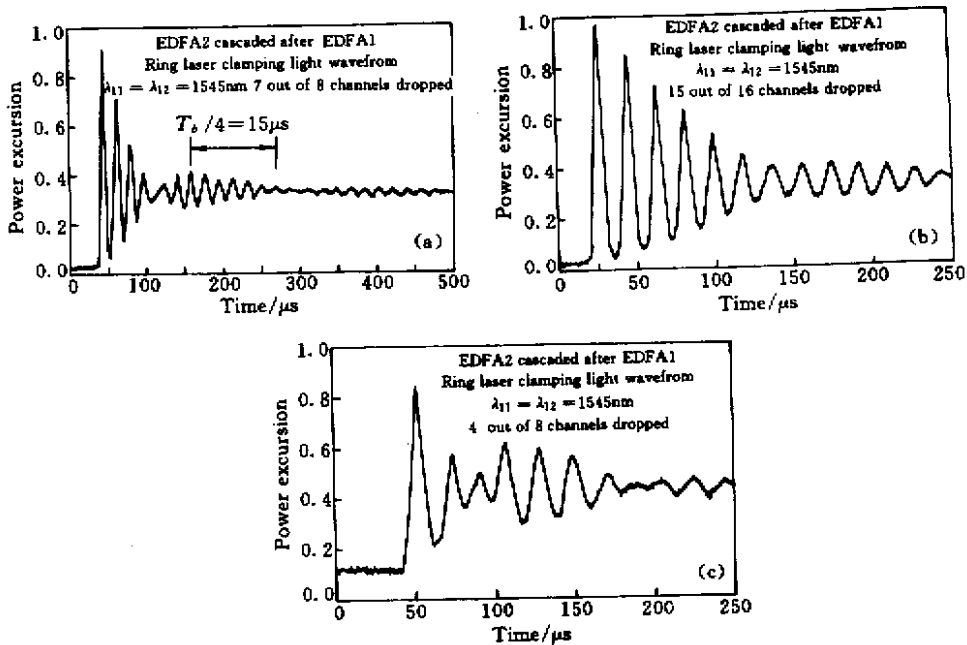


图 5 掉信道与剩余信道功率比 7:1(a),15:1(b)和 4:1(c)时,两级 EDFA 箝制激光拍频现象

Fig.5 Typical beat phenomena of clamping laser light 7 out of 8(a), 1 out of 16(b) and 4 out of 8(c) channels are dropped

络振荡频率约为几千赫,正好是“调顶”技术所应用的频率:它通过对每个信道光功率加以几千赫到几十千赫的小振幅调制来标记各个信道,以进行网络管理。以上结果表明,对于级联环腔箝制 EDFA 系统,使用调顶技术时必须注意避免拍频现象的发生,否则系统误码特性可能明显恶化。

3.2.2 拍频现象的抑制

级联环腔箝制 EDFA 系统中抑制拍频现象的方法很简单,就是使各级 EDFA 瞬态的本征振荡频率相差足够大。为此可以有意选择不同的箝制波长。图 6 为 EDFA1 和 EDFA2 的箝制激光波长分别为 1549 nm 和 1560 nm,且掉信道与剩余信道功率比为 7:1时 EDFA2 箝制激光瞬态图。EDFA1 和

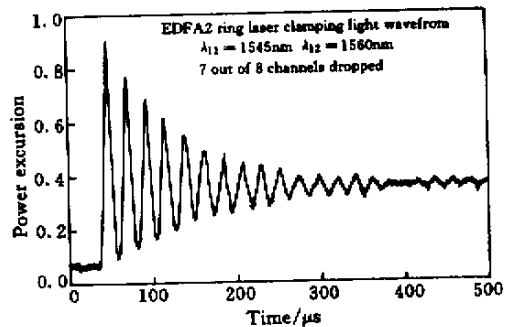


图 6 箝制激光波长错开后第二级 EDFA 箝制激光拍频消失
 Fig.6 Beat phenomena of clamping laser light disappear when EDFAs have different wavelength of clamping laser each other

EDFA2 箝制激光本征频率分别为 52.5 kHz 和 43.8 kHz 相对差 $\Delta f/f = 18.1\%$,拍频现象基本消失。

有不同的箝制激光波长和/或环腔长度,从而使其瞬态本征频率相差足够大。

4 结 论

本文通过理论分析指出级联环腔箝制 EDFA 系统中的拍频现象:前级 EDFA 的剩余信道输出瞬态扰动作用被“耦合”到后级 EDFA 的箝制激光瞬态上,从而使其产生拍频。它又反过来作用于剩余信道,使后级 EDFA 的剩余信道输出瞬态中也产生拍频。随着 EDFA 级数的增加,拍频现象将趋于复杂。当两级 EDFA 箝制激光的本征频率相差很大,或后级 EDFA 剩余信道和箝制激光的稳态功率相差悬殊时,拍频现象不显著。上述现象和规律为实验所证实。数值模拟的结果与实验相符,说明利用本文给出的理论可以很好地解释和模拟这一现象。由于拍频的频率和“调顶”技术所采用的频率相近,因此在级联环腔箝制 EDFA 系统中必须加以避免。一种抑制拍频现象的有效方法是使各级环腔箝制 EDFA 具

参 考 文 献

- 1 S. Y. Kim, J. Chung, B. Lee. Dynamic performance of the all-optical gain-controlled EDFA cascade in multiwavelength optical networks [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(17):1475 ~ 1477
- 2 G. Luo, J. L. Zyskind, J. A. Nagel *et al.*. Experimental and theoretical analysis of relaxation-oscillations and spectral hole burning effects in all-optical gain-clamped EDFA's for WDM networks [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(4):527 ~ 532
- 3 Y. Sun. Average inversion level, modeling, and physics of erbium-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, 1997, **3**(4) 991 ~ 1007
- 4 Q. Yu, C. Fan. Simple dynamic model of all-optical gain-clamped erbium-doped fiber amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(7):1166 ~ 1171
- 5 D. H. Richards, J. L. Jackel, M. A. Ali. A theoretical investigation of dynamic all-optical automatic gain control in multichannel EDFA's and EDFA cascades [J]. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, 1997, **3**(4):1027 ~ 1036



征 订 启 事

经国家科学技术部批准,本刊 2002 年第二季度将出版增刊一期,内容为“第十五届全国激光学术会议”论文集,收集会议上发表的约 200 多篇论文,主要包括:激光物理,超短脉冲激光与非线性光学,全固态激光器及各类新型激光器,光通信有源及无源器件,光束传输、控制及光束质量,激光光学材料、薄膜及元器件,工业激光及应用,医用激光及激光与生物组织相互作用等。

本期增刊约 800 页,定价为 160.00 元(含邮寄费)。如需订阅的单位或个人请将款从邮局汇至上海市 800-211 信箱《中国激光》编辑部苏笑珍收。

《中国激光》编辑部
二〇〇二年三月