

文章编号 : 0258-7025(2002)08-0717-05

分立拉曼放大器中的瞬态研究

张 嵩,王四海,范崇澄

(清华大学电子工程系,北京 100084)

提要 研究了在有增益饱和的反向抽运光纤拉曼放大器(FRA)中的瞬态现象,并通过解析表达式及数值分析发现瞬态持续时间可用信号在 FRA 光纤中的往返传播时间(一般在 10^{-1} ms 量级)来表征。在级联 FRA 中功率瞬态会随着级数的增加而恶化。分析还表明在前向抽运的饱和 FRA 中,交叉增益饱和将导致信道串扰和消光比下降。最后讨论了如何设计增益箝制的 FRA(GC-FRA)以最大限度地抑制瞬态。

关键词 拉曼放大器,功率瞬态,增益箝制

中图分类号 TN 929.11 文献标识码 A

Transience in Discrete Fiber Raman Amplifiers

ZHANG Lun, WANG Si-hai, FAN Chong-cheng

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

Abstract Analytical expressions, basic rules and physical interpretation of transient phenomena in discrete fiber Raman amplifiers (FRAs) are presented in this paper, and agree well with simulation results. Characteristics of transience in gain-clamped FRAs are also discussed based on these analytical expressions.

Key words Raman amplifiers, power transience, gain clamping

1 引 言

光纤拉曼放大器(FRA)在高速、长距离波分复用(WDM)光通信系统中扮演着越来越重要的角色^[1,2],因为它们可以在任意波长上提供宽带、低噪声的光放大。另一方面,随着光网络及全光交换的发展和运用,光放大器由于系统重组和上下信道所引起的动态特性也日益受到人们的关注^[3]。

工作于饱和状态的光放大器,当输入光功率发生突变时,输出功率的变化过程称为瞬态,一般而言具有复杂的时间响应。在 WDM 系统中发生上下信道时,光放大器的这一瞬态将使剩余信道功率发生变化,功率增加会使非线性作用增强从而破坏信号的波形,信号功率减弱会导致光信噪比(OSNR)下降,这二者都会破坏光通信系统特性。在掺饵光纤放大器(EDFA)和半导体光放大器(SOA)中,瞬态的发生主要是和亚稳态粒子寿命相关。然而在 FRA

中,瞬态的发生主要是和光纤中的传输延时有关。一般 FRA 中的光纤长度为数十千米,传输延时 τ 在 10^{-1} ms 量级。在反向抽运的 FRA 中,设输入信号功率在 $t = 0$ 时发生突变,则由于传输延时,输出信号功率在 $[0, \tau]$ 内不会发生变化,而当 $t = \tau$ 时瞬态开始发生。由于分布 FRA 中的饱和现象不严重,瞬态在这种 FRA 中并不明显,故本文主要讨论分立 FRA 中的瞬态。

在前人的工作中,Forghieri 等^[4]讨论了 FRA 中与瞬态相关的串扰带宽。Chen 等^[5]对单级 FRA 中单信道的瞬态做过实验及数值模拟研究。但就作者所知,尚未见有关 FRA 中瞬态特性解析分析的报道。

2 单级 FRA 中的瞬态

由于种种原因,FRA 常用反向抽运^[1,2,4],因此本文主要讨论反向抽运的 FRA。此时如果忽略噪声

收稿日期 2001-06-11;收到修改稿日期 2001-08-27

作者简介 张嵩(1975—),男,清华大学电子系硕士研究生,主要从事 DWDM 系统仿真及拉曼放大器特性研究。E-mail: zhanglun@tsinghua.org.cn

及信号与抽运之间群速差,在单信道情况下,信号功率 P_s 和抽运功率 P_p 沿传输距离的变化满足^[6]

$$\frac{\partial P_p}{\partial z} = \tau_g \frac{\partial P_p}{\partial t} + \alpha_p P_p + g_p P_s P_p \quad (1)$$

$$\frac{\partial P_s}{\partial z} = -\tau_g \frac{\partial P_s}{\partial t} - \alpha_s P_s + g_s P_p P_s \quad (2)$$

其中下标 p 和 s 分别代表抽运和信号, α 为光纤损耗, g 为拉曼增益系数, τ_g 为光纤中的比群延时。信号功率的突变表示为如下边界条件

$$P_s(z=0, t) = P_s(0, t) = \begin{cases} P_0, & t < 0 \\ P_1, & t \geq 0 \end{cases} \quad P_p|_{z=L} = P_{pL} \quad (3)$$

采用迭代方法求解(1)和(2),首先在(1)中忽略 P_s , 可以解得 P_p 为

$$P_p = P_{pL} \exp[\alpha_p(z-L)] \quad (4)$$

将(4)代入(2)得

$$P_s = P_s(t - \tau_g z) \exp(\Gamma z) \quad (5)$$

其中

$$\Gamma = -\alpha_s + g_s P_{pL} e^{-\alpha_p L} \frac{e^{\alpha_p z} - 1}{\alpha_p z} \quad (6)$$

在分立 FRA 中, $\frac{e^{\alpha_p z} - 1}{\alpha_p z}$ 一般在 1 ~ 2 之间。为了简化推导,将其用与 z 无关的常数

$$K = \left(\frac{e^{\alpha_p L} - 1}{\alpha_p L} + 1 \right) / 2 \quad (7)$$

代替。这样

$$\Gamma = -\alpha_s + g_s P_{pL} e^{-\alpha_p L} K \quad (8)$$

成为一个常数。再将(5)和(3)代入(1),得到

$$P_p = P_{pL} \exp[G_p(z, t)] \quad (9)$$

其中

$$G_p(z, t) = \begin{cases} \alpha_p(z-L) + (e^{\Gamma z} - e^{\Gamma L}) \frac{g_p P_0}{\Gamma}, & t \leq \tau_g z \\ \alpha_p(z-L) - \frac{g_p}{\Gamma} \{ P_1 [e^{\Gamma(z/2+t/2\tau_g)} - e^{\Gamma z}] + P_0 [e^{\Gamma L} - e^{\Gamma(z/2+t/2\tau_g)}] \}, & \tau_g z \leq t \leq (2L-z)\tau_g \\ \alpha_p(z-L) + (e^{\Gamma z} - e^{\Gamma L}) \frac{g_p P_1}{\Gamma}, & t \geq (2L-z)\tau_g \end{cases} \quad (10)$$

将(9)(10)代入(2),即可得到 $z=L$ 处的信号功率

$$P_s|_{z=L} = P_s(t - \tau_g L) \exp[G_s(t)] \quad (11)$$

而信号增益 $G_s(t)$ 为

$$G_s(t) = \begin{cases} -\alpha_s L + g_s P_{pL} \int_0^L \exp\left[\alpha_p(z-L) + \frac{g_p P_0}{\Gamma} (e^{\Gamma z} - e^{\Gamma L}) \right] dz, & t \leq \tau \\ -\alpha_s L + g_s P_{pL} \int_0^u \exp\left\{ \alpha_p(z-L) - \frac{g_p P_1}{\Gamma} [e^{\Gamma(t/2\tau_g - L/2+z)} - e^{\Gamma z}] + \frac{g_p P_0}{\Gamma} [e^{\Gamma L} - e^{\Gamma(t/2\tau_g - L/2+z)}] \right\} dz + \\ g_s P_{pL} \int_u^L \exp\left[\alpha_p(z-L) + \frac{g_p P_1}{\Gamma} (e^{\Gamma z} - e^{\Gamma L}) \right] dz, & \tau \leq t \leq 3\tau \\ -\alpha_s L + g_s P_{pL} \int_0^L \exp\left[\alpha_p(z-L) + \frac{g_p P_1}{\Gamma} (e^{\Gamma z} - e^{\Gamma L}) \right] dz, & t \geq 3\tau \end{cases} \quad (12)$$

其中 $u = 3L/2 - t/2\tau_g$, $\tau = \tau_g L$ 。

从以上表达式中可以清楚地看到,输出信号功率的瞬态将从 $t = \tau$ 开始,在 $t = 3\tau$ 结束,而在其他时间($t \notin [\tau, 3\tau]$), $G_s(t)$ 将保持常数。瞬态持续时间 2τ 正好是信号在 FRA 光纤中的往返传播时间。此结果被文献[5]中的实验所验证。当然,如果持续迭代过程,瞬态的持续时间也会延长,但幅度甚小,一般可以忽略。从(12)还可看出,即使输入功率发

生突变,信号增益也不会发生跳变。另外,当放大器工作在小信号状态时 P_0 和 P_1 可以忽略, G_s 保持常数,没有瞬态发生。图1给出了 FRA 中一个典型的瞬态波形:当输入信号功率在 $t = 0$ 突然减少 7/8 情况下,输出信号功率及增益的变化波形。FRA 主要参数为:G.655 光纤 $L = 20$ km, $\nu_p = 206.6$ THz (1451 nm), $\nu_s = 192.2$ THz (1560 nm), $P_{pL} = 500$

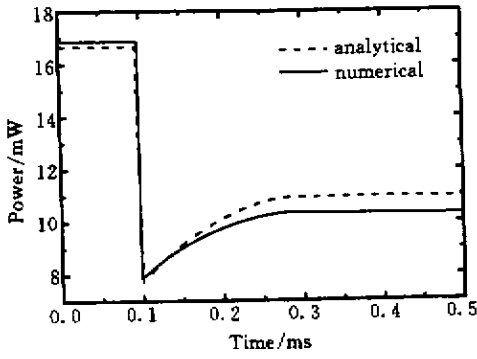


图 1 当信号功率减少 7/8 时反向抽运 FRA 中的瞬态

Fig.1 Transience in a backward pumped discrete FRA during 7/8 drop of input signal power
Analytical : Eq.(14). Numerical : Eqs.(3) and (4).
Parameters see text

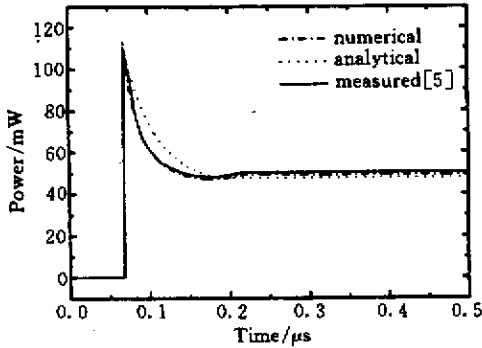


图 2 当信号功率突然增加时反向抽运 FRA 中的瞬态

Fig.2 Transience in a backward pumped discrete FRA during input signal power add
Analytical : Eq.(14). Numerical : Eqs.(3) and (4).
Parameters see [5]

mW , $P_0 = 0.4 \text{ mW}$, $P_1 = 0.05 \text{ mW}$ 。解析和数值模拟结果相符合(尤其是恢复时间),可见在推导过程中采取的近似(忽略噪声、忽略抽运光和信号光的群速度差、常数 K 的引入、采用一次迭代)是可行的。另外,此二者也和文献[5]中的曲线相符合,如图2所示。其中解析瞬态波形中的上冲幅度与实验曲线误差小于4%,而瞬态持续时间的误差可以忽略。这表明增加迭代次数只会导致更为复杂的表达式,而对结果的准确度不会有明显改善。

上述单信道的解析解对于理解瞬态的物理过程十分有益。多信道情况下,解析求解过于繁杂,而物理过程与单信道无根本差别。因而本文只进行了数值模拟。图3给出了在两信道系统中,当一个与原有信道功率相等的新信道在 $t = 0$ 和 $t = 0.5 \text{ ms}$ 分别突然加入和下载时,原有信道功率、信道总功率和抽运功率的瞬态波形。主要参数为:原有信道频率 $\nu_{s2} = 192.8 \text{ THz}$ (1555 nm),新增信道频率 $\nu_{s1} = 192.2 \text{ THz}$ (1560 nm),两信道功率均为 0.2 mW,其他参数与图1同。由图可见增加信道时,功率瞬态从 $t = \tau$ 开始发生,并伴随有 3 dB 的功率上冲。这主要是因为信道增益(由信号在传输过程中所遇到的抽运功率的积分决定)不能突变。其后信道总输出功率会由于放大器的饱和作用而逐渐下降。另外,在加信道和掉信道的瞬态曲线上还可以看到和 EDFA 中瞬态波形很不相同的较小的凹陷和凸起,它与抽运的瞬态波形(图3(c))相联系:当新的信道加入时,其前端受到比较大的信号增益,这使抽运光消耗较大,当前端经过 t 时间后到达 FRA 的输出端时,抽运功率被消耗得最多,之后由于信号增益下降,抽运光功率也会上升。这部分抽运功率会再经过

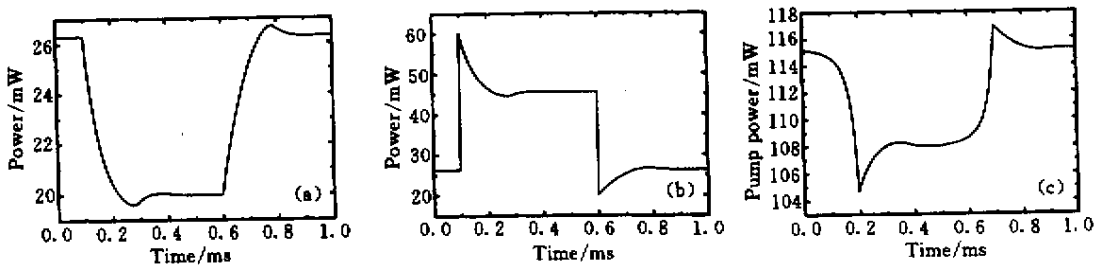


图 3 多信道情况下典型的瞬态波形

(a) 剩余信道波形 (b) 总功率波形 (c) 抽运功率波形

Fig.3 Numerical simulation on the transience of

(a) surviving channel power ; (b) total output power ;

(c) pump power at $z = 0$, in backward pumped discrete FRA during channel add at $t = 0$ and channel drop at $t = 0.5 \text{ ms}$

t , 即 $t = 2t$ 时传到 FRA 输入端, 这从图中可以清楚地看到。由于信号增益大小由抽运光在光纤中的积分决定, 所以抽运光功率的下冲会使信号光也有相应的变化, 文献 [5] 也给出了相关的解释。还有, 当信道数目增加时, FRA 中新的稳态功率值和 EDFA 相比会增加较多, 这是因为在 FRA 中大多数抽运光子都被光纤损耗吸收, 而新增的信道光子可以“夺取”这部分光子放大自己, 因此 FRA 的增益饱和程度一般没有 EDFA 的深。

3 级联 FRA 中的瞬态

在长距离传输系统中, 往往会用到多级 FRA, 此时瞬态会因积累而变强。级联 FRA 系统中掉信道的瞬态数值模拟结果示于图 4 (参数同图 2)。可见在级联系统中, 功率瞬态的幅度和持续时间都随级数而增加。物理上这是很自然的: 单级情况下输入为简单阶跃函数时, 输出已出现上冲; 级联后的输入

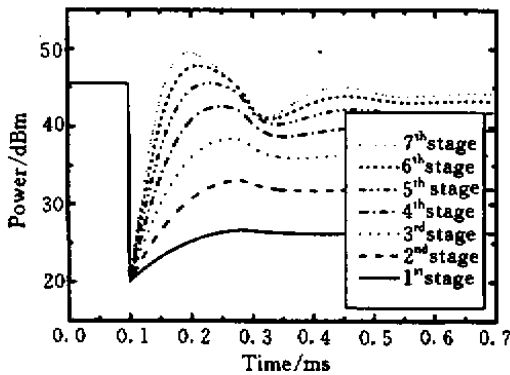


图 4 级联 FRA 中的瞬态

Fig.4 Transience in cascaded backward pumped discrete FRAs

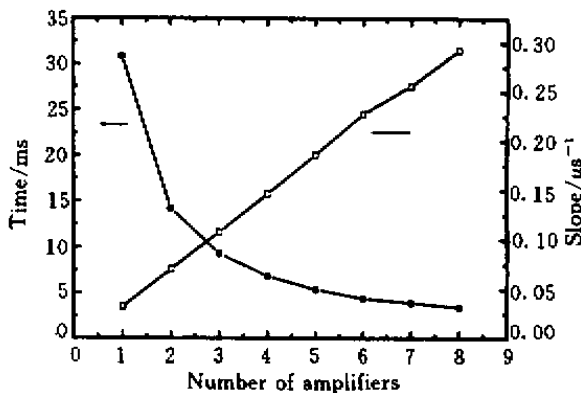


图 5 功率上冲达到 1 dB 所用时间与级数的关系

Fig.5 Time to reach 1 dB power excursion for surviving channel

包含上冲时, 输出必然出现更大的上冲。与级联 EDFA 系统中的瞬态(文献 [7], 图 2 和图 3)相比, 两者固然有共同点 (1) 功率变化斜率(功率上冲 1 dB 所用时间的倒数)随级联的级数线性增加, 见图 5。(2) 功率上冲幅度可以超过原来的稳态值。但两者也有明显不同 (1) FRA 增益饱和程度较浅, 一般需要更多的 FRA 才能使新的功率稳态值恢复到以前的大小 (2) 级联 FRA 中信道功率在瞬态内的变化程度比 EDFA 要更为严重。

为使剩余信道功率稳态值不受信道增减的影响, 增益箝制技术在光放大器中得到广泛应用。本节下面讨论为减小剩余信道(由于瞬态带来的)功率

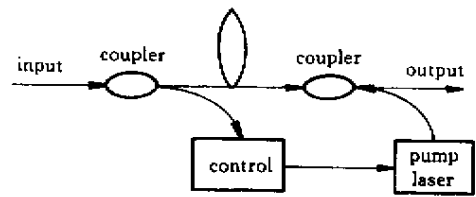


图 6 带有调抽运方式的反向抽运 GC-FRA 结构框图

Fig.6 Gain-clamping by pump power adjustment in backward-pumped discrete FRA

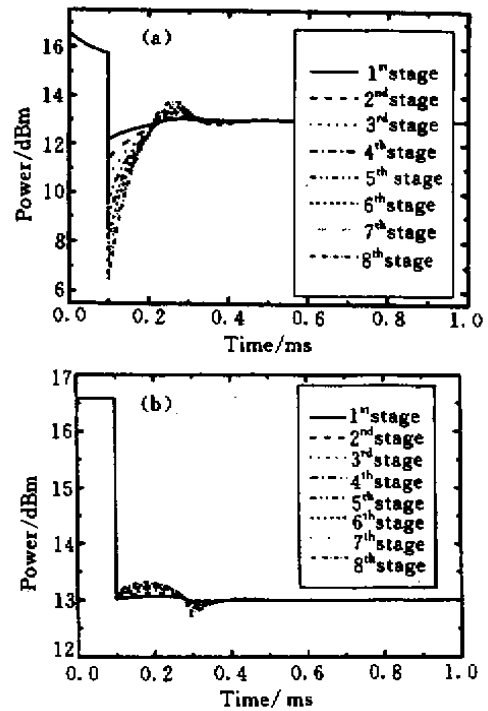


图 7 GC-FRA 中的瞬态

Fig.7 Total output power transience in gain-clamped discrete FRA

(a) $\tau_{res} = 0$; (b) $\tau_{res} = \tau$

变化增益箝制 FRA (GC-FRA) 的优化箝制方案。与增益箝制的 EDFA (GC-EDFA) 类似, 最简单实用的增益箝制方式是调节抽运功率, 其结构框图见图 6。经 8 级级联 GC-FRA 的传输结果见图 7 (a) (b)。选用 8 级的理由是它符合大部分陆上通信系统的实际情况。

GC-FRA 设计中的一个重要指标是响应时间 τ_{res} 。其定义就是当输入信号功率发生突变时, 抽运功率在经过 τ_{res} 时间后调节到合适大小, 使信号增益与原来相同。在 GC-EDFA 中, τ_{res} 应越小越好, 理论上如 $\tau_{\text{res}} = 0$ 剩余信道就没有功率变化。但在 GC-FRA 中情况十分不同。图 7 (a) 给出了 $\tau_{\text{res}} = 0$ 时信道功率的变化波形, 可以明显看到剩余信道功率也会出现变化, 这种变化随着 FRA 级数的增加还会积累。物理上, 虽然信号功率在 $t = 0$ 突然减小, 但是“储存”在光纤中的信号功率却不会发生突变, 此时减小抽运光功率会使信号增益在 $0 < t < \tau$ 时下降。最后当“储存”光纤中的信号完全输出 ($t = \tau$) 时, 输出功率会有一凹陷。事实上, τ_{res} 的最佳值不是 0 而是 τ , 这主要是因为传输延时带来的。图 7 (b) 给出了当 $\tau_{\text{res}} = \tau$ 时的功率变化波形, 可以看到即使在第 8 级输出, 剩余信道的功率变化也小于 0.5 dB。

4 结 论

1) 有增益饱和作用的反向抽运 FRA 中存在功率瞬态。输入功率发生瞬态后, 输出功率经时延 (信号在 FRA 光纤中的单程传播时间) 开始发生瞬态,

而其持续时间可用 2τ 表征, 一般在 10^{-1} ms 量级。

2) 解析表达式很好地和数值模拟及实验结果符合, 说明在解析表达式推导过程中采取的近似 (忽略噪声、忽略抽运光和信号光的群速度差、常数 K 的引入、采用一次迭代) 是可行的。

3) 多信道系统中, 加/掉信道和信道的瞬态曲线上可以分别看到与 EDFA 中瞬态波形很不相同的较小的凹陷和凸起, 它与抽运的瞬态波形相联系。

4) 功率瞬态在级联 FRA 中会随着级数的增加而恶化, 瞬态波形变化斜率与级联级数呈正比增加; 瞬态持续时间也逐级变长。

5) 在 GC-FRA 中, 通过调节合适的 τ_{res} , 瞬态可以被很好的抑制。

参 考 文 献

- 1 M. Gunkel, F. Küppers. 40 Gb/s RZ unrepeated transmission over 252 km SMF using Raman amplification [C]. OFC '2001, PD paper
- 2 Alan Evans. Raman amplification in broadband WDM systems [C]. OFC '2001, TUF4-1
- 3 A. Bononi, L. A. Rusch. Doped-fiber amplifier dynamics: A system perspective [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16** (5) 945 ~ 956
- 4 Fabrizio Forghieri *et al.*. Bandwidth of cross talk in Raman amplifiers [C]. OFC '94, FC6
- 5 Chien-Jen Chen, W. S. Wong. Transient effects in saturated Raman amplifiers [J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37** (6) 371 ~ 373
- 6 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M] (2nd Edition). New York: Academic Press, 1995
- 7 Y. Sun, A. K. Srivastava, J. L. Zyskind *et al.*. Fast power transients in WDM optical networks with cascaded EDFA's [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33** (4) 313 ~ 314