

掺铒光纤放大器的频率响应和瞬态增益

宋 开 范崇澄

(清华大学电子工程系, 光纤通信研究所, 北京 100084)

摘 要 根据掺铒光纤放大器(EDFA)的速率方程和传播方程, 忽略自发辐射噪声, 推导出了小信号调制时频率响应函数的解析表达式以及大信号调制时描述瞬态增益的方程。数值计算表明, 当输入信号的调制频率大于 5 kHz 时, 放大器的瞬态增益变化很小, 频率响应很弱。通过计算机仿真, 描述了关闭一个信道时的放大器的增益变化过程。

关键词 掺铒光纤放大器, 频率响应, 瞬态增益。

1 引 言

掺铒光纤放大器的宽频带增益特性, 在高速波分复用光纤通信系统中作为功率放大器、中继放大器和前置放大器得到了广泛的应用。在实际波分复用系统和网络中, 要求在发信端和网络节点处上下话路时不影响系统和网络的正常运行。由于掺铒光纤放大器通常工作在饱和状态, 信道数增加时其增益将下降, 各信道的输出光功率会降低; 信道数减少时, 各信道的输出光功率会增大, 导致光纤的非线性效应加强。因而掺铒光纤放大器应具有恒定的增益或较小的增益变化。目前的主要对策有: 1) 适时调节泵浦功率以稳定掺铒光纤放大器的增益^[1], 2) 利用激光钳制掺铒光纤放大器的增益^[2]等等。

在实施以上方案时, 需要知道掺铒光纤放大器的频率响应特性和瞬态增益变化。本文将根据掺铒光纤放大器的速率方程和信号传输方程对此加以研究, 并通过计算机仿真, 描述输入信号光功率突然变化时, 掺铒光纤放大器的瞬态增益变化。有人给出了这一问题在小信号状态下的结果(未给出推导过程)^[3], 本文则详细给出了小信号及大信号状态下的分析过程与结论。

2 放大器的频率响应和瞬态增益

由于粒子在亚稳态能级上的寿命远大于其在泵浦能级上的寿命, 因而掺铒光纤放大器可以等效于一个二能级系统。其速率方程为^[4]

$$\tau \frac{dn_2(z, t)}{dt} + n_2(z, t) = - \sum_k \frac{n_i}{\mu_k(a_k + g_k)P_k^{\text{sat}}} \frac{dP_k(z, t)}{dz} \quad (1)$$

$$n_1(z, t) + n_2(z, t) = n_i \quad (2)$$

式中 $n_1(z, t)$ 和 $n_2(z, t)$ 分别为基级和亚稳态能级上的粒子浓度, n_t 为总的粒子浓度; a_k 和 g_k 分别为掺铒光纤对波长 λ_k 的吸收系数和增益系数; P_k^{sat} 为放大器的内部饱和功率; $P_k(z, t)$ 为波长 λ_k 的光波的瞬时功率; $\mu_k = 1$ 和 $\mu_k = -1$ 分别对应前向(沿 $+z$ 方向)和后向(沿 $-z$ 方向)传输光。另一方面, 传播方程为:

$$\frac{dP_k(z, t)}{dz} = \mu_k(a_k + g_k) \frac{n_2(z, t)}{n_t} P_k(z, t) - \mu_k \alpha_k P_k(z, t) \quad (3)$$

由于本文主要研究掺铒光纤放大器在输入信号功率变化时的瞬态增益, 因而(3)式中忽略了放大的自发辐射噪声(ASE)。

掺铒光纤放大器处于稳态时的各光波的功率和增益可以通过联立(1)~(3)式解析求得^[2]。令 $P_k(z, 0) \equiv P_{k0}$, $n_2(z, 0) \equiv n_{20}$, 稳态下的增益为 G_{k0} , 对稳态进行扰动, 各光波的瞬时功率和上能级粒子的瞬时浓度可以表示为:

$$P_k(z, t) = P_{k0}(z) + \Delta P_k(z, t) \equiv P_{k0}(z)[1 + mp_k(z, t)] \quad (4)$$

$$n_2(z, t) = n_{20}(z) + \Delta n_2(z, t) \quad (5)$$

式中 $P_{k0}(z)$ 和 $n_{20}(z)$ 分别为稳态时的功率和粒子浓度, $mp_k(z, t)$ 为功率的调制系数。将(4)式、(5)式分别代入(1)式和(2)式, 并在光纤长度 $0 \sim l$ 上积分。对比稳态方程, 可得:

$$\tau \frac{d\Delta \bar{n}_2(t)}{dt} + \Delta \bar{n}_2(t) = - \sum_k \frac{n_t}{\mu_k(a_k + g_k)P_k^{\text{sat}}l} [P_{k0}(l)mp_k(l, t) - P_{k0}(0)mp_k(0, t)] \quad (6)$$

$$\ln \frac{1 + mp_k(l, t)}{1 + mp_k(0, t)} = \mu_k \frac{(a_k + g_k)l}{n_t} \Delta \bar{n}_2(t) \quad (7)$$

式中 l 为掺铒光纤的长度。 $\Delta \bar{n}_2(t)$ 为上能级粒子的瞬时浓度在整个光纤长度上的平均变化量,

$$\Delta \bar{n}_2(t) = \frac{1}{l} \int_0^l \Delta n_2(z, t) dz \quad (8)$$

(6)式和(7)式是分析放大器的频率响应和瞬态增益的两个基本方程。

2.1 小信号扰动时放大器的频率响应

当输入扰动很小时, 即 $|mp_k(0, t)| \ll 1$, $|mp_k(l, t)| \ll 1$, (7)式可以近似为:

$$mp_k(l, t) \approx mp_k(0, t) + \mu_k \frac{(a_k + g_k)l}{n_t} \Delta \bar{n}_2(t) \quad (9)$$

对(6)式和(9)式进行傅里叶变换, 其对应的频域两方程再合并整理后可得

$$mp_k(l, \omega) = mp_k(0, \omega) + \frac{1}{[1 + i\omega\tau + \sum_j \frac{P_{j0}(l)}{P_j^{\text{sat}}}] \sum_j \frac{\mu_k(a_k + g_k)}{\mu_j(a_j + g_j)} \frac{[P_{j0}(0) - P_{j0}(l)]}{P_j^{\text{sat}}}] mp_j(0, \omega) \quad (10)$$

利用 $\frac{\alpha_k + g_k}{\alpha_j + g_j} = \frac{\nu_{k0} P_k^{\text{sat}}}{\nu_{j0} P_j^{\text{sat}}}$ (ν_{j0} 为光波的中心频率), (10)式可进一步简化为:

$$mp_k(l, \omega) = mp_k(0, \omega) + \frac{1}{[1 + i\omega\tau + \sum_j \frac{P_{j0}(l)}{P_j^{\text{sat}}}] \sum_j \frac{\mu_k \nu_{k0}}{\mu_j \nu_{j0}} \frac{[P_{j0}(0) - P_{j0}(l)]}{P_k^{\text{sat}}}] mp_j(0, \omega) \quad (11)$$

(11)式给出了放大器输出信号的调制系数与输入信号调制系数的解析关系。由此, 不但可以求得放大器对调制信号的响应, 还可以说明在多个信道同时传输时信道之间的影响。为此, 考虑一个调制波和一个连续探针波共同输入的情形, 它们的频率响应函数可定义为

$$H_{1,2}(\omega) = mp_{1,2}(L, \omega) / mp_1(0, \omega) \quad (12)$$

下标 1、2 分别对应调制波和探针波。

在连续泵浦条件下, 根据(11)式, 它们的频率响应函数分别为:

$$H_1(\omega) = 1 + \frac{1}{[1 + i\omega\tau + \sum_j \frac{P_{j0}(L)}{P_j^{\text{sat}}}] } \frac{P_{10}(0) - P_{10}(L)}{P_1^{\text{sat}}} \quad (13)$$

$$H_2(\omega) = \frac{1}{[1 + i\omega\tau + \sum_j \frac{P_j^0(L)}{P_j^{\text{sat}}}] } \frac{P_{10}(0) - P_{10}(L)}{P_1^{\text{sat}}} \quad (14)$$

2.2 大信号扰动时放大器的瞬态增益

在多个信道传输时, 突然断掉一个(或数个)信道是大信号扰动的情况。此时虽然得不到频率响应函数的解析表达式, 但可以得到一个描述瞬态增益的简单方程。由(4)式, 放大器的瞬态增益可以表达为:

$$G_k(t) = G_{k0} \frac{1 + mp_k(L, t)}{1 + mp_k(0, t)} \quad (15)$$

G_{k0} 为放大器的稳态增益。定义:

$$\Delta G_k(t) = \exp \left[\mu_k \frac{(\alpha_k + g_k)l}{n_k} \Delta \bar{n}_2(t) \right] \quad (16)$$

则由(15)式和(7)式得

$$G_k(t) = G_{k0} \Delta G_k(t) \quad (17)$$

即 $\Delta G_k(t)$ 表示瞬态增益相对稳态增益的变化量。

根据(6)式、(7)式和(16)式, 可得关于 $\Delta G_k(t)$ 的常微分方程:

$$\tau \frac{d \ln [\Delta G_k(t)]}{dt} + \ln [\Delta G_k(t)] = - \sum_j \frac{\mu_k}{\mu_j} \frac{\nu_{k0}}{\nu_{j0}} \frac{[G_{j0} \Delta G_j(t) - 1] P_j(0, t) - [G_{j0} - 1] P_{j0}}{P_k^{\text{sat}}} \quad (18)$$

由(16)式可知, 不同波长信号的 $\Delta G_k(t)$ 满足如下关系

$$\ln [\Delta G_j(t)] = \frac{\nu_{j0} P_k^{\text{sat}}}{\nu_{k0} P_j^{\text{sat}}} \ln [\Delta G_k(t)] \quad (19)$$

将(19)式代入(18)式利用四阶龙格-库塔法即可求解(18)式。

3 数值分析与讨论

用于数值分析的掺铒光纤放大器参数为: 掺铒光纤长度 10 m, 调制波(1555 nm)、探针波(1556 nm)和泵浦波(980 nm)的内部饱和功率为 0.29 mW、0.28 mW、0.69 mW; 吸收系数为 3.8 dB/m、3.6 dB/m、5.3 dB/m; 增益系数为 5.6 dB/m、5.5 dB/m、0。同向泵浦功率为 13 dBm。

3.1 小信号频率响应

图 1(a)和图 1(b)是由(15)式和(16)式算出的调制波和探针波的幅度响应和相位响应。图中实线和虚线分别对应调制波和探针波的平均输入功率为 -20 dBm 和 -10 dBm。当调制频率较高(> 5 kHz)时。调制波的幅度响应趋于 1, 相位响应趋于 0, 而探针波的幅度响应趋于 0, 相位响应趋于常数(-90°), 说明放大器对于高频调制信号是透明放大的, 并且信道间

的交叉调制很弱。



Fig. 1 Frequency response at small-signal modulation. Input power is - 10 dBm (solid line) and - 20 dBm (dashed line). (a) Amplitude, (b) Phase delay

3.2 大信号调制时, 增益变化与调制频率的关系

图2表示连续泵浦功率为20mW、调制波为调制系数100%的正弦信号时, 探针波的增益变化 [$\Delta G(t)$ 的峰-峰值] 与调制频率的关系。调制波和探针波的平均输入功率均为- 10 dBm。

3.3 调整泵浦功率实现放大器的增益控制

图 3(a) 和图 3(b) 描述了某时刻突然关闭两个信道中的一个时, 放大器的瞬时增益变化。在 $t = 0.5 \text{ ms}$ 时, 关闭一个信道, 经过约 1.5 ms , 放大器的增益基本稳定, 达到 21 dB 。为了恒定增益, 在 $t = 0.64 \text{ ms}$ 时刻(假设电子线路的延迟为 0.14 ms), 将泵浦功率由 13 dBm 下降到 11 dBm , 从图 3(c) 和图 3(d) 中可见, 调节泵浦功率后, 放大器的增益变化降低到了 1 dB 。如果电子线路的延迟时间缩短到 0.1 ms , 则增益变化将小于 0.5 dB 。

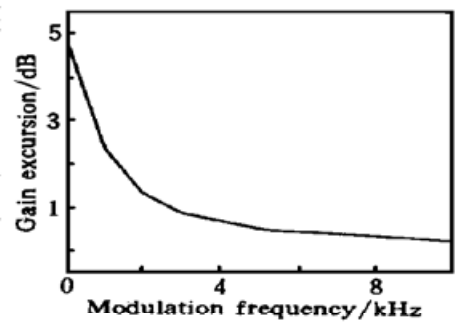


Fig. 2 Gain excursion of probe signal against modulation frequency

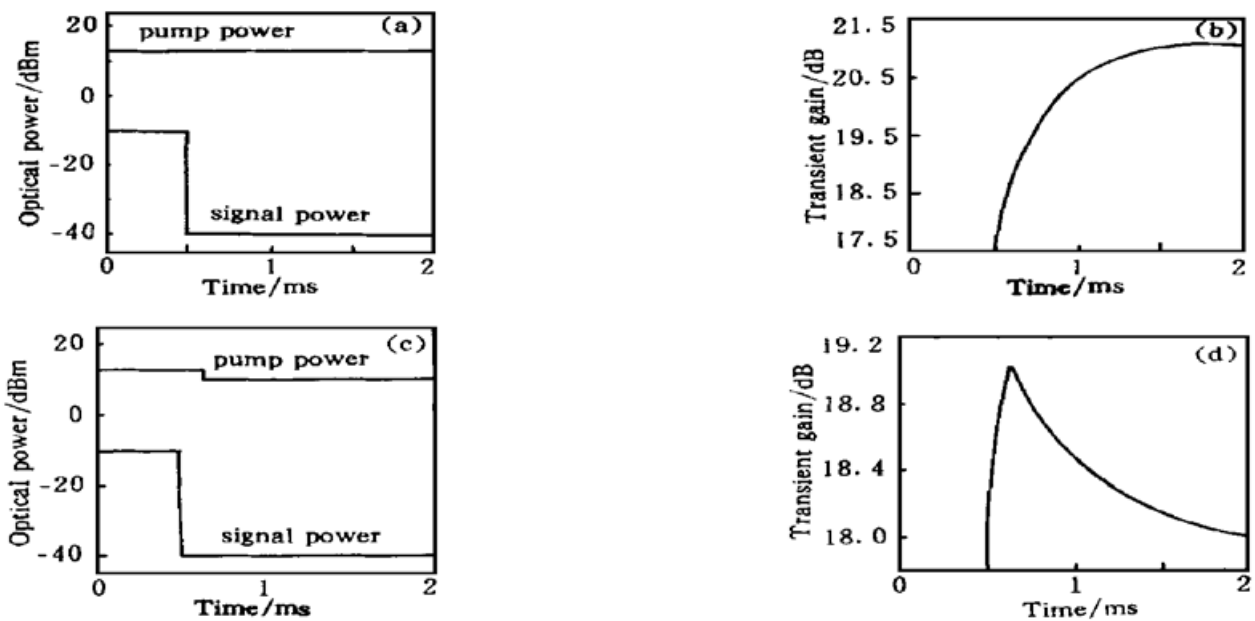


Fig. 3 Transient process in EDFA during channel dropping. (a) Pump power and dropped signal power, (b) Transient gain of surviving channel under constant pump power, (c) Adjusting pump power, (d) Transient gain of surviving channel under adjusting pump power

总结 根据掺铒光纤放大器的速率方程和传播方程, 在忽略自发辐射噪声的前提下, 推导

出了 1) 小信号调制时频率响应函数的解析表达式; 2) 大信号调制时描述瞬态增益的方程。通过数值计算, 从理论上证明了掺铒光纤放大器的低频响应特性, 当输入信号的调制频率大于 5 kHz 时, 频率响应很弱, 可视为“透明”放大器。另外, 通过计算机仿真, 描述了两信道中突然关闭一个信道时, 放大器的增益变化过程, 证明了通过调节泵浦功率来控制增益的可行性。利用本文结果可以研究多个掺铒光纤放大器级联的情况。

参 考 文 献

- [1] Srivastava A K, Sun Y, Zyskind J L. EDFA transient response to channel loss in WDM transmission system. *IEEE Photonics Technology Lett.*, 1997, **9**(3) : 386~ 388
- [2] Yu A, O'Mahony M J. Design and modeling of laser-controlled erbium-doped fiber amplifiers. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, 1997, **3**(4) : 1013~ 1018
- [3] Sun Y, Saleh A M *et al.*. Modeling of small-signal cross-modulation in WDM optical systems with erbium-doped fiber amplifiers. *Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference '97*, 1997, 106~ 107
- [4] Giles C R, Desurvire E. Modeling of erbium-doped fiber amplifiers. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **9**(2) : 271~ 283

Frequency Response and Transient Gain of Erbium-Doped Fiber Amplifier

Song Kai Fan Chongcheng

(*Centre for Optical Fiber Communication Studies, Department of Electronics Engineering,
Tsinghua University, Beijing 100084*)

(Received 1 October 1997; revised 3 April 1998)

Abstract An analytical formula on small-signal frequency response of Erbium-doped fiber amplifier (EDFA) is deduced and gain modulation response for large-signal modulation is investigated through numerical calculation. Computer simulations show that fast pump control can limit transient gain excursion of EDFA.

Key words Erbium-doped fiber amplifier, frequency response, transient gain.