

窄脉冲泵浦的 Raman 放大研究

张劲松

(深圳信息职业技术学院电子通信技术系,广东 深圳 518029)

摘要:基于振幅耦合方程,引入入射处信号脉冲与泵浦脉冲的时间差,研究了光纤中单个信号脉冲与窄泵浦脉冲的作用。将泵浦脉冲取为双曲正割形式,得到交叠因子、信号光振幅、泵浦光振幅的解析解,及信号功率沿光纤的分布。研究了长光纤中信号脉冲与多个泵浦脉冲的作用,推导出考虑插损时的信号增益。

关键词:光纤 Raman 放大器;窄泵浦脉冲;受激 Raman 散射;走离效应

中图分类号:TN253 **文献标识码:**A

Research on Raman amplification pumped by short pulses

ZHANG Jin-song

(Shenzhen Institute of Information Technology, Shenzhen 518029, China)

Abstract: Based on the amplitude-coupled equations, the interaction of single signal pulse and single short pump pulse is studied by inducting time difference. Theoretical solutions of overlapping factor, amplitude of signal and pump are obtained by assuming sech pump pulse. The power distribution of signal is also obtained. The actions for signal pulse with multi pump pulses are analyzed. The Raman gain for signal is obtained with considering insert loss.

Key words: fiber Raman amplifier; short pump pulse; SRS; walk-off effect

1 引言

光纤 Raman 放大器是利用受激 Raman 散射产生的增益机制而对光信号实现放大,由于具有带宽大、小信号增益高、信噪比高、传输线路与放大器线路可同为一体等优点而得到重视与大量的研究,在长距离、大容量光通信系统中有广泛的应用。

进行 Raman 放大器的理论分析有很大的现实意义,国际及国内目前的理论研究主要集中于 CW (连续波)泵浦、CW 信号^[1-4],对 CW 泵浦、泵浦脉冲较宽的情形,仍可近似采用连续波的理论。但为了抑制受激布里渊散射(SBS),泵浦脉冲需采用窄脉冲形式,就需要对连续波理论进行修正^[5]。本文基于光纤 Raman 放大的振幅耦合方程,研究信号光脉冲与一个、多个泵浦脉冲相作用的情形。

2 理论分析

若信号光、泵浦光都为脉冲形式,采用正向泵浦

方式,振幅耦合方程可写为^[5]:

$$\frac{\partial A_s}{\partial z} + \frac{1}{v_{gs}} \frac{\partial A_s}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2s} \frac{\partial^2 A_s}{\partial t^2} + \frac{\alpha_s}{2} A_s = i\gamma_s (|A_s|^2 + 2|A_p|^2) A_s + \frac{g_s}{2} |A_p|^2 A_s \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_p}{\partial z} + \frac{1}{v_{gp}} \frac{\partial A_p}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2p} \frac{\partial^2 A_p}{\partial t^2} + \frac{\alpha_p}{2} A_p = i\gamma_p (|A_p|^2 + 2|A_s|^2) A_p - \frac{g_p}{2} |A_s|^2 A_p \quad (2)$$

其中, A_j 振幅; v_{gj} 是群速度; β_{2j} 是 GVD 系数; α_j 是衰减系数; g_j 是增益系数; $j = s, p$ 分别表示信号光、泵浦光。

采用延时系, $T = t - z/v_{gs}$, 振幅耦合方程可改写为:

作者简介:张劲松(1969-),男,博士,高工,主要从事光纤激光器,放大器等方面的研究。E-mail:zhangjs@sziit.com.cn
收稿日期:2009-09-07

$$\frac{\partial A_s}{\partial z} + \frac{i}{2}\beta_{2s}\frac{\partial^2 A_s}{\partial T^2} + \frac{\alpha_s}{2}A_s = i\gamma_s(|A_s|^2 + 2|A_p|^2) \cdot A_s + \frac{g_s}{2}|A_p|^2 A_s \quad (3)$$

$$\frac{\partial A_p}{\partial z} + d\frac{\partial A_p}{\partial T} + \frac{i}{2}\beta_{2p}\frac{\partial^2 A_p}{\partial T^2} + \frac{\alpha_p}{2}A_p = i\gamma_p(|A_p|^2 + 2|A_s|^2)A_p - \frac{g_p}{2}|A_s|^2 A_p \quad (4)$$

首先讨论一个信号脉冲与一泵浦脉冲的相互作用。

假设入射处($z=0$),信号光为双曲正割脉冲:

$$A_s(0, T) = A_{s_0} \operatorname{sech}\left(\frac{T}{T_{s_0}}\right) \quad (5)$$

其中, A_{s_0} 为入射处信号光的峰值; 取为 $A_{s_0}^2 = 2.5 \text{ mW}$ 。 T_{s_0} 为泵浦光脉冲半宽度, 取为 20 ps。脉冲重复频率取为 10 GHz(脉冲间隔 T_{js} 100 ps)。

假设入射端, 泵浦光为双曲正割脉冲, 且泵浦脉冲超前信号脉冲 M 个泵浦光脉冲半宽度:

$$A_p(0, T) = A_{p_0} \operatorname{sech}\left(\frac{T + MT_{p_0}}{T_{p_0}}\right) \quad (6)$$

其中, A_{p_0} 为入射处泵浦光的峰值; 取为 $A_{p_0}^2 = 100 \text{ W}$ 。 T_{p_0} 为泵浦光脉冲半宽度; 取为 20 ps。脉冲重复频率取为 80 MHz(间隔 T_{jp} 12500 ps)。

入射处, 信号脉冲与泵浦脉冲的时域峰值, 前人工作都是取重合的。但在 Raman 放大器中, 信号脉冲传输速度比泵浦脉冲快, 总是不断地从落后泵浦脉冲, 到与泵浦脉冲交叠, 再到超过泵浦脉冲。故需要引入入射处信号脉冲与泵浦脉冲的时间差, 从而研究 Raman 放大时脉冲相互作用。

其他相关参数的选取如下:

$$\beta_{2p} = 20 \text{ ps}^2/\text{km}, \alpha_p = 0.25 \text{ dB/km}, d = 4 \text{ ps/m}, \gamma_j = 20 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}。$$

$$\beta_{2s} = 20 \text{ ps}^2/\text{km}, \alpha_s = 0.20 \text{ dB/km}, g_s = 0.86 \text{ (W} \cdot \text{km)}^{-1}。$$

可计算出色散长度 $L_D = 20 \text{ km}$, 走离长度 $L_W = 5 \text{ m}$, 非线性长度 $L_{NL} = 0.5 \text{ m}$ 。故可以忽略泵浦光脉冲与信号光脉冲的色散效应。走离长度较小, 脉冲相互作用的距离小, 故可以忽略插损。由于信号光较弱, 泵浦光的 SPM 比 XPM 大很多, 忽略信号对泵浦光的影响。所以采用简化模型^[6]是合理的。

式(4)可简写为:

$$\frac{\partial A_p}{\partial z} + d\frac{\partial A_p}{\partial T} = i\gamma_p |A_p|^2 A_p \quad (7)$$

式(7)的解为:

$$A_p(z, T) = A_p(0, T - zd) \cdot$$

$$\exp(i\gamma_p \cdot |A_p(0, T - zd)|^2) \quad (8)$$

由于信号光较弱, 可忽略信号光的 SPM。式(3)可简写为:

$$\frac{\partial A_s}{\partial z} = i\gamma_s 2|A_p|^2 A_s + \frac{g_s}{2}|A_p|^2 A_s \quad (9)$$

式(9)的解为:

$$A_s(z, T) = A_s(0, T) \exp\left(\left(\frac{g_s}{2} + i2\gamma_s\right)\varphi(z, T)\right) \quad (10)$$

其中, 交叠因子 $\varphi(z, T) = \int_0^z |A_p(0, T - z'd)|^2 dz' =$

$$\int_0^z \left| A_{p_0} \operatorname{sech}\left(\frac{T - z'd + MT_{p_0}}{T_{p_0}}\right) \right|^2 dz' = \frac{2A_{p_0}^2 T_{p_0}}{d} \left[\frac{1}{e^{\frac{2(T-zd+MT_{p_0})}{T_{p_0}}} + 1} - \frac{1}{e^{\frac{2(T+MT_{p_0})}{T_{p_0}}} + 1} \right] \quad (11)$$

这里, 利用将泵浦脉冲取为双曲正割形式, 可得到交叠因子的解析表达式。如取 Gauss 脉冲, 无法得到解析表达式, 且很难进行数值计算, 因为数值积分的传输距离步长必须取得很小 ($\sim 10^{-4} \text{ m}$ 量级), 计算量过大。

信号光功率沿传输光纤的分布可写为:

$$P_s(z) = \frac{1}{T_{js}} \int_{-\infty}^{\infty} |A_s(z, T)|^2 dT = \frac{A_{s_0}^2}{T_{js}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \operatorname{sech}^2\left(\frac{T}{T_{s_0}}\right) \exp(g_s \varphi(z, T)) dT \quad (12)$$

取 $M=3$, 根据式(12)可通过数值计算得到信号光功率沿传输光纤的分布如图 1 所示。

由图 1 可见, 当信号脉冲开始与泵浦脉冲有交叠时, 由于 SRS, 信号开始增大; 当信号脉冲超过泵浦脉冲较远, 交叠因子很小时, 信号功率保持不变。

当信号脉冲从落后泵浦脉冲较远, 到超过泵浦脉冲较远, 即取 $z \rightarrow \infty, M \gg 1$ 时, 交叠因子式(11)可写为:

$$\varphi(z, T) = \frac{2A_{p_0}^2 T_{p_0}}{d} \quad (13)$$

信号增益 G 可写为:

$$G(\text{dB}) = 20 \lg(e) g_s A_{p_0}^2 T_{p_0} / d = 10 \lg(e) g_s P_p(0) T_{jp} / d \quad (14)$$

其中, $P_p(0) = 2A_{p_0}^2 T_{p_0} / T_{jp}$ 为泵浦脉冲入射平均功率。式(14)表明, 一个信号脉冲完整穿过一泵浦脉冲时, 信号增益与信号脉冲形状无关。走离参量 d

越小,增益越大。

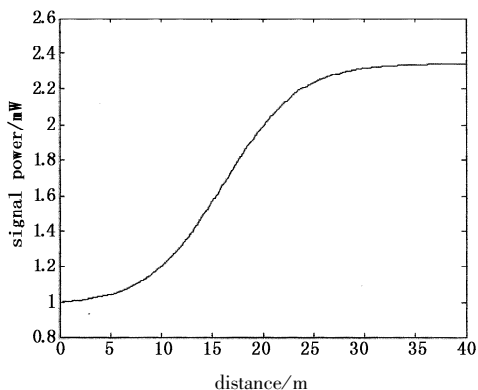


图1 短光纤时信号功率沿光纤的分布

现讨论在长光纤中,信号与多个泵浦脉冲相作用的情况。设信号在长光纤传输过程中,与 R 个泵浦脉冲相作用,与第 r 个泵浦脉冲作用后,考虑到泵浦光的插损,得到的增益可以表示为:

$$G_r(\text{dB}) = 10 \lg(e) g_s P_p(0) T_{jp}/d \cdot \exp(- (r-1) \alpha_p T_{jp}/d) \quad (15)$$

这里, $(r-1) T_{jp}/d$ 表示信号中心与第 r 个泵浦脉冲中心位置相同时,泵浦脉冲的传输位置。入射端,第一个泵浦脉冲超前信号脉冲的距离为 $MT_{p0} v_{gp}$,在 0.01 m 量级,故可以忽略这段距离的泵浦光插损。

SRS 总增益可写为:

$$G_{st}(\text{dB}) = \sum_{r=1}^R G_r = 10 \lg(e) g_s P_p(0) T_{jp}/d \times \sum_{r=1}^R \exp(- (r-1) \alpha_p T_{jp}/d) = 10 \lg(e) g_s P_p(0) \cdot T_{jp} \frac{1 - \exp(- \alpha_p T_{jp} R/d)}{d(1 - \exp(- \alpha_p T_{jp}/d))} \quad (16)$$

考虑信号在光纤中传输的插损,可以得到经过传输距离 z (较大,如 10 km 量级)后,信号总增益可表示为:

$$G_t(z, \text{dB}) = 10 \lg(e) g_s P_p(0) T_{jp} \cdot \frac{1 - \exp(- \alpha_p T_{jp} R/d)}{d(1 - \exp(- \alpha_p T_{jp}/d))} - \alpha_s z \quad (17)$$

其中,给定传输距离 z ,可以得到 R :

$$R = \lfloor zd/T_{jp} \rfloor \quad (18)$$

这里 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示取整数。对本文所给定的参数,当光纤长度分别为 10 km, 20 km, 30 km, 40 km, 50 km 时,利用式(17)可计算出信号增益分别为 7.46 dB, 10.98 dB, 12.19 dB, 12.06 dB, 11.41 dB。

3 结论

基于振幅耦合方程,引入入射处信号脉冲与泵浦脉冲的时间差,研究了光纤中单个信号脉冲与泵浦脉冲的作用。当信号脉冲开始与泵浦脉冲有交叠时,由于 SRS,信号开始增大;当信号脉冲超过泵浦脉冲较远,信号功率保持不变。一个信号脉冲完整穿过一泵浦脉冲时,信号增益与信号脉冲形状无关。走离参量 d 越小,增益越大。研究了长光纤中信号脉冲与多个泵浦脉冲的作用,推导出考虑插损时的信号增益。这些工作对 Raman 放大器的设计有较大的指导意义。

参考文献:

- [1] Ma Yonghong, Xie Shizhong. Optimal Design and Analysis of Broadband Fiber Raman Amplifier [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24 (1): 42 - 47. (in Chinese)
- [2] Wen He, Yang Xin, Gu Wan-yi. A Fast Method for Wide-Band Flat-Gain Fiber Raman Amplifier Pump Configuration [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32 (11): 1894 - 1896. (in Chinese)
- [3] Chang Jianhua, Zhang Ming-de, Sun Xiaohan. A Novel Method of Calculating Transmission Equations for Multi-wavelength-Pumped Fiber Raman Amplifiers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31 (5): 579 - 582. (in Chinese)
- [4] Cui Sheng, Liu Jinsong, Ma Xiaoming. Optimization of multiple wavelength bidirectionally pumping fiber Raman Amplifier [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24 (12): 1607 - 1611. (in Chinese)
- [5] G P Agrawal. Nonlinear Fiber Optics [M]. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 1995.
- [6] He Jingsuo, Guo Tongwen, Lei Bo, et al. Optimal Design of Multiwave Pumped Fiber Raman Amplifier with Simplified Mode [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23 (7): 819 - 822. (in Chinese)