

文章编号: 0258-7025(2004)05-0579-04

# 计算多波长抽运光纤拉曼放大器 传输方程的新方法

常建华, 张明德, 孙小菡

(东南大学电子工程系, 江苏 南京 210096)

**摘要** 提出了一种直接用龙格-库塔迭代算法全面求解光纤拉曼放大器传输方程的方法。求解中不作任何假设近似, 综合考虑了抽运、信号、噪声在传输过程中的相互作用。该方法推导过程简单, 计算速度较快, 能达到较高的精度要求, 且有助于深入理解光纤拉曼放大器中各种效应在传输过程中的相互影响。采用此方法成功地在 100 nm 带宽上求得信号增益, 取得了较好的增益平坦度。同时给出了抽运功率在光纤传输线上的分布, 进而给出了各个波长上的噪声系数。该方法非常适合应用于超宽带多波长抽运光纤拉曼放大器的工程设计。

**关键词** 光纤通信技术; 光纤拉曼放大器; 密集波分复用; 龙格-库塔法

**中图分类号** TN 929.11 **文献标识码** A

## A Novel Method of Calculating Transmission Equations for Multiwavelength-Pumped Fiber Raman Amplifiers

CHANG Jian-hua, ZHANG Ming-de, SUN Xiao-han

(Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

**Abstract** The Runge-Kutta iterative algorithm is used to solve the standard propagation equations of fiber Raman amplifiers (FRAs). The analysis includes all the interactions of pumps, signals and noise without any approximation. Applications of the numerical analysis to practical FRA-based systems show a great reduction in computation time comparing with the direct integration approach based on ordinary coupled differential equations, while reproducing all the essential system performances precisely. In addition to enhanced computational efficiency, the derived equations can also give deeper insights into the detailed dynamics of FRAs. By making use of this method, flattened signal gains of a multiwavelength-pumping FRA with a bandwidth of over 100 nm are successfully calculated and pump power distributions along the transmission fiber are given. Furthermore, noise figures of the FRA are also presented. The method is very suitable to the engineering design of ultrabroad band FRAs with multiwavelength pumps.

**Key words** fiber communication technique; fiber Raman amplifier; dense wavelength division multiplexing (DWDM); Runge-Kutta analysis

## 1 引 言

近年来, 光纤拉曼放大器在密集波分复用 (DWDM) 系统中越来越受到重视, 这是由其特点所决定的, 首先它的噪声较低, 由于沿线的信号功率比较小, 所以非线性效应也不明显; 其次, 只要选择合

适的抽运源, 就可以放大任意频段, 突破了掺铒光纤放大器 (EDFA) 的只能放大  $C$  和  $L$  波段的限制。因此, 随着高功率激光二极管抽运激光器和光纤光栅技术的发展, 光纤拉曼放大器由于其自身固有的全波段可放大特性和可利用传输光纤做在线放大的优点, 一经成功地应用于密集波分复用传输系统, 就立

收稿日期: 2002-12-28; 收到修改稿日期: 2003-03-27

作者简介: 常建华(1976—), 男, 东南大学电子工程系光通信实验室博士研究生, 主要从事光纤拉曼放大器及全光通信的研究。E-mail: jianhuachang@seu.edu.cn

刻受到广泛关注。由于光纤拉曼放大器传输方程比较复杂,传统的直接积分求解耦合方程的方法随着光纤长度、带宽和抽运数目的增加,需要消耗大量的计算时间,变得越来越不切实际。为此很多人提出了许多简化模型<sup>[1,2]</sup>,如不考虑信号对抽运造成的衰减,放大自发辐射(ASE)噪声求出了解析式等,这些模型虽然速度有所提高但忽略了很多因素。本文采用龙格-库塔算法来求解拉曼传输方程,全面地考

虑了 ASE 噪声、瑞利散射以及自发拉曼散射等因素,计算速度快且达到了高的精度要求。

## 2 理论模型

Kidorf 等提出了一个包含有前后向的抽运、信号和放大自发辐射噪声功率分布的比较完备的传输方程<sup>[3~5]</sup>,即

$$\begin{aligned} \frac{dP^\pm(z, \nu_i)}{dz} = & \mp \alpha(\nu_i)P^\pm(z, \nu_i) \pm \eta(\nu_i)P^\pm(z, \nu_i) \pm \\ & P^\pm(z, \nu_i) \sum_{m=i+1}^n \frac{g_R(\nu_m - \nu_i)}{\Gamma A_{\text{eff}}} [P^\pm(z, \nu_m) + P^\mp(z, \nu_m)] \pm \\ & h\nu_i \sum_{m=i+1}^n \frac{g_R(\nu_m - \nu_i)}{\Gamma A_{\text{eff}}} [P^\pm(z, \nu_m) + P^\mp(z, \nu_m)] [1 + (e^{\frac{h(\nu_m - \nu_i)}{kT}} - 1)^{-1}] \Delta\nu \mp \\ & P^\pm(z, \nu_i) \sum_{m=1}^{i-1} \frac{\nu_i}{\nu_m} \frac{g_R(\nu_i - \nu_m)}{\Gamma A_{\text{eff}}} [P^\pm(z, \nu_m) + P^\mp(z, \nu_m)] \mp \\ & 2h\nu_i P^\pm(z, \nu_i) \sum_{m=1}^{i-1} \frac{\nu_i}{\nu_m} \frac{g_R(\nu_i - \nu_m)}{\Gamma A_{\text{eff}}} [1 + (e^{\frac{h(\nu_i - \nu_m)}{kT}} - 1)^{-1}] \Delta\nu \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $P^+(z, \nu_i)$  和  $P^-(z, \nu_i)$  分别表示在频率  $\nu_i$  附近很小带宽内的正向和反向传输光功率。 $\alpha, \eta, h, k, T$  分别表示光纤衰减系数、瑞利散射系数、普朗克常数、玻尔兹曼常数和绝对温度。 $A_{\text{eff}}$  为光纤在频率  $\nu_m$  的有效面积。 $g_R$  为拉曼增益系数(见图 1)。 $\Gamma$  为偏振因子,偏振态相同、正交和完全扰乱时分别为 1,  $\infty$  和 2。右式中第 1, 2 项分别表示光纤的衰减和瑞利散射,第 3, 4 项表示对频率  $\nu_i$  信道的放大作用,而第 5, 6 项是对其的衰减作用项。具体地讲,第 3 项表示高频短波长对信道  $\nu_i$  的放大,第 4 项是放大自发辐射噪声并考虑了温度的影响,第 5 项表示低频长波长对信道  $\nu_i$  造成的衰减,第 6 项表示噪声发射导致的衰减。

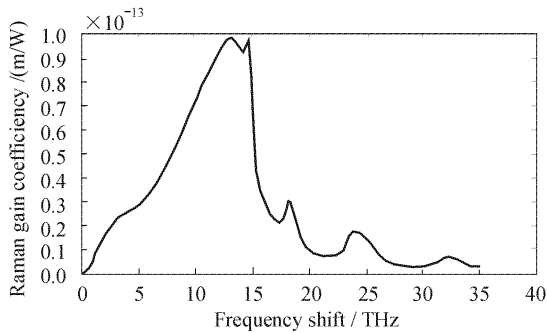


图 1 拉曼增益系数

Fig. 1 Raman gain coefficient

对于拉曼增益系数,常用 Lorents 函数来近似,

可表示为<sup>[6]</sup>

$$g_R(t) = \frac{\tau_1^2 + \tau_2^2}{\tau_1 \tau_2} \exp(-t/\tau_2) \sin(t/\tau_1) \quad (2)$$

式中  $\tau_1, \tau_2$  是两个参数,比较好的取值是  $\tau_1 = 12.2$  fs,  $\tau_2 = 32$  fs。

为了能利用龙格-库塔法来求解,式(1)可表示为

$$\frac{dP^\pm(z, \nu_i)}{dz} = F[z, \nu_i, P^\pm(z, \nu_i)] \quad (3)$$

式中  $F[z, \nu_i, P^\pm(z, \nu_i)]$  就是(1)式右边的部分。把传输光纤分成很多段,假设每一段的长度为  $\Delta z$ ,则利用龙格-库塔迭代思想可以得到下面的公式

$$P^\pm(z_0 \pm \Delta z, \nu_i) = P^\pm(z_0, \nu_i) \pm (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \Delta z / 6 \quad (4)$$

$$k_1 = F[z_0, \nu_i, P^\pm(z_0, \nu_i)] \quad (5)$$

$$k_2 = F[z_0 \pm \Delta z / 2, \nu_i, P^\pm(z_0, \nu_i) \pm k_1 \Delta z / 2] \quad (6)$$

$$k_3 = F[z_0 \pm \Delta z / 2, \nu_i, P^\pm(z_0, \nu_i) \pm k_2 \Delta z / 2] \quad (7)$$

$$k_4 = F[z_0 \pm \Delta z, \nu_i, P^\pm(z_0, \nu_i) \pm k_3 \Delta z] \quad (8)$$

这里考虑的是只有后向抽运的情况。在计算抽运功率分布时,从抽运输入端出发以抽运的初始输入值作为初始迭代值,以  $\Delta z$  为步长一步一步反方向迭代计算出各个位置的抽运功率值;同样计算信号功率沿光纤分布时也是从信号输入端开始,以信号的初始功率值作为初始迭代值一步一步迭代下去。迭代过程中计算某个点的功率值就以其上一点的功率值作为初始值  $P^\pm(z_0, \nu_i)$ 。 $\Delta z$  值的选取一般不能

取得太大, 否则精度不高, 但也不能取得太小, 那样会消耗很多计算时间, 影响速度, 在这里取了 0.6 km。在每一小段  $\Delta z$  内, 假设各个信道的衰减是一个常数, 并采用广义衰减系数<sup>[1]</sup>

$$\alpha(z_0, \nu_i) = \frac{F[z_0, \nu_i, P(z_0, \nu_i)]}{P(z_0, \nu_i)} \quad (9)$$

这样在求  $k_1, k_2, k_3, k_4$  的值时, 需要代入的其他信道在  $(z_0 \pm \Delta z)$  的功率值, 可以从其初始值出发乘以  $\exp[\pm \alpha(z_0, \nu_i) \cdot \Delta z]$  就可以了。

由于后向抽运的拉曼方程属于边值问题, 比较常用的方法有打靶法, 但是它对初始值的选择值依赖比较大, 初始值选得合适收敛较快, 反之收敛较慢甚至不收敛。本文采用下面的迭代步骤: 先计算抽运光沿着光纤反向传输不考虑信号造成的衰减, 抽运光在传输过程中只受到光纤的衰减。记录下抽运光沿光纤的分布。接下来计算信号的正向传输, 这时候光纤中已经有了抽运功率的分布, 因此光在传输过程中不仅会受到光纤造成的衰减而且还会受到抽运光产生的增益而放大。利用前面记录下来的抽运光的功率分布求出信号光沿着光纤的功率分布。接着继续计算抽运光的反向传输, 这时候光纤中已经有了信号光的分布, 所以要考虑信号对抽运造成的衰减, 这样得到了又一个抽运沿着光纤的功率分布。把两次的结果作一次加权平均, 继续计算信号时用该加权平均的抽运分布代入计算。这样反复迭代直到精度达到要求为止。这个称作“权重因子”的参数代表每一步计算中的“残余”作用在总的记录功率中所占的比重。如果这个参数设得太大了, 将会增加迭代的次数; 而设得太小了又会出现不收敛或者达不到精度的要求。一般可取经验值 1/6 时, 经过 7 次迭代就能够达到精度为  $10^{-4}$  的结果。

### 3 结果分析

在模拟计算中采用了下面的参数<sup>[2]</sup>:  $L = 10$  km,  $T = 300$  K,  $\alpha_p = 0.3$  dB/km,  $\alpha_s = 0.2$  dB/km,  $G = 20$  dB,  $\eta = -38$  dB/km,  $N = 100$  (信号从 1510 nm 到 1610 nm),  $A_{\text{eff}} = 50 \mu\text{m}^2$ ,  $\Gamma = 2$ 。抽运有六个波长分别为 1404 nm, 1413 nm, 1432 nm, 1449 nm, 1463 nm 和 1495 nm, 其功率分别对应为 680 mW, 600 mW, 440 mW, 190 mW, 76 mW 和 54 mW。

图 2 给出了信号的增益曲线及噪声系数。实线是龙格-库塔法模拟结果, 虚线是文献[2]中的近似

法模拟图线。可见两种方法模拟的结果很接近。但龙格-库塔算法具有几个明显的优势: 首先考虑的影响因素更全面。由于这里给出的一组优化好的参数中信号的初始值都比较小, 因而可以忽略信号给抽运造成的衰减以及信号之间的拉曼散射作用。如果在信号初始值比较大的情况下, 文献[2]的方法计算就会有比较大的误差。但如果用本文中的方法来模拟就不会有这个问题, 因为我们没有做任何近似假设。其次, 计算时间明显要快于文献中的方法, 这是由于四阶龙格-库塔算法具有很高的精度, 同时在计算过程中采用了广义衰减系数<sup>[1]</sup>, 使得 Stokes 光增益和抽运光的消耗的一阶变化量在迭代步长内成为  $z$  的简单指数函数, 迭代步长内的功率演化通过相当精确的半解析式公式求解。因此步长可以取得很大, 文中  $\Delta z$  取 0.6 km, 而其他的方法由于精度不高, 步长一般不能取得太大, 如文献[2]中只能取到 0.3 km 左右才能有比较好的精度, 其速度就不言而喻了。

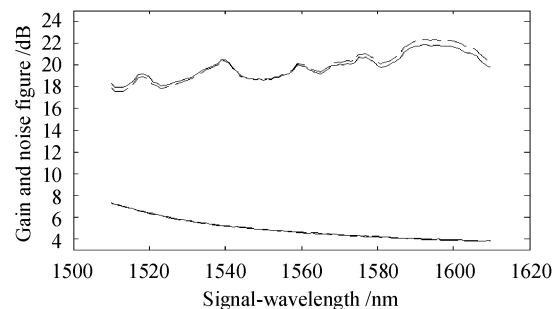


图 2 信号增益和噪声系数曲线

Fig. 2 Calculated signal optical gains and noise figures

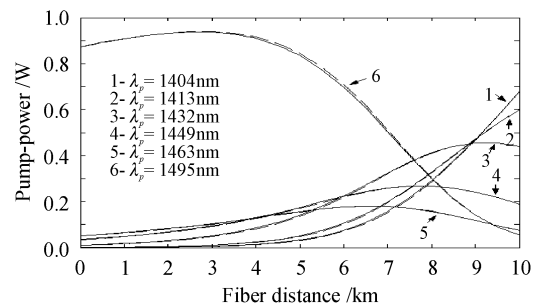


图 3 抽运的功率分布

Fig. 3 Pump power distribution in the distributed fiber Raman amplifier

图 3 给出了抽运功率分布。实线是龙格-库塔法模拟的抽运功率分布, 虚线是文献[2]近似法模拟的分布图线。同样可以看出两种方法得出的结果非常一致, 再次说明了龙格-库塔法是一个可靠的计算

拉曼传输方程方法。

## 4 结 论

本文采用龙格-库塔算法来求解光纤拉曼放大器传输方程,取得了理想的结果。此方法成功地在 100 nm 带宽上求得信号增益,取得了较好的增益平坦度。同时给出了抽运功率在光纤传输线上的分布,进而深入地给出了各个波长上的噪声系数。不仅具有高的精度,而且计算的时间也明显减少。

### 参 考 文 献

- 1 Sihai Wang, Lun Zhang, Chongcheng Fan. Generalized attenuation coefficients and their application in counter-pumped fiber Raman amplifier simulation [J]. *Communication Technology Proceeding*, 2000, **WCC-ICCT2000**, **2**:1550~1553
- 2 Xiang Zhou, Chao Lu, Ping Shum *et al.*. A simplified model and optimal design of a multiwavelength backward-pumped fiber Raman amplifier [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(9):945~947
- 3 H. Kidorf, K. Rottwitt, M. Nissov *et al.*. Pump interactions in a 100-nm bandwidth Raman amplifier [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(5):530~532
- 4 Victor E. Perlin, Herbert G. Winful. Efficient design method for multi-pump flat-gain fiber Raman amplifiers [C]. *Proc. of OFC'02*, TuJ1, 57
- 5 Y. Emory, S. Namiki. 100 nm bandwidth flat gain Raman amplifiers pumped and gain-equalized by 12-wavelength-channel WDM high power laser diodes [C]. *Tech. Dig. OFC'99*, 1999, San Diego, CA, USA
- 6 M. Achtenhagen, T. G. Change, B. Nyman *et al.*. Analysis of a multiple-pump Raman amplifier [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78**(10):1322~1324