

文章编号 : 0258-7025(2002)08-0729-06

分布光纤拉曼放大器对光通信系统 传输性能的改善

张 巍, 彭江得, 刘小明, 范崇澄
(清华大学电子工程系, 北京 100084)

提要 考察了后向抽运分布光纤拉曼放大器(B-DFRA)对光通信系统传输性能的改善。分别讨论了 B-DFRA 的两种可能用途: 1) 作为第一级预放大器与掺铒光纤放大器(EDFA)及光接收机一同构成接收终端。2) 在一个有中继的长距离光通信系统中作为各级 EDFA 的预放大器。针对这两种用途分别计算出 B-DFRA 对系统性能的影响, 并给出选择抽运功率的原则。

关键词 光通信系统, 分布光纤拉曼放大器, 掺铒光纤放大器, 光接收终端, 接收机灵敏度

中图分类号 TN 253; TN 929.11 **文献标识码** A

Improvement of Transmission Performances of Optical Communication Systems by Distributed Fiber Raman Amplifiers

ZHANG Wei, PENG Jiang-de, LIU Xiao-ming, FAN Chong-cheng
(*Electronic Engineering Department, Tsinghua University, Beijing 100084*)

Abstract An optical communication system with both EDFA and B-DFRA is introduced. Two applications of B-DFRA are studied. The first case is a receiver terminal with a receiver, an EDFA preamplifier and a B-DFRA. The second case is a multistage point to point optical repeated system with both EDFA and B-DFRA. The performance improvements in the two cases are calculated. The principle of the Raman pump power selection is discussed.

Key words optical telecommunication system, distributed fiber Raman amplifier, EDFA, optical receiver terminal, receiver sensitivity

1 引 言

由于下一代高速光通信网络的需求和大功率拉曼抽运源的发展, 光纤拉曼放大器越来越引起人们的注意。早期的研究表明正向抽运的光纤拉曼放大器的性能受拉曼抽运光的幅度和偏振不稳定性影响严重^[1,2]。所以现在普遍采用后向抽运的方式, 利用分布光纤拉曼放大的低噪声特性, 将后向抽运分布光纤拉曼放大器(B-DFRA)作为掺铒光纤放大器(EDFA)和光接收机的预放大器。

近期的研究工作表明 B-DFRA 的性能会受到传输光纤中瑞利后向散射的影响。已有大量文献研究

了两种相关的机制^[3~7]: 一是某一方向的自发辐射放大(ASE)会被反射到另一方向并在此方向上经历拉曼增益。ASE 经过这种分布式的多次反射和放大, 会导致光信噪比的恶化。二是信号光的分布式的多径反射光会在接收机中对原信号形成交扰, 影响信号质量。我们的前期工作已经得到了具有 B-DFRA 预放大器的接收终端中各种噪声项的分析方法^[8,9]。在本文中, 这些方法扩展到既有 B-DFRA 又有 EDFA 的实际光通信系统中用以分析 B-DFRA 对系统性能的改善。

2 理论分析

收稿日期 2001-06-01; 收到修改稿日期 2001-07-24

作者简介 张巍(1974—), 男, 清华大学电子工程系博士, 主要从事与光通信相关的光电子学研究。E-mail: zwzhang98@mails.tsinghua.edu.cn

分别讨论了两种 B-DFRA 的可能用途:第一种用途如图 1 所示。B-DFRA 作为第一级预放大器与 EDFA 及光接收机一同构成接收终端。这种用法通常用于长距离无中继系统中。在对这种用途的分析中,我们用一个简单的黑箱模型来模拟 EDFA 的增益饱和和特性^[10]

$$G_{\text{edfa}} = \frac{G_0}{1 + \left(\frac{G_0 P_{\text{in}}}{P_{\text{max}}} \right)^\alpha}$$

$$F = F_0 + k_1 e^{k_2 (G_0^{\text{dB}} - G_{\text{edfa}}^{\text{dB}})} \quad (1)$$

其中, G_0 和 G_{edfa} 分别为 EDFA 的小信号增益和在给定输入信号功率 P_{in} 下的增益, G_0^{dB} 和 $G_{\text{edfa}}^{\text{dB}}$ 分别为上述参量的 dB 值。 F_0 和 F 分别为对应小信号增益 G_0 和实际信号增益 G_{edfa} 下的 EDFA 噪声系数。 α , P_{max} , k_1 和 k_2 为通过实验测量得到的参数。 1540 ~ 1560 nm 的范围内这些参数近似地与波长无关。

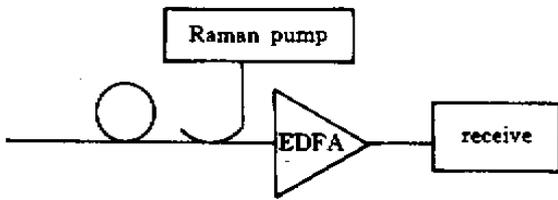


图 1 B-DFRA 作为接收终端的预放大器

Fig.1 B-DFRA used as preamplifiers in a receiver terminal

输入光接收机的 ASE 功率为

$$P_{\text{ase}} = 2N_s^+ h\nu B_o G_{\text{edfa}} + F(G_{\text{edfa}} - 1)h\nu B_o \quad (2)$$

其中 $h\nu$ 为给定波长下单光子的能量, B_o 为接收机光带宽。 N_s^+ 为 B-DFRA 的前向输出 ASE 光子数,由文献 8]的结果给出

$$N_s^+(0) = q^{-\frac{\alpha_s}{\alpha_p}} \exp(q) \gamma\left(\frac{\alpha_s}{\alpha_p} + 1, q\right) + \frac{r}{2\alpha_p \left(1 - \frac{\alpha_s}{\alpha_p} + q\right)} \times \exp(2q) \left[(2q)^{-\frac{2\alpha_s}{\alpha_p}} \gamma\left(\frac{2\alpha_s}{\alpha_p}, 2q\right) - (2q)^{q - \frac{\alpha_s}{\alpha_p}} \gamma\left(\frac{\alpha_s}{\alpha_p} + q + 1, 2q\right) \right] \quad (3)$$

其中 α_s 和 α_p 分别为传输光纤中信号和抽运的损耗。 r 为传输光纤中在信号波长下的单位长度瑞利反射率。 $\gamma(\cdot)$ 为不完全伽马函数^[11]。在(3)式中

$$q = C_r P_p(0) / \alpha_p \quad (4)$$

q 是一个反映抽运功率和光纤特性综合作用的无量

纲参数。其中 $C_r = g_r / bA_{\text{eff}}^{[3]}$, g_r 为 Raman 增益系数。 b 为一个描述 Stokes 光与抽运光偏振态相互关系的常数。 A_{eff} 为光纤的有效面积。 $P_p(0)$ 为抽运功率。上述结果适用于单个抽运波长的 B-DFRA。对于多个抽运波长的 B-DFRA,则必须考虑抽运光间的能量转移,可以利用文献 8,9]中的分析方法做数值解。为了便于分析,本文仅考虑单波长抽运的 B-DFRA。

B-DFRA 的开关增益可以用 q 来表示

$$G_{\text{on-off}} = \exp(q) \quad (5)$$

文献 9]给出进入接收机的二次瑞利反射(DRB)噪声功率谱密度

$$P_{s-\text{DRB}}(f) = \frac{10}{9} \cdot \frac{r^2}{\alpha_p^2} \cdot \left\{ \int_{2qe^{-\alpha_p L}}^{2q} x^{-\frac{2\alpha_s}{\alpha_p} - 1} \cdot e^x \cdot \left[\gamma\left(\frac{2\alpha_s}{\alpha_p}, x\right) - \gamma\left(\frac{2\alpha_s}{\alpha_p}, 2qe^{2qe^{-\alpha_p L}}\right) \right] \cdot dx \right\} \cdot F(|R_E(\tau)|^2) G_{\text{edfa}}^2 \quad (6)$$

其中 \cdot 为 B-DFRA 输出信号光电场强度的时间自相关函数的幅度平方, F 代表傅里叶变换, x 为一个积分变量。

本文采用的接收机模型与文献 9]相同。按文献 9]给出的分析方法可以计算出接收终端的等价接收灵敏度。

B-DFRA 的第二种用途如图 2 所示。在一个有 EDFA 中继的光通信系统中, B-DFRA 作为 EDFA 的预放大器可以改善系统的整体性能。在对 B-DFRA 这种应用的分析中,假定在每一个光纤段中 B-DFRA 和 EDFA 的增益总是恰好补偿了光纤段的损耗。那么进入接收机的光信号功率就与发射端功率一致。现在产品化的 EDFA 内都带有隔离器,所以可以不计光纤段之间的多次瑞利反射而只考虑单段内的瑞利后向散射作用。因此,进入接收机的总 ASE 功率就是各段 ASE 噪声贡献之和。 DRB 噪声的作用也就是各段 DRB 噪声贡献之和。

如果各光纤段的结构和相应的参数都相同,对

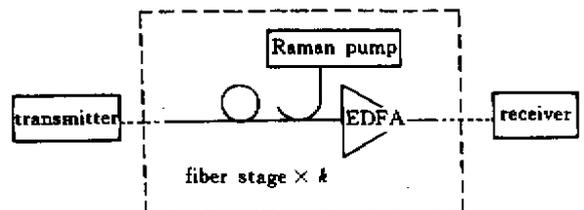


图 2 B-DFRA 点到点光通信系统中的应用

Fig.2 B-DFRA used in a point to point optical repeated system

于一个 N 段的光通信系统 输入接收机的 ASE 光功率为

$$P_{ase} = N [2N_s^+ h\nu B_o G_{edfa} + F(G_{edfa} - 1) h\nu B_o] \quad (7)$$

由(6)式 进入接收机的 DRB 噪声功率谱密度为

$$P_{s-DRB}(f) = N \cdot \frac{10}{9} \cdot \frac{r^2}{\alpha_p^2} \cdot \left\{ \int_{2qe^{-\alpha_p L}}^{2q} x^{-\frac{2\alpha_s}{\alpha_p}} \cdot e^x \cdot \left[\gamma \left(\frac{2\alpha_s}{\alpha_p} \right) x - \gamma \left(\frac{2\alpha_s}{\alpha_p} \right) 2qe^{2qe^{-\alpha_p L}} \right] \cdot dx \right\} \cdot F(|R_{E_s}(\tau)|^2) G_{edfa}^2 \quad (8)$$

通过文献 [9] 给出的分析方法可以得到反映系统性能的 Q 参数及误码率。

3 计算结果及其讨论

3.1 带有 B-DFRA 的接收终端

首先计算了具有 EDFA 预放和 B-DFRA 预放的接收终端中各种电噪声项的归一化均方噪声电流 (均方噪声电流除以平均信号电流的平方)。图 3 是在不同 Raman 抽运功率下的计算结果。计算中传

箱模型 相关的参数如表 1 所示 其他参数如表 2 所示。

表 1 EDFA 黑箱模型的相关参数

Table 1 Parameter used in black box EDFA model			
G_0	42 dB	F_0	4dB
P_{max}	15.4 dBm	k_1	0.0147
α	1.0129	k_2	0.2105

表 2 计算中所用的系数参数

Table 2 Parameters used in calculation	
$\alpha_s @ 1550 \text{ nm}$	0.22 dB/km
$\alpha_p @ 1450 \text{ nm}$	0.25 dB/km
EXT	0.05
Bit rate	2.5 Gb/s
Receiver electrical bandwidth(B_e)	0.75 * Bit rate
Filter Optical bandwidth(B_o)	50 GHz
PIN detector quantum efficiency	0.8
Receiver thermal noise current	0.036 μA^2
BER requirement	10^{-15}

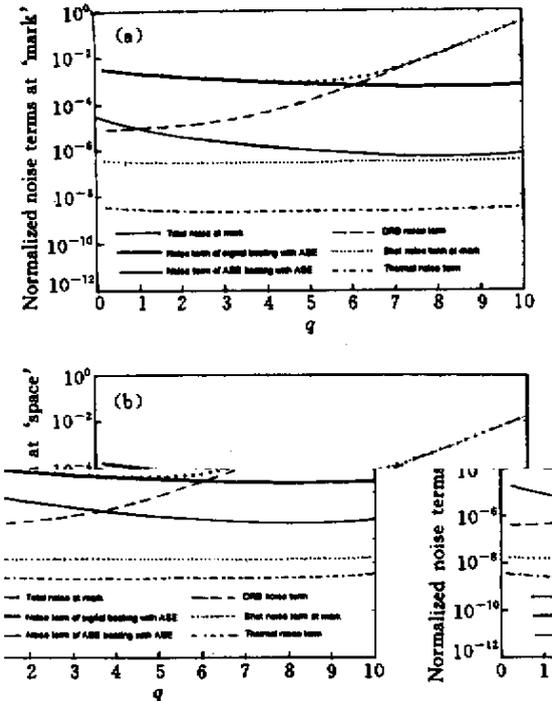


图 3 带有 B-DFRA 预放器的接收终端内各种电噪声项的比较

Fig.3 Comparison of noise terms in the receiver terminal with B-DFRA

图 3 (a) 和 (b) 分别是“1”和“0”时的计算结果。因为 EDFA 和 B-DFRA 的作用 , 散粒噪声和热噪声项都相对与 ASE 有关的噪声项较弱。在抽运功率较小时 , 接收终端内的主导噪声项是 ASE 与信号的拍噪声。随着抽运功率的增长 , B-DFRA 的作用也越来越明显 : 一方面 B-DFRA 使与 ASE 有关的归一化均方噪声电流下降。这是因为 B-DFRA , EDFA 和接收机构成一个级联的放大器系统。系统的噪声特性主要由第一级放大器的性能决定。B-DFRA 是此系统的第一级放大器 , 它具有很好的噪声特性 , 所以随着抽运功率提高 B-DFRA 作用的增强 , 整个放大系统噪声特性提高。当抽运功率过高时 , 计算结果显示由于瑞利后向散射对 ASE 的影响 , 与 ASE 有关的归一化均方噪声电流会随抽运功率上升。另一方面 , B-DFRA 内会产生 DRB 噪声。图 3 表明 DRB 噪声项随抽运功率增强上升得很快 , 最终取代与 ASE 有关的噪声项成为决定接收终端性能的主要因素。当抽运功率过大时 , DRB 噪声甚至会淹没信号电流而使接收机无法工作。这种 DRB 噪声造成的恶化是无法用提高信号光功率的办法来克服的。

为了综合考虑 B-DFRA 两方面的作用 , 我们计算了一个 2.5 Gbit/s 接收终端的等价接收灵敏度和相应的接收机输入光功率 , 如图 4 所示。其中光纤段长 100 km。在计算中选择了两个单位长度瑞利

输光纤段长 100 km , 光纤段的输入信号功率为 100 μW 。瑞利反射率为 -42 dB/km。EDFA 用简单的黑

反射率： $r = -42 \text{ dB/km}$ 和 $r = -45 \text{ dB/km}$ 。针对不同的 r ，分别计算了有和没有 EDFA 预放的接收终端对应的等价接收灵敏度以作为比较。计算中使用的其他参数如表 1 和表 2 所示。

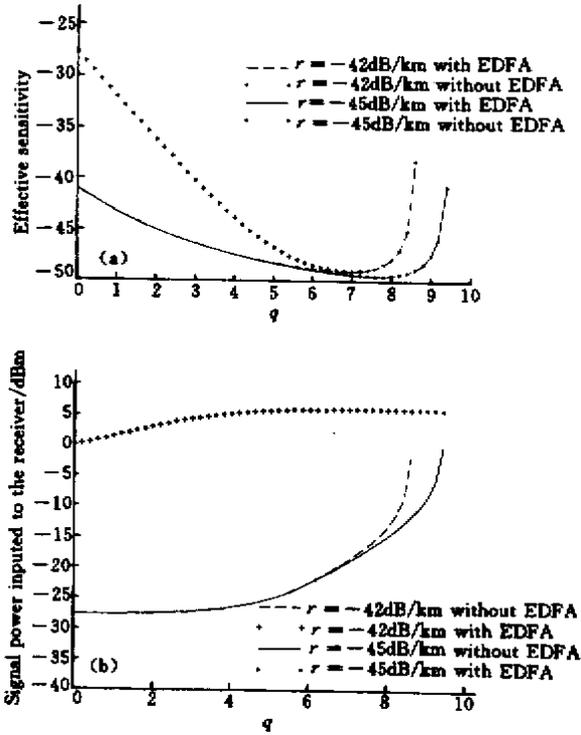


图 4 带有 B-DFRA 预放器的 2.5 Gbit/s 接收终端的接收性能

Fig.4 Performance of a 2.5 Gbit/s receiver terminal with B-DFRA preamplifier

图 4(a) 是等价接收灵敏度的计算结果。由图 4(a) 可以看出, 当抽运功率很弱时, 主要是 EDFA 预放决定接收终端的性能。当抽运功率相当大时则是 B-DFRA 起主要作用。此时有无 EDFA 预放对等价接收灵敏度已经没有大的影响。另一方面, 随着抽运功率的增强, 瑞利后向散射的作用越来越明显。特别是 DRB 噪声随抽运功率增长很快。瑞利后向散射作用使接收终端存在一个最优的抽运功率, 在此抽运功率下等价接收灵敏度达到最佳。在此计算中, 抽运功率用无量纲参数 q 表示。对于有 EDFA 的接收终端, 当 $r = -42 \text{ dB/km}$ 时最优的 q 是 6.8, 最佳的等价接收灵敏度为 -49.0 dBm , 相对于仅有 EDFA 预放的接收终端而言灵敏度提高量为 8.0 dB 。当 $r = -45 \text{ dB/km}$ 时, 相应的计算结果为 7.6, -49.5 dBm 和 8.5 dB 。对于无 EDFA 的接收终端, 最优的 q 和最佳的等价接收灵敏度几乎与以上结果相同。从图 4(a) 还可以看出由于受 DRB 噪声的影响,

接收终端存在一个临界 q 值, 当抽运功率过大使 q 超过此临界值时, 接收终端的性能将严重恶化。

图 4(b) 给出接收终端恰好工作在误码率要求时接收机的输入信号光功率。尽管有无 EDFA 预放对最优的抽运功率和最佳的等价接收灵敏度没有影响, 但是相应的光功率大不相同。对于没有 EDFA 的接收终端, 当 $r = -42 \text{ dB/km}$ 和 $r = -45 \text{ dB/km}$ 时在最佳等价接收灵敏度下接收机输入信号光功率分别为 -18.5 dBm 和 -16.5 dBm 。对于有 EDFA 的接收终端相应的输入信号光功率为 6.0 dBm 和 6.1 dBm 。所以 B-DFRA 的抽运功率决定了接收终端结构。如果抽运功率较小, 有 EDFA 的接收终端具有更好的性能。而当抽运功率达到或接近最优的抽运功率时, EDFA 对接收终端性能的提高作用就很小了, 可以略去。但是在很多接收终端中, 在接收机前需要插入一些器件, 如解复用器、光滤波器、色散补偿模块等。考虑到器件的插入损耗, 无 EDFA 的接收终端输入接收机的光功率可能过小。因此在这种情况下要由系统整体设计要求决定 EDFA 预放的取舍。

3.2 B-DFRA 对点对点长距离有中继光通信系统传输性能的提高

我们计算的系统是一个 10 Gbit/s 点对点的光中继通信系统, 如图 2 所示。在此系统中有 6 个光纤段, 每段光纤的损耗是 22 dB 。在每一段中, 光纤的损耗被一个 B-DFRA 和一个 EDFA 的增益恰好补偿。对于不同的 Raman 抽运功率, B-DFRA 有不同的增益, 则 EDFA 的增益也随之改变。但无论 EDFA 的增益如何改变, 假定它的噪声系数总是 6 dB 。其他系统参数参见表 2。

图 5 是发射机输出信号光功率固定在 0 dBm 时系统的性能(用 Q 表示)与 Raman 抽运功率(用 q 表示)的关系。选择了三个瑞利反射率 r 进行计算: -42 dB/km , -45 dB/km 和 0 dB/km 。对于前两个 r , 也计算了忽略 DRB 噪声的结果以作为比较。从图 5 可以看出如果没有瑞利后向散射的影响, 系统性能随抽运功率的增强而单调上升。在实际情况下, 由于有瑞利后向散射的影响, 当抽运功率过大, 系统性能会随抽运功率的增强而下降。存在一个最优的抽运功率使整个系统的传输性能达到最佳。当 $r = -42 \text{ dB/km}$ 时最优的 q 为 4.4, 最佳的 Q 为 13.5 dB , 系统 Q 值与仅有 EDFA 的系统相比提高 4.1 dB 。当 $r = -45 \text{ dB/km}$ 时相应的结果为 5, 13.9 dB 和 4.5 dB 。由此可以看出如果发射机输出功率相同, 瑞利

反射率较小的系统需要较大的抽运功率达到最佳性能,它的性能提高潜力也相应较大。图 5 的结果还说明 DRB 噪声不可忽略。忽略 DRB 噪声会过高估计系统性能提高潜力和相应的最优的抽运功率。尤其是当抽运达到或超过最优的抽运功率时,DRB 噪声已经压倒其他噪声项成为决定系统性能的主导因素。此时随着抽运功率的继续变强,系统性能将迅速恶化。

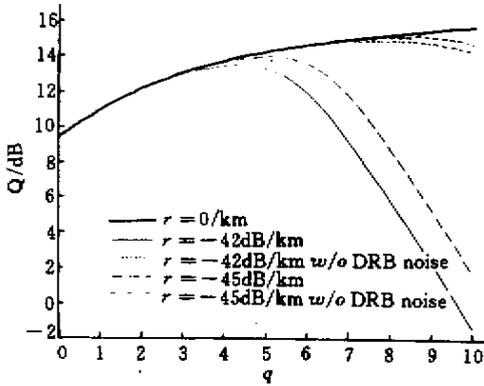


图 5 应用 B-DFRA 的有中继系统的传输性能 (不同瑞利反射率)

Fig.5 Q value of repeated systems with B-DFRA using fibers with different r

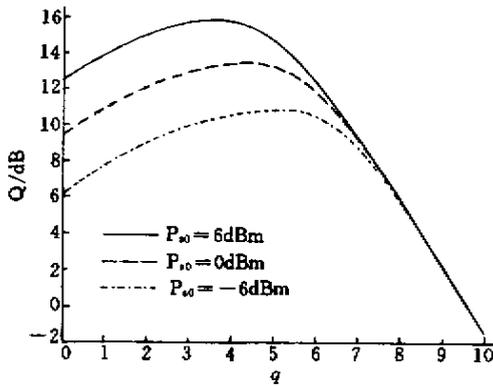


图 6 应用 B-DFRA 的有中继系统的传输性能 (不同系统工作点)

Fig.6 Q value of repeated systems with B-DFRA at different work point

图 6 给出了单位长度瑞利反射率 r 给定时系统性能和抽运功率的关系。计算中选取了三个发射机输出信号光功率: -6 dBm/ch, 0 dBm/ch, 6 dBm/ch。当输出光功率是 -6 dBm/ch 时,最优的 q 为 5.1 ,最佳的 Q 值为 10.9 dB,而 Q 值的提高为 4.8 dB。当输出光功率为 0 dBm/ch 和 6 dBm/ch 时,相应的计

算结果分别为 4.4 , 13.5 dB, 4.1 dB 和 3.6 , 15.9 dB, 3.4 dB。由此可以看出 B-DFRA 对系统传输性能的提高与系统的工作点有关。对于信号光功率较高的系统,需要的最优抽运功率较弱,最佳系统 Q 值较高,但提高系统性能潜力较小。研究与工程实践均表明较高的信号输出光功率会带来较大的光纤非线性恶化。因此系统工作点和 Raman 抽运功率的选择必须综合考虑系统的各项要求。从另一个角度看,利用 B-DFRA 可以使系统工作点适当下降从而缓解光纤非线性造成的系统性能的恶化。

4 结 论

将我们在前期工作中得到的 B-DFRA 噪声特性的分析方法扩展到既有 B-DFRA 又有 EDFA 的光通信系统中,并以此分析 B-DFRA 对系统性能的改善。分别讨论了 B-DFRA 的两种可能用途: 1) B-DFRA 作为第一级预放大器与 EDFA 和光接收机一同构成接收终端。分析与计算的结果表明存在一个最优的抽运功率使接收终端的性能达到最佳。在抽运功率较强时,DRB 噪声成为决定接收终端性能的主要因素。随着抽运功率的增长它会使接收终端的性能迅速恶化,甚至使接收机不能工作。2) B-DFRA 在一个有中继的长距离光通信系统中作为各级 EDFA 的预放大器。分析与计算的结果同样表明存在一个最优的抽运功率使整个系统的性能达到最佳。最优抽运功率与最佳系统性能不但与光纤参数有关,而且与系统的工作点有关。由此,B-DFRA 有可能成为控制信号光功率和缓解光纤非线性恶化的有力措施。

参 考 文 献

- 1 A. S. Siddiqui, G. G. Vienne. The effect of pump and signal laser fluctuations on the output signal from Raman and Brillouin optical fiber amplifier [J]. *J. Opt. Comm.*, 1992, **13**(1): 33 ~ 36
- 2 F. Forghieri, R. W. Tkach, A. R. Chraplyvy. Bandwidth of cross talk in Raman amplifiers [C]. in OFC '94, San Jose, CA, FC6
- 3 P. B. Hansen, L. Eskildsen, A. J. Stentz et al.. Rayleigh scattering limitations in distributed Raman pre-amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(1): 159 ~ 161
- 4 M. Nissov, K. Rottwitz, H. D. Kidorf et al.. Rayleigh crosstalk in long cascades of distributed unsaturated Raman amplifiers [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(12): 997 ~ 998
- 5 P. Wan, J. Conradi. Double Rayleigh backscattering in long-haul transmission systems employing distributed and lumped fibre amplifiers [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(5): 383 ~ 384

- 6 S. R. Chinn. Temporal observation and diagnostic use of double Rayleigh scattering in distributed Raman amplifier[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.* ,1999 ,**11**(12) :1632 ~ 1634
- 7 S. A. E. Lewis , S. V. Chernikov , J. R. Taylor. Characterization of double Rayleigh scatter noise in Raman amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.* , 2000 , **12** (5) 528 ~ 530
- 8 Zhang Wei , Peng Jiangde , Liu Xiaoming. An analytical expression for the impact of Rayleigh scattering on distributed fiber Raman amplifiers[J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光) , 2001 , **A28**(12) :1108 ~ 1112 (in Chinese)
- 9 Zhang Wei , Peng Jiangde , Liu Xiaoming *et al.* . The impact of Rayleigh backscattering on noise characteristics of distributed fiber Raman amplifiers[J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光) , 2002 , **A29**(2) :143 ~ 148 (in Chinese)
- 10 Xiupu Zhang , Alan Mitchell. Simple black box model for erbium-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.* ,2000 , **12**(1) 28 ~ 30
- 11 W. Magnus , F. Oberhettinger , R. P. Soni. Formulas and Theorems for the Special Functions of Mathematical Physics [M]. Third Edition , New York : Springer-Verlag Berlin Heidelberg , 1966