

# 拉曼放大系统传输性能的比较\*

马永红<sup>†</sup> 谢世钟 陈明华

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

(2004 年 2 月 2 日收到, 2004 年 4 月 22 日收到修改稿)

提出了一种比较拉曼放大系统传输性能的简单方法. 对三种典型拉曼放大系统的比较表明: 基于均匀传输光纤和色散管理光纤的双向抽运全拉曼放大系统与常规的混合拉曼放大系统相比, 传输距离可分别提高约 10% 和 30%, 而入纤功率可下降约 6dB.

关键词: 光纤通信, 拉曼放大, 双向抽运, 色散管理

PACC: 4255N, 4265C, 4281D, 4281

## 1. 引 言

纵观近年来大容量长距离光纤传输系统可以看出, 拉曼放大、大有效面积的传输光纤、高光谱效率的调制码型和前向纠错成为系统中普遍采用的四项关键技术<sup>[1]</sup>, 其中光纤拉曼器(FRA)的广泛采用与其灵活的增益谱、高的光信噪比特性密不可分. 近期随着大功率拉曼抽运源制作工艺的改善以及双向抽运和色散管理光纤(DMF)的引入, 光纤传输系统呈现出由混合拉曼放大(HRA)向全拉曼放大(ARA)发展的趋势. 文献[2]和[3]分别利用理论模拟和实验方法对采用均匀传输光纤(UTF)的HRA和ARA系统进行了比较, 但得到的结论不尽相同. 由于利用模拟方法进行系统的比较效率较低, 而采用实验方法进行全面的对比经济性较差, 为此本文提出了一种比较拉曼放大系统传输性能的简单方法——解析比较法, 然后利用此方法对常规HRA系统、基于UTF和DMF的双向抽运ARA系统的传输性能进行了比较. 文中得到的结论弥和了现有结论的矛盾性, 同时给出的系统配置方案能够为大容量长距离拉曼放大系统的设计提供理论上的指导.

## 2. 理 论

在拉曼放大系统中, 通常可采用图 1 所示的三种典型链路结构: 其中图 1(b)为基于 UTF 的 ARA

系统, 其链路段采用色散补偿光纤(DCF)实现色散补偿功能. UTF和DCF均可采用双向抽运构成光纤拉曼放大器<sup>[4]</sup>, 简记为FRA1和FRA2(c)为基于DMF的双向抽运ARA系统, 其由色散参数匹配的正、负色散光纤(PDF, NDF)组成的“三明治”光纤组合结构有助于抑制高速光纤传输系统中色散和非线性效应的综合影响, 作为对照, 图中也给出了由反向抽运的UTF和双段EDFA构成的常规HRA系统(图1(a)), 该结构在拉曼放大系统发展初期由于前向抽运源产品的匮乏而成为拉曼放大应用的主要形式. 三种链路中的 $T_L$ 代表链路段由于引入其他功能性器件(如增益平坦滤波器)而带来的额外插损, 整个链路段满足无损传输要求. 图中的隔离器起防止光反馈形成自激振荡和降低双瑞利散射(DRS)噪声的目的.

最大透明传输距离可以作为拉曼放大系统优化设计的一个重要指标, 而这一指标的实现受到 ASE 噪声、DRS 噪声和非线性的综合影响. 作为一种简单有效的方法, 这里采用非线性相移衡量非线性效应的影响<sup>[5]</sup>. 在给定系统要求的光信噪比(OSNR)和所能容忍的集聚非线性相移的条件下, 对图 1 的三种典型拉曼放大系统, 传输  $N$  个链路段后其 OSNR 可表示为

$$\text{OSNR} = \frac{P_{in}}{N(2N_{ASE}^{ul/bl/c} B_o)}, \quad (1)$$

式中  $P_{in}$  为链路入纤功率,  $B_o$  为 ASE 噪声带宽(取为

\* 国家自然科学基金(批准号 90104003)资助的课题.

<sup>†</sup>E-mail: mayh2000@mails.tsinghua.edu.cn 电话: 62773197.

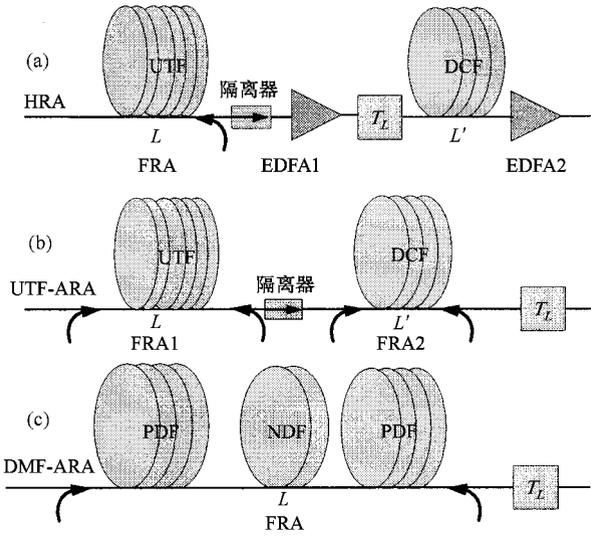


图 1 三种拉曼放大链路示意图

0.1nm),  $N_{ASE}^{a/b/c}$  为三种拉曼放大链路段的 ASE 噪声谱密度, 可分别为<sup>[6,7]</sup>

$$\begin{aligned}
 N_{ASE}^a &= n_{sp} h\nu \left[ \int_0^L \frac{\chi(z) \alpha_p(z) p_p(z)}{\alpha(z)} dz \right. \\
 &+ \int_0^L \frac{\alpha_{RS}(z)}{G^2(z)} \chi(z') \alpha_p(z') p_p(z') \alpha(z') dz' dz \\
 &+ n_{sp}^E h\nu [(G_{E1} - 1) T_L T_D G_{E2} + (G_{E2} - 1)], \\
 N_{ASE}^b &= n_{sp} h\nu \left\{ \left[ \int_0^L \frac{\chi(z) \alpha_p(z) p_p(z)}{\alpha(z)} dz \right. \right. \\
 &+ \int_0^L \frac{\alpha_{RS}(z)}{G^2(z)} \chi(z') \alpha_p(z') p_p(z') \alpha(z') dz' dz \\
 &+ 1/G^{UTF} \left[ \int_0^L \frac{\chi(z) \alpha_p(z) p_p(z)}{\alpha(z)} dz \right. \\
 &+ \left. \left. \int_0^L \frac{\alpha_{RS}(z)}{G^2(z)} \chi(z') \alpha_p(z') p_p(z') \alpha(z') dz' dz \right] \right\}, \\
 N_{ASE}^c &= n_{sp} h\nu \left[ \int_0^L \frac{\chi(z) \alpha_p(z) p_p(z)}{\alpha(z)} dz \right. \\
 &+ \left. \int_0^L \frac{\alpha_{RS}(z)}{G^2(z)} \chi(z') \alpha_p(z') p_p(z') \alpha(z') dz' dz \right].
 \end{aligned}$$

上面第一式中的第一项为在 FRA(长度为  $L$ , 自发辐射因子为  $n_{sp}$ )中产生的 ASE 噪声, 第二项为在双段 EDFA 中产生的 ASE 噪声(EDFA 增益分别为  $G_{E1}, G_{E2}$ , 自发辐射因子为  $n_{sp}^E$ , DCF 长度为  $L'$ , 损耗为  $T_D$ ); 第二式中的两项分别为在 FRA1(UTF 的拉

曼净增益记为  $G^{UTF}$ )和 FRA2 中产生的 ASE 噪声. 这里公式中的下标  $p$  代表抽运光,  $h$  为普朗克常数,  $\nu$  为信号光频率,  $\alpha, \alpha_{RS}$  分别为光纤衰减系数和瑞利散射系数,  $\alpha(z)$  为信号沿光纤纵向获得的净增益,  $\gamma, p_p$  分别为无量纲的拉曼增益因子(光纤的拉曼增益系数为  $g_R$ )和归一化的抽运功率(抽运总功率为  $P_R$ , 前向抽运比为  $k$ . 为给出解析解, 忽略了抽运消耗作用), 可分别由以下公式给出:

$$\begin{aligned}
 \chi(z) &= g_R(z) P_R / \alpha_p(z), \\
 p_p(z) &= k \exp \left[ - \int_0^z \alpha_p(z') dz' \right] \\
 &+ (1 - k) \exp \left[ - \int_z^L \alpha_p(z') dz' \right].
 \end{aligned}$$

同样图 1 中的系统传输  $N$  个链路段后其集聚的非线性相移  $\phi_{nl}$  可表示为

$$\phi_{nl} = NP_{in} \varphi_{nl}^{a/b/c}, \quad (2)$$

式中  $\varphi_{nl}^{a/b/c}$  满足

$$\begin{aligned}
 \varphi_{nl}^a &= \int_0^L \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_2(z)}{A_{eff}(z)} \alpha(z) dz \\
 &+ G^{UTF} G_{E1} T_L \int_0^L \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_2(z)}{A_{eff}(z)} T_F(z) dz, \\
 \varphi_{nl}^b &= \int_0^L \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_2(z)}{A_{eff}(z)} \alpha(z) dz \\
 &+ G^{UTF} \int_0^L \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_2(z)}{A_{eff}(z)} \alpha(z) dz, \\
 \varphi_{nl}^c &= \int_0^L \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_2(z)}{A_{eff}(z)} \alpha(z) dz.
 \end{aligned}$$

这里  $n_1, A_{eff}$  分别为光纤的折射率和有效模场面积,  $\lambda$  为信号波长, 式中  $T_F(z)$  为信号功率沿 DCF 的衰减因子.

联立求解 (1) 和 (2) 式, 可得到系统优化的入纤功率  $P_{in}^{a/b/c}$  和最大传输链路段数  $N^{a/b/c}$ :

$$P_{in}^{a/b/c} = \sqrt{\phi_{nl} OSNR \frac{2N_{ASE}^{a/b/c} B_o}{\varphi_{nl}^{a/b/c}}}, \quad (3)$$

$$N^{a/b/c} = \sqrt{\frac{\phi_{nl}}{OSNR} \frac{1}{(2N_{ASE}^{a/b/c} B_o) \varphi_{nl}^{a/b/c}}}. \quad (4)$$

计及 DRS 噪声的影响后, 则 (4) 式可修正为

$$\begin{aligned}
 N_{*}^{a/b/c} &= \sqrt{\frac{\phi_{nl}}{OSNR} \frac{1}{(2N_{ASE}^{a/b/c} B_o + N_{DRS}^{a/b/c} B_{eff}) \varphi_{nl}^{a/b/c}}}, \quad (5)
 \end{aligned}$$

式中  $B_{eff}$  为信号有效带宽<sup>[6]</sup>,  $N_{DRS}^{a/b/c}$  为三种拉曼放大链路段的 DRS 噪声谱密度, 可分别由以下公式得到<sup>[6,7]</sup>

$$N_{DRS}^{a/c} = \frac{5}{9} \frac{P_{in}^{a/c}}{B_{eff}} \left[ \int_0^L \frac{\alpha_{RS}(z)}{G^2(z)} \int_z^L \alpha_{RS}(z') G^2(z') dz' dz \right],$$

$$N_{DRS}^b = \frac{5}{9} \frac{P_{in}^b}{B_{eff}} \left[ \int_0^L \frac{\alpha_{RS}(z)}{G^2(z)} \int_z^L \alpha_{RS}(z') G^2(z') dz' dz + \int_0^{L'} \frac{\alpha_{RS}(z)}{G^2(z)} \int_z^{L'} \alpha_{RS}(z') G^2(z') dz' dz \right].$$

这里第一式忽略了 HRA 链路段中 DCF 产生的 DRS 噪声,第二式括号中的两项分别为在两个 FRA 中产生的 DRS 噪声。

由上面的推导可以看出:在适当近似基础上得到的解析比较方法由于综合考虑了 ASE,DRS 噪声和非线性效应对拉曼放大系统的影响,因而对系统传输性能的比较具有合理性。同时由于(3)和(5)式中包含 FRA 设计中的两个重要参数——前向抽运比  $k$  和净增益  $G$ ,为此借助简单高效的解析分析方法全面系统地比较拉曼放大系统的传输性能具有可行性。借此方法得到的优化配置方案能够为大容量长距离拉曼放大系统的设计提供理论上的指导。

### 3. 系统优化和比较

利用上面的解析方法,这里首先对图 1 中的三种拉曼放大系统进行优化设计,然后对其传输性能进行比较(包括 10Gb/s 和 40Gb/s 信道速率)。其中图 1(a)和(b)型链路段采用 80km SSMF 作为 UTF,色散补偿由 16 km 常规 DCF(色散值为  $-80\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ )实现。(c)型链路段采用长度比为 2:1 的 PDF 和 NDF 组成对称分布的 DMF,总长度也为 80km。所有光纤特性参数见表 1。

取拉曼放大系统在 10Gb/s 和 40Gb/s 信道速率下要求的 OSNR 分别为 17dB 和 23dB,信号有效带宽  $B_{eff}$  分别为 10GHz 和 40GHz。这里参数选取的依据一方面参照了实验结果<sup>[8]</sup>,另一方面从理论上基于如下考虑:由于 40Gb/s 与 10Gb/s 系统相比,在相同的入纤功率下前者的信号频谱约为后者的 4 倍,而接收机中电滤波器的带宽通常设定为信道速率的 0.75 倍,由此就很好解释两种系统中 6dB 的 OSNR 差和 4 倍的信号有效带宽<sup>[6]</sup>参数的设定。同时取系统所能容忍的集聚非线性相移  $\phi_{nl}$  为 1,链路额外插损  $T_L$  为 -5dB。以上参数变化对系统性能的影响将在后面讨论。此外取 FRA 和 EDFA 的自发辐射因子  $n_{sp}^{[6]}$  和  $n_{sp}^E$  分别为 1.1 和 1.4(即 EDFA 的噪声系数为 4.5dB)。

表 1 光纤特性参数(抽运波长 1450nm,信号波长 1550nm)

光纤参数	SSMF	DCF	PDF	NDF
$\alpha_p$ (dB/km)	0.24	0.70	0.22	0.29
$\alpha_s$ (dB/km)	0.21	0.50	0.19	0.25
$\alpha_{RS}/\text{km}^{-1}$	$0.6 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-4}$	$0.4 \times 10^{-4}$	$1.6 \times 10^{-4}$
$g_R/\text{km}^{-1} \text{W}^{-1}$	0.39	3.45	0.2	0.8
$A_{eff}/\mu\text{m}^2$	80	22	110	27.5
$n_2/(\text{m}^2/\text{W})$	$2.0 \times 10^{-20}$			

图 2 给出了常规图 1(a)型 HRA 系统在 10Gb/s 信道速率下的优化结果。图中的  $k_1, k_2$  为表示链路段增益分配的参量,分别由下式给出:

$$k_1 = \frac{G_{R,AB}}{G_{R,AB} + G_{E1,AB}},$$

$$k_2 = \frac{G_{R,AB} + G_{E1,AB}}{G_{R,AB} + G_{E1,AB} + G_{E2,AB}},$$

这里的  $G_{R,AB}, G_{E1,AB}, G_{E2,AB}$  分别为 FRA 和两个 EDFA 的 dB 增益。

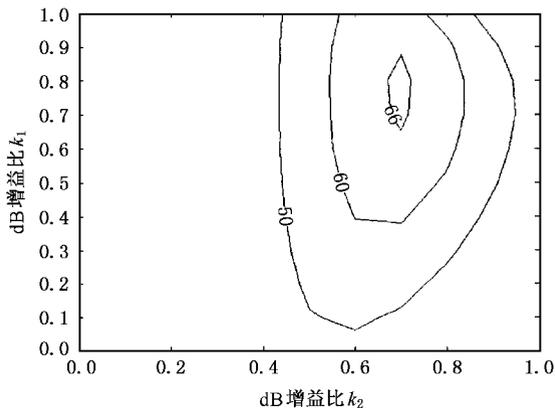


图 2 图 1(a)型 HRA 系统性能分析(传输链路段数@10Gb/s)

由图可以看出:当  $k_1 = 0.8, k_2 = 0.7$  即 FRA 和两个 EDFA 的增益分别为 16.7, 4.2 和 8.9dB 时,系统的传输性能最优。

在 EDFA 系统中,由于 DRS 噪声较小,其影响通常可以忽略。但在拉曼放大系统中,由于分布式拉曼放大的引入,必然引起 DRS 噪声的增强。为揭示其对系统传输性能影响的程度,图 3 给出了量化结果。由图可以看出:DRS 噪声明显限制了 HRA 链路所能采用的拉曼增益,也在一定程度上限制了系统传输性能的进一步提升。文献[8]对此进行了类似分析,但由于未计及 DRS 噪声的影响,使得给出的系统配置方案在对拉曼增益的使用上存在着较大

偏差.

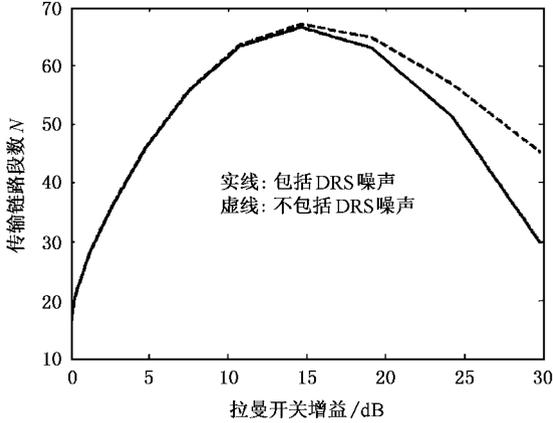


图3 DRS噪声对图1(a)型HRA系统性能的影响

图4给出了图1(b)型UTF-ARA系统在10Gb/s信道速率下的优化结果,图中的增益比为FRA1的开关增益占链路段dB总增益的比值.

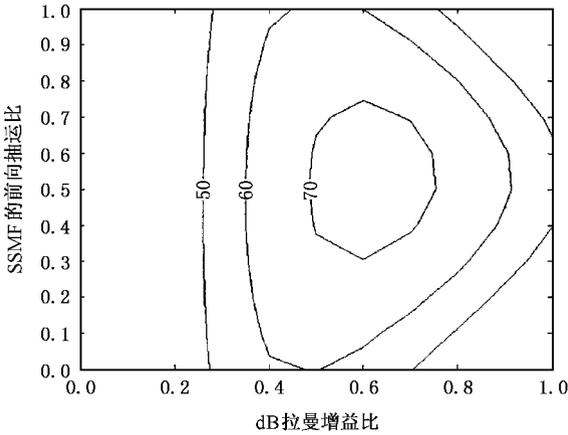


图4 图1(b)型ARA系统性能分析(传输链路段数,10Gb/s (FRA2反向抽运))

由图可以看出:当FRA1采用双向对称抽运( $k \approx 0.5$ ),FRA2采用反向抽运( $k = 0$ ,未给出具体结果),并且当两个拉曼放大单元的增益配比约为60%:40%时,系统的传输性能最优.对此配置方案的合理解释为:由于SSMF和DCF的非线性系数比约为1:4,因而FRA1的性能主要受制于噪声,而FRA2的性能主要受制于非线性.对FRA性能影响因子的研究表明: $k, G$ 越大,则ASE噪声越小; $k \approx 0.5, G$ 越小,则DRS噪声越小; $k, G$ 越小,则非线性的影响越小.根据以上结论不难看出:优化的抽运组合方式和增益分配方式是两个放大单元性能折中的必然结果.

由于前面的讨论只针对10Gb/s系统,并固定系统所能容忍的集聚非线性相移 $\phi_{nl}^* = 1$ ,链路额外插损 $T_L = -5\text{dB}$ .为验证系统配置方案的普适性,表2给出了拉曼链路段模型参数对b型ARA系统优化配置结果的影响.

表2 b型拉曼链路段参数对其优化配置结果的影响

优化结果	$\phi_{nl}^* = 1$	$\phi_{nl}^* = 3$	$\phi_{nl}^* = 5$
$T_L = 0\text{dB}@10\text{Gb/s}$	(0.5 0.75)		
$T_L = -5\text{dB}@10\text{Gb/s}$	(0.5 0.6)	(0.5 0.6)	(0.5 0.6)
$T_L = -5\text{dB}@40\text{Gb/s}$	(0.5 0.6)	(0.5 0.6)	(0.5 0.6)

由表可以看出:优化配置方案对信道速率(与计算有关的参数为OSNR和 $B_{\text{eff}}$ )和系统所能容忍的集聚非线性相移 $\phi_{nl}$ 参数不敏感.而当链路额外插损 $T_L$ 发生变化时,链路段优化的抽运方式相对固定,而优化的增益分配方式变化较为明显.对宽带拉曼放大系统,通常需要使用增益平坦滤波器(GEF)来消除非理想增益谱累积所带来的影响.当宽带拉曼放大器多个抽运参量配置得较为恰当时,可每隔数个链路段附加一个GEF;反之,则需在每个链路段均加入此器件.以上结果表明,链路的增益配置必须根据其具体情况仔细调节,以确保系统工作在最佳状态.对图1(a)型HRA系统的增益配置可作类似处理.

图5给出了图1(c)型DMF-ARA系统在10Gb/s信道速率下的优化结果.由于该系统在给定了DMF的结构参数后只涉及到前向抽运比的配置问题,分析起来比较简单.由图可以看出:当FRA的前向抽运比 $k \approx 0.25$ 时,系统的传输性能最优.

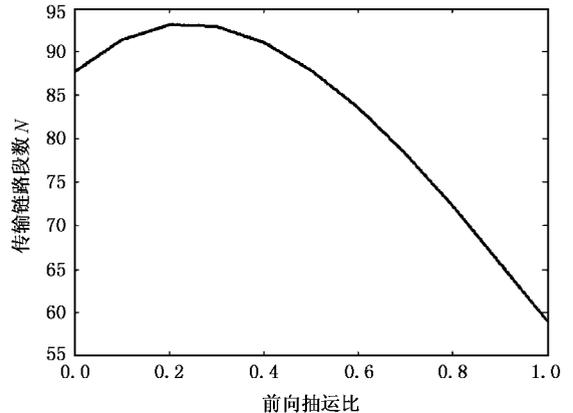


图5 图1(c)型ARA系统性能分析(传输链路段数,10Gb/s)

根据以上优化配置方案,图 6 给出了三种拉曼放大系统在不同的集聚非线性相移参数下传输性能的比较结果.由图可以看出:与常规的 HRA 系统相比,基于 UTF 和 DMF 的双向抽运 ARA 系统可分别将传输距离提高约 10% 和 30%.传输距离的增加是双向抽运和色散管理技术对放大器噪声和非线性(大有效面积 PDF 引入的结果)特性改善的必然结果.

图 7 给出了利用(3)式得到的系统优化入纤功率(与图 6 对应).由图可以看出:对 10Gb/s 系统,常规 HRA 系统和 ARA 系统的优化入纤功率分别约为 -3dBm 和 -9dBm;对 40Gb/s 系统,常规 HRA 系统和 ARA 系统的优化入纤功率分别约为 0dBm 和 -6dBm.入纤功率 6dB 的降幅同样是双向抽运和色散管理技术对放大器噪声特性改善的必然结果.对照文献 [10] 利用模拟方法得到的宽带 UTF-ARA 系统的优化配置方案(包括入纤功率、增益和抽运组合配置方式),发现其符合得相当好,由此从另一侧面表明了本文单信道解析比较方法的可行性.

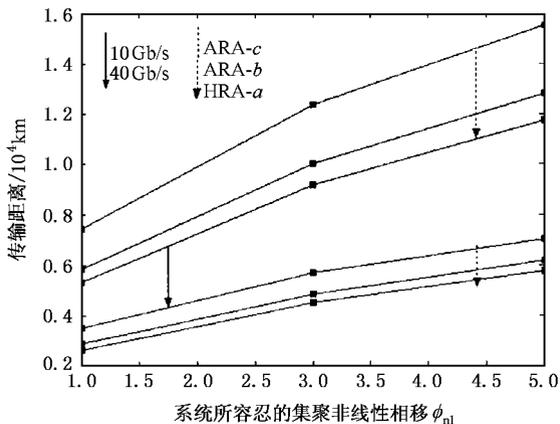


图 6 拉曼放大系统传输性能的比较

根据以上结果,可以很好地解释前文提及的 HRA 和 ARA 系统性能比较结论的不一致性.文献 [3] 的实验研究由于采用 ARA 系统的典型入纤功率

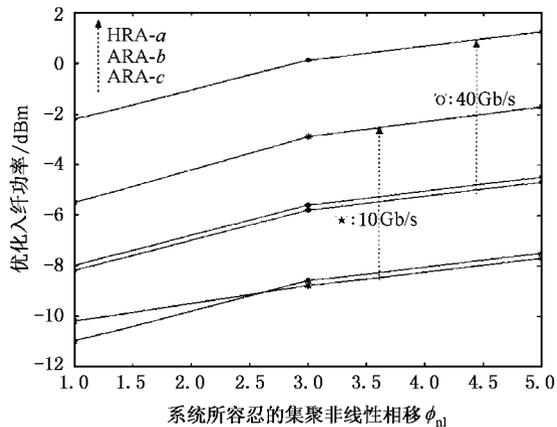


图 7 拉曼放大系统的优化入纤功率

值(G655 光纤,  $5 \times 80\text{km}$  系统约  $-5\text{dBm}/\text{ch}$ ),因而得到了与本文一致的结论,而文献 [2] 的模拟研究针对反向抽运的 HRA 系统,给出 HRA 优于 ARA 的结论建立在较大入纤功率(G652 光纤,  $8 \times 100\text{km}$  大于  $4\text{dBm}/\text{ch}$ )和较大拉曼增益的基础上.而在此条件下,长距离传输系统中 DRS 噪声的影响(文献 [2] 未考虑)必然有所增强(见图 3).即使对文献讨论的短距离系统,在这样大的入纤功率下分析也有所不妥(在相似条件下,文献 [3] 给出的优化功率为  $-5\text{dBm}/\text{ch}$ )而在小信号功率下文献给出了与本文一致的结论.对双向抽运系统,由于 DRS 噪声有所降低,采用较大拉曼增益是可行的,但由于非线性影响的增强,必需采用较小的入纤功率.

### 4. 结 论

本文提出了一种拉曼放大系统传输性能的简单比较方法.利用此方法对三种拉曼放大系统传输性能的比较表明了 ARA 系统的潜在应用价值.结合 ARA 增益谱灵活和结构简单的特点,相信它必将在大容量长距离光纤传输系统中获得越来越广泛的应用.

[1] Cai J et al 2002 *ECOC* 10.1.1  
 [2] Pizzinat A, Santagiustina M and Schivo C 2003 *IEEE Photonics Tech. Lett.* **15** 341  
 [3] Zhu Y et al 2002 *OFC ThX1*  
 [4] Chi R H et al 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 456 (in Chinese) [迟荣华等 2004 物理学报 **53** 456]

[5] Antona J C, Bigo S and Faure J P 2002 *OFC WX5*  
 [6] Essiambre R J et al 2002 *IEEE Photonics Tech. Lett.* **14** 914  
 [7] Kobayakov A, Vasilyev M and Evans A 2003 *OFC WB2*  
 [8] Kung A et al 2002 *ECOC* 1.1.1  
 [9] Hainberger R et al 2002 *IEEE Photonics Tech. Lett.* **14** 471  
 [10] Ma Y H, Xie S Z, She S X and Chen M H 2003 *Optical Engineering* **42** 2942

# Comparison of performance for Raman-amplified optical-fiber transmission systems<sup>\*</sup>

Ma Yong-Hong Xie Shi-Zhong Chen Ming-Hua

( *Department of Electronic Engineering , Tsinghua University , Beijing 100084 , China* )

( Received 2 February 2004 ; revised manuscript received 22 April 2004 )

## Abstract

A simple method is provided for the performance comparison of the Raman-amplified optical-fiber transmission systems. The results show that , compared with conventional hybrid-Raman-amplification systems , the maximum transmission distance can be increased by about 10% and 30% separately , and the input signal power can be decreased by about 6 dB for bidirectional-pumping all-Raman-amplification systems based on uniform or dispersion-managed transmission fibers.

**Keywords** : optical-fiber communication , Raman amplification , bidirectional pumping , dispersion management

**PACC** : 4255N , 4265C , 4281D , 4281

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 90104003 ).