

# 超长跨距无中继光传输系统中远程增益单元的研究

徐 健<sup>1,2</sup> 付成鹏<sup>1,2</sup> 卜勤练<sup>1,2</sup> 余春平<sup>1,2</sup> 江 毅<sup>1,2</sup> 黄丽艳<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 光纤通信技术和网络国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)  
(<sup>2</sup> 武汉光迅科技股份有限公司, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 远程抽运光放大技术已广泛应用于超长跨距光传输系统。在介绍超长跨距光传输系统远程抽运光放大技术的设计方案基础上, 得出了远程增益单元的增益和噪声指数与远程抽运光放大系统输出光信噪比的关系。从选择掺铒光纤、采用反射镜和设计隔离器位置等三方面对远程增益单元(RGU)的结构设计进行了理论分析和实验研究, 比较了不同方案下的远程增益单元的增益与噪声指数, 通过优化光路设计, 提出了不同抽运功率和信号光功率条件下的最佳远程增益单元光路结构。结果表明, 选用低浓度的 HE980 掺铒光纤、采用高反射率和低插损的反射镜及设计合适的光隔离器位置, 远程增益单元的增益和噪声指数能得到明显的改善。

**关键词** 光通信; 超长跨距; 远程抽运光放大器; 远程增益单元

中图分类号 TN914

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP49.100602

## Research on Remote Gain Unit of Ultra-Long Span Unrepeated Optical Transmission System

Xu Jian<sup>1,2</sup> Fu Chengpeng<sup>1,2</sup> Bu Qinlian<sup>1,2</sup> Yu Chunping<sup>1,2</sup>

Jiang Yi<sup>1,2</sup> Huang Liyan<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Optical Communication Technologies and Networks,  
Wuhan, Hubei 430074, China  
<sup>2</sup> Accelink Technologies Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract** Remote optically pumped amplification technology is widely used in ultra-long span optical transmission system. Based on designed scheme of remote pump technology of the ultra-long span optical transmission system, the relation between gain and noise figure with optical signal-to-noise ratio (OSNR) of system is obtained, the structure design of remote gain unit (RGU) from the choice of erbium-doped optical fiber, mirror used, isolator position design is theoretically analyzed and experimentally researched, comparing gain and noise figure of remote gain unit at different schemes. Through the optimization of optical design, the optimal optical structure of remote gain unit is proposed under the conditions of different pump powers and the signal powers. The results show that using low-concentration HE980 erbium-doped fiber, high-reflectivity and low-insertion loss mirror and suitable isolator position, the gain and noise figure of remote gain unit can be obviously improved.

**Key words** optical communications; ultra-long span; remote optically pumped amplifier; remote gain unit

**OCIS codes** 060.2360; 230.2285; 250.4480

## 1 引言

近年来, IP 业务的爆炸性增长加大了对巨大带宽的需求, 波分复用技术的诞生使光纤通信进入了高速光纤通信的发展阶段。不断发展的长途网络对单跨距传输系统提出了更高的要求: 更大容量、更长跨距和更高速率。超长单跨距光传输系统有别于传统的通信系统, 其单跨距的光缆长度一般要求几百千米, 线路中间不能有任何的中继设备, 目前国内外对超长单跨距光传输系统的研究也不断深入, 通过采用新的调制码型<sup>[1]</sup>、低损耗系数传输光纤、大有效面积管理方案和相干接收<sup>[2]</sup>等前沿技术不断突破新的超长跨距距

收稿日期: 2012-06-07; 收到修改稿日期: 2012-07-08; 网络出版日期: 2012-08-28

作者简介: 徐 健(1985—), 男, 硕士, 主要从事光通信系统与光器件等方面的研究。E-mail: jian.xu2@accelink.com

离<sup>[3~5]</sup>。在采用前向纠错技术(FEC)、调制码型、功率放大器(BA)、前置放大器(PA)和拉曼放大器(RA)等常规技术后仍不能解决长跨距问题时,选择远程抽运光放大(ROPA)技术能进一步扩大单跨距距离。远程抽运光放大传输技术是在光缆中插入掺铒光纤(EDF)等增益介质以提供光放大,同时在该点不需供电设施,也不需人员维护,适合用于穿越沙漠、高原、湖泊和海峡等维护、供电不便的地区,因为没有中继站,减少了日常维护成本;遥泵放大器的应用,也意味着引入更多的噪声,导致光信噪比(OSNR)的劣化。因此研究远程增益单元(RGU)的增益和噪声特性对系统误码率(BER)的影响是非常有意义的。本文对RGU EDF的选择、采用隔离器(ISO)以及合适的ISO位置以及不同RGU增益与噪声指数对远程抽运光放大系统OSNR的影响等进行了理论分析,并通过实验验证了分析结果。

## 2 理论基础

### 2.1 远程抽运光放大技术的基本原理

远程抽运光放大器简称遥泵光放大器,主要应用于无中继系统,用来提高系统功率预算,延长系统传输距离。远程抽运光放大系统原理框图如图1所示,由远程抽运单元(RPU)和RGU两部分组成,RGU的增益介质是由一段EDF组成,为系统提供增益单元,实现光信号的放大。RGU通过将信号光和远端RPU传来的抽运光耦合进增益介质EDF,实现信号光的受激放大,从而实现信号的无源光中继。

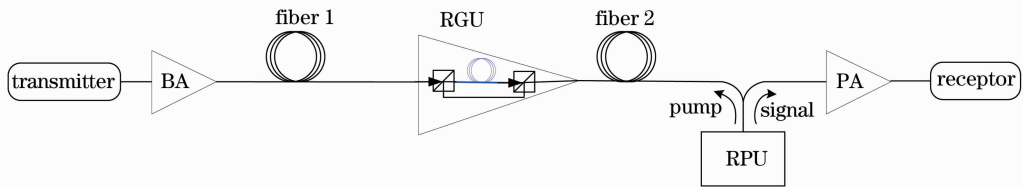


图1 远程抽运光放大系统原理图

Fig.1 ROPA system diagram

遥泵光放大器与常规光放大器的不同之处在于抽运激光器与增益介质放置于光纤链路的不同位置,在常规EDF放大器中,抽运激光器与增益介质是放在同一站点,以光放大单板的方式对信号光实现放大。遥泵光放大器的增益介质位于RGU内,抽运激光器位于接收端的RPU内,RPU将抽运光反向传入RGU,RPU的抽运光既能扮演RA作用,又能利用残余抽运光实现RGU信号光的远程放大。随着RGU在系统中放置的位置不同,其抽运功率及入纤信号功率是不同的,相应地,RGU的增益及噪声指数也随着其放置位置的变化而变化。因此远程抽运光放大器既不是增益锁定,也不是功率锁定,而是一个动态放大器。

### 2.2 RGU对远程抽运光放大系统OSNR影响的分析

远程抽运光放大系统包含BA、RGU、RA、PA及两段传输光纤,相当于级联光传输系统。在超长跨距光传输系统中,影响误码率的因素主要有光功率和OSNR,光功率可以通过BA、PA、RA、远程抽运光放大器等来解决。OSNR受光纤、光放大器等影响,分析较复杂,根据国际标准ITU-T G.692和级联系统等效噪声指数<sup>[6]</sup>定义可得出系统输出端OSNR表达式为

$$R_{SN_{out}} = P_{in} + 58 - 10\lg\left(F_{sys} - \frac{1}{G_{all}}\right), \quad (1)$$

式中 $P_{in}$ 为信号发射模块的输出功率, $R_{SN_{out}}$ , $P_{in}$ 均以dB为单位; $F_{sys}$ 为系统的等效噪声指数, $G_{all}$ 为远程抽运光放大系统总增益,且其表达式分别为

$$F_{sys} = F_B + \frac{FT_1 - 1}{G_B} + \frac{F_R T_1 T_2 - T_1}{G_B G} + \frac{F_P T_1 T_2 - T_1 T_2}{G_B G G_R}, \quad (2)$$

$$G_{all} = G_B \frac{1}{T_1} G \frac{1}{T_2} G_R G_P, \quad (3)$$

式中 $F_B$ 、 $F$ 、 $F_R$ 、 $F_P$ 分别是BA、RGU、RA、PA产生的噪声指数。 $G_B$ 、 $G$ 、 $G_R$ 、 $G_P$ 分别是BA、RGU、RA、PA的增益。 $T_1$ 和 $T_2$ 分别是第一段和第二段光纤的传输损耗。在系统配置固定后,RGU的增益和噪声指数对系统OSNR的影响起着关键作用,如图2(a)所示,在小增益情况下,RGU增益和噪声指数对系统输出OSNR

影响都较大;当增益到达一定值后,增益的提高对系统的 OSNR 的改善不是非常明显。但如图 2(b)所示,远程增益单元的噪声指数的改变与系统的 OSNR 的改善成线性关系,此时在设计远程增益单元时,应优先选择低噪声指数的 RGU 光路。

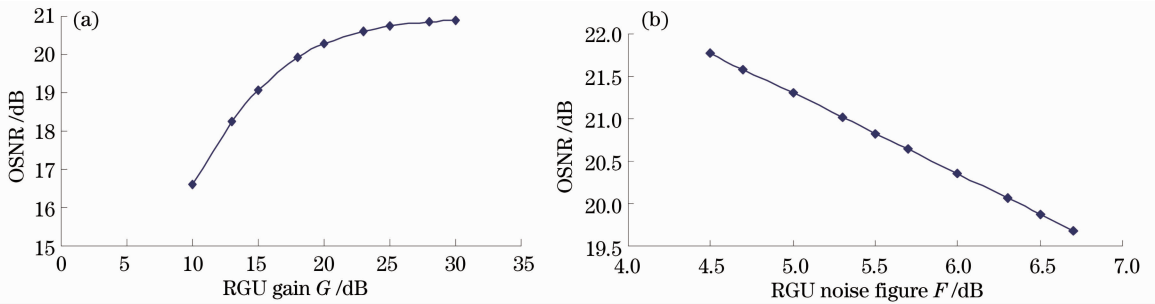


图 2 RGU 增益和噪声指数与系统 OSNR 的关系曲线

Fig. 2 Relation curve between gain and noise figure of RGU with system OSNR

远程抽远光放大系统中对 RGU 特性要求是高增益、低噪声指数,其中 RGU 的增益通常在 20 dB 左右,根据 RGU 增益和噪声指数与系统 OSNR 的关系曲线,此时设计 RGU 应优先选择低噪声指数的光路结构。在光路设计中可通过选择合适的 EDF、提高抽运效率和使用 ISO 来降低噪声指数。RGU 的输入信号光为小信号光且抽运光功率较低,因此为了实现高增益和低噪声,尽量选择低浓度、小模场直径和高数值孔径的 EDF<sup>[7]</sup>,以实现尽可能低的噪声指数,从而使远程抽运光放大系统输出 OSNR 得到最大限度地改善。同时为了使 RGU 抽运效率最大化,应充分利用抽运光,当输出端的抽运光功率仍高于抽运阈值时,可采用反射镜将抽运光反射回 EDF,形成双向抽运形式,从而能有效地降低噪声指数。另外在 EDF 中插入 ISO,构成两段级联结构,ISO 能有效抑制第二段 EDF 的反向自发辐射(ASE),使其不能进入到第一段 EDF,减少了抽运功率在反向 ASE 上的消耗,使抽运光子更有效地转换成信号光能量,从而明显改善 RGU 的增益和噪声指数。

### 3 实验研究

远程抽运光放大器是一个动态放大器,不同的 RGU 位置对应着不同的信号光和抽运光,同时也对应着不同的最优 RGU 光路结构使得系统的 OSNR 最大化,因此设计不同条件下的最优 RGU 光路对系统设计具有重要意义。如图 3 所示, RGU 主要由 ISO 和波分复用器(WDM)的合成器件(IWDM)、EDF、ISO、反射镜等组成, IWDM 能有效降低插损,低的输入端的插入损耗能有效改善 RGU 的噪声指数,低的输出端的插入损耗能有效改善 RGU 的增益。

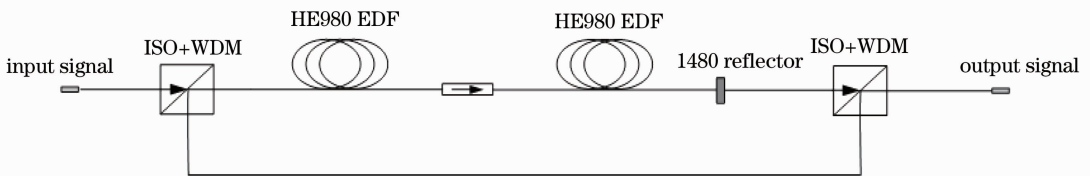


图 3 RGU 光路图

Fig. 3 RGU optical configurations

#### 3.1 EDF 选择设计

由于 RGU 的输入信号光较弱,且抽运光在 10 dBm 左右,所以为了能够在低抽运功率情况下实现较大增益和较低噪声指数,应选择低浓度的 EDF,实验采用 OFS HE980 EDF,其 1530 nm 峰值吸收为 2.8 dB/m。为了验证不同 EDF 在 RGU 中的增益和噪声特性,对 4 种不同浓度的 EDF 进行实验测试。如图 4 所示为 2.8 dB/m(1530 nm 峰值吸收)浓度的 HE980 EDF、6 dB/m 浓度的 MP980 EDF、7.0 dB/m 浓度的 R37003 EDF 的增益曲线和噪声指数曲线。显而易见,在满足系统要求下(高增益,低噪声指数)HE 980 EDF 与 MP 980 EDF 和 R37003 EDF 相比有较大的优势。在远程抽运光放大系统中,当 RGU 增益达到一定值时,其噪声指数更易影响系统 OSNR,因此选择用 2.8 dB/m 浓度的 HE980 EDF 更能改善远程抽运光放大系统

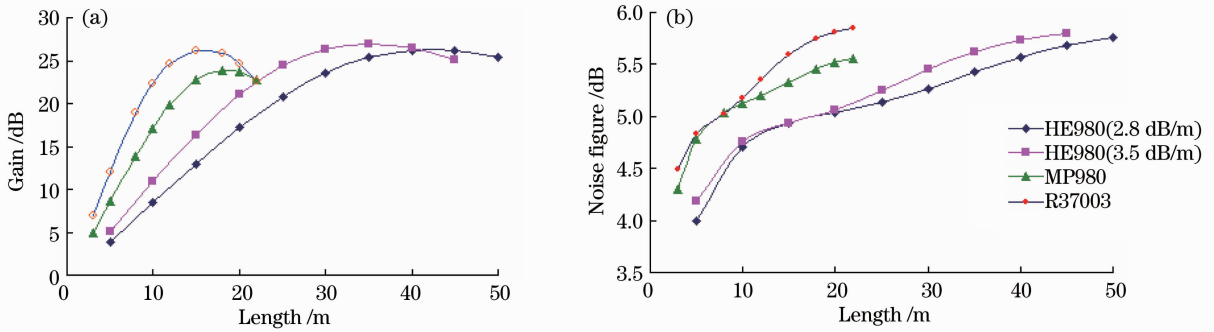


图4 不同类型 EDF 的长度与(a)增益和(b)噪声指数的关系曲线

Fig. 4 Relation curves between lengths of different EDF with (a) gains and (b) noise figures

的 OSNR。

### 3.2 反射镜设计

在 RGU 的光路结构上采用了一个特殊器件反射镜,该器件对 14xx nm 范围的抽运光 99.9% 反射,对入射信号光 99.9% 透射,且二者的插损较小。经过 EDF 后的残余抽运光仍较大,采用 14xx nm 反射镜后光路中会增加反向抽运光,从而可以充分利用该残余抽运光,形成一个类似双向抽运的光放大器。

如图 5 所示,EDF 长度在 5~50 m 范围内,加反射镜后 RGU 增益都高于不加反射镜情况,在 30 m 时的增益改善能达到 1.88 dB。EDF 长度在 5~30 m 范围内加反射镜后 RGU 噪声指数有所改善,最大可改善 0.13 dB,但当 EDF 长度超过 35 m 后不仅不能改善噪声指数,反而劣化噪声指数。原因是当 EDF 过长时到达末端的抽运光过弱,一方面反射镜增加了信号光的插入损耗,另一方面过长的 EDF 增大了正向 ASE,从而劣化了噪声指数。

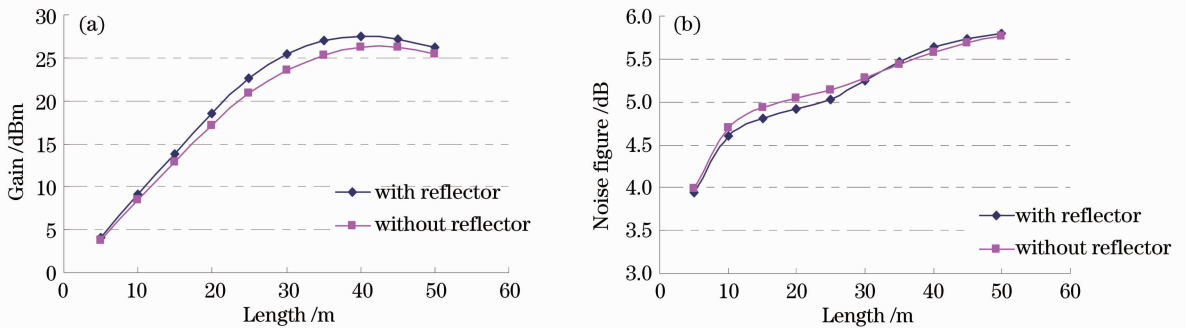


图5 无反射镜与含反射镜时不同纤长的(a)增益和(b)噪声指数

Fig. 5 (a) Gain and (b) noise figure of different fiber lengths with reflector and without reflector

### 3.3 ISO 优化设计

通常在设计光放大器光路时会使用 ISO 以改善增益和噪声指数,ISO 能有效地抑制第二级 EDF 的反向 ASE,使其不能进入第一级 EDF,减少了抽运功率在反向 ASE 上的消耗,从而可以明显改善掺铒光纤放大器(EDFA)的增益、噪声系数和输出功率等特性。由于实验用的 EDF 是较低浓度的 HE 980 EDF,所以为了实现较高的增益,采用的 EDF 长度较长,因此必须合理地设计两级 EDF 的比例,如图 6 所示在信号光功率  $P_s = -39$  dBm、抽运光功率  $P_p = 10$  dBm 条件下 4 种不同光纤长度下不同的 ISO 位置的增益和噪声指数,  $L_1$  表示光隔离器前的第一段 HE 980 EDF 长度,  $L$  表示两段 HE 980 EDF 总长。实验结果表明不同纤长下有不同增益最佳 ISO 位置和噪声指数最佳 ISO 位置,由于在增益最佳 ISO 位置附近噪声指数变化非常小,故最佳 ISO 位置采用增益最佳 ISO 位置。从图中可以得出,随着 EDF 长度的增加,最佳 ISO 位置逐渐靠近输入端。

由于不同的 RGU 位置会导致其输入信号光和抽运光发生变化,不同抽运光和信号光功率条件下的最佳 ISO 位置也会发生变化。通过对不同抽运光和信号光功率进行实验测试,如图 7 所示,在低抽运光功率时最佳 ISO 位置偏向于输出端,在高抽运光功率时最佳 ISO 位置偏向于输入端。当抽运光功率一定时,随

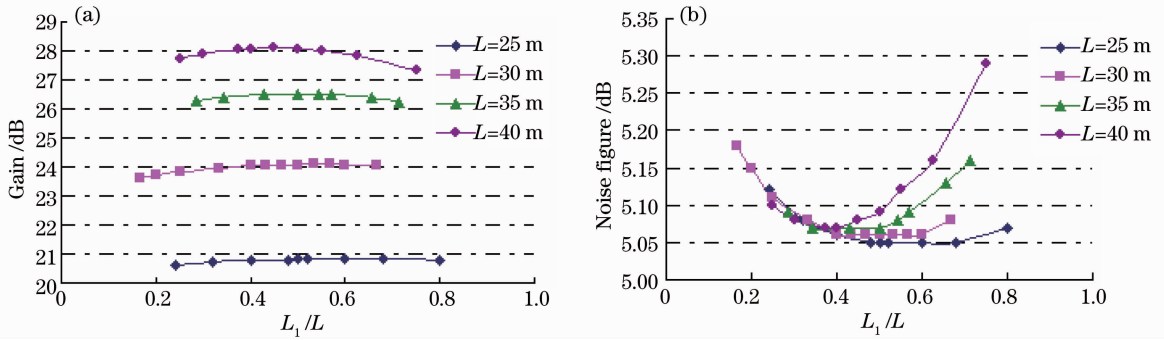
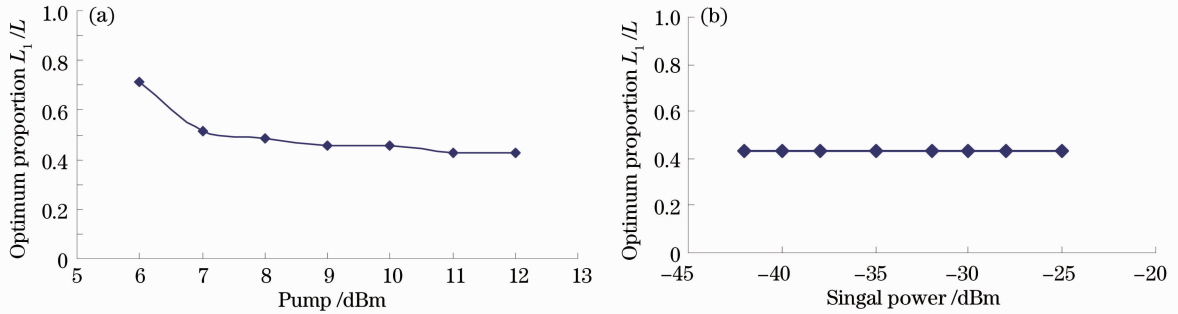


图 6 加 ISO 时不同纤长比例的(a)增益和(b)噪声指数

Fig. 6 (a) Gain and (b) noise figure of different fiber length ratios with ISO

图 7 ISO 最佳位置  $L_1/L$  与(a)抽运光和(b)信号光功率的关系曲线Fig. 7 Relation curve between optimal ISO position  $L_1/L$  with (a) pump and (b) signal power

着信号光的改变,最佳 ISO 的位置几乎不发生改变。因此在实际工程中,随着远程抽运放大器中 RGU 位置或系统参数的改变,输入信号光功率和抽运光功率都会发生改变,根据 ISO 最佳位置与抽运光和信号光功率的关系曲线即可设计最优的 RGU 光路结构。

## 4 结 论

RGU 的增益和噪声指数对远程抽运光放大系统输出 OSNR 的改善起着关键作用。通过数值理论分析,得出了 RGU 的增益和噪声指数与系统 OSNR 的关系,结论有助于 RGU 的设计分析。通过实验研究,验证了超长跨距光传输系统中 RGU 的增益介质选择 OFS HE980 EDF 的合理性,并由实验得出了不同信号光和抽运光功率条件下的最佳 RGU 光路结构。在信号光功率  $P_s = -40$  dBm、抽运光功率  $P_p = 10$  dBm 条件下,实验结果表明包含 IWDM 和反射镜的 RGU 的最佳纤长为 35 m,最佳纤长比例  $L_1/L$  为 0.46,实现 RGU 24.6 dB 增益和 5.3 dB 噪声指数,从而验证了理论分析的正确性。理论分析及实验结论有助于远程抽运光放大系统和 RGU 的设计研究。

## 参 考 文 献

- 1 Chen Yong, Cao Jihong, Chen Ting *et al.*. Optimal modulation formats for 2560 km optical transmission with low-power penalty[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 331~335  
陈 勇, 曹继红, 陈 婷 等. 优化调制格式实现 2560 km 低代价无误码传输[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 331~335
- 2 Hu Yi, Yang Jialong. Technical analysis of 40/100 Gb/s polarization multiplexing and coherent detection for optical transponder module[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(8): 080601  
胡 毅, 杨家龙. 40/100 Gb/s 偏振复用相干检测光模块的技术分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(8): 080601
- 3 D. Chang, W. Pelouch, J. McLaughlin.  $8 \times 120$  Gb/s unrepeated transmission over 444 km (76.6 dB) using distributed Raman amplification and ROPA without discrete amplification[C]. ECOC, 2011. 1~3
- 4 J. D. Downie, J. Hurley, J. Cartledge *et al.*.  $40 \times 112$  Gb/s transmission over an unrepeated 365 km effective area-managed span comprised of ultra-low loss optical fibre[C]. ECOC, 2010. 19~23

- 5 Wu Lin, Liu Liang, Zhang Fan *et al.*. Experimental study of high-speed differential phase-shift keying signal long-haul transmission [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 54~58  
吴琳, 刘亮, 张帆等. 高速率差分相移键控信号的长距离传输实验[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 54~58
- 6 Yang Ning, Yang Zhu, Qi qinian *et al.*. The OSNR calculating of DWDM system using cascade EDFAs[J]. *J. China Institute of Communications*, 2003, **24**(1): 75~82  
杨宁, 杨铸, 漆启年等. DWDM系统中级联EDFA光信噪比计算[J]. *通信学报*, 2003, **24**(1): 75~82
- 7 P. C. Becker, N. A. Olsson, J. R. Simpson. *Erbium Doped Fiber Amplifiers Fundamentals Technology* [M]. San Diego: A Harcourt Science and Technology Company, 1999