

用于光孤子通信的理想分布式放大器

于晋龙 马晓红 戴居丰 杨恩泽

(天津大学电子系, 光电子信息工程开放实验室, 天津 300072)

摘 要 光孤子通讯的一个重要的问题是如何提高光孤子通讯的站间距离, 降低线路成本。本文从降低信号在线路中的起伏入手, 通过理论分析和计算机模拟, 提出了用于孤子通讯的理想分布式光纤放大器的设想。借以降低噪声和提高泵浦站间距, 降低线路成本。并对一些设计参数对系统的影响进行了讨论。

关键词 光孤子, 分布式放大器, 站间距。

1973 年, 由 Hasegawa 等人提出了光孤子通信的概念^[1], 用以克服光纤色散对光纤通信速率的限制。1980 年, Mollenauter 等人首先在实验中观察到了光纤孤子^[2]。此后的一段时间里, 孤子通信一时成为了通信研究中的热点, 各种实验系统纷纷提出。尤其是掺铒光纤放大器的出现^[3], 更为孤子通信的研究展示了美好的前景。

90 年代中后期, 常规光纤通信由于采用了波分复用(WDM)和色散补偿等技术, 通信速率和距离都有了突破性进展。与此形成对照的是, 光孤子通信却迟迟没能投入大规模商业使用。究其原因, 主要是光孤子通信本身固有的一些特点所决定的。一个是在线光放大器的自发辐射噪声(ASE 噪声)引起的时间抖动, 限制了光孤子通信的通信容量(Gordon-Haus 限制^[4]), 有几种孤子控制技术(时域控制技术^[5]和频域控制技术^[6])较好地解决了这个问题。但为了限制自发辐射噪声的强度, 放大器的增益不能太大, 因此站间距的提高受到了限制; 另一个问题是, 为了保证孤子的稳定传输, 放大器的间距必须远小于光孤子周期。孤子周期的计算公式

$$Z_0 = \pi T_0^2 / 2 |\beta_2|$$

其中 T_0 为光孤子脉冲宽度, β_2 为光纤色散参量。从式中可以看出, 它与脉冲的宽度的平方成正比。即通信速率越高, 孤子周期也就越短, 放大器的间隔也就越小, 从现有实验来看^[7-9], 放大器间距一般小于 50 km。无论从成本角度还是从将来的系统提升角度来讲, 对于商业应用来讲是不利的。为了解决这个问题, 分布式光纤放大器的放大的自发辐射噪声低, 不失为一种较好的解决方法。最近报道利用分布式掺铒光纤放大器, 其泵浦站间距已达到 97 km^[10]。但是, 分布式掺铒光纤放大器自身也存在问题。由于掺铒光纤本身也作为传输光纤用, 所以其制造难度比单纯的掺铒光纤或传输用色散位移光纤要大。另一个问题是, 实际中使用的普通分布式掺铒光纤放大器, 泵浦光在传输过程中由于损耗和放大吸收, 其在整个放

大器中也不是均匀的,这就使得其增益与损耗不能处处抵消。信号在传输过程中也有起伏。当泵浦站间距提高,泵浦功率加大时,这种起伏也加大。数值模拟表明,当这种起伏的周期与光孤子的周期可以比较时,其长距离传输变得不稳定。所以说,分布式放大器站间距的提高也是有一定的限制。从中可以看出,对于分布式放大器来讲,信号的起伏所产生的色散波是限制传输泵浦站间距的又一重要因素。要提高站间距,必须在加大泵浦功率的同时减小信号在传输过程中的起伏。当起伏为 0 时,孤子传输为理想传输(不考虑放大的自发辐射噪声),信号的传输距离是无限的。

在掺铒光纤放大器中,每点的增益是由这一点的泵浦光功率和掺杂浓度共同决定的。在足够强的泵浦光功率下(大于阈值),掺杂浓度越大,其增益也越大;对于一定的掺杂浓度,泵浦光越强,增益也越大。对于实际的分布式光纤放大器来讲,泵浦光是从两端引入的。在传输过程中总是呈一种衰减的趋势。故可以改变光纤中不同位置的铒离子的掺杂浓度^[13],在泵浦光强的地方,其掺杂浓度较低;在泵浦光弱的地方,掺杂浓度较高。这两个因素相互作用,使总的增益在整个传输线路中平均分配,使信号起伏最小。这样就可以提高泵浦站间距。理想的情况下,泵浦光衰减引起的增益的减小完全由掺杂浓度的增加所抵消,孤子的传输为理想传输,称之为理想分布式放大器。

1 理想分布式光纤放大器的理论计算

掺铒光纤放大器的放大过程可以用泵浦光光子的吸收和信号光子的发射来描述,则有:

$$\Delta P_s = \eta \Delta P_{\text{pump}} \frac{\nu_s}{\nu_p}, \quad (1)$$

式中 ΔP_s 、 ΔP_{pump} 分别为信号光增量和泵浦光的吸收量; ν_s 、 ν_p 分别为信号光和泵浦光频率; η 为效率常数,当它等于 1 时,对应光放大器放大系统的量子极限。在理想分布式放大器中,信号在线路中保持不变,其增益系统与光纤损耗系数相等。有 $\Delta P_s = P_s [1 - \exp(-\alpha L)]$ 。 P_s 为线路中的信号功率(在理想分布式放大器中,它是一个固定值), α 为光纤损耗, L 为光纤长度。从(1)式可求得泵浦光在线路中的吸收值。再考虑光纤的损耗,在理想分布式放大器内,任一点的泵浦光表达式为

$$P_{\text{pump}}(L) = P_0 \exp(-\alpha L) - \frac{\nu_p}{\nu_s} \eta P_s [1 - \exp(-\alpha L)], \quad (2)$$

P_0 为当 $L = 0$ 时的泵浦光功率。对于一个固定的 P_0 ,随着 L 的增加, P_{pump} 减小到不能保持掺铒光纤对信号的放大时,此时的距离就是这一泵浦功率的最大泵浦距离。

从粒子数反转的角度,求得该放大器的增益表达式:

$$G = \eta_s \sigma_{sc} [(1 + R_s) N_2 - R_s N_{\text{tot}}] = \alpha \quad (3)$$

式中 N_{tot} 为粒子总数; N_2 为上能级粒子数; σ_{sc} 为信号光的吸收截面; η_s 为信号光和光纤的耦合效率; R_s 、 R_p 分别为信号光和泵浦光的吸收截面比和发射截面的比。将 N_2 的表达式用 N_{tot} 表示:

$$\left. \begin{aligned} N_2(L) &= \frac{N_{\text{tot}}(L) (R_p W_p + R_s W_s)}{(1 + R_s) W_s + (1 + R_p) W_p + (1/\tau)} \\ W_s &= \eta_s \sigma_{sc} \frac{(P_s + P_{\text{ASE}}^- + P_{\text{ASE}}^+)}{h \nu_s A}, & W_p &= \eta_p \sigma_{pc} \frac{P_{\text{pump}}}{h \nu_p A} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

从(3)、(4)式可得到:

$$G = \eta_s \sigma_{sc} \left[\frac{(1 + R_s)(R_p W_p + R_s W_s)}{(1 + R_s) W_s + (1 + R_p) W_p + (1/\tau)} - R_s \right] N_{tot} = \alpha \quad (5)$$

忽略放大的自发辐射噪声的影响,从以上可以求出理想分布式光纤放大器的浓度分布的表达式:

$$N_{tot}(L) = \frac{\alpha [P_s \eta_s (\sigma_{sc} + \sigma_{sa}) / v_s + P_{pump}(L) \eta_p (\sigma_{pa} + \sigma_{pc}) / v_p + (hA/\tau)]}{\eta_s [(\sigma_{sc} \sigma_{pa} - \sigma_{sa} \sigma_{pc}) \eta_p P_{pump}(L) / v_p - hA (\sigma_{sa} / \tau)]} \quad (6)$$

式中 $P_{pump}(L)$ 由(2)式给出。这样,就得到了正向泵浦的理想分布放大器的浓度分布曲线。由于在理想分布式放大器中,信号强度在整个线路中保持不变。在忽略放大的自发辐射噪声的情况下,反向泵浦情况与正向泵浦一样,上式同样可表达反向泵浦情况。此结果和数值计算结果的比较如图 1 所示。

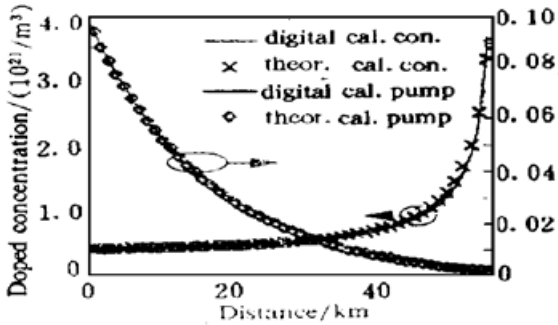


Fig. 1 Doped concentration and pump power against the distance, with the ideal DEDFA

于在理想分布式放大器中,信号强度在整个线路中保持不变。在忽略放大的自发辐射噪声的情况下,反向泵浦情况与正向泵浦一样,上式同样可表达反向泵浦情况。此结果和数值计算结果的比较如图 1 所示。

从(6)式可以看到,理想的分布式放大器的浓度分布与信号光强度、泵浦光强度及光纤损耗均有关系,对于一个实际的传输线路,一旦铺设完成,其浓度的变化曲线就固定了。在这种情况下,信号光强度的变化必然引起对泵浦光要求的改变。人们所关心的是:此时理想分布式放大器是否还能保持其理想放大的特点?对信号的变化对泵浦光的要求又是怎样?

理想放大的特点?对信号的变化对泵浦光的要求又是怎样?

由于信号光变化 ΔP_s 和泵浦光变化 ΔP_{pump} 所引起的在 L 处理想掺杂浓度的变化 $\Delta N_{tot}(L)$ 可由下面的表达式表达:

$$\Delta N_{tot}(L, \Delta P_s, \Delta P_{pump}) = N(L, P_s + \Delta P_s, P_{pump} + \Delta P_{pump}) - N(L, P_s, P_{pump}) \quad (7)$$

当理想的情况下,有 $\Delta N_{tot}(L, \Delta P_s, \Delta P_{pump}) = 0$ 。就是说信号和泵浦光的变化正好相互补偿,对掺杂浓度的影响为 0。则从(7)式可得到满足这种情况下的 ΔP_s 和 ΔP_{pump} 的关系式。由于该表达式过于烦琐,本文对于一些参数(信号和泵浦光波长、掺铒光纤在信号和泵浦光波长处的吸收和发射截面、普朗克常数)用数值代入,最后的表达式为:

$$\Delta P_{pump} \approx \frac{1.4035 \times 10^8 A \eta_p [1 - \exp(-\alpha L)] - 2.1478 \times 10^8 A \eta_s + 4.5707 \eta_s \eta_p P_0}{(1.3401 \times 10^8 A + 4.5707 \eta_s P_s) \eta_p \exp(-\alpha L)} \Delta P_s \quad (8)$$

对于现有的商用光纤参数, P_s 为 1 mW 左右, P_{pump} 为 100 mW 左右, $L > 50$ km。对上式进行计算,当信号光和泵浦光的变化满足(8)式的情况下,在 L 点处,掺杂浓度可以保持不变。但从(8)式中可以知道,由于表达式中含有 L 。当 ΔP_s 、 ΔP_{pump} 取为某一值量,在整个放大器中不可能处处满足理想放大的条件,此时的信号会发生起伏。但从计算中可以发现,由于信号的变化引起的对掺杂浓度的改变随传输距离的增加而增加。所以取最远距离对泵浦功率和信号功率进行优化,可以使不同的信号引起的对浓度曲线要求改变最小。但这个公式中所含的泵浦效率 η 并不是一个常数,在掺铒光纤参数确定时,它随泵浦功率和信号功率的改变而改变。其变化情况如图 2 所示。所以公式(8)仅当 ΔP_s 不太大时适用,否则会有较大

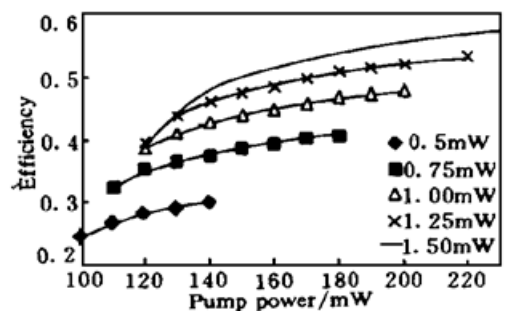


Fig. 2 Curves of the pumping efficiency at difference signal power

的误差。从图 2 也可发现, 信号功率较低的情况下, 效率的变化较大, 所以在信号功率较上的情况下, (8) 式算出的结果比大信号情况下误差更大。

以上的理论计算为理想分布式光纤放大器给出了一个定性的结论。由于假设泵浦效率为一个常数, 并且忽略了放大的自发辐射噪声对放大器的影响, 所以它虽然在一定的程度上反映出了理想分布式放大器的特点。但进一步精确的分析仍要用数值分析的办法来完成。

2 理想分布式光纤放大器的数值模型

从上面分析可以得到有关理想分布式光纤放大器的一些有用的结论。但是, 由于忽略了放大的自发辐射噪声以及在计算中的一些近似。其结果与实际的系统必然存在一定的偏差。现用数值分析的办法, 对该放大器进行定量的分析, 并检验所得到的理论结果。

分布式放大器的数值模型一般可用速率方程^[11]:

$$\begin{cases} \frac{dP_{\text{pump}}^{\pm}(Z)}{dZ} = \mp P_{\text{pump}}^{\pm}(Z) \eta_p [\sigma_{\text{pa}} [N_{\text{tot}}(Z) - N_2] + (\sigma_{\text{ASE}} - \sigma_{\text{pe}}) N_2] \mp \alpha_{\text{pump}} \\ \frac{dP_{\text{ASE}}^{\pm}(Z)}{dZ} = \pm \gamma(Z) (P_{\text{ASE}}^{\pm} + 2\alpha h \nu_s B) \mp \alpha_s P_{\text{ASE}}^{\pm} \\ \frac{dP_s^+(Z)}{dZ} = [\gamma(Z) - \alpha_s] P_s^+ \end{cases} \quad (9)$$

计算中取信号波长为 1545 nm, 泵浦波长为 1480 nm(尽管此波长噪声较大, 但其本征损耗小, 在分布放大中多采用它); 式中 $\gamma = \eta_s \sigma_{\text{sc}} [(1 + R_s) N_2 - R_s N_{\text{tot}}]$, 为放大器的不同 Z 处的增益; η_s, η_p 分别为信号光和泵浦光与光纤的耦合因子取为 0.4; σ_{sc} 为信号光的发射截面取为 5.03×10^{-25} ; R_s 为信号光的吸收截面与发射截面之比取为 0.5667; $\sigma_{\text{ASE}}, \sigma_{\text{pa}}$ 和 σ_{pe} 分别为泵浦光的放大的自发辐射截面、吸收截面和发射截面取为 0、 $1.86 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ 和 $0.42 \times 10^{-25} \text{ m}^2$; P_{pump}^{\pm} 为正向和反向泵浦光功率取为 100 mW; P_s 为信号光功率; P_{ASE}^{\pm} 为正向和反向放大的自发辐射噪声功率; $N_{\text{tot}}(Z)$ 为铒离子浓度; τ, N_2 为上能级的寿命离子浓度; A 为光纤的有效通光面积取为 $12.6 \times 10^{-12} \text{ m}^2$; 取为 10 ms; B 是放大的自发辐射噪声的带宽取为 3100 GHz(25 nm); $\alpha_s, \alpha_{\text{pump}}$ 分别为信号光和泵浦光在光纤中的损耗, 取为 5.76×10^{-5} , 相当于 0.25 dB/km。

本文设计一个 10 Gb/s 的孤子传输系统, 光纤的色散参量 $\beta_2 = -0.55 \text{ ps}^2/\text{km}$, 脉冲宽度为 5 ps(或 $T_{\text{FWHM}} \approx 1.76T_0 = 8.8 \text{ ps}$, 此时的脉冲间隔为 100 ps, 为了减小孤子间的相互作用, 一般孤子间隔取为信号脉冲宽度的 20 倍)。通过下式可计算出此条件下形成一阶孤子所要求的信号峰值功率。

$$P_1 = \frac{|\beta_2|}{\gamma T_0^2} \approx \frac{3.11|\beta_2|}{\gamma T_{\text{FWHM}}^2} \quad (10)$$

式中 γ 为对应于自相位调制的非线性参量。

计算可知, 此系统中形成一阶孤子所需的信号峰值功率为 11.3 mW, 孤子周期为 64 km。对于“1”“0”等几率的随要信号来讲, 其信号平均功率为 0.5 mW。根据泵浦光细度的变化, 改变不同位置的掺杂浓度, 以保持信号不变。通过解上面的方程组, 可以得到理想分布式光纤放大器的浓度分布曲线及其他的放大特性。如图 3 所示。

图 3(a) 是掺杂浓度和泵浦光功率在整个光纤线路中的变化曲线, 可以看到对于本文设计

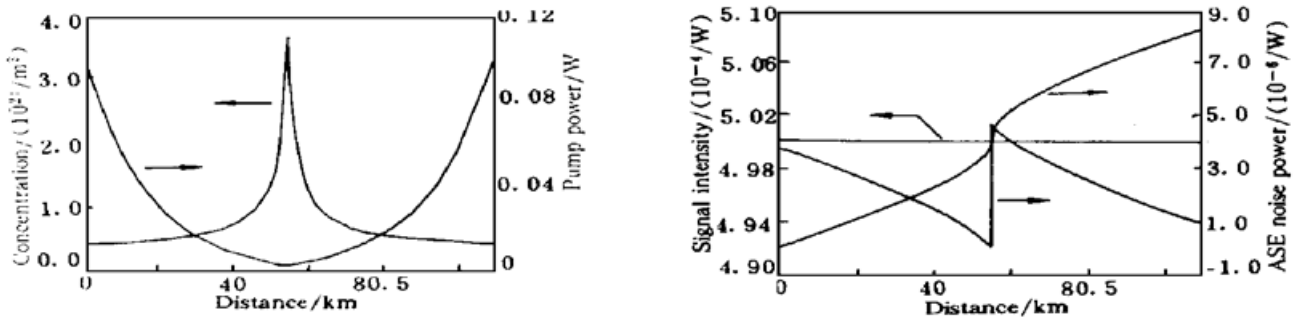


Fig. 3 (a) The doped concentration and pump light change along the ideal distributed fiber amplifier, (b) The signal light, forward and backward ASE noise change along the ideal distributed fiber amplifier

的这个系统, 掺杂光纤的掺杂浓度有一个非常大的变化范围(相差近一个数量级)。图 3(b) 是信号光、正向和反向放大的自发辐射噪声在线路中的积累情况。注意到信号在整个传输过程中的起伏其微乎其微, 这个特点保证了孤子在泵浦站间距远大于其孤子周期的条件下可以保持稳定的长距离传输。理论计算的结果也在图中给出, 其与数值计算的结果相差很小。

与常规的分布式放大器相比较, 理想分布式光纤放大器输出的放大的自发辐射噪声要略小。这是因为在理想分布式放大器中, 由于增益保持为一常数, 其放大的自发辐射噪声也近似为一线性分布; 而在常规的分布式放大器, 放大的自发辐射噪声较多地集中在离输入输出端较近的部分, 到输出端所受的损耗较小。

图 4 给出的是泵浦功率和站间距的关系。可见, 随着站间距的增加, 所要求的泵浦功率

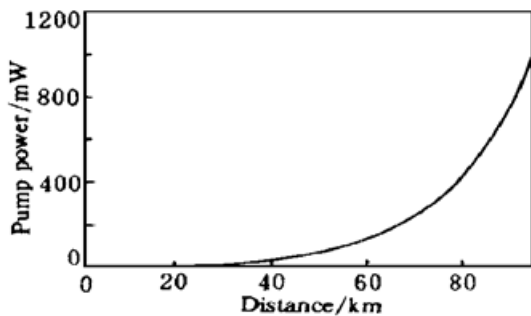


Fig. 4 The requisite pump power against the span between two pumping stations

近似呈指数增加。当站间距为 200 km 时, 要求的每个单向泵浦功率达到 1 W(总功率为 2 W)。一方面, 现有高功率的 1480 nm 泵浦源已经达到入纤功率 1 W 的水平^[12]。另一方面, 提高站间距的同时, 放大的自发辐射噪声的影响也会增加。此时应考虑适当的降噪措施, 以保证系统对于时间抖动的要求。在本文的计算中, 所有有关放大的自发辐射的计算都是比较保守的(放大的自发辐射的带宽取为 25 nm)。在实际使用中, 只要采取一些简单的措施, 就可以大大降低放大的自发辐射噪声; 比如在线路中加入双窗口滤波器(两个窗口分别在

1480 nm 和 1550 nm 处, 以保证在降低放大的自发辐射噪声的同时, 对泵浦光的损耗很低); 在对泵浦光功率影响不大的一些点上(如两个泵浦站的中点或两个传输段之间的点), 可以采用现有的降噪措施(如加入同步光调制器, 移频滤波器等)。所以放大的自发辐射噪声在这个系统中并不是一个很难解决的问题。

图 5(a) 给出的是在相同的站间距离和初始浓度下, 不同信号功率所要求的理想分布式放大器的浓度分布曲线(只考虑了正向的情况, 反向泵浦的浓度分布和正向泵浦的对称)。可以看到, 当信号平均功率在 400 μ W 到 1.8 mW 的大范围内变化时, 当适当地提高了泵浦光强度时, 其理想浓度分布曲线的变化不是很大。这就保证了在一定的掺杂浓度分布的情况下, 信号功率的变化引起的放大器的工作状态与理想的工作状态之间的偏差是可以忽略不计的。

在掺杂浓度分布已定的情况下, 由于信号功率的改变而引起的泵浦功率的变化情况如图

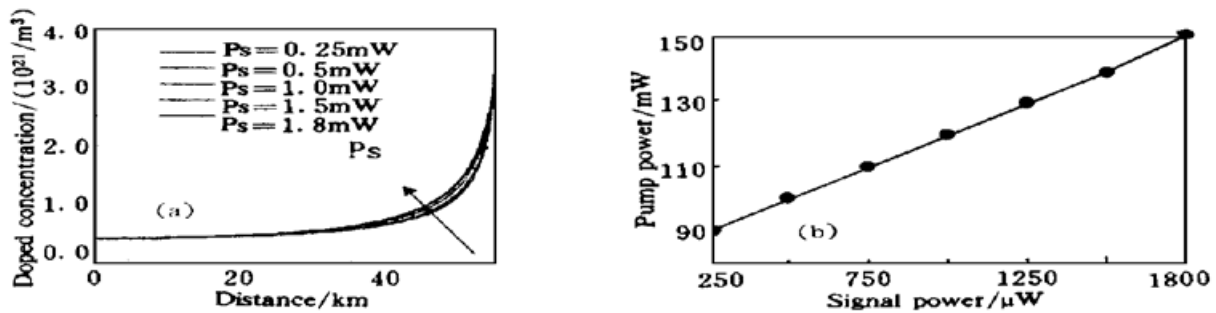


Fig. 5 (a) The change of doped concentration distribution at difference signal power, (b) The change of pump power compensate the change of signal

5(b)所示。此时的掺杂浓度分布是针对某一信号功率优化的。对于非优化的信号功率来讲,其泵浦功率要高于针对其自身优化的放大系统。所以,在实际设计中,应综合考虑各个因素和以后升级的需要,选择一个合理的信号功率作为系统优化设计的基础。

在传输相同的距离(110 km)的条件下,理想分布式光纤放大器要求的泵浦功率是常规分布式放大器的两倍,因为理想分布式放大器要求有较高的泵浦功率来保证在线路中点处的增益保持不变。但从提高站间距,降低整个线路成本的角度考虑,这样做还是利大于弊。

结 论 从以上的讨论中可以知道:理想分布式光纤放大器较好地解决了信号在线路中的起伏问题,避免了普通的分布式放大器由于信号起伏产生的色散波。从而可以大大提高泵浦站间距,降低线路成本。

参 考 文 献

- [1] A. Hasegawa, F. Tappert, Transmission of stationary nonlinear optical pulse in dispersive dielectric fibers, I. Anomalous dispersion. *Appl. Phys. Lett.*, 1973, **23**(3) : 142~ 144
- [2] L. F. Mollenauer, R. H. Stolen, J. P. Gordon: Experiment observation of picosecond pulse narrowing soliton in optical fibers. *Phys. Rev. Lett.*, 1980, **45**(13) : 1095~ 1098
- [3] R. J. Mears *et al.*, Low-noise Erbium-doped fiber amplifier operating at 1.54 μm . *Electron. Lett.*, 1987, **23**(19) : 1026~ 1028
- [4] J. P. Gordon, H. A. Haus, Random walk of coherently amplified solitons in optical fiber transmission. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(10) : 665~ 667
- [5] M. Nakazawa, K. Suzuki, *et al.*, Experimental demonstration of soliton data transmission over unlimited distance with soliton control in time and frequency domains. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(9) : 729~ 730
- [6] L. F. Mollenauer, J. P. Gordon, S. J. Evangelides, The sliding-frequency guiding filter: an improved form of soliton jitter control. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(22) : 1575~ 1577
- [7] F. Matera, M. Romagnoli, B. Daino, Alternate polarisation soliton transmission over 4200 km by using mode-locked monolithic extend-cavity laser as soliton source. *WC2, OFCC*, 1993. 88
- [8] M. Nakazawa, Y. Kimura *et al.*, Soliton transmission at 20 Gbit/s over 2,000 km in Tokyo metropolitan optical network. *Electron Lett.*, 1995, **31**(17) : 1478~ 1479
- [9] A. Naka, T. Matsuda, S. Saito *et al.*, 5,200 km straight-line soliton transmission experiment at 10 Gbit/s. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(19) : 1679~ 1681
- [10] C. Lester, K. Bertilsson, *et al.*, Soliton transmission over more than 90 km using distributed erbium-doped fibers. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(2) : 219~ 220
- [11] P. R. Morkel, R. L. Laming, Theoretical modeling of erbium doped fiber amplifier with bidirectional

pumpng at 1.48 μm . *IEEE Photonics. Tech. Lett.*, 1992, 4(1) : 52~ 55

- [12] Y. Miyajima, T. Komukai, T. Sugawa, 1-W cw Tm-doped fluoride fiber laser at 1.47 μm . *Electron. Lett.*, 1993, 29(8) : 660~ 661
- [13] Yu Jinlong, Ma Xiaohong, The ASE noise of a long EDFA with gradually-changing erbium concentration. *OFSET '95 C-126*

The Ideal Distributed Er^{3+} Doped Fiber Amplifier for Soliton Communication

Yu Jinlong Ma Xiaohong Dai Jufeng Dong Xiaoyi Yang Enze

(*Electronic Department, Tianjin University,*

The Open Laboratory of Photoelectronics & Information Engineering National Committe, Tianjin 300072)

(Received 18 April 1997; revised 15 September 1997)

Abstract How to lengthen the span of smpifiers is a crucial issue in use soliton transmission system. Based on theoretical analysis and computer stimulation, it is proved that the ideal distributed Er^{3+} doped fiber amplifier can improve the noise performance and lengthen the span between two pumping stations. A preliminary discussion about the result is presented.

Key words soliton, distrabuted Er^{3+} doped fiber amplifier, span between two amplifiers.