

掺铒光纤放大器在多路模拟 光纤传输系统中应用*

毛庆和 杨祥林 张明德 章河勇
(东南大学电子工程系, 南京 210096)

丁铁骑 马正北 张爽斌
(南京邮电学院, 南京 210003)

摘 要 对应用掺铒光纤放大器的副载波频分复用模拟电视光纤传输系统的噪声和失真进行了实验研究, 利用掺铒光纤放大器作为系统的功率提升和中继放大器, 分别成功地进行了 185 km 和 215 km 的系统传输试验。

关键词 频分复用, 掺铒光纤, 放大器, 增益, 信噪比。

1 引 言

光纤具有极宽的频带和优良的抗干扰特性, 光纤通信在现代通信技术中占有重要的地位。近年来光纤传输已被应用于视频传输和广播电视系统^[1]。但由于当今的光纤电视图像传输普遍采用调幅(AM)与调频(FM)制式的频分多路复用(FDM)技术, 系统功率预算低, 一般为点-点单级干线传输, 距离较短, 复用信道少, 用户分配路数受到限制, 为提高干线传输距离和增大用户分配数, 必须设置中继器。工作于 $1.55 \mu\text{m}$ 低损耗光通信窗口处的掺铒光纤放大器(简称 EDFA), 具有增益高、噪声低、频带宽与输出功率大等特点, 是新一代光纤系统中的理想光放大器。将掺铒光纤放大器应用于多路模拟广播电视光纤传输系统, 不仅可以大大提高干线传输距离和视频信道数, 而且还可应用于用户分配网, 视频质量和可靠性均得到改善, 成本也得到降低。这是一种很有实用价值和发展前途的新技术^[2]。本文报道利用国产器件研制的实用化掺铒光纤放大器在调频频分复用模拟电视光纤传输系统应用中的实验研究和系统传输试验结果。

2 实验方案和传输试验

在模拟光纤传输系统中, 光纤放大器可作为光发送机的提升放大器(Post amplifier)和系统在线中继放大器(in-Line amplifier)。本文对系统中接入放大器后传输距离的变化以及掺铒

* 国家自然科学基金、通信 863 资助项目。

收稿日期: 1996 年 2 月 2 日; 收到修改稿日期: 1996 年 4 月 19 日

光纤放大器的接入位置(掺铒光纤放大器的工作点)对传输距离和信号传输质量的影响进行了研究。传输试验在副载波调频频分复用系统上进行,图1为系统传输试验框图。图中,光发射机将两路模拟电视信号经副载波调频频分复用后、调制DFB-LD输出,按图示的三种方案传输至接收端。为比较,第一种系统中未接入掺铒光纤放大器,第二种系统中将掺铒光纤放大器作为功率提升放大器,第三种系统中将掺铒光纤放大器作为在线放大器。信号传输至终端后分别由接收机接收或由光谱分析仪和光功率计测量,利用矢量示波器和视频噪声仪分别测出接收机输出视频信号的微分增益(DG)、微分相位(DP)和信噪比(SNR)等。光发射机的副载波频率为30 MHz和70 MHz,视频带宽6 MHz,伴音副载波频率7 MHz,峰-峰频偏12 MHz,信号调制带宽36 MHz,信号光源DFB-LD的中心波长为 $1.563\ \mu\text{m}$,线宽0.2 nm,输出平均光功率为 $-1.5\ \text{dBm}$,传输光纤为CCITT-G652型单模光纤(SMF),损耗 $0.19\ \text{dB/km}$,活动连接器FC和熔接点等引起的附加传输损耗平均值约 $0.04\ \text{dB/km}$ 。

光纤放大器由掺铒光纤(EDF)、 $1.48\ \mu\text{m}$ 泵浦激光器组件(LD)、带尾纤的偏振不灵敏的光隔离器(ISO)、波分复用耦合器(WDM)及活动连接器(FC)组成的光路模块和由致冷控制及能量补偿电路组成的机箱两部分构成,为双向泵浦结构^[3]。泵浦LD的中心波长分别为 $1.472\ \mu\text{m}$ 和 $1.473\ \mu\text{m}$;掺铒光纤为低掺杂浓度(50 ppm)、低背景损耗($< 0.3\ \text{dB/km}$)的Er/Ge/Al型光纤,芯径 $4.9\ \mu\text{m}$,数值孔径0.22,根据有效泵光功率的大小选定长度为30 m。图2为掺铒光纤放大器的增益和噪声特性,小信号增益和噪声系数分别为28 dB和5.1 dB,3 dB饱和输出功率(小信号增益下降3 dB时的输出功率)和最大输出功率分别为 $4.8\ \text{dBm}$ 和 $11\ \text{dBm}$ 。

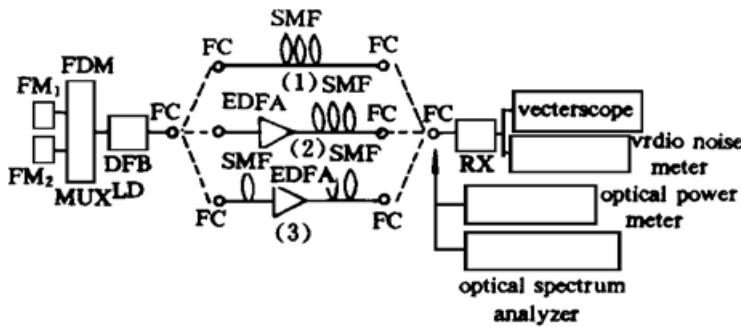


Fig. 1 Experiment setup

(1) without EDFA, (2) EDFA as a booster, (3) EDFA as an in-line amplifier

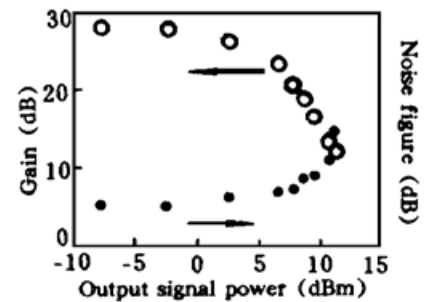


Fig. 2 The characteristics of the EDFA

3 结果与讨论

模拟系统的传输质量一般以信噪比(SNR)特性和失真(DG与DP)进行评价。

3.1 信噪比

首先对三种不同系统组成方案中信噪比随传输距离的变化进行了测量,其结果如图3所示。由图可见,未接掺铒光纤放大器时,传输距离较短。当信噪比为56 dB时最大传输距离约120 km。当将掺铒光纤放大器作为光发送机功率提升放大器使用时,它提供的增益使系统功率预算比未接掺铒光纤放大器时提高了12 dB,从而增加了系统传输距离。当系统长度达160 km时,测得信噪比为62 dB。最大传输距离可达185 km(信噪比为56 dB),比未接掺铒光纤放大器时约延长了65 km。当掺铒光纤放大器用作在线中继放大器时,系统功率预算提高得

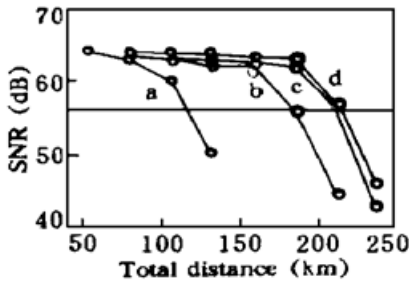


Fig. 3 SNR as a function of total transmission distance.

a: without EDFA, b: the EDFA as a postamplifier, c: the EDFA as an in-line amplifier at 55 km, d: the EDFA as an in-line amplifier at 25 km

更多,从而进一步增加了传输距离。在 25 km 中继时,放大器提供的增益为 18 dB,试验测得的系统经 185 km 传输后的信噪比为 63 dB,最大传输距离为 215 km(信噪比为 56 dB)。在 50 km 中继时,放大器提供的增益为 23 dB,系统经 185 km 传输后的信噪比为 62 dB,最大传输距离则为 205 km(信噪比为 56 dB)。尽管在 25 km 中继比在 50 km 中继掺铒光纤放大器提供的增益约小 5 dB,但前者的最大传输距离却反而增加了 10 km,可见系统最大传输距离不仅与放大器提供的增益有关,而且与放大器的接入位置(它的工作点)有关。

掺铒光纤放大器在提供增益、增加功率预算的同时,必然要引入附加的噪声,这可通过对载噪比分析看出,对于调频频分复用系统,信噪比等于通道带宽内的总载噪比与解调增益之和,而总载噪比(CNR)可表示为:

$$CNR^{-1} = CNR_0^{-1} + CNR_{EDFA}^{-1} \quad (1)$$

(1) 式中 CNR_0 为无掺铒光纤放大器时总载噪比,它来源于前端光发射机光源相对强度噪声、传输噪声、接收机光检测器量子噪声以及接收机电路等效热噪声。 CNR_{EDFA} 为受掺铒光纤放大器附加噪声限制时对应的载噪比,它来源于掺铒光纤放大器的放大自发辐射(ASE)噪声,主要表现为信号-自发辐射(σ_{s-sp}^2)之间和自发辐射-自发辐射(σ_{sp-sp}^2)之间的差拍噪声,可表示成^[4]:

$$CNR_{EDFA} = \frac{1}{2} m^2 R_0^2 P_s^2 / (\sigma_{s-sp}^2 + \sigma_{sp-sp}^2) B \quad (2)$$

$$\sigma_{s-sp}^2 = 2R_0^2 P_s [NF(G-1)h\nu\alpha] = 2R_0^2 P_s S_{ASE}(\nu_s)\alpha \quad (3)$$

$$\sigma_{sp-sp}^2 = R_0^2 [NF(G-1)h\nu\alpha]^2 \Delta\nu = R_0^2 S_{ASE}^2(\nu_s)\alpha^2 \Delta\nu \quad (4)$$

式(2)~(4)中 R_0 为光检测器(PIN)的响应度, m 为光调制指数, B 为视频带宽, P_s 为接收机接收到的光功率, α 为掺铒光纤放大器到接收机之间的损耗, $h\nu$ 为信号光子能量, G 、 NF 分别为掺铒光纤放大器的增益和噪声指数, $S_{ASE}(\nu_s)$ 为信号带宽内的放大自发辐射功率谱密度, $\Delta\nu$ 为放大自发辐射噪声等效带宽,当有放大自发辐射滤波器时即为滤波器带宽。由(3)式, (4)式可看出, $s-sp$ 噪声与接收机接收到的光功率有关,与放大自发辐射的噪声带宽无关,而 $sp-sp$ 噪声则相反,但它们均与掺铒光纤放大器的工作状态(G 、 NF)有关,当掺铒光纤放大器进入饱和工作状态时,信号光对放大自发辐射具有抑制作用, $S_{ASE}(\nu_s)$ 减小,从而掺铒光纤放大器的附加噪声小,但当掺铒光纤放大器深度饱和时(如用作功率提升放大器),虽然信号光对放大自发辐射的抑制作用更强,但这时 $s-sp$ 噪声起主要作用,使得掺铒光纤放大器附加噪声增大,这与掺铒光纤放大器深度饱和时 NF 显著增大的结果一致(见图 2)。图 3 所示的试验结果与以上分析非常吻合,在接收机接收到的光功率远高于其灵敏度时,50 km 处中继 ($G = 23$ dB) 掺铒光纤放大器的附加噪声引起的系统信噪比下降约 1 dB,当在 25 km 处中继 ($G = 18$ dB) 时,系统信噪比与未用掺铒光纤放大器时基本相同,而当掺铒光纤放大器用作功率提升放大器 ($G = 12$ dB) 时,系统信噪比下降约 1~2 dB,由此可见,饱和工作掺铒光纤放大器的附加噪声对系统信噪比的影响不大,但影响程度与掺铒光纤放大器的工作点有关。

克服掺铒光纤放大器附加噪声以满足系统信噪比的要求,是以损失系统功率预算、降低接收机接收灵敏度为代价的,这可从试验测得的掺铒光纤放大器提供的增益所增加的功率预算大于系统所增加的传输距离对应的损耗值看出。为此,在保持 56 dB 系统信噪比时,对功率代价与掺铒光纤放大器增益之间的关系进行了研究,结果如图 4 所示。由图可见,当掺铒光纤放大器增益较低时,功率代价不大,当增益为 15~20 dB 时,功率代价可忽略,而当增益较高(掺铒光纤放大器未饱和或刚刚饱和)时,功率代价急骤上升。

综上所述可见,应用掺铒光纤放大器增加模拟光纤传输系统的功率预算,应从它的增益和噪声两方面来权衡,在保证其高增益的同时,通过优化工作点使附加噪声最小。试验发现掺铒光纤放大器在 10 dB 小信号增益压缩时(对应于约 25 km 处中继)传输距离最长,且附加噪声最小,图 5 给出了在 25 km 处接入掺铒光纤放大器经 185 km 传输后的接收端光谱。

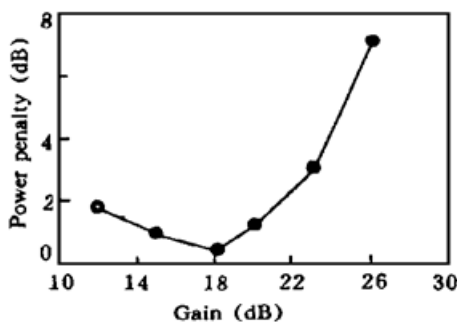


Fig. 4 Power penalty as a function of the EDFA gain

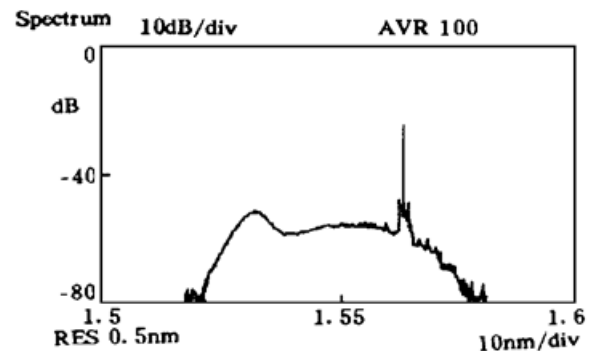


Fig. 5 The spectrum at the system output

3.2 微分增益(DG)、微分相位(DP)

系统未接掺铒光纤放大器前,测得传输系统的微分增益、微分相位分别小于 1% 和 0.8° ,表明发射机、接收机以及传输光纤色散等因素引起的系统失真小。用掺铒光纤放大器作为发端功放经 160 km 光纤传输和作为中继放大在 25 km、50 km 接入经 185 km 光纤传输,测得的微分增益、微分相位仍然都小于 1% 和 0.8° ,即试验未测出它的附加失真。掺铒光纤放大器的附加失真主要由其增益斜率与光源非线性相互作用引起的复合二次失真决定。尽管试验所用信号源 DFB-LD 的中心波长($1.563 \mu\text{m}$)远离掺铒光纤放大器的增益谱峰处的波长($1.552 \mu\text{m}$),但在系统试验中,掺铒光纤放大器均工作在深度饱和区,这时的动态增益谱较平坦,信号中心波长处的增益斜率较小,因而其附加失真可以忽略。

顺便指出,为了测量的方便,系统试验中使用了多个活动连接器,其附加损耗约 5~7 dB,试验测得 185 km 的光纤线路 13 km/Disk 总损耗为 43 dB,该附加损耗对系统的传输距离影响较大(约 30 km),并且,其端面反射等因素对系统的信噪比、微分增益和微分相位大小也有影响。

结论 通过实验研究,发现掺铒光纤放大器用于多路调频频分复用模拟电视光纤传输系统时,系统的传输距离大大增加,饱和工作的掺铒光纤放大器的附加噪声小,但最大传输距离和附加噪声均与它的工作点有关,在 10 dB 小信号增益压缩时应用,传输距离最长,且附加噪声可忽略,系统试验未发现饱和工作掺铒光纤放大器的附加失真。此外,将利用国产器件研制的实用化掺铒光纤放大器作为系统的功放和中继放大,分别成功地进行了 185 km 和 215 km 两路电视信号的光纤传输试验,主要传输质量指标高于 CATV 要求。

参 考 文 献

- [1] W. I. Way, Subcarrier multiplexed lightwave system design considerations for subcarrier loop application. *J. Lightwave Technol.*, 1989, 7(11) : 1806~ 1817
- [2] K. Nakagawa, S. Nishi, K. Aida *et al.*, Trunk and distribution network application of erbium-doped fiber amplifier. *J. Lightwave Technol.*, 1991, 9(2) : 198~ 208
- [3] 毛庆和, 杨祥林, 张明德等, 1.48 μm LD 双向泵浦掺铒光纤放大器的研究. 中国激光, 1995, 22(4) : 249~ 252
- [4] P. M. Cabla, V. Lemaire, H. Krimmel *et al.*, 35 AM-VSB TV channels distribution with high signal quality using a 1480 nm doide-pumped erbium-doped fiber postamplifier. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, 3(10) : 56~ 58

The Practical EDFA and Its Application in Analog Optical Fiber Systems

Mao Qinghe Yang Xianglin Zhang Mingde Zhang Heyong
(*Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing 210096*)

Ding Tieqi Ma Zhenbei Zhang Shuangbin
(*Nanjing Institute of Post & Telecommunication, Nanjing 210003*)

(Received 2 February 1996; revised 19 April 1996)

Abstract The characteristics of noise and distortion on an erbium-doped fiber amplifier (EDFA) are investigated experimentally for using in optical FM frequency-division multiplexing (FDM) video systems. The transmission experiment at the signal-noise ratio of 56 dB over 180 km and 215 km were performed by using EDFA as a post-amplifier and an in-line amplifier.

Key words frequency-division multiplexing (FDM), erbium-doped fiber, amplifier, gain, signal-noise ratio (SNR).