

文章编号 : 0258-7025(2001)02-0179-04

新型副载波调制 EDFA 远程在线监控技术 的原理论证^{*}

刘 丹 厉 群 李 佟 刘小明 彭江得 周炳琨

(清华大学电子工程系 北京 100084)

提要 从理论和实验上论证了一种用于掺铒光纤放大器(EDFA)远程在线监控和判断级连 EDFA 系统级间断点位置的技术方案。该方案利用频移键控-频分复用(FSK-FDM)技术进行声频副载波调制,通过光强度调制实现远程在线 EDFA 监控信息随主信号的传输。实验测得在副载波调制度为 3% 和 15% 时,10 Gbit/s 波分复用(WDM)光传输系统的功率代价分别为 0.16 dB 和 0.86 dB。采用锁相技术,成功进行了 3% 调制度的监控信息解调。说明该方案可以实现对 5 级 EDFA 系统的监控。

关键词 掺铒光纤放大器,副载波调制,在线监控

中图分类号 :O 438 文献标识码 :A

Demonstration on Remote in-Service Supervision for in-Line EDFAs Based on Subcarrier Modulation

LIU Dan LI Qun LI Tong LIU Xiao-ming PENG Jiang-de ZHOU Bing-kun

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

Abstract A novel scheme for remote supervision of in-line EDFA and fault-location in EDFA cascaded system based on subcarrier modulation is theoretically proposed and experimentally demonstrated. In the scheme, FSK-FDM technique is used in subcarrier modulation, and the EDFA's supervisory information is transmitted by optical intensity modulation. In this 10 Gbit/s WDM transmission experiments, the system power penalty was 0.16 dB and 0.86 dB, while the subcarrier modulation degree was 3% and 15% respectively. With the technique of phase-lock, demodulation of supervisory information was realized while the modulation degree was 3%. The conclusion comes that this scheme can be applied in a long-haul WDM transmission system with five EDFAs cascaded.

Key words erbium-doped fiber amplifier(EDFA), subcarrier modulation, in-service supervision

1 引 言

掺铒光纤放大器(EDFA)是光纤通信系统中的关键器件,在波分复用(WDM)光通信系统、光缆电视(CATV)系统与光网络中有广泛的应用。其中,对在线 EDFA 的工作状态进行实时监控与管理以保证传输系统正常工作,是当今 EDFA 系统技术实用化过程中尚需解决的关键技术之一。

国际上对 EDFA 的监控技术进行了多年探索,已提出的技术方案有抽运源调制法^[1]、专用信道法、

布里渊放大法^[2]和偏振调制法^[3]等。本文提出一种基于副载波调制的远程监控技术方案。该方案利用频移键控-频分复用(FSK-FDM)技术,将 EDFA 的监控信息和话务信息调制于某一频率的副载波,并通过内插于 EDFA 中的光强度调制器加载到主信道上,然后在接收端对该频率副载波信号进行滤取、解调,从而实现 EDFA 在线工作状态的监控。根据系统监控管理的需要,每台 EDFA 的监控信息可以调制于不同的副载波频率,相当于每台 EDFA 各自拥有一个独特的标记,因而很容易实现对多级 EDFA 系统的监控。此外,由于监控信号附加于主信道上,可随着主信道进行交换和路由,特别适合于 WDM 全光网络。这种监控技术对 EDFA 的增益、噪

^{*} 国家自然科学基金(批准号 69782003)资助项目。

收稿日期:1999-11-01;收到修改稿日期:1999-12-06

声等性能影响很小,同时避免了抽运源调制法的抽运安全问题。而且,本方案无需在传输系统中设置专用波长监控信道,亦无需在 EDFA 中设置对监控信道的分波/合波、接收/发送的光-电-光转换装置,降低了系统及 EDFA 的成本。

本方案除了可以用于 EDFA 信息的监控外,还可以用于判断 EDFA 级连系统的断点位置。当断点位于某两个放大器之间时,断点前的 EDFA 输出光(包括信号与 EDFA 的 ASE)无法到达断点后的 EDFA,而断点后的 EDFA 尽管已经没有信号输入,但是它本身产生的 ASE 仍然被本级的副载波所调制并继续传输,因此在最终的监控信息接收端仍然可以检测到断点后各级的副载波频率,据此可以方便地知道断点出现在哪两级 EDFA 之间。

2 理论分析

利用副载波调制监控的 EDFA 结构如图 1 所示。在 EDFA 的两段掺铒光纤中间插入一个光强度调制器,该调制器的调制驱动信号是载有本台 EDFA 监控参量信息的某频率的副载波。主信道信号经过调制器后加载了本地监控参量信息,再经第二段光放大后输出。

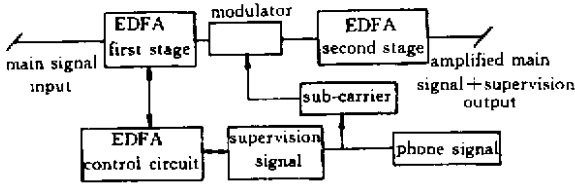


图 1 带有副载波调制的 EDFA 结构框图

Fig.1 Configuration of EDFA with sub-carrier modulation

理论上,无副载波调制时系统的误码率 BER 可表示为^[4]

$$BER = \frac{1}{\sqrt{2\pi}Q} \exp(-Q^2/2) \quad (1)$$

$$Q = (I_1 - I_0)(\sigma_1 + \sigma_0) \quad (2)$$

其中 I_1, I_0 分别为经接收机检测后“1”码和“0”码的平均光电流, σ_1 和 σ_0 为“1”码和“0”码相应的方差。当施加副载波调制且调制度为 m 时,最坏情况下系统的 Q 值可以用 Q' 表示为

$$Q' = [I_1(1 - m) - I_0(1 + m)](\sigma_1 + \sigma_0) \quad (3)$$

近似等于无调制时的 $(1 - m)$ 倍。当调制度为 m 时,为了使误码率恢复到无调制时的水平,需要提高进

入接收机的平均光功率,即增加了系统的功率代价。当调制度较小时,可以近似认为 σ_1 和 σ_0 与调制度无关,经过简单的推导,有如下关系

$$10\log[1/(1 - m)] = 10\log I' - 10\log I \quad (4)$$

其中 I 与 I' 分别为无调制时和调制度为 m 时进入接收机的平均光功率。等式(4)的右边即是调制度为 m 时的系统功率代价。据此,我们计算了系统功率代价与副载波调制深度的关系曲线,结果如图 2 实线所示。可见,当调制度从 0 增大到 20% 时,功率代价小于 1 dB。

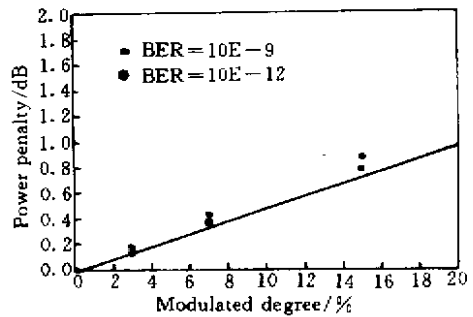


图 2 系统功率代价与副载波调制度关系的理论曲线与实验值

Fig.2 Power penalty versus sub-carrier modulation degree, theoretical and experimental values

本质上,所施加的副载波调制对主信道是一种干扰,对主信道的信噪比必定产生一定影响,从而产生一定的功率代价。如果调制深度太大,会使系统的误码特性恶化以至不可接受,但如果调制深度太小,则会对监控信号的解调造成很大困难。因此,此方案在系统中实用与否的技术关键是根据系统余量及副载波解调接收的灵敏度确定合适的调制深度。

3 实验论证

论证实验利用本系已有的 8×10 Gbit/s 波分复用实验系统的部分设备进行,如图 3 所示。选用的光发射机(Tx)的波长为 1553.4 nm,误码仪产生的伪随机-非归零码(PRBS-NRZ)作为发射机的调制信号,其码率为 10 Gbit/s,码长为 $2^{23} - 1$,从发射机出来的光信号的消光比为 12。光信号经过 8×1 复用器(MUX)后进入传输光纤,经过 60 km 的常规单模光纤传输后进入 EDFA。进入 EDFA 的光信号经过放大并施加副载波调制后,携带着放大器的监控信息进入下一段长度为 20 km 的传输光纤,再经解复用器(DEMUX)光衰减器(Attenuator)进入光接收机

(Rx)并由误码仪的接收端测量整个传输过程的系统误码率。

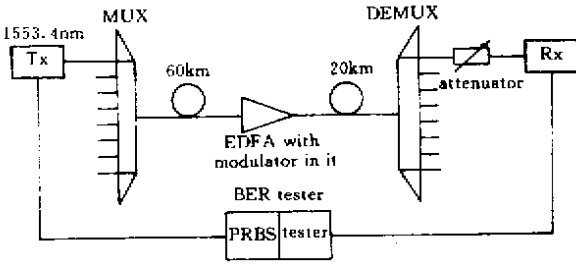


图 3 副载波调制 EDFA 远程在线监控技术方案原理论证实验系统框图

Fig.3 System scheme of remote in-service supervision for in-line EDFAs based on sub-carrier modulation

实验所用 EDFA 是一个由两段掺铒光纤级连内插光强度调制器的放大器。这里采用的调制器是本实验室研制的新型光纤熔锥型声光调制器^[5]。这种调制器采用普通单模光纤融烧制成,与光纤系统兼容性好,插入损耗小。调制器的工作频率受器件结构、声光耦合建立时间等因素的影响,插入 EDFA 后,其频率特性还受 EDFA 瞬态特性的影响。调制器插入 EDFA 后实测工作频率范围为 5 ~ 50 kHz,插入损耗 < 0.1 dB。传输实验中选取声波频率为 2 MHz,副载波调制频率为 17.6 kHz。对副载波进行频移键控(FSK)调制的信号码率为 1200 bit/s。未加副载波调制时 EDFA 的小信号增益为 31.3 dB,输出功率为 13.2 dBm,噪声系数为 4.3 dB。

在调制度分别为 0%、3%、7% 和 15% 的情况下实验测量的误码率曲线如图 4 所示。可见,随着调制度加大,调制所带来的功率代价逐步加大。以误码率等于 10^{-12} 为参考,调制度为 3% 和 15% 时,功率代价分别为 0.16 dB 和 0.86 dB。实际系统中,接收机灵敏度已经固定,则随着调制度增加误码率上升。从图 4 还发现随着调制度增大,误码曲线变得越来越平缓。造成这一现象的原因是当接收机接收信号功率较小时,接收机噪声对系统误码的贡献大于副载波调制的贡献,而当接收信号功率较大时,情况正好相反。为与理论结果比较,相应于误码率分别为 10^{-9} 和 10^{-12} 的情况下,上述几种调制度时的功率代价用实心点示于图 2。可以看出当调制度较小时,实验结果与理论计算的结果基本吻合;当调制度较大时,实验测量值略大于理论计算值。这是因为理论计算时忽略了“1”码和“0”码的方差 σ_1 和 σ_0

受调制度影响,这一影响还随调制度的增大而增大。另外,从图 2 可以看出,误码率为 10^{-9} 时调制所引入的功率代价要略小于误码率为 10^{-12} 时的功率代价,这是因为随着调制度增大,误码曲线变得越来越平缓的缘故。

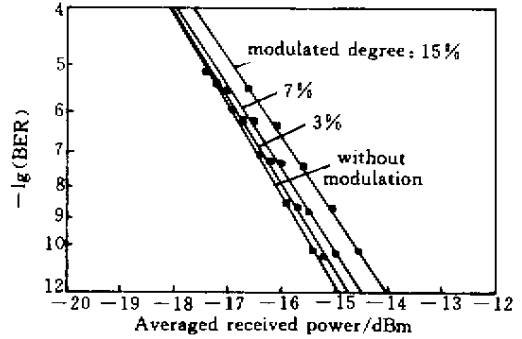


图 4 不同调制度下系统的误码率特性

Fig.4 BER of system under different sub-carrier modulation degree

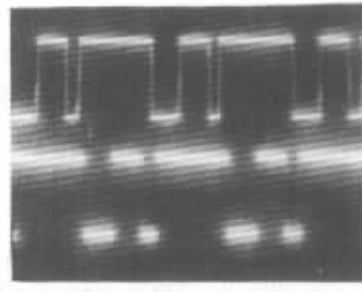


图 5 副载波解调信号(上)与调制信号(下)波形

Fig.5 Sub-carrier wave forms of demodulated(upper) and modulating(lower)

在我们的实验系统中,副载波的信号处理采用了锁相解调技术,结果在 3% 的调制度下,仍成功地对 FSK 信号进行了解调。图 5 中上半部的信号波形是从示波器上观察到的解调后得到的信号,下半部的信号波形是作为参考的初始调制信号。可见 3% 的调制度足以满足监控信号正常接收的要求。如果每级 EDFA 的调制度为 3%,经过 5 级 EDFA 级连后总调制度最坏不大于 15%,根据图 4 所示实验结果,系统总的功率代价仍低于 1 dB。也就是说,采用副载波调制方案,在 5 级 EDFA 级连后引入的功率代价小于 1 dB。

4 结 论

论证了一种简单而有效的副载波调制实现 EDFA 远程监控的新方法,它仅需在 EDFA 中插入一

个低频光强度调制器即可实现。除了对 EDFA 的工作参量进行监控外,还可以用于判断 EDFA 级间断点的位置。我们分别从理论和实验上研究了副载波调制对 10Gbit/s 光传输系统误码特性的影响。当调制制度分别为 3% 和 15% 时,系统功率代价分别为 0.16 dB 和 0.86 dB。结果表明,该技术完全可以实现对 5 级以下 EDFA 级连传输系统的远程监控。

致谢 在传输实验中,得到了谢世钟教授和董毅、王晖、吕利平等同志的大力支持,与周立嵩同学的讨论也使我们受益非浅,在此对他们表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 J. Freeman, J. Conradi. Gain modulation response of erbium-doped fiber amplifiers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, 5(2) 224 ~ 226
- 2 Y. Sato, Y. Yamabayashi, K. Aoyama. A supervisory channel scheme for EDFA transmission systems that uses brillouin amplification. *J. Lightwave Technol.*, 1993, 11(10):1652 ~ 1658
- 3 S. Matsuoka, Y. Yamabayashi, K. Aida *et al.*. Supervisory Signal Transmission Methods for Optical Amplifier Repeater Systems. *IEEE GLOBECOM '90*, San Diego, CA, pp. 1846 ~ 1850, Dec 2 ~ 5, 1990
- 4 E. Desurvire. *Erbium-doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications*, New York: Wiley, 1994. 179
- 5 Qun Li, Tong Li, Wei Yuan *et al.*. Acousto-optic Switch Based on Single-Mode Fiber Tapers. *Proceedings of APCC/OECC '99*, Vol. 2, Oct. 1999. 1467 ~ 1470