

文章编号: 0258-7025(2008)04-0582-05

# 自适应调制的正交频分复用多模光纤 通信系统性能分析

李兆玺 胡贵军 孔令杰

(吉林大学通信工程学院光通信系, 吉林 长春 130012)

**摘要** 随着短距离通信网的不断发展,多模光纤(MMF)已经成为实现高速大容量信息传输的理想介质,但多模光纤严重的模式色散限制了其传输能力。为了提高多模光纤的传输能力,设计了基于自适应调制(AM)的正交频分复用(OFDM)多模光纤通信系统。提出了适用于该系统的自适应比特分配算法,并通过仿真证明了该算法的有效性。在此基础上重点分析了自适应调制对系统性能的影响,对比了自适应前后不同传输速率、不同信道情况下的误码特性。结果表明,自适应调制能较好地克服深衰落点对系统性能的影响,有效降低了系统误码率(BER)。

**关键词** 光通信;自适应调制;正交频分复用;多模光纤

中图分类号 TN 929.11 文献标识码 A

## Performance Analysis of a Multimode Fiber Communication System Based on the Adaptive Modulation Orthogonal Frequency Division Multiplexing

Li Zhaoxi Hu Guijun Kong Lingjie

(Department of Optics Communication, College of Communication Engineering,  
Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China)

**Abstract** With the development of short distance communication network, multimode fiber (MMF) has become a ideal medium to realize high-speed transmission of information with large-capacity. But the severe model dispersion of the MMF restrict its transmission ability. To improve the transmission ability of the MMF, a MMF communication system based on adaptive modulation (AM) orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) is designed. An adaptive bit loading algorithm which is fit for this communication system is proposed. Simulation is done to validate the feasibility of the algorithm. Based on the given system, the effect of adaptive modulation to the transmission performance of the system is emphatically analyzed. And the bit error rate (BER) curves of different bit rates, different transmission performance with and without adaptive modulation are compared. The result shows that adaptive modulation can improve the transmission performance of the system effectively, and overcome the effect of deep fading nulls very well.

**Key words** optical commuicaion; adaptive modulation; orthogonal frequency division multiplexing; multimode fiber

### 1 引言

随着通信业务的不断增长,短距离通信网的完善越来越受到人们的关注,光纤到户、光纤到桌面已经是光通信发展的必然趋势。多模光纤(MMF)具有数值孔径大、连接时容易对准、与之配套的器件成本较低等诸多优点,成为短距离光纤通信的首选传输媒质。但多模光纤存在严重的模式色散,使其传

输能力受限<sup>[1]</sup>。目前,人们提出了一些提高多模光纤传输能力的新技术<sup>[2,3]</sup>,其中,基于正交频分复用(OFDM)技术的多模光纤通信技术能很好地利用多模光纤的高频带通区域实现大容量信息传输,是一种很有实用前景的新技术<sup>[4,5]</sup>。但正交频分复用技术并不能克服多模光纤高频区域深衰落点对系统性能的影响。针对这一问题,本文对基于自适应调制

收稿日期:2007-09-10;收到修改稿日期:2007-10-26

作者简介:李兆玺(1984—),女,吉林人,硕士研究生,主要从事光通信方面的研究。E-mail:Lizhaoxi23@163.com

导师简介:胡贵军(1970—),男,辽宁人,教授,硕士生导师,主要从事光电子及光通信方面的研究。

E-mail:huguijun2000@yahoo.com.cn (通信作者)

(AM)的正交频分复用多模光纤通信系统进行了深入的研究,发展了一种适合正交频分复用多模光纤通信系统的自适应比特分配算法。这对提升多模光纤传输能力、推进短距离通信网络的光纤化进程具有实际意义。

## 2 正交频分复用多模光纤通信系统功能实现原理

### 2.1 正交频分复用原理

正交频分复用技术是一种特殊的多载波复用技术,它是将串行的高速数据码流变换为  $N$  路并行的低速码流,每个码流都用不同的副载波发送,每个副载波可以采用不同的调制方式(相位键控(PSK)或多进制正交幅度调制(MQAM))。正交频分复用的调制过程如下:设码元周期为  $T_s$ ,子信道数为  $N$ 。经过串/并变换后,分配给每个子信道的数据符号为  $d_i$ (如图 1 所示),载波频率为  $f_c$ ,其中,  $f_i = f_c + i/T$ 。则从  $t = t_s$  开始的正交频分复用符号可以表示为

$$s(t) = \text{Re}\left\{ \sum_{i=0}^{N-1} d_i \exp\left[j2\pi\left(f_c + \frac{i}{T}\right)(t - t_s)\right] \right\}, \quad t_s \leq t \leq t_s + T \quad (1)$$

若用基带信号来描述,则

$$s(t) = \sum_{i=0}^{N-1} d_i \exp\left[j2\pi \frac{i}{T}(t - t_s)\right], \quad t_s \leq t \leq t_s + T, \quad (2)$$

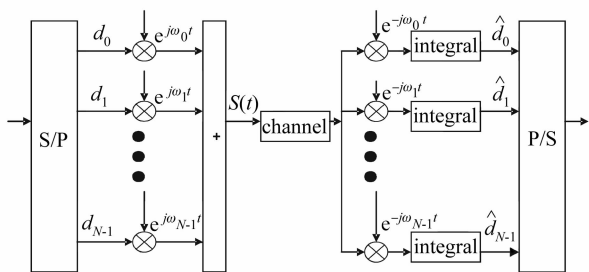


图 1 正交频分复用原理框图

Fig.1 Schematic diagram of the OFDM

从以上可以看出,正交频分复用信号的形成过程可以通过快速傅里叶逆变换(IFFT)和快速傅里叶变换(FFT)来实现<sup>[6]</sup>。具体的第  $k$  个副载波信号的解调过程为:将接收信号与第  $k$  个解调载波  $\exp[-j2\pi \frac{j}{T}(t - t_s)]$  相乘。然后在时间长度  $T$  内积分就可以恢复出原信号

$$\hat{d}_j = \frac{1}{T} \int_{t_s}^{t_s+T} \exp[-j2\pi \frac{j}{T}(t - t_s)] \times$$

$$\sum_{i=0}^{N-1} d_i \exp\left[j2\pi \frac{i}{T}(t - t_s)\right] dt = \frac{1}{T} \sum_{i=0}^{N-1} d_i \int_{t_s}^{t_s+T} \exp\left[j2\pi \frac{i-j}{T}(t - t_s)\right] dt = d_j. \quad (3)$$

### 2.2 自适应调制的正交频分复用多模光纤通信系统

基于自适应调制的正交频分复用多模光纤通信系统如图 2 所示,信源发出的串行高速数据流根据接收端反馈得到的信道信息分配到各个副载波上。其中信道信息是通过信道估计模块实现的<sup>[7]</sup>。比特分配的参数由自适应比特分配算法得到,比特分配的过程即是调制方式的确定过程。映射后的信号经过快速傅里叶逆变换,加循环前缀(CP),并/串变换后,由马赫-曾德尔调制器(MZM)将电信号转化为光信号,耦合入多模光纤传输。接收端首先由光电探测器(PIN)把光信号转化为电信号,然后采取与发送端相对应的变换即可恢复出原始信号。

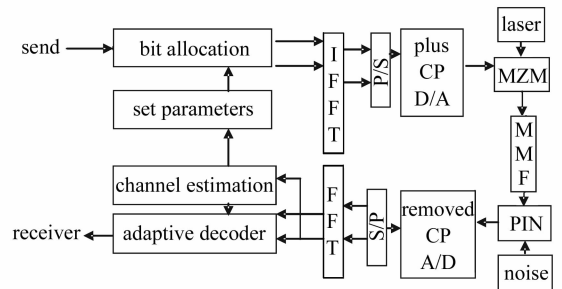


图 2 自适应调制的正交频分复用多模光纤通信系统  
Fig.2 A MMF communication system based on the adaptive modulation OFDM

## 3 适用于正交频分复用多模光纤通信系统的自适应算法

要将自适应调制技术用于正交频分复用多模光纤通信系统中,首先要在发送端及时了解信道信息,根据信道响应合理分配传输比特,在信道特性平坦的副载波上通过提高调制阶数多传信息,在信道特性较差时通过降低调制阶数少传甚至不传信息,从而合理分配比特,改善系统性能。在实际系统中可以通过信道估计来获取信道信息。假设信道状态已知,重点分析自适应调制技术对系统性能的影响。自适应调制的算法很多<sup>[8-10]</sup>,有的算法复杂度取决于每个正交频分复用符号的比特数,当副载波数较大时,算法的速度很慢,有的算法采用的标准是使信道容量最大化,而正交频分复用多模光纤通信系统

要达到的目标是在要求的误码率(BER)范围内达到高速的数据传输。这些算法都不适用于该系统,因此提出了一种适用于正交频分复用多模光纤通信系统的自适应比特分配算法。该算法是在保证传输速率不变的情况下,根据选定误码率条件下的信噪比(SNR)门限值来分配比特。该算法仅需少量迭代就可以达到最终分配结果,计算量很小。算法中采用的调制方式取自集合{不调制,二进制相位键控(BPSK), 4QAM, 8QAM, 16QAM, 32QAM,

64QAM},分别携带的比特数对应集合{0,1,2,3,4,5,6}。由二进制相位键控和多进制正交幅度调制对应的误码率公式

$$P_{\text{BPSK}} = \text{erfc}(\sqrt{2r}), \quad (4)$$

$$P_{\text{MQAM}} = \left(1 - \frac{1}{L}\right) \text{erfc}\left(\frac{3}{L^2 - 1}r\right)^{1/2}, \quad (5)$$

式中  $r$  为信噪比,  $L = \text{lb}M^{[11]}$ 。给出不同目标误码率要求下的信噪比门限值如表 1 所示(目标误码率为  $10^{-6}$ )。算法的具体流程图如图 3 所示。

表 1 不同目标误码率要求下的信噪比门限值

Table 1 Threshold SNR under different target BER (SNR: dB)

	BPSK	4QAM	8QAM	16QAM	32QAM	64QAM
$10^{-1}$	-1.6973	1.3114	4.5962	7.5089	10.257	12.138
$10^{-2}$	2.2011	5.2114	8.7128	11.847	14.836	16.964
$10^{-3}$	4.3136	7.3239	10.881	14.082	17.118	19.346
$10^{-4}$	5.7797	8.79	12.39	15.621	18.7	20.918
$10^{-5}$	6.8823	9.8926	13.509	16.758	19.854	22.088
$10^{-6}$	7.7685	10.779	14.406	17.667	20.773	23.017

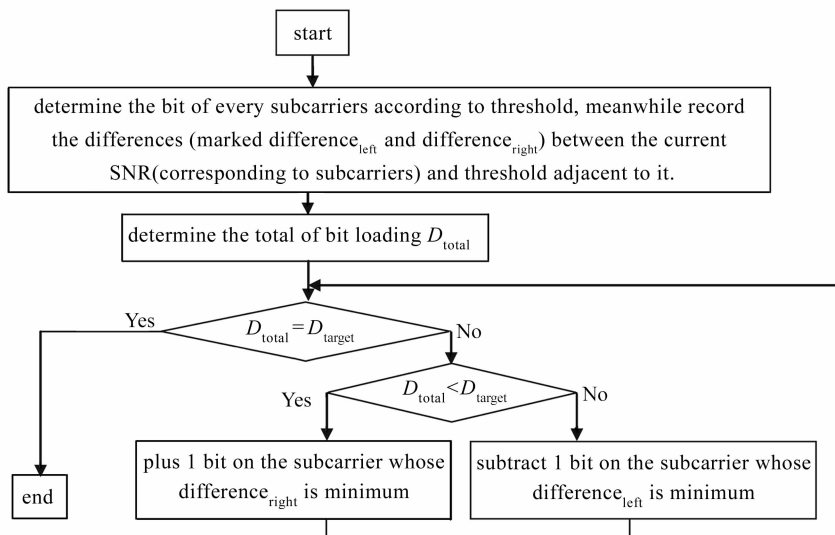


图 3 自适应比特分配算法流程图

Fig. 3 Adaptive bit allocation algorithm flow chart

表 2 正交频分复用多模光纤系统链路部分仿真参数

Table 2 Simulation parameters of OFDM MMF link of the system

Parameter	Value	Parameter name	Value
Length of IFFT/FFT	64	Fiber type	MMF
Number of subcarrier	31	Length of fiber 1 /km	1
OFDM symbol period /ns	6.4	Length of fiber 2 /km	2
Length of cyclic prefix /ns	1.6	Differential mode delay /(ns/km)	2
Total symbol period /ns	8	Fiber loss /(dB/km)	1
Modulation mode	{Not modulation, BPSK, MQAM}	Modulator type	MZI
		Photodetector type	PIN
Transmission rate /(Gbit/s)	11.625	Responsivity of photodetector /(mA/mW)	0.9
Bandwidth-distance product /(MHz · km)	300	Thermal noise current / $\mu$ A	0.8

### 4 自适应比特分配结果

图 4(b)和图 5(b)分别仿真了频率响应特性优劣不同的两条多模光纤信道的自适应比特分配结果。其中光纤 1 频率响应特性较平坦,深衰落点少;光纤 2 频率响应特性相对较差,深衰落点较多。系

统的部分仿真参数如表 2 所示。从图中可以看出,图 3 所示的自适应算法有效地实现了自适应比特分配,能够根据信道特性合理分配比特,在信道特性较好时多分配比特,在信道特性较差时少分配甚至不分配比特。

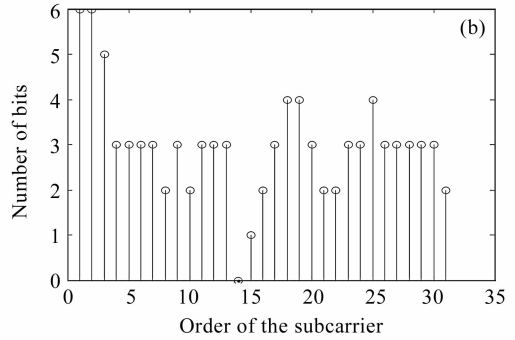
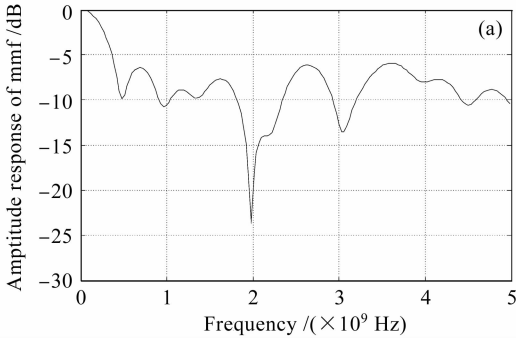


图 4 光纤 1 的频率响应(a)和比特分配结果(b)

Fig. 4 Frequency response (a) and bit loading result (b) of fiber 1

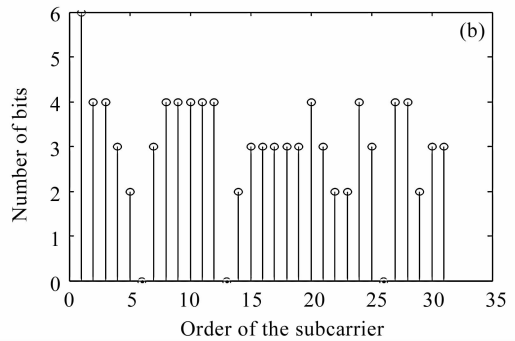
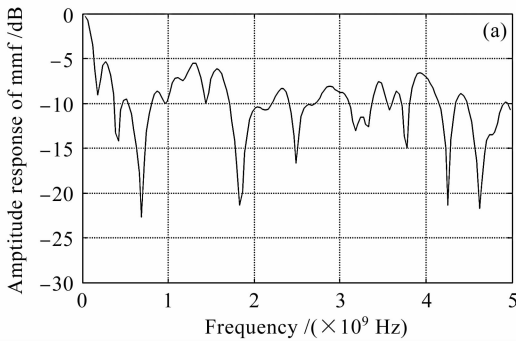


图 5 光纤 2 的频率响应(a)和比特分配结果(b)

Fig. 5 Frequency response (a) and bit loading result (b) of fiber 2

### 5 自适应调制对系统性能的影响

图 6 仿真了不同光纤采用自适应调制前后系统的误码率曲线。在不采用自适应调制时,信道深衰落点较多的光纤 2 与信道特性较好的光纤 1 相比,其系统的误码性能明显变差。由此可知,深衰落点

是影响系统性能的主要因素。光纤 1 深衰落点少系统误码率较低;光纤 2 深衰落点多系统误码率较高。采用自适应调制后,光纤 2 和光纤 1 的系统误码率都有明显降低,并且其误码率曲线较为接近。原因分析如下:经过自适应调制实现了好信道多传信息,坏信道少传信息,落在深度衰落点的信道不传信息,这样消除了深衰落点的影响,使系统性能得到提高。虽然光纤 2 的深衰落点比光纤 1 的多,但由于自适应调制有效地消除了信道优劣不同对系统误码性能的影响,导致其误码率曲线较为接近。由此可以得出结论:自适应调制有效地克服了深衰落点对系统性能的影响,降低了系统误码率。

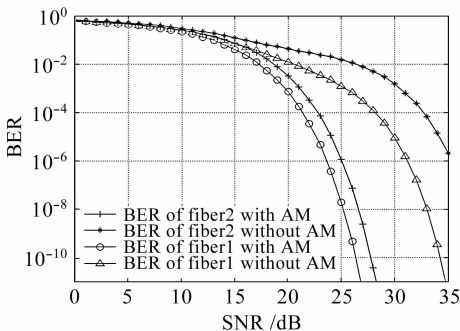


图 6 不同光纤自适应前后的系统误码率曲线

Fig. 6 BER of different fibers with and without AM

图 7 仿真了采用自适应调制后不同光纤在不同传输速率下的系统误码特性。从图 7 可以看出,速率提高,系统的误码率变大。这是因为在发射功率一定的条件下,传输速率越高每比特所占的功率越

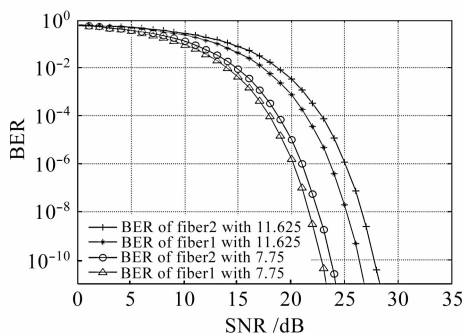


图 7 不同光纤不同速率下的系统误码率曲线

Fig. 7 BER of different fibers with different bit/s

低,即信噪比越低,误码率增大。由图 7 还可以看出,无论是在高速还是低速时,光纤 1 和 2 误码率曲线都较为接近,这也表明,无论是在高速还是低速条件下自适应调制都可以减小深衰落点对系统性能的影响,有效地降低系统误码率。

## 6 结 论

针对目前提升多模光纤传输能力的热点进行了深入的研究。设计了带有自适应调制功能的正交频分复用多模光纤通信系统。并提出了适用于该系统的自适应比特分配算法。通过仿真分析了自适应调制对系统性能的影响。结果表明,自适应调制技术有效地克服了深衰落点对系统性能的影响,降低了系统误码率,为提升多模光纤通信系统的性能找到了一种行之有效的方案。

## 参 考 文 献

- 1 L. Raddatz, I. H. White, D. G. Cunningham *et al.*. Influence of restricted mode excitation on bandwidth of multimode fiber links [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(4):534~536
- 2 M. Webster, L. J. Sargent, P. Dawd *et al.*. Mode-controlled

vertical cavity surface emitting lasers for bandwidth enhancement of multimode fibre links [C]. *Conference on Laser and Electro-Optics*, 1998, **14**(18):33~36

- 3 L. J. Sargent, M. Webster, I. H. White *et al.*. Spatial emission control of vertical cavity surface emitting lasers to provide bandwidth gain in multimode fibre links using a simple alignment technique [J]. *Semiconductor Laser Conference*, 1998, **4**(8):241~242
- 4 H.-G. Yeh, V. R. Ramirez. Implementation and performance of a M-ary PSK and QAM-OFDM system in a TMS320VC5416 digital signal processor [C]. *Second International Conference on Digital Telecommunications 2007*, **1**:21~27
- 5 Fang Zujie, Ye Qing, Liu Feng *et al.*. Progress of millimeter wave subcarrier optical fiber communication technologies [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4):481~488
- 方祖捷,叶青,刘峰等.毫米波副载波光纤通信技术的研究进展[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4):481~488
- 6 Cong Yuliang, Wang Hongzhi. Principle of Digital Signal Processing and the Implementation of MATLAB [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. 89~97
- 丛玉良,王宏志.数字信号处理原理及其 MATLAB 实现[M].北京:电子工业出版社,2005. 89~97
- 7 Hou Xiaoxin, Wu Junli, Yin Changchuan *et al.*. Adaptive modulation with channel estimation in highspeed packet-based OFDM communication systems [J]. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2004, **11** (Suppl.):77~82
- 8 Tong Xuejian, Luo Tao. OFDM Mobile Communication Theory and Application of Technology [M]. Beijing: Posts and Telecommunication Press, 2003. 123~133
- 佟学俭,罗涛. OFDM 移动通信技术原理与应用[M].北京:人民邮电出版社,2003. 123~133
- 9 Xiao Jianhua, Zhang Ping. Adaptive modulation for variable-rate OFDM system with imperfect channel knowledge [J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2003, **26**(3):16~19
- 肖建华,张平.非精确信道状态信息下 OFDM 系统中的自适应调制技术[J]. *北京邮电大学学报*, 2003, **26**(3):16~19
- 10 Andreas Czylwik, Deutsche TelekomAG. Adaptive OFDM for wideband radio channels [J]. *IEEE Trans. on Commun.*, 1996, **43**(3):713~718
- 11 Fan Changxin, Zhan Daoyong, Xu Bingxiang *et al.*. Communication Principle [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1995. 158~160
- 樊昌信,詹道庸,徐炳祥等.通信原理[M].北京:国防工业出版社,1995. 158~160