

文章编号: 0258-7025(2009)03-0554-04

直接检测的光正交频分复用信号 光纤传输系统实验研究

陈林^{1,2} 曹子峥^{1,2} 董泽^{1,2} 余建军^{1,2}

(¹ 湖南大学计算机与通信学院, 湖南长沙 410082;
² 湖南大学微纳光电器件及应用教育部重点实验室, 湖南长沙 410082)

摘要 研制了直接检测的光正交频分复用(OOFDM)光纤传输实验系统。实验中产生了 2 Gbit/s 的正交相移键控(QPSK)、正交频分复用(OFDM)光信号,并成功地在标准单模光纤中传输了 200 km。测量得到在误码率为 10^{-6} 时,单模光纤传输 200 km 后的功率代价小于 2 dB。比较了光纤传输前后 OFDM 信号的波形、频谱以及星座图,发现光正交频分复用信号能很好地抵抗光纤中的色散效应。

关键词 光纤通信;光调制;正交频分复用;光正交频分复用

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093603.0554

Experimental Investigation of Direct-Detection Optical Orthogonal Frequency-Division Multiplexing Transmission System

Chen Lin^{1,2} Cao Zizheng^{1,2} Dong Ze^{1,2} Yu Jianjun^{1,2}

(¹ School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China
² Key Laboratory for Micro/Nano Opto-Electronic Devices of Ministry of Education, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract An experimental system of direct-detection optical orthogonal frequency-division multiplexing (OOFDM) signal transmission over fiber was successfully built. In this experiment, the 2 Gbit/s quadrature phase shift keying (QPSK) optical OFDM signals are generated and transmitted over 200 km in single-mode fiber. After transmission in single-mode fiber over 200 km the power penalty is less than 2 dB at the bit error rate of 10^{-6} . Comparing of waveform, electrical spectrum and constellation before and after transmission over fiber, the experimental results show that the optical OFDM signal can overcome the effect of chromatic dispersion in fiber.

Key words optical communication; optical modulation; orthogonal frequency-division multiplexing; optical orthogonal frequency-division multiplexing

1 引言

目前正交频分复用(OFDM)技术已成为高速宽带无线通信的优选方案,OFDM 可以采用商业化的 IFFT/FFT 芯片实现调制解调,易于与软件无线电、智能天线结合;可编程的数字信号处理器(DSP)能在多路子载频间灵活地实现自适应调制和功率分配,有效地按需分配带宽,提高射频(RF)的频谱利

用率;OFDM 抗多径衰落和窄带干扰特性明显;最近几年,由于 OFDM 的高频谱利用率和在无线信道中的抗多径干扰特性,成为 4G 移动通信技术的备选方案。自从 N. E. Jolley 等^[1]在 OFC2005 会议上提出利用 OFDM 结合调制技术来抵抗光纤色散的影响,尤其是用来补偿链路长度不确定的波分复用(WDM)光交换网络中的色散以来,人们开始

收稿日期: 2008-08-25; 收到修改稿日期: 2008-11-07

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z263),湖南省自然科学基金(06JJ50108),教育部光通信和光波技术重点实验室(北京邮电大学)开放基金资助。

作者简介: 陈林(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤通信系统及光网络等方面的研究。

E-mail: linchenhnu@hotmail.com

研究光正交频分复用技术(OOFDM), OOFDM 有望成为解决长距离大容量光纤通信系统中首选的调制格式^[2~4]。近年来有关 OOFDM 的研究, 主要采用仿真方法进行。如 2006 年, I. B. Djordjevic 等^[5]利用软件仿真证明, 利用现有器件, 采用 OFDM 技术, 可以实现 100 Gbit/s 的信号沿单模光纤传输 3480 km。2007 年, H. C. Bao 等^[6]在理论上证明采用 OOFDM 技术 10 Gbit/s 的信号可以沿单模光纤传输 4800 km 而无需色散补偿。从 2007 年后国际上开始出现有关 OOFDM 的实验研究报道, 目前 OOFDM 已成为国际光通信研究的热点^[7~9]。国内仅有 OFDM 光纤传输的理论和仿真报道^[10,11]。

本文报道了基带 OOFDM 光纤传输实验系统, 实现了速率为 2 Gbit/s 的基带 OOFDM 信号的产生并在光纤中传输 200 km 的实验。在接收端采用直接检测方法, 将光正交频分复用信号直接转化为电正交频率复用信号。

2 OOFDM 实验系统

2.1 整体方案

如图 1 所示为实验整体方案, OFDM 源是由计算机进行编程产生数据流, 然后通过任意波发生器转化为 OFDM 波形。在光发射机一端, 由可调谐激光器发出波长为 1559.7nm 的连续波光载波, 通过光调制器将 OFDM 源产生的 OFDM 信号调制到光载波上, 产生基带光 OFDM 信号, 经过长距离光纤传输后, 再将光 OFDM 信号经光电转换成电 OFDM 信号, 再将转换后的信号送往实时示波器进行采样并用计算机编程实现光正交频分复用信号的最终解调。

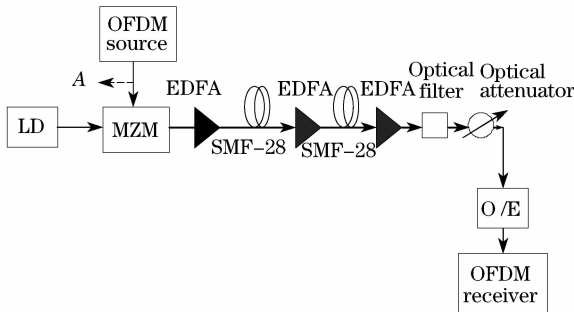


图 1 基带光正交频分复用实验系统

Fig. 1 Experimental setup of OFDM over fiber

2.2 OFDM 调制信号产生

数字信号的 OFDM 信号源如图 2 所示。包括两部分, 第一部分是生成一个用于传输用户数据的 OFDM 信号。首先, 将需要传输的伪随机码序

列按照系统特性进行帧形成, 将需要传输的数据按照特定数量打包, 并根据需要将符号进行多进制符号映射如采取正交相移键控(QPSK)映射(Mapper)。将数据帧映射为符号帧后, 在各个符号中加入导频(Pilot), 并将高频部分插零作为保护间隔(GI)。至此, 形成送往 IFFT 进行子载波成形所需要的符号帧。经过 IFFT 变换后形成的多正交子载波波形就是基本 OFDM 波形, 需要将这一波形的一部分复制到波形的头部作为克服信号时延的循环前缀(CP), 产生数据信号的 OFDM 信号。

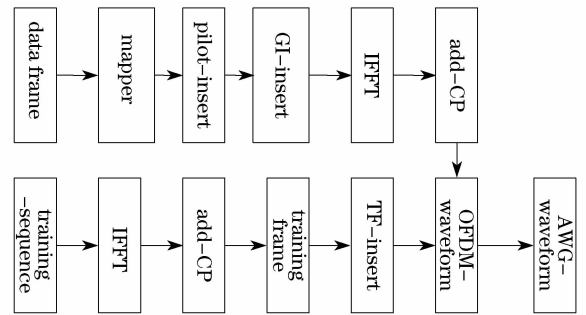


图 2 OFDM 信号产生原理

Fig. 2 Principle of OFDM signal generation

第二部分是训练字的 OFDM 信号的产生。主要目的在于生成一个用于同步和信道估计的功能型 OFDM 信号。首先, 根据需要形成一个训练字序列, 将这个序列直接通过 IFFT 形成子载波。将形成的多子载波波形的一部分复制到波形的头部作为循环前缀, 至此, 形成了训练字 OFDM 信号。

在完成以上两个步骤后, 将训练字 OFDM 复制在数据 OFDM 信号前形成一个完整 OFDM 信号。以上是由计算机进行编程产生的信号, 然后通过任意波发生器转化为 OFDM 波形。

2.3 OFDM 信号接收机

将光 OFDM 信号经过光电变换转换为电 OFDM 信号, 采用实时示波器对其电域波形进行采集, 再将采集后的数据送往计算机进行 OFDM 解调及数据分析。实验采用的 OFDM 解调原理如图 3 所示。首先将实时示波器采集下来的 OFDM 波形数据送往计算机, 通过对训练字的相关性估计实现粗同步, 以此确定数据 OFDM 信号开始的位置。根据帧长确定每帧数据, 并将数据送往 FFT 恢复除各个子载波的数据。这些数据包括导频和保护间隔, 再对这些数据进行导频抽取和去除保护间隔, 至此, 得到经过信道传输后未进行信

道估计的各自信道映射符号。将接收到的训练字和导频和理想的训练字和导频进行比较,估计出信道的特性,再对接受到的信道映射符号进行信道补偿,并对映射符号进行解映射以恢复出基带信号。在完成数据解调恢复之后,对接收到的数据进行错误适量分析,以此估计出在传输过程中映射符号所受到的信道的影 响。同时,将接收到的数据和发射端的数据进行比较,以得到系统传输的误码率。

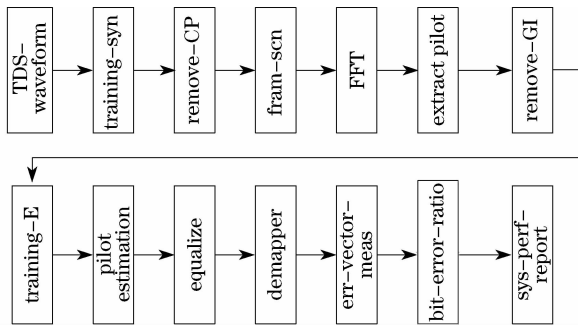


图 3 OFDM 接收机原理

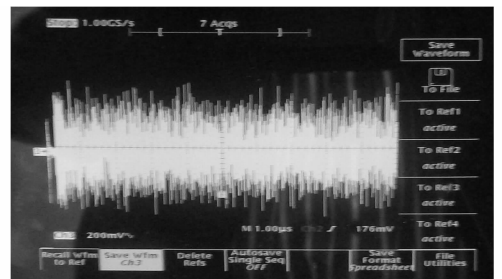
Fig. 3 Principle of OFDM receiver

3 实验结果及数据分析

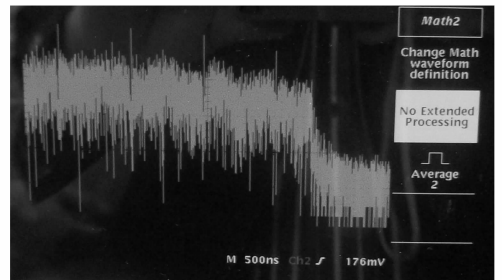
实验中生成的电域 OFDM 信号其子载波数为 256,调制方式为 QPSK。我们使用无信道编码、无加扰方式直接将 01 数据调制到子载波上。其中选用了 96×2 个子载波传输数据,8 个子载波作为导频插在各个子载波之间。剩余 56 个子载波一个作为直流载波被置零抑制,其他分别作为频域保护间隔分两组分别置于数据子载波两端,从而达到提高 OFDM 信号正交性、减少信道引起子载波频移的目的。

利用图 1 所示的实验装置,用 Tektronix

TDS684B 实时示波器和 Tektronix 2792 频谱仪分别测试 OFDM 信号的波形的频谱。在图 1 所示的 A 点测量得到发射端产生的速率为 2 Gbit/s OFDM 的波形和频谱的照片如图 4(a)和(b)所示,由于直接从仪器上抓拍的照片不是很清楚,且便于分析,下面的实验结果都是从测试仪器的存储器输出的数据用计算机绘制的。通过双臂铌酸锂强度调制,将电 OFDM 信号调制到光波上。然后,将 OFDM 信号通过 200 km 的光纤发送到接收端,再通过光电变换后,用 OFDM 接收机测量得到传输 200 km 以后的 OFDM 信号的波形和频谱,如图 5(a)和(b)所示。通过比较传输前后的波形和频谱图,可以发现光纤传输后 OFDM 信号的波形和频谱基本保持不变。



(a)



(b)

图 4 OFDM 信号的波形(a)及频谱图(b)照片

Fig. 4 Photograph for OFDM wave form

(a) and electrical spectrum (b)

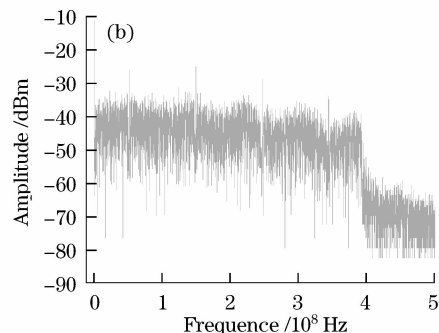
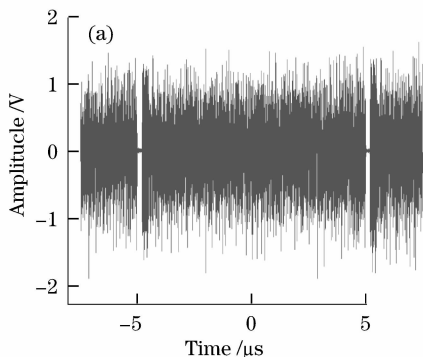


图 5 光纤传输 200 km 以后的 OFDM 波形(a)和频谱(b)

Fig. 5 OFDM wave form (a) and electrical spectrum (b) after 200 km optical transmission

为了进一步考察光纤传输对 OFDM 信号的影响,测量得到了光纤传输 200 km 以后的 OOFDM 信号的误码率与接收光功率关系曲线,如图 6 所示。实验中,采用的光纤为 G. 652 标准单模光纤,损耗系数为 0.19 dB/km,色散系数为 17/(nm·km)。将 200 km 光纤分二段传输,进入第一个 100 km 段光纤的入纤功率为 0 dBm,进入第二段光纤前加 EDFA 进行放大,进入光纤的光功率仍然为 0 dBm,在接收机再加一个预放大器,之后加一个带宽为 1 nm 的光滤波器进行滤波,再加光衰减器用以调节进入光接收机的光功率。采用带宽为 7 GHz 的光接收机将 OOFDM 信号转化为电信号。通过图 6 可以发现,当误码率在 10^{-6} 时,功率代价低于 2 dB,

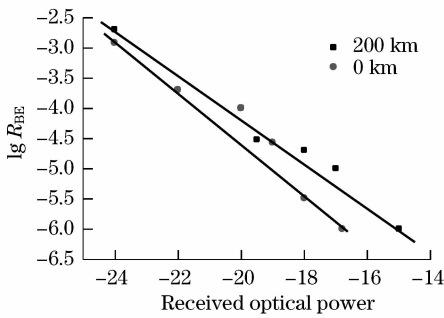


图 6 光纤传输 200 km 前后的误码率

ig. 6 BER cure before and after 200 km fiber transmission

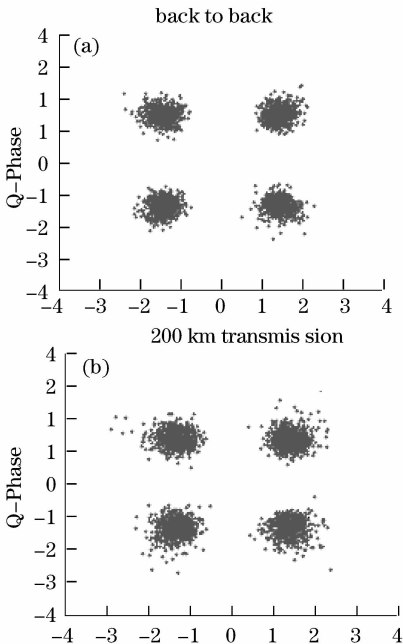


图 7 光纤传输前后星座图。(a) 0 km; (b) 200 km

Fig. 7 Constellation of OFDM before (a) and after (b) 200 km fiber transmission

这是由于光信噪比下降引起的。得到光纤传输前后 OFDM 信号的星座图,如图 7 所示,经过光纤传输后由于信噪比降低星座图有一些发散,说明光纤的色散产生了一定的相位噪声。

4 结 论

建立 QPSK OFDM 光传输实验系统,测量得到了速率为 2 Gbit/s 的 QPSK OFDM 信号在光纤中传输 200 km 前后的波形和频谱图,当误码率在 10^{-6} 时,功率代价低于 2 dB,说明该系统是可行的。

参 考 文 献

- 1 N. E. Jolley, H. Kee, R Rickard *et al.*. Generation and propagation of a 1550 nm 10 Gbit/s optical orthogonal frequency division multiplexed signal over 1000 m of Multimode fibre using a directly modulated DFB[C]. *OFC, OFP3, Anaheim, CA*, 2005
- 2 J. M. Tang, P. M. Lane, K. A. Shore. Transmission performance of adaptively modulated optical OFDM signals in multimode fiber links[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(1): 205~207
- 3 A. J. Lowery, L. Du, J. Armstrong. Orthogonal frequency division multiplexing for adaptive dispersion compensation in long-haul WDM systems[C]. *OFC 2006, Postdeadline paper, PDP 39*
- 4 I. B. Djordjevic, B. Vasic. Orthogonal frequency division multiplexing for high-speed optical transmission [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**: 3767~3775
- 5 Ivan B. Djordjevic, Bane Vasic. 100-Gb/s transmission using orthogonal frequency-division multiplexing [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006,**18**(15): 1576~1578
- 6 H. C. Bao, W. Shieh. Transmission of wavelength-division-multiplexed channels with coherent optical OFDM [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(12): 922~924
- 7 W. Shieh, X. Yi, Y. Tang. Experimental demonstration of transmission of coherent optical OFDM systems[C]. *OFC 2007, paper OMP2*
- 8 Brendon J. C. Schmidt, Arthur James Lowery, Jean Armstrong. Experimental demonstrations of electronic dispersion compensation for long-haul transmission using direct-detection optical OFDM[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(1): 198~203
- 9 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
- 10 Li Zhaoxi, Hu Guijun, Kong Lingjie. Performance analysis of a multimode fiber communication system based on the adaptive modulation orthogonal frequency division multiplexing [J]. *Chineses J. Lasers*, 2008, **35**(4): 582~586
- 11 Li Zhaoxi, Hu Guijun, Kong Lingjie. Performance analysis of a multimode fiber communication system based on the adaptive modulation orthogonal frequency division multiplexing [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(1): 8~10