

基于FPGA的光OFDM系统中实时色散均衡研究

田凤, 李现鹏

北京邮电大学电子工程学院; 信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876

摘要 提出一种基于现场可编程门阵列(FPGA)的光正交频分复用(OFDM)系统的实时色散均衡方法, 根据色散均衡的原理, 搭建了OFDM-PON系统色散均衡的仿真平台。研究表明, 基于FPGA的色散均衡模块可以有效地补偿色散损伤, 在不同的传输距离范围内光信噪比(OSNR)性能提高了0.5~1 dB, 同时能够满足信号处理系统的实时性需求。

关键词 高速光纤通信; OFDM; 色散均衡; FPGA

近几年来, 随着数据业务量的增加和用户通信速率的急剧需求, 光纤通信系统正向高速、大容量方向发展。目前在中国的骨干网中, 每根光纤容量已超过10 Tbit/s, 单个波长传输速率已由10 Gbit/s向40 Gbit/s乃至100 Gbit/s转变, 满足了当代信息社会对传输带宽日益增长的需求, 有力推动了整个信息通信业的发展^[1-2]。正交频分复用(OFDM)技术正是满足这一需求的关键技术之一, 它是一种多载波调制技术, 其基本思想是将高数据流拆分成若干低数据流, 每路低速率数据采用独立并且相互正交的载波调制后叠加成发送信号, 因而具有较高的频谱效率、带宽扩展性强、频谱资源灵活分配等优点。然而在目前接入网中大多数OFDM-PON都是采用非实时的信号处理技术, 没有考虑到实际数字信号处理(digital signal processing, DSP)中硬件的速率、信号精度要求以及设备成本等问题^[3-5]。因此在高速光纤通信系统中, 传统线下(非实时)处理具有一定的局限性, 这就迫切需要产生一种对光OFDM信号进行实时处理的方法^[6-7]。根据研究分析, 美国赛灵思(Xilinx)公司的现场可编程逻辑门阵列(field programmable gate array, FPGA)是一类拥有高集成度的可编程逻辑器件, 其具有极强的实时性和对信号的并行处理能力, 因此在许多领域都有广泛的应用。另外, 对于光OFDM传输系统, 由于色散、偏振膜色散、光纤损耗等因素影响而使信号衰减失真^[8-10]。为了解决色散对传输系统的影响, 寻找较好的均衡方法对于OFDM信号的长距离传输和系统的稳定性等都有非常重要的意义^[11-12]。因此, 色散均衡技术成为目前高速光纤传输系统的研究热点之一。

本文介绍OFDM的基本实现原理和色散均衡原理, 分析系统验证平台和FPGA的硬件实现结构, 给出仿真结果及分析。

1 OFDM的实现原理

图1为OFDM收发系统。

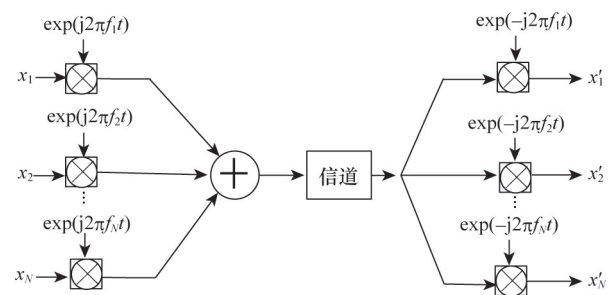


图1 OFDM收发系统框图

Fig. 1 Block diagram of OFDM transceiver system

忽略矩形脉冲, OFDM的信号可表示为

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} x_k \exp(j2\pi f_k t), \quad 0 < t \leq T \quad (1)$$

式中, x_k 为原始的数据符号, f_k 表示第 k 个载波的信号频率, t 为采样时间, T 为采样周期。

在 $[0, T]$ 时间内, 对 OFDM 信号 $s(t)$ 以 T/N 的速率采样, 即令 $t = mT/N$, $m = 0, 1, \dots, N-1$, 则第 m 个采样点为

$$s_m = \sum_{k=0}^{N-1} x_k \exp\left(j2\pi f_k \frac{mT}{N}\right), \quad m = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

收稿日期: 2016-06-30; 修回日期: 2016-08-03

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2015AA016904); 中国博士后科学基金项目(2015M570057)

作者简介: 田凤, 博士后, 研究方向为高速光纤通信系统, 电子信箱: tianfeng@bupt.edu.cn

引用格式: 田凤, 李现鹏. 基于FPGA的光OFDM系统中实时色散均衡研究[J]. 科技导报, 2016, 33(16): 150-153; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.16.019

由于对任意两载波 $c_n(t) = \exp(j2\pi f_n t)$ 和 $c_m(t) = \exp(j2\pi f_m t)$

$$\begin{aligned} \int_0^T c_n(t)c_m^*(t)dt &= \int_0^T \exp(j2\pi f_n t)\exp(-j2\pi f_m t)dt \\ &= \int_0^T \exp[j2\pi(f_n - f_m)t]dt \\ &= \frac{\exp[j2\pi(f_n - f_m)Ts] - 1}{j2\pi(f_n - f_m)} \\ &= T \cdot \exp[j2\pi(f_n - f_m)T] \sin c[(f_n - f_m) \cdot T] \end{aligned} \quad (3)$$

由此可知,使 $c_n(t)$ 和 $c_m(t)$ 保持正交的频率间隔为

$$|f_n - f_m| = \frac{k}{T} \quad (4)$$

OFDM 子载波频率满足 DFT 分辨率的整数倍,即

$$f_k = \frac{k}{T} \quad (5)$$

将式(5)代入式(2)可以得到

$$s_m = \sum_{k=0}^{N-1} x_k \exp\left(j2\pi \frac{km}{N}\right), \quad m = 0, 1, \dots, N-1 \quad (6)$$

同样在接收端为了恢复原始的数据符号 x_k , 对 s_m 进行反变换, 即进行离散傅里叶变换 DFT 得到

$$x_k = \sum_{m=0}^{N-1} s_m \exp\left(-j2\pi \frac{km}{N}\right), \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (7)$$

2 色散均衡的基本原理

图2为色散均衡的结构框图。

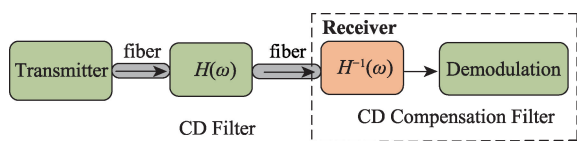


图2 色散均衡的结构

Fig. 2 Structure diagram of dispersion equalization

忽略光纤中非线性效应和衰减效应,信道中的色散传输函数表示为

$$H(z, \omega) = \exp\left(-j \frac{D\lambda^2 z \omega^2}{4\pi c}\right) \quad (8)$$

其中, D 为色散系数, λ 为中心波长, z 为光纤传输距离, c 为光在光纤中的传输速率, ω 为载波角频率。

在接收端,相应 CD 均衡器的传递函数可设为 $H^{-1}(\omega) = \frac{1}{H(\omega)}$, 因此由式(8)可得

$$H^{-1}(z, \omega) = \exp\left(j \frac{D\lambda^2 z \omega^2}{4\pi c}\right) \quad (9)$$

通过对 $H^{-1}(z, \omega)$ 进行傅里叶逆变换,可以得到 CD 均衡器的时域脉冲响应函数为

$$g(z, t) = \sqrt{\frac{jc}{D\lambda^2 z}} \exp\left(-j \frac{\pi c}{D\lambda^2 z} t^2\right) \quad (10)$$

3 系统实现

实时 OFDM-PON 传输系统平台如图3所示,首先发射机

(Xilinx V5系列FPGA)用来完成数据源信号的OFDM调制以及相应的数字信号处理,然后输出的OFDM信号通过数模转换器(DAC)转换成模拟信号,再调制为光信号进入光纤传输。接收端通过PIN管将光信号转化成电信号,电信号经放大器放大之后再通过低通滤波器LPF进行整形,输入到ADC。经过以上处理的信号输送到Xilinx V5 FPGA中,对接收到的信号进行实时均衡处理然后再进行接收解调,最后再进行误码率的计算。

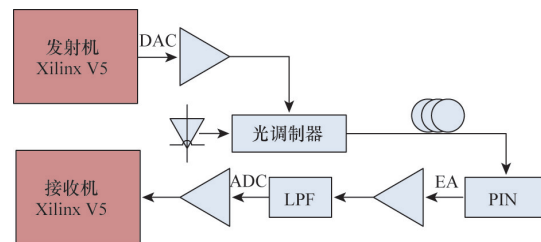


图3 实时OFDM-PON传输系统平台的结构

Fig. 3 Structure diagram of real time OFDM-PON transmission system

其中发送端模块如图4(a)所示,二进制比特流经串并变换后进行QAM调制,取共轭运算后产生的数据进行IFFT变换产生OFDM信号,再经过限幅和量化后根据光纤的传输长度,添加不同长度的循环前缀,以提高光OFDM信号的抗色散性能,解决ICI(载波互扰)和ISI(符号间串扰)两个问题。另外,通过对OFDM符号添加训练序列和导频,可以在接收端对信号进行同步及有效的信道估计,再引入预编码,把接收端的检测算法分离出一部分来,让发送端来做,以降低接收端的压力。在接收端模块如图4(b)所示,FPGA接收到的信号先进行实时色散均衡,然后进行解复用操作,接着采用同步算法实现系统同步,目前光OFDM的同步方法均是采用施密特方法或者该方法的改进版。经过串并变换后的串行数据,再进行去循环前缀和FFT运算来恢复原始信号,再通过OFDM符号的导频或训练序列完成信道估计和相位估计,最后将解调好的数据进行误码检测,以分析系统性能。

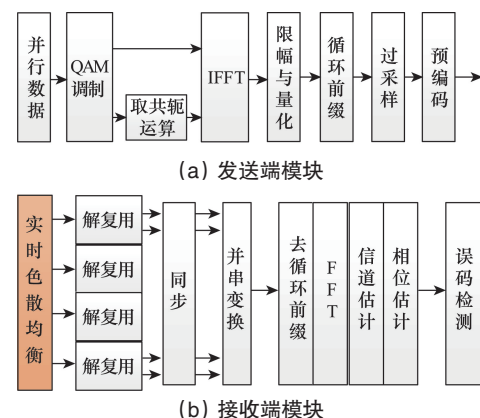


图4 OFDM-PON传输系统的收发模块

Fig. 4 Transceiver module of OFDM-PON transmission system

图5为系统采用的FPGA板子实物,型号为VIRTEX-5 LXT/SXT。最高的系统频率为700 MHz,I/O的接口速率为1.25 Gbit/s。其不仅具有先进的高性能逻辑结构,还内置大量IP硬核系统级模块,其中包括功能强大的36 Kb模块

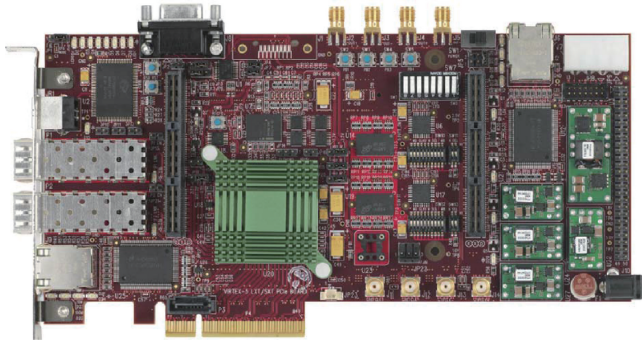


图5 FPGA板的实物

Fig. 5 Physical map of FPGA board

RAM/FIFO、第二代25x18 DSP Slice、系统监控功能、带集成数字时钟管理器(DCM)和锁相环(PLL)时钟生成器的增强型时钟管理模块以及高级的配置选项。

4 仿真结果及分析

本设计使用ISE14.3软件完成了硬件电路的Verilog设计、综合(一种软件工具,把写的RTL代码转换成对应的实际电路),使用Modelsim 10.1c完成时序仿真。调制格式为OFDM-16QAM,信号速率为1 Gbit/s,信道中的色散系数为20 ps/(nm·km)。

图6为接收端信号的仿真时序,图7为传输距离为10、30及50 km条件下色散均衡前后的误码率曲线,由结果可以看出该方法取得了明显的色散均衡效果,提高了色散容限。图8表示了不同传输距离情况下色散均衡前后的OSNR需求(误码率 $BER=10^{-3}$),可以看出经过色散均衡后 OSNR性能提高了0.5~1 dB。

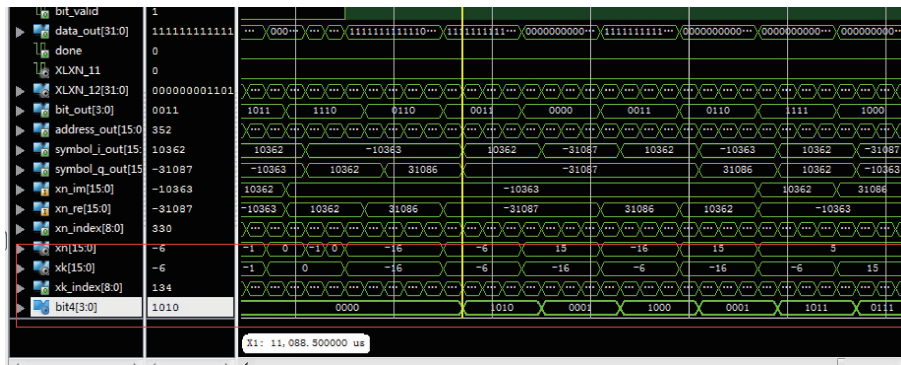


图6 接收端的信号仿真时序

Fig. 6 Time sequence diagram of signal at receiver

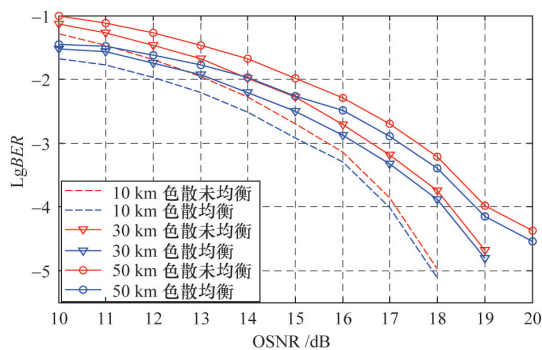


图7 不同传输距离的误码性能

Fig. 7 BER performances with different transmission distances

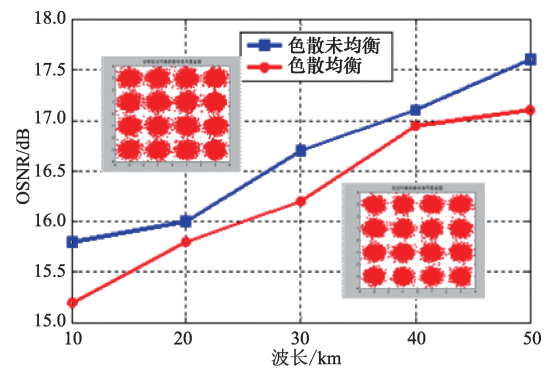


图8 不同传输距离的OSNR需求@ $BER=10^{-3}$

Fig. 8 OSNR requirements at different transmission distances@ $BER=10^{-3}$

5 结论

基于OFDM的实现原理和色散均衡原理,研究了基于FPGA的实时色散均衡算法性能,结果表明该方法在OFDM-

PON系统中能够达到很好的色散均衡效果,不同传输距离下系统OSNR性能提高了0.5~1 dB,同时满足了信号的实时在线处理要求。

参考文献 (References)

- [1] Seiji Okamoto, Kazushi Toyoda. 512 QAM (54 Gbit/s) coherent optical transmission over 150 km with an optical bandwidth of 4.1 GHz[C]//Conference and Exhibition on Optical Communication 2010. Turin, Italy: IEEE, 2010: 1-3.
- [2] Tatsunori Omiya, Kazushi Toyoda, Masato Yoshida, et al. 400 Gbit/s frequency-division-multiplexed and polarization-multiplexed 256 QAM-OFDM transmission over 400 km with a spectral efficiency of 14 bit/s/Hz [C]//Optical Fiber Communication Conference 2012. Los Angeles: IEEE, 2012: 1-3.
- [3] Xin Xiangjun, Zhang Lijia, Liu Boand, et al. Dynamic λ -OFDMA with selective multicast overlaid[J]. Optics Express, 2011, 19(8): 7847-7855.
- [4] Zhang Lijia, Xin Xiangjun, Liu Bo, et al. A novel ECDM-OFDM-PON architecture for next-generation optical access network[J]. Optics Express, 2010, 18(17): 18347-18353.
- [5] Liu Bo, Xin Xiangjun, Zhang Lijia, et al. A WDM-OFDM-PON architecture with centralized lightwave and PolSK-modulated multicast overlay[J]. Optics Express, 2010, 18(3): 2137-2143.
- [6] Jin Xianqing, Giddings Rogers, Tang. Real-time transmission of 3 Gb/s 16-QAM encoded optical OFDM signals over 75 km SMFs with negative power penalties[J]. Optics Express, 2009, 17(17): 14574-14585.
- [7] Giddings Rogers, Jin Xianqing, Hughes-Salas. Experimental demonstration of a record high 11.25 Gb/s real-time optical OFDM transceiver supporting 25 km SMF end-to-end transmission in simple IMDD systems[J]. Optics Express, 2010, 18(6): 5541-5555.
- [8] Hugues-Salas Emilio, Jin Xianqing, Giddings Rogers. Directly modulated VCSEL-based real-time 11.25 Gb/s optical OFDM transmission over 2000 m legacy MMFs[J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(1): 143-154.
- [9] Qian Dayou, Tai-On Kwok Tyrone, Cvijetic Neda. 41.25 Gb/s real-time OFDM receiver for variable rate WDM-OFDMA-PON transmission [C]//Optical Fiber Communication Conference 2010. San Diego: IEEE, 2010: 1-3.
- [10] Qiao Yaojun, Zhou Ji, Wang Lei. 1 Gb/s Multimedia service upstream transmission in real-time DSP-based OFDM-PON[C]//International Conference on Communications in China 2013. Xi'an: IEEE, 2013: 190-194.
- [11] Cho Seung-Hyun, Kyong WhanDoo, Jie Hyun Lee. Demonstration of a real-time 16 QAM encoded 11.52 Gb/s OFDM transceiver for IM/DD OFDMA-PON Systems[C]//Opto Electronics and Communications Conference 2013(OECC/PS). Kyoto, Japan: IEEE, 2013: 1-2.
- [12] Lin Wei, Li Zhaohui, Li Jianping. 18.6 Gb/s DDO-OFDM system without dispersion compensation based on DML[J]. Optical Communication Technology, 2012, 36(10): 50-52.

Research on real-time dispersion equalization in an OOFDM system based on FPGA

TIAN Feng, LI Xianpeng

State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications; School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract A method of real-time dispersion equalization for optical OFDM system based on FPGA is researched in this paper. According to the principle of dispersion equalization, a simulation platform for the OFDM-PON system is setup. The results show that the dispersion equalization module based on FPGA can effectively compensate for the dispersion damage, and that the performance of OSNR can be improved by about 0.5~1 dB and the requirement for real-time processing system can be met.

Keywords high speed optical fiber communication; OFDM; dispersion equalization; FPGA

(编辑 傅雪)