

# 基于非线性压缩的 OOFDM 系统的 FPGA 实现

冯群翔<sup>1</sup>, 郑兴<sup>1\*</sup>, 苏江涛<sup>1</sup>, 孙玲玲<sup>1</sup>, 唐建明<sup>2</sup>

(1.杭州电子科技大学 射频电路与系统教育部重点实验室, 杭州, 310018, 中国; 2.班戈大学 电子工程学院, 班戈 LL57 1UT, 英国)

**摘要:**针对光正交频分复用(OOFDM)系统中高峰均比的问题,利用坐标旋转数字计算机(CORDIC)算法进行非线性压缩,并采用现场可编程门阵列(FPGA)进行硬件实现,在 Matlab 上对从 FPGA 抓取的信号进行分析,计算出信号的峰均比以及通信系统的误码率,并传统 OOFDM 系统进行了对比分析。实验结果表明该算法能有效抑制信号的峰均比,保证了通信质量。

**关键词:**光正交频分复用;峰值平均功率比;现场可编程门阵列

**中图分类号:**TN914 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2020)06-0058-05

**DOI:**10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.06.013

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## FPGA implementation of OOFDM system based on nonlinear compression

FENG Qunxiang<sup>1</sup>, ZHENG Xing<sup>1\*</sup>, SU Jiangtao<sup>1</sup>, SUN Lingling<sup>1</sup>, TANG Jianming<sup>2</sup>

(1.Key Laboratory of RF Circuits and Systems of Ministry of Education, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. School of Electronic Engineering, Bangor University, Bangor LL57 1UT, UK)

**Abstract:** Aiming at the problem of high peak to average power ratio in optical orthogonal frequency division multiplexing (OOFDM) system, the coordinate rotation digital computer (CORDIC) algorithm is used for nonlinear compression, and field programmable gate array (FPGA) is used for hardware implementation. The signal captured from FPGA is analyzed on Matlab, the peak to average power ratio and bit error rate of communication system are calculated, and compared with the traditional OOFDM system. Experimental results show that the algorithm can effectively suppress the peak to average power ratio of the signal and ensure the communication quality.

**Key words:** optical orthogonal frequency division multiplexing; peak to average power ratio; field programmable gate array

### 0 引言

光正交频分复用(OOFDM)技术由于具备较高的传输速率、高频谱利用率、低系统复杂度以及抗光纤色散等优势,已成为实现下一代大容量的光接入网和数据中心网络的可行技术之一<sup>[1-4]</sup>。OOFDM 通信系统会把加过循环前缀的信号送入数/模转换器(DAC)中,

收稿日期:2019-11-11。

**基金项目:**浙江省自然科学基金(项目号:LY17F010017,LY17F010016)资助;浙江省钱江人才计划(项目号:QJD1402001)资助;国家自然科学基金(项目号:61331006,61827806)资助;国家某项目资助。

**作者简介:**冯群翔(1996—),男,河南周口人,杭州电子科技大学电子信息学院硕士研究生,专业为集成电路工程。研究生期间获得“三等奖学金”,主要研究方向是高速光纤通信算法和硬件实现。

\* 通信作者:郑兴(E-mail: zhengxing@hdu.edu.cn)。



当信号的峰均比较高时,为了防止信号失真就会要求采用高量化比特的 DAC<sup>[5-7]</sup>。但是,高量化比特的 DAC 不仅会增加硬件成本,而且会牺牲 DAC 的采样率,从而限制了通信系统的传输速度。因此,抑制 OOFDM 信号的峰均比是实现经济高效的高速通信的关键<sup>[8-10]</sup>。

文献[11]提出了直接限幅法,该方法通过限幅削峰来降低信号的峰均比,具有限幅效果好、易于实现和计算量较低等优点,但限幅削峰会引起信号的损失,从而使得系统的误码率上升。文献[12]提出了迭代限幅法,该方法是一种基于直接限幅法的改进算法,虽然降低了通信的误码率,但在降低信号峰均比的同时,需要多次迭代运算,增加了系统的计算量。文献[13]提出了一种非线性压缩的算法,该算法通过对 DAC 前的信号进行余弦运算,使得信号的幅度在-1~1 之间变化,从而明确了信号的动态幅度范围,降低了

信号的峰均比, 但该算法仅仅是基于仿真分析, 并没有进行硬件实现。

本文对该非线性压缩算法进行了深入研究, 利用坐标旋转数字计算机(CORDIC)算法实现对信号的余弦化和反余弦化, 并基于现场可编程门阵列(FPGA)平台首次对非线性压缩算法进行硬件电路的实现。

## 1 非线性压缩的 OOFDM 系统原理

基于 OOFDM 系统的电域结构图如图 1 所示。在发射端, 对输入的比特流采用正交幅度调制(QAM)进行映射。64 个子载波满足 Hermitian 对称, 即将这 64 个子载波的首位置 0, 之后 31 个子载波携带真实的信息, 后面 32 个子载波为前面的子载波的共轭。然后, 经过快速傅里叶逆变换 (IFFT) 后, 产生一个实值 OOFDM 符号  $A(t)$ , 这样避免使用 IQ 调制器, 从而降低了成本<sup>[18]</sup>。

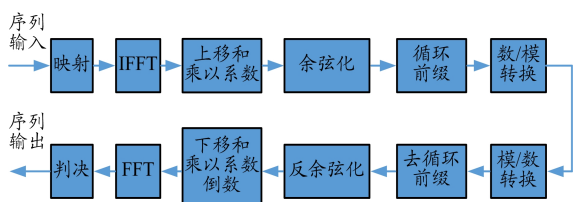


图 1 基于非线性压缩的 OOFDM 系统 (电域部分)

在  $A(t)$  进行余弦运算前, 系统采用非线性压缩算法将  $A(t)$  进行适当地上移, 以确保所有的 OOFDM 信号的最小峰值为正。经过上移的 OOFDM 信号  $A_p(t)$  可以写成:

$$A_p(t) = A(t) + I_1 \quad (1)$$

其中,  $I_1$  是  $A(t)$  的最小峰值的绝对值。为了确保在接收端反余弦解压缩时的唯一性,  $A_p(t)$  被乘以一个运算系数  $C$  使所有的信号幅度限制在  $0 \sim \pi$  内。被非线性压缩的 OOFDM 信号  $S_{NSC}(t)$  表达式为:

$$S_{NSC}(t) = \cos[CA_p(t)] \quad (2)$$

相较于传统的 OOFDM 复值信号, OOFDM 实值信号  $S_{NSC}(t)$  仅仅在  $-1 \sim 1$  的范围内变化, 因此给定了明确的动态幅度范围, 降低了信号的峰均比。将余弦后的信号添加循环前缀, 之后进行数/模转换。在接收端, 将信号进行模/数转换, 去掉循环前缀后, 将接收到的信号  $S_{NSC_r}(t)$  做对应的逆变换, 得到  $A_r(t)$  为:

$$A_r(t) = 1/C[\arccos(S_{NSC_r}(t))] - I_1 \quad (3)$$

然后, 对  $A_r(t)$  进行快速傅里叶变换(FFT)后再判决输出信号。信号的峰均比和通信的误码率也与运算系数  $C$  的选择有关。为了确保在接收端还原时的唯一

性, 使  $CA_p(t)$  处于  $0 \sim \pi$  之间。当  $C$  值越大时, 每个子载波余弦运算后得到的结果的差距也就越大, 这使得在接收端反余弦时越易于还原信号, 从而最大程度地降低信号的误码率; 当  $C$  值越小时, 每个子载波余弦运算后得到的结果也就越接近, 故余弦运算后的信号的峰均比也就越低。所以, 需要结合试验结果适当地选择  $C$  值来平衡信号的峰均比和通信的误码率。

## 2 CORDIC 算法分析

本文基于 FPGA 实现硬件电路, 同时为了节约系统资源, 采用了 CORDIC 算法来实现余弦运算和反余弦运算。CORDIC 算法是一种利用数学逼近来实现基本数学操作和函数的算法, 其根本思想就是通过一系列旋转与运算基数相关的角度以逼近所需的角度的<sup>[9]</sup>。由于该算法最终被分解为加减和移位操作, 因而十分适合硬件实现。

该算法具有 2 种工作模式, 分别是旋转模式和向量模式。旋转模式适用于实现正三角函数。旋转模式下其迭代公式如下:

$$\begin{cases} X_{i+1} = X_i - d_i Y_i 2^{-i} \\ Y_{i+1} = Y_i + d_i X_i 2^{-i} \\ Z_{i+1} = Z_i - d_i \arctan 2^{-i} \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $X$ 、 $Y$  表示要旋转的角度在单位圆上的横纵坐标,  $Z$  表示旋转剩余角度,  $d$  表示旋转方向,  $i$  是迭代次数,  $\arctan 2^{-i}$  是一系列要旋转的角度。初始值  $Z_0$  设置为目标角度,  $X_0$  设置为  $1/A_n$ ,  $Y_0$  设置为 0。  $A_n$  是伸缩因子, 其表达式为:

$$A_n = \prod_{i=1}^{n-1} \sqrt{1+2^{(-2i)}} \quad (5)$$

当  $n \rightarrow \infty$  时,  $A_n$  趋于一个常数,  $A_n = 1.6467602581451$ 。当  $Z_i$  值大于零时,  $d_i$  为 1; 反之,  $d_i$  为 -1。  $Z$  的迭代过程是将  $Z$  收敛于零的过程, 也正是将目标角度分解为一系列旋转角度的过程, 故  $Z_i$  可看成是第  $i$  次旋转剩余的角度。经过  $n$  次旋转, 迭代结果为:

$$\begin{cases} X_n = \cos Z_0 \\ Y_n = \sin Z_0 \\ Z_n = 0 \end{cases} \quad (6)$$

向量模式用于实现反三角函数。旋转模式通过旋转逼近目标角度, 迭代得到目标角度的余弦和正弦值。向量模式将  $X_i$  与目标余弦值比较, 在多次迭代后, 使得  $X_i$  逼近目标余弦值, 这时  $Z_n$  得到该余弦值对应的角度, 实现反余弦。

### 3 硬件实现与实验参数

本文使用 Quartus 软件编写 Verilog 代码进行建模和仿真,然后采用 Altera 公司的 Cyclone IV 代 FPGA 芯片、型号为 TLV5618 的 12 位 DAC 和型号为 ADC128S022 的 12 位 ADC 进行硬件实现。之后利用 Quartus 软件自带的 SignalTap II 抓取信号,在 Matlab 软件中对从 FPGA 抓取的信号进行误码率和峰均比的分析。

发射端的核心 RTL 图如图 2 所示。该发射端采用 7 位的线性反馈移位寄存器生成伪随机序列,将伪随机序列串/并转换为 4 位的码元,再将 31 个码元采用 16QAM 共轭映射为 64 个子载波;将这 64 个子载波送入到 64 点的 IFFT,采用 Quartus 自带的 FFT IP 核可变速流模式。在 IFFT 之后,输出数据虚部为零,此时将

实部数据送入到余弦预处理模块进行上移和乘以运算系数  $C$  的操作,并将输出的信号送入余弦模块进行余弦运算、添加占比为 25% 的循环前缀,最后将加了循环前缀的数据进行 DAC。

接收端的核心 RTL 图如图 3 所示。首先将 DAC 后的信号去掉循环前缀,接着进行反余弦化操作,再将反余弦的信号送入 FFT 预处理模块,进行前面发射端的逆运算。FFT 变换后,再将结果送入到判决模块,输出 4 位的码元信号。利用 Quartus 软件自带的 SignalTap II 抓取输出信号并导出,在 Matlab 上与串/并转换后的数据进行比较,计算通信的误码率。

### 4 实验结果分析

本节对采用非线性压缩的 OOFDM 系统和传统的

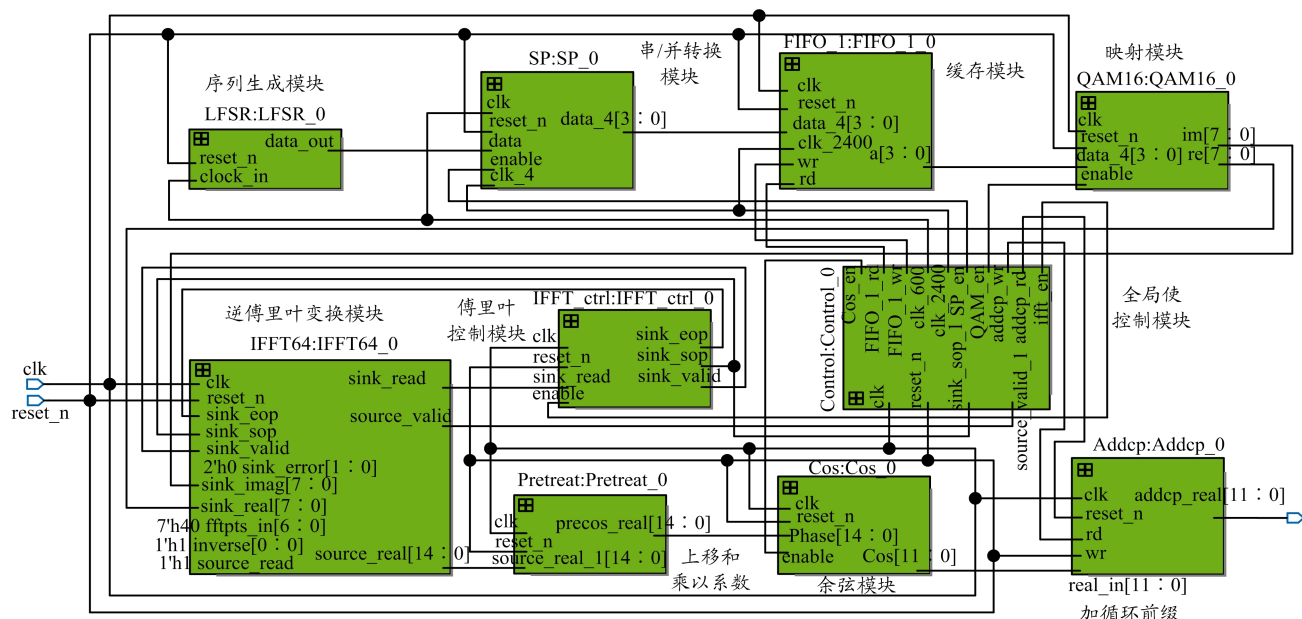


图 2 发射端核心 RTL 图

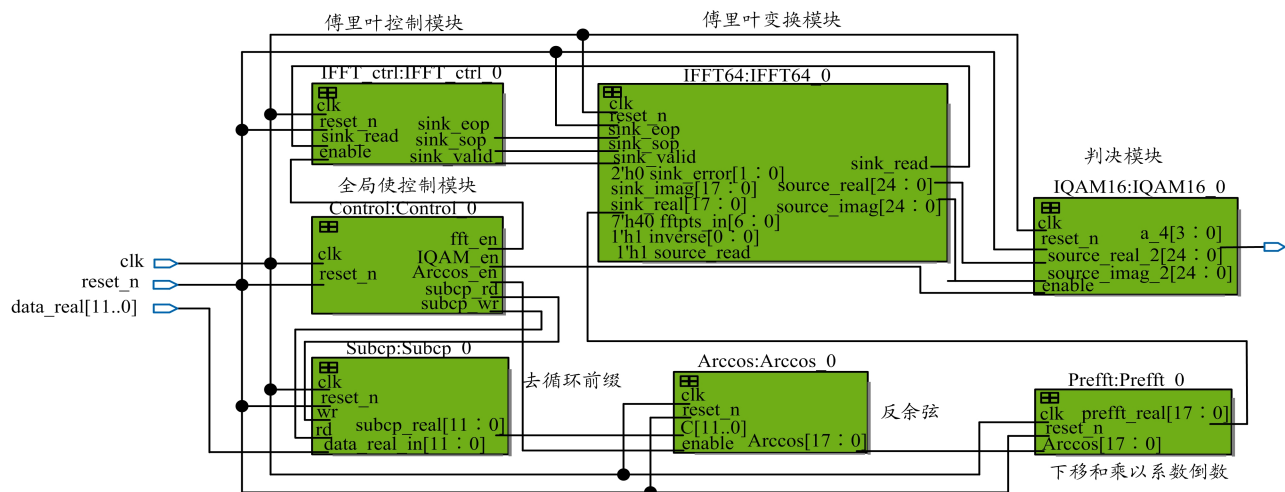


图 3 接收端核心 RTL 图

OOFDM 系统进行数据比较分析。不同系统下的信号峰均比的互补累计分布函数(CCDFF)值分布曲线如图 4 所示。图中右边蓝色曲线为传统 OOFDM 信号的峰均比的分布曲线,其余的曲线为通过采用不同  $C$  值的非线性压缩算法得到的分布曲线。在实验中,当  $C$  值大于 1.25 时,将要进行余弦运算的信号有可能大于  $\pi$ ,故  $C$  值取值要小于 1.25。为了便于在 FPGA 中采用移位的方式实现乘以不同的运算系数的目的,后面依次测量了  $C$  值为 1、0.75、0.5 和 0.375 下的信号的峰均比。由图 4 可知,随着  $C$  值的不断变小,信号的峰均比也在下降。这是因为当运算系数越小时,每个子载波被余弦运算后的结果越接近,相应的峰均比也就越低。传统 OOFDM 的信号 CCDF 值为  $10^{-2}$  所对应的的峰均比值是 9.57 dB,而采用  $C$  值为 0.75 的非线性压缩算法后,对应的峰均比值为 4.144 dB,比传统 OOFDM 信号减少了 5.426 dB。

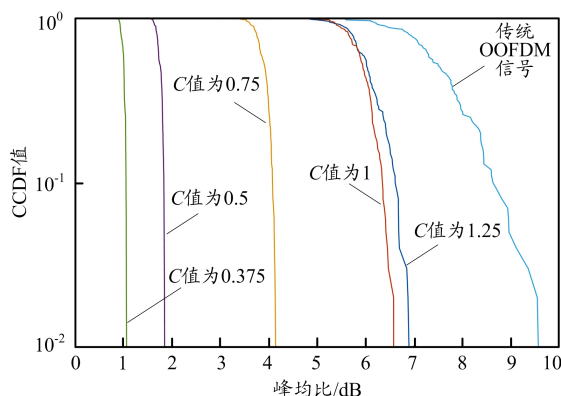


图 4 抑制峰均比效果图

当运算系数  $C$  值过小时,会增加在接收端还原信号的难度,影响通信质量。故本文使用在第 3 节所述的 Cyclone IV 代 FPGA 芯片以及 12 位的 DAC/ADC 的硬件平台在同一段时间下,测量了 100 个 OOFDM 符号,计算了非线性压缩算法在不同运算系数下的误码率以及未使用该算法的信号误码率。在本实验中,由于一个 OOFDM 符号含有 31 个携带真实信息的子载波,采用 16QAM 方式,故每个子载波由 4 个比特映射而来。因此 100 个 OOFDM 符号,共传输 12400 个比特。不同系统的误码率如表 1 所示。当取  $C$  值在 1.25~0.75 时,错误比特个数为 4 个,故系统的误码率为 0.000323。当  $C$  值为 0.5 和 0.375 时,系统的误码率开始增加,错误比特个数达到 178 个和 440 个,计算的误码率为 0.014355 和 0.035484。故为了平衡峰均比和误码率,该实验将  $C$  值固定为 0.75,这样在不影响通

表 1 不同系统下的误码率

| 信号类型                                  |           | 误码率      |
|---------------------------------------|-----------|----------|
| 传统 OOFDM 信号                           |           | 0.067661 |
| 采用非线性压缩的<br>OOFDM 系统,<br>不同 $C$ 值下的信号 | $C=1.25$  | 0.000323 |
|                                       | $C=1$     | 0.000323 |
|                                       | $C=0.75$  | 0.000323 |
|                                       | $C=0.5$   | 0.014355 |
|                                       | $C=0.375$ | 0.035484 |

信质量的前提下,最大程度地降低了信号的峰均比。在实验环境与上述相同时,传统 OOFDM 系统的错误比特个数为 839 个,计算的误码率为 0.067661。故采用该算法后,系统的误码率降低了。误码率的下降是因为该算法降低了信号的峰均比,从而降低了对 DAC 的量化比特的要求,使得系统的性能得以改进。

IFFT 输入信号、非线性压缩后的 FFT 输出信号以及传统 FFT 输出信号的对比图如图 5 所示。在 FPGA 实现 CORDIC 算法的过程中,由于在 CORDIC 算法内部会定义一系列角度常量,而这些角度常量在数学上是以小数的形式呈现的,余弦的输出结果也是小数。但在 FPGA 中,所有的数据都是有位宽的,最小单位是一个比特,即 1。为了实现这些小数,需将这些数据进

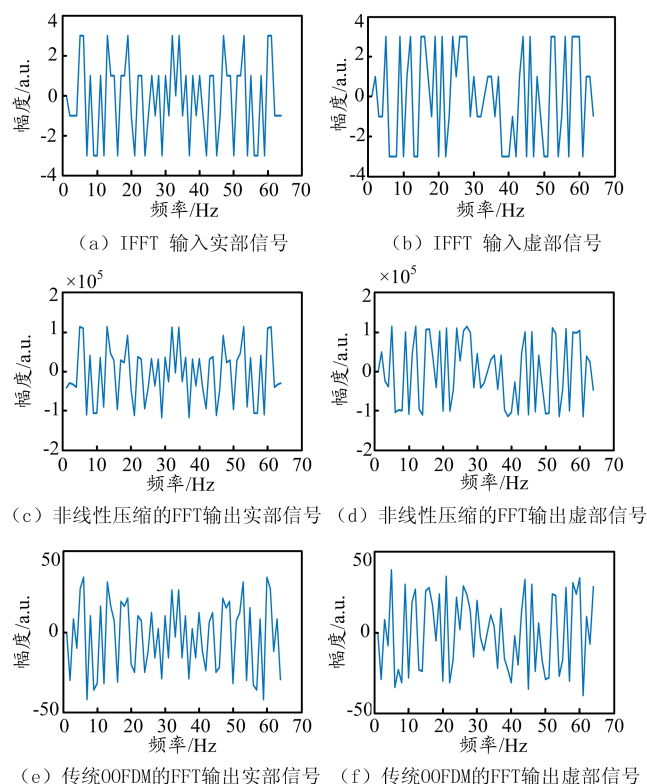


图 5 输入/输出对比图

冯群翔,郑兴,苏江涛,等:基于非线性压缩的 OOFDM 系统的 FPGA 实现

行放大。因此,使用非线性压缩的 OOFDM 系统的输出信号的幅度会远远大于传统 OOFDM 系统的幅度,这对输出信号的判决其实是有利的,因为信号的幅度差距越大,越便于判决。从图 5 中可以看出,使用该算法后,输出信号的波形和输入信号的波形更为接近。这与表 1 的误码率结果相对应。

## 5 结束语

为了抑制 OOFDM 系统中信号的峰均比,本文详细介绍了一种非线性压缩算法来降低信号的峰均比。同时,为了测试该算法的有效性和采用该算法后的通信质量,本文利用 FPGA 进行实际的硬件实现。实验结果表明:与传统 OOFDM 相比,该非线性压缩算法能够有效降低信号的峰均比,同时通过控制算法的运算系数保证了通信的质量。

## 参考文献:

- [1] LIN Y, TIEN P. Next-generation OFDMA-based passive optical network architecture supporting radio-over-fiber [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2010, 28(6): 791-799.
- [2] ZHENG X, TANG J M, SPENCER P S. Transmission Performance of Adaptively Modulated Optical OFDM Modems Using Subcarrier Modulation over Worst-Case Multimode Fibre Links [J]. IEEE Communications Letters, 2008, 12(10): 788-790.
- [3] ZHENG X, WEI J L, TANG J M. Transmission performance of adaptively modulated optical OFDM modems using subcarrier modulation over SMF IMDD links for access and metropolitan area networks[J]. Optics Express, 2008, 16(25): 20427-20440.
- [4] 权天. 非线性效应对 OOFDM 系统的影响研究 [J]. 科技视界, 2016(12): 30-31.
- [5] JIANG T, WU Y Y. An Overview: Peak-to-Average Power Ratio Reduction Techniques for OFDM Signals [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2008, 54(2): 257-268.
- [6] HAN S H, LEE J H. An overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission [J]. IEEE Wireless Communications, 2005, 12(2): 56-65.
- [7] 江涛. OFDM 无线通信系统中峰均功率比的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- [8] ZHENG X, TANG J M. Phase modulation enabled relaxation of DAC/ADC requirements and optical OFDM performance improvement over SMF-based IMDD systems [C]// 36th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC), September 19-23, 2010, Torino, Italy, Torino: IEEE, 2010: 1-3.
- [9] 陈明. 高性能实时光纤 OFDM 通信系统及其相关算法研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- [10] LI W Z, XUE D J, ZHOU L, et al. 32-GS/s 6-bit DAC based on SiGe technology for IM-DD OFDM systems with non-uniform quantization[J]. Optics express, 2019, 27(6): 8121-8129.
- [11] WANG Y, LUO Z. Optimized Iterative Clipping and Filtering for PAPR Reduction of OFDM Signals [J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59(1): 33-37.
- [12] YU Z, BAXLEY R J, ZHOU G T. Iterative Clipping for PAPR Reduction in Visible Light OFDM Communications [C]// 2014 IEEE Military Communications Conference (MILCOM), October 6-8, 2014, Baltimore, MD, USA. Tampa: IEEE, 2014: 1681-1686.
- [13] ZHENG X, TANG J M. Improved optical orthogonal frequency-division multiplexing performance using non-linear signal compression in intensity modulation and direct detection transmission systems incorporating parameter-relaxed digital-to-analogue converters/analogue-to-digital converters[J]. IET Optoelectronics, 2013, 7(2): 51-56.
- [14] SARVANAN P, RAMASAMY S. Sine/cos generator for direct digital frequency synthesizer using pipelined CORDIC processor[C]// 2013 Fourth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT), July 4-6, 2013, Tiruchengode, India, Tiruchengode: IEEE, 2013: 1-6.
- [15] 殷越, 郑兴, 苏江涛, 等. 降低双带光正交频分复用系统中 IFFT/FFT 复杂度的方法[J]. 光通信技术, 2019, 43(6): 38-43.
- [16] WU C H, GAO Z Y, LI H L, et al. Realization of OFDM modulation and demodulation for visible light communication based on FPGA [J]. Optoelectronics letters, 2017, 13(1): 58-62.
- [17] MECWAN A, SHAH D. Implementation of OFDM transceiver on FPGA[C]// 2013 Nirma University International Conference on Engineering (NUICONE), March 28-30, 2013, Ahmedabad, India. Bengaluru: IEEE, 2013: 1-5.
- [18] ZHUANG Z M, ZHENG X, TANG J M. Adaptively Modulated Optical OFDM System Using Triple-Band Subcarrier Modulation Over MMF IMDD Links [C]// 2018 10th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN), July 1-3, 2018, Chengdu, China. Beijing: IEEE, 2018: 104-108.
- [19] 车力, 党幼云. 基于 CORDIC 算法的正余弦函数 FPGA 实现[J]. 西安工程大学学报, 2010, 24(6): 805-809.

# 2020 年 光通信技术 征订启事 月刊

邮发代号: 48-126

定 价: 16 元/册; 192 元/年

订 阅: 全国各地邮局