

降低双带光正交频分复用系统中 IFFT/FFT 复杂度的方法

殷越¹, 郑兴^{1*}, 苏江涛¹, 孙玲玲¹, 唐建明²

(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; 2. 班戈大学 电子工程学院, 班戈 LL57 1UT, 英国)

摘要:为降低双带光正交频分复用(OOFDM)系统中最核心的算法模块—快速傅里叶逆变换/快速傅里叶变换(IFFT/FFT)的复杂度,提出在基于现场可编程门阵列(FPGA)的双带 OOFDM 系统中,在发射端 2 路数据进入 IFFT 前进行共轭变换的算法。仿真结果表明:在不影响 OOFDM 收发机性能的情况下,该算法能大幅降低 FPGA 的逻辑资源利用率和 IFFT/FFT 的复杂度。

关键词:光纤通信;光正交频分复用;快速傅里叶变换;现场可编程门阵列;共轭变换

中图分类号:TN919 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2019)06-0038-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.06.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Approach for reducing IFFT/FFT complexity in dual-band OOFDM system

YIN Yue¹, ZHENG Xing^{1*}, SU Jiangtao¹, SUN Lingling¹, TANG Jianming²

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

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

Abstract: To reduce the complexity of fast Fourier inverse transform/fast Fourier transform (IFFT/FFT), which is the core algorithm module in the dual-band optical orthogonal frequency division multiplexing(OOFDM) system, a conjugate transform algorithm based on field programmable gate array(FPGA) is proposed for the dual-band OOFDM system before two data at the transmitter enter IFFT. The simulation results show that, without affecting the performance of OOFDM transceiver, the algorithm can greatly reduce the logic resource utilization of the FPGA and the complexity of IFFT/FFT.

Key words: optical fiber communication; OOFDM; FFT; FPGA; conjugate transformation

0 引言

光纤通信由于具有传输容量大、保密性好和传输距离远等特点,被越来越多地应用于实际生活中,特别是对于带宽和传输容量要求更大的数据中心网络。光正交频分复用(OOFDM)技术因其具有高传输速率、高频谱利用率和抗光纤色散等优势被科研人员采用,并作为实现下一代光纤通信网络(包括广域网、城域

网、接入网、局域网和数据中心网络等)的可行技术之一^[1-3]。伴随着现场可编程门阵列(FPGA)技术的迅速发展及其应用的逐渐成熟,尤其是在生产成本低、更新速度快的数字化系统中,更倾向于采用以 FPGA 为代表的现场可编程 IC 来实现专用集成电路^[4-6]。然而,高复杂度的 OOFDM 系统占用巨大的 FPGA 逻辑资源,这已经成为具有较强灵活性、可扩展性和适应性的实时 OOFDM 系统的重要障碍之一^[7-8]。此外,为实现更高速率的 OOFDM 传输系统,双带子载波调制技术被采用^[9]。双带 OOFDM 系统意味着电域正交频分复用(OFDM)的核心模块复杂度的加倍,而快速傅里叶逆变换/傅里叶变换(IFFT/FFT)是 OOFDM 系统的核心模块,其逻辑资源利用率在很大程度上决定着 OOFDM 系统的复杂度。

如何有效降低硬件实现 IFFT/FFT 模块的逻辑资源利用率,成为了减小 OOFDM 系统复杂度的研究重点^[10-12]。我们在之前的工作中提出了基于共轭变换的

收稿日期:2018-11-28。

基金项目:浙江省自然科学基金(LY17F010017,LY17F010016)资助;浙江省钱江人才计划(QJD1402001)资助;国家自然科学基金(61331006,61827806)资助;武器装备预研基金重点实验室项目(61420010101)资助。

作者简介:殷越(1994-),女,安徽安庆人,杭州电子科技大学电子信息学院的硕士研究生。主要研究方向为高速光纤通信。研究生期间获“二、三等奖学金”,获“全国大学生集成电路创新创业大赛华东赛区三等奖”。

*通信作者:郑兴(Email:zhengxing@hdu.edu.cn)。



核心算法^[13],该算法能够在不影响双带 OOFDM 系统传输速率和距离的前提下,节省一对 IFFT/FFT 的使用,所以理论上可以降低 OOFDM 系统复杂度,但是该算法只是基于理论研究,并未进行具体的硬件实现。因此,本文旨在深入探索基于共轭变换的 IFFT/FFT 算法,将该算法在具体的 FPGA 平台上进行首次电路设计和硬件实现,并进行相应的理论和实验分析。

1 基于共轭变换的双带 OOFDM 系统与 IFFT/FFT 算法分析

1.1 基于共轭变换的双带 OOFDM 系统(电域部分)

OOFDM 系统是将电域的 OFDM 技术引入到光域。电域的 OFDM 是将完整的信道划分为多个正交子信道,将高速数据信号转换成并行多个低速子数据流,然后调制到每个子信道上实现信号传输^[14]。若将信道分为 N 个子信道,每个子信道的调制格式为多进制正交幅度调制(MQAM)。那么,每码元包含 $\log_2 M$ 比特随机序列;若将子信道上 $\log_2 M$ 比特的码元都映射为矢量星座点,则有:

$$S_k = (S_{k1}, S_{k2}), k=0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

其中, k 表示第 k 路子信道; S_{k1}, S_{k2} 表示矢量星座点 S_k 在星座图上的坐标。那么子信道 $x_k(t)$ 波形可表示为:

$$x_k(t) = S_{k1} \cos 2\pi f_k t - S_{k2} \sin 2\pi f_k t = \operatorname{Re}(X_k e^{j2\pi f_k t}) \quad (2)$$

其中, f_k 表示每一路子信道上中心载波频率; t 表示时域时间; X_k 表示对应子路上传输的码元数据映射。得出合成的发送信号为:

$$x(t) = \sum_k x_k(t) = \operatorname{Re} \sum_k (X_k e^{j2\pi f_k t}), k=0, 1, \dots, N-1 \quad (3)$$

从式(3)可知, OOFDM 的调制信号其本质是将所有子信道上的码元映射成相应的复数形式,之后进行 N 点 IFFT 得出实部信号。因此, OOFDM 调制的核心就是 N 点的 IFFT/FFT 运算。本文基于数字信号处理技术,运用基于共轭变换的 IFFT/FFT 实现双带 OOFDM 系统的调制与解调过程。

基于共轭变换的双带 OOFDM 系统(电域部分)如图 1 所示。在发送端,首先将需要发送的 2 路伪随机序列分别存放于 ROM 表里,再将 2 路伪随机序列分别通过串/并转换进入映射部分,进行正交幅度调制(QAM)。然后,可将这 2 路信号进行有符号数相加并送入 IFFT 的输入端。为了克服光纤的色散效应,我们加入循环前缀,通过并/串转换器将并行的符号序列化后形成一段长的序列。最后,经过数模转换器(DAC)将

信号转换为电信号,电信号被激光器转换成光信号后进入光纤信道中。在接收端,则采取与发送端相反的变换。

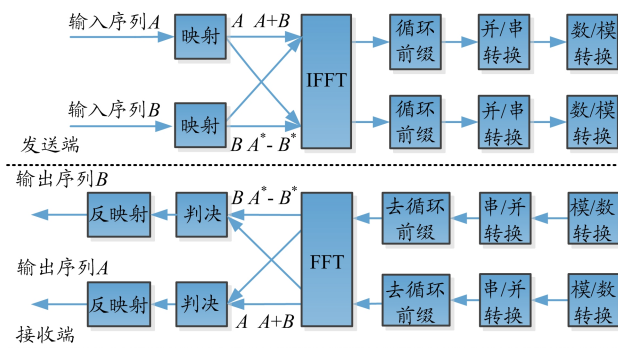


图1 基于共轭变换的双带 OOFDM 系统(电域部分)

1.2 IFFT/FFT 的算法分析

对于 OOFDM 系统而言,为了实现高速实时的特性,通常采用提高 DAC 的采样率来提升 FPGA 的处理速度。然而,这需要每个 FPGA 时钟周期执行一次传输操作^[15]。为此,本文在信号进入 IFFT/FFT 时,使用双带调制信号代替单带调制信号。与单带调制信号相比,双带调制信号将占用 FPGA 更多的逻辑资源,特别是在进行 IFFT/FFT 的过程中。但由于 FPGA 有限的逻辑资源,我们将使用如下算法减少 IFFT/FFT 的重复使用以降低双带调制信号的资源利用率和复杂度。

基于共轭变换的 IFFT/FFT 算法原理如图 2 所示。在发射端,设 OOFDM 子载波中有 2 组相互独立的序列 ($\{A\}$ 和 $\{B\}$), 每组包含 $2N$ 个并行编码数据。当 $\{A\}$ 和 $\{B\}$ 中的第 n 个元素满足 $A_{2N-n} = A_n^*$ 和 $B_{2N-n} = -B_n^*$, 以及 $\operatorname{Im}\{A_0\} = \operatorname{Im}\{A_N\} = \operatorname{Im}\{B_0\} = \operatorname{Im}\{B_N\} = 0$ 时, 经过 IFFT 后可以将第 k 个输出符号写为:

$$S_k^{A+B}(t) = \sum_{n=0}^{2N-1} (A_n + B_n) e^{j2\pi n \Delta f t} = I_{kA}(t) + jQ_{kB}(t) \quad (4)$$

其中, Δf 是 2 个相邻 OOFDM 子载波之间的频率间隔,

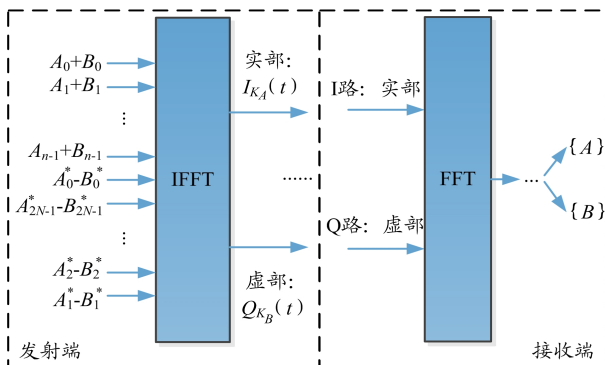


图2 基于共轭变换的 IFFT/FFT 算法原理图

$n=1,2,\dots,2N-1$ 。 $I_{k_A}(t)$ 仅传递来自 $\{A\}$ 的信息,而 $Q_{k_B}(t)$ 仅传递来自 $\{B\}$ 的信息。这样的特征在涉及单个 IFFT 操作的情况下,可以独立传输 2 组数据^[13]。接着将经过 IFFT 的 2 组数据 $I_{k_A}(t)$ 和 $Q_{k_B}(t)$ (即 IFFT 输出端的实部和虚部),恢复为双带信号传输。然而,与普通的双带调制技术(2 路信号分别经过各自的 IFFT)相比,其资源利用率将大大降低。在接收端,当进行完 FFT 之前所需的一切基本信号处理操作后获得 2 路数字基带信号。这 2 路信号分别作为实部和虚部进入 FFT 输入端,信号 $\{A\}$ 和 $\{B\}$ 分别可以通过式(5)和式(6)还原:

$$A_n = \frac{1}{2} \{ [\text{Re}(S'_n) + \text{Re}(S'_{2N-n})] + j[\text{Im}(S'_n) - \text{Im}(S'_{2N-n})] \} \quad (5)$$

$$B_n = \frac{1}{2} \{ [\text{Re}(S'_n) - \text{Re}(S'_{2N-n})] + j[\text{Im}(S'_n) + \text{Im}(S'_{2N-n})] \} \quad (6)$$

其中, S'_n 是 FFT 输出的第 n 个 OOFDM 子载波, A_n 和 B_n 分别表示序列 $\{A\}$ 和 $\{B\}$ 的第 n 个元素。另外,数据恢复的过程相互独立并且可以同时发生。

2 仿真与实验参数

本文的 OOFDM 系统采用 Altera 公司的 Stratix II 系列 FPGA 芯片编写 Verilog 语言进行建模与硬件实现。系统生成的发送端和接收端的 RTL 图如图 3 所示。首先在 Matlab 中生成基于 2 个 mif 文件的伪随机序列并将其分别存放于 ROM 表里,该序列具有周期性和伪随机性;然后分别经过串/并转换,将序列转换成 4 比特的码元后,经过 16QAM,将码元映射为复数形式的数据,并产生 2 路数据流,每一路包含 64 个子载波。其中,一路子载波为前 32 个子载波(包含 31 个有能量且携带真实信息,1 个没有能量)和 32 个复数共轭^[16-18];另一路子载波为前 32 个子载波(同样包含

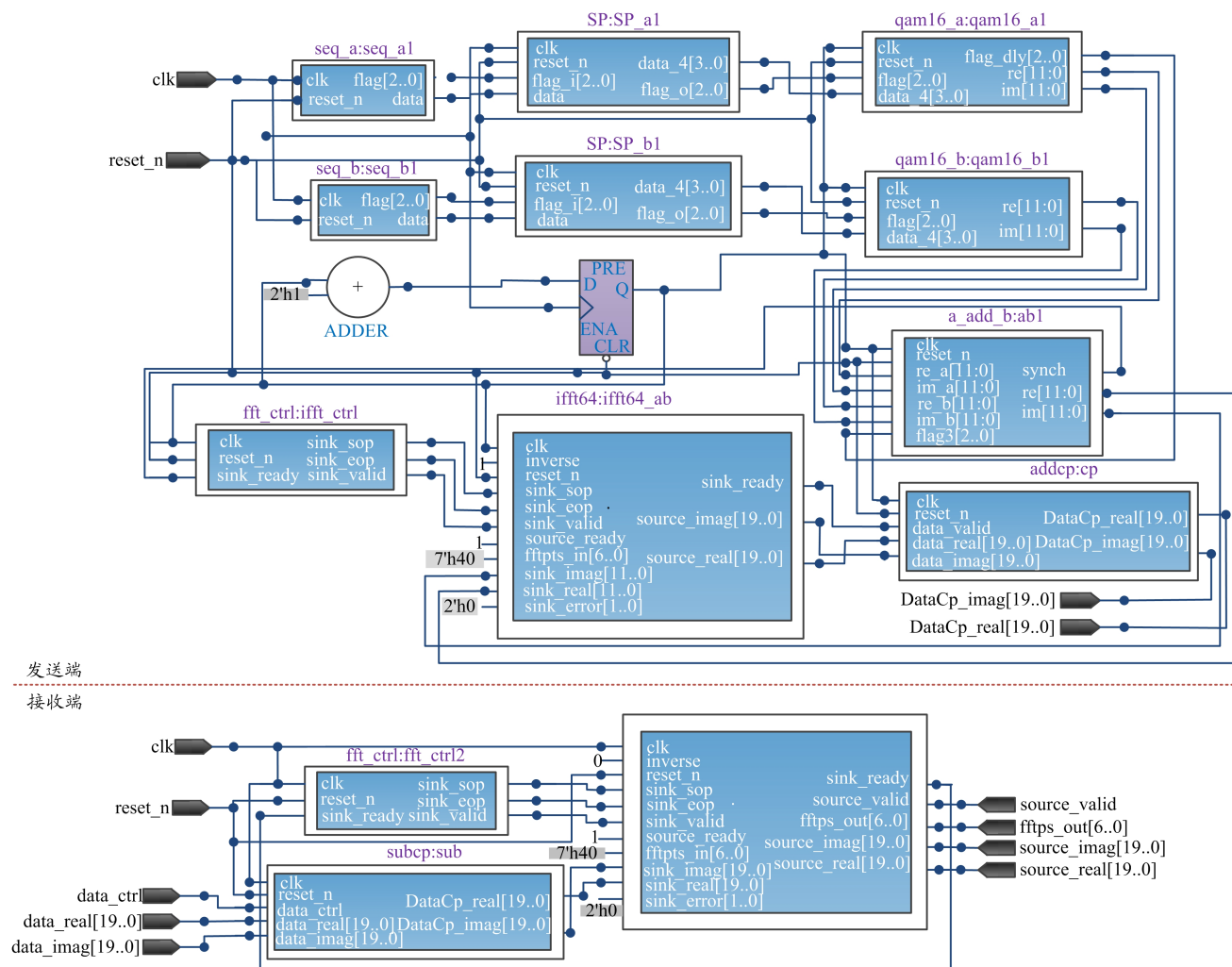
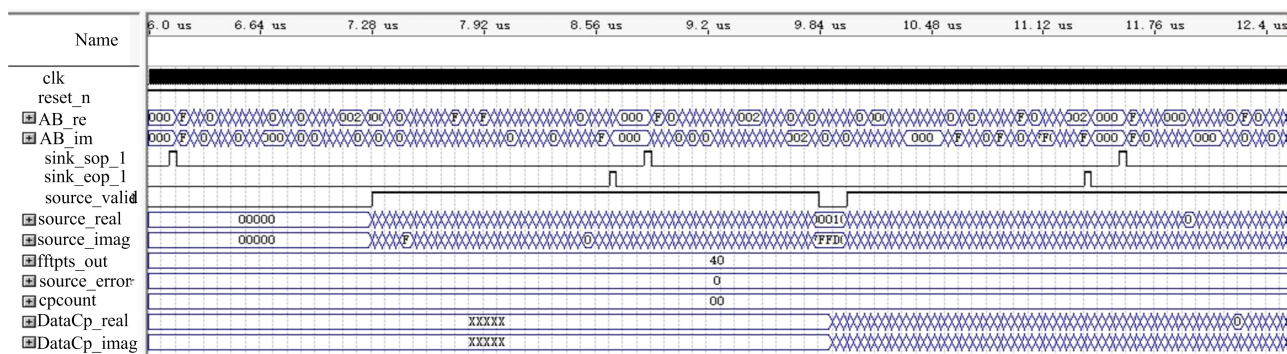
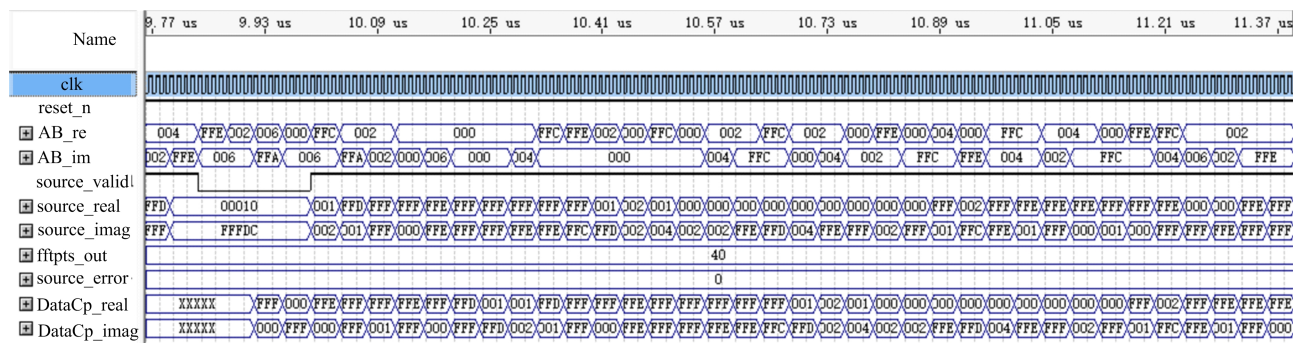


图3 双带 OOFDM 系统中收发机核心模块的 RTL 图



(a) 系统仿真结果的整体显示



(b) 系统仿真结果的局部显示

图 4 基于共轭变换的双带 OOFDM 系统硬件仿真图

31 个有能量且携带真实信息,1 个没有能量) 和 32 个复数共轭的相反数^[13]。

将 2 路子载波进行有符号数相加后进入 IFFT 的输入端,IFFT 采用的是 Quartus II 中的 FFT megacore IP 核,并将输入设置为 12 位,输出设置为 20 位的定点可变速流模式。sink_sop 表示 FFT IP 核已开始接收数据,且第一个数据已经发送。sink_eop 表示数据接收完成,且该数据为最后一位。而 source_sop 与 source_eop 分别表示输出数据包的开始和结尾。最后添加长度占比为 25% 的循环前缀。仿真结果如图 4 所示。

3 实验结果分析

本文分析了双带信号分别经过 32 点和 64 点的 IFFT 的资源利用率的情况,以及双带信号在进入 IFFT 之前使用算法转换成共轭信号后,经过 32 点和 64 点的 IFFT 的资源利用率的情况。为了验证实验仿真的正确性,不仅在信号进行 FFT 后使用式 (5) 和式 (6) 恢复的信号 $\{A'\}$ 和 $\{B'\}$ 与输入前的信号 $\{A\}$ 和 $\{B\}$ 进行比较,得出误差的均方值,还使用 Matlab 对整个过程进行模拟,并将 Quartus II 的硬件仿真结果与 Matlab 的理论值进行对比。

图 5 为 IFFT 输入信号和 FFT 输出信号在 Quartus

II 的对比图;图 6 为 FFT 的输出信号在 Quartus II 和 Matlab 的对比图。可以看出,使用 Quartus II 硬件仿真结果的输出信号与使用 Matlab 仿真结果基本相同,表明硬件仿真过程是正确的。同时,使用 Quartus II 的硬件仿真结果的输出信号与输入信号也基本相同,表明整个系统是正确的,尤其是硬件验证了让双带信号在

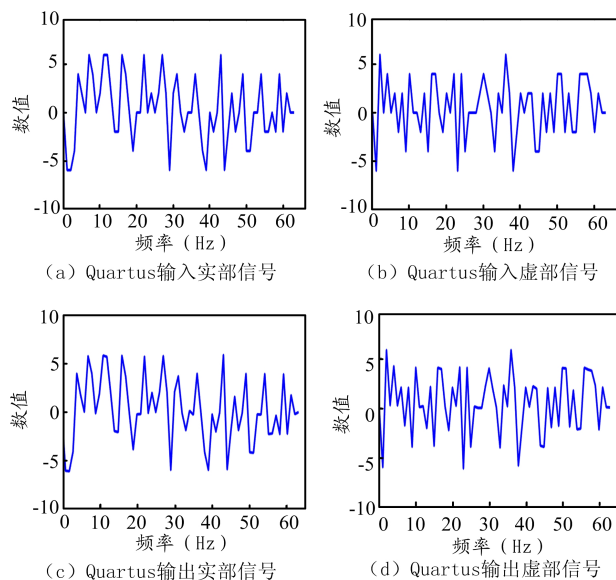


图 5 IFFT 输入信号和 FFT 输出信号在 Quartus II 的对比图

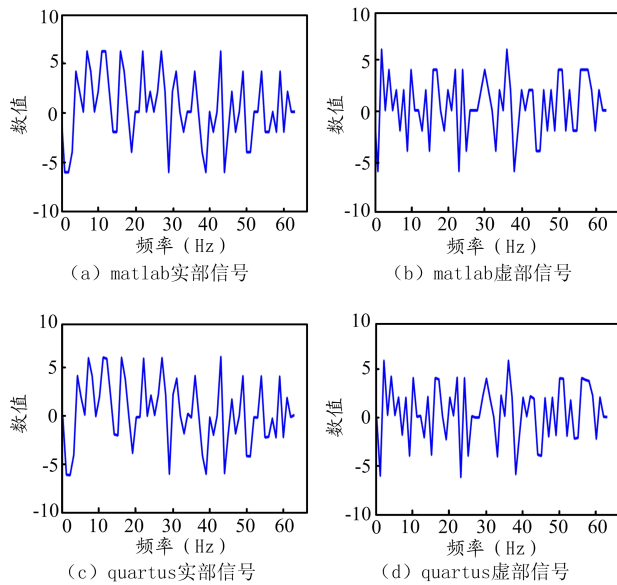


图6 FFT的输出信号在Quartus II和Matlab的对比图

进入 IFFT/FFT 之前转换成共轭信号这一算法提出的正确性以及硬件实现的可行性。当然,由于 FPGA 进行 IFFT/FFT 每一步量化都存在量化误差,而 Matlab 里面全部是浮点数运算,精度远远大于硬件仿真,所以误差的存在性是不可避免的。

为了进一步验证实验的正确性,本文计算了在基于共轭变换的双带 OOFDM 系统中,IFFT 之前的共轭变换信号与 FFT 之后待还原的共轭变换信号的误差均方值,以及 IFFT 之前的 A/B 路信号与 FFT 之后的 A/B 路信号分别在基于共轭变换的双带 OOFDM 系统和普通双带 OOFDM 系统中的误差均方值如表 1 所示。表 1 中,“共轭信号”指 IFFT 之前的共轭变换信号与 FFT 之后待还原的共轭变换信号的误差均方值;

表 1 IFFT 输入信号和 FFT 输出信号误差均方值

信号类型		误差均方值	
		64 点 FFT	32 点 FFT
基于共轭变换 双带 OOFDM 系统	共轭信号	3.28%	2.95%
	共轭信号还原 A	1.65%	1.45%
	共轭信号还原 B	1.74%	1.71%
普通 双带 OOFDM 系统	双带信号 A	3.60%	2.28%
	双带信号 B	3.19%	2.12%

“共轭信号还原 A”指 IFFT 之前的 A 路信号与 FFT 之后被还原的 A 路信号的误差均方值;“共轭信号还原 B”同理。“双带信号 A”指普通双带 OOFDM 系统中,IFFT 之前的 A 路信号与 FFT 之后的 A 路信号的误差均方值;“双带信号 B”同理。由于仿真误差出现在 IFFT/FFT 做量化处理的时候,所以进行 IFFT/FFT 会出现误差,且误差比很接近。由于本文使用算法的原因,在基于共轭变换的双带 OOFDM 系统中,还原后的信号误差均方值反而低于在普通双带 OOFDM 系统中的误差均方值。

我们将 IFFT 输入信号和 FFT 输出信号的资源利用率进行了对比,如表 2 所示。“双带”指普通的双带 OOFDM 系统;“共轭”指基于共轭变换的双带 OOFDM 系统。可以看出,无论是 32 点还是 64 点的 IFFT/FFT,与普通双带 OOFDM 系统的核心部件相比,使用算法将双带信号在进入 IFFT/FFT 前处理成共轭信号的方法所占用的逻辑资源利用率降低了大约 40%~50%。因

表 2 资源利用率对比

参数名称	资源利用和占用情况							
	64 点 IFFT		32 点 IFFT		64 点 FFT		32 点 FFT	
	双带	共轭	双带	共轭	双带	共轭	双带	共轭
逻辑资源利用率(%)	9	5	9	5	23	12	24	12
查找表数	5	3	5	3	14	7	14	7
逻辑寄存器数	7	4	8	4	19	10	20	10
引脚总数	22	18	21	18	74	44	73	44
块存储数	<1	<1	<1	<1	1	<1	<1	<1
DSP 单元数	11	6	11	6	100	50	100	50

此,采用共轭变换后的双带 OOFDM 系统,将 I 和 Q 调制到不同的射频频率上,与普通单带 OOFDM 系统相比,基于共轭变换的核心算法可以实现更高的速率。但是由于采用了共轭变换,只需要一个 IFFT 和 FFT,因此系统复杂度又和单带差不多,而比普通双带降低接近 50%。

4 结束语

随着光纤传输系统带宽与传输距离的不断提升,OOFDM 技术以其卓越的色散容忍能力、高效的频谱利用率和易于同高阶调制等技术相结合等特点,成为近年来光纤通信领域热点研究问题之一^[9]。本文详细介绍了如何降低双带 OOFDM 系统核心部件 IFFT/FFT 模块在电学领域的复杂度的方法。虽然光学 IFFT/FFT 的变换速度会更快,但光学 IFFT/FFT 的成本较高,故选择性价比更高的电学领域 IFFT/FFT 进行研究。本文中算法的硬件实现,一方面证明了基于共轭变换的核心算法的正确性以及硬件实现的可行性;另一方面,表明了通过该算法可以有效降低 IFFT/FFT 的复杂度,减少逻辑资源利用率。

参考文献:

- [1] GIDDINGS R P, SALAS E H, CHARBONNIER B, et al. Experimental Demonstration of Real-Time Optical OFDM Transmission at 11.25Gb/s over 500m MMFs Employing Directly Modulated DFB Lasers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23 (1): 51–53.
- [2] 刘皎,陈静颖,党楠. 高速 OOFDM 传输系统研究[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(10): 88–92.
- [3] SALAS E H, ZHANG Q W, GIDDINGS R P, et al. Record-high and robust capacity versus reach performance of adaptive real-time dual-band optical OFDM signals for upgrading legacy MMF systems [C]// 2013 Future Network & Mobile Summit, July 3–5, 2013, Lisboa, Portugal. Albany: IEEE, 2013: 1–10.
- [4] MECWAN A, SHAH D. Implementation of OFDM transceiver on FPGA[C]// 2013 Nirma University International Conference on Engineering (NUICONE), November 28–30, 2013, Ahmedabad, India. Bengaluru: IEEE, 2013: 1–5.
- [5] YU L, WANG M, FENG J, et al. The high-speed optical OFDM transmitter based on FPGA[C]// IET International Conference on Smart and Sustainable City 2013 (ICSSC 2013), August 19–20, 2013, Shanghai, China. Florence: ICSSC, 2013: 415–418.
- [6] WANG Y H, TSAI S, CHEN Y Y. Design and implementation of an optical OFDM baseband receiver in FPGA[C]// Proceedings of Technical Program of 2012 VLSI Design, Automation and Test, April 23–25, 2012, Hsinchu, Taiwan. Singapore: IEEE, 2012: 1–4.
- [7] ZHANG J J, TANG Z H, GIDDINGS R P. Stage-Dependent DSP Operation Range Clipping-Induced Bit Resolution Reductions of Full Parallel 64-Point FFTs Incorporated in FPGA-Based Optical OFDM Receivers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(16): 3752–3760.
- [8] MEFENZA M, BOBDA C. FPGA Implementation of Subcarrier Index Modulation OFDM Transceiver [C]// IEEE International Symposium on Parallel & Distributed Processing, Workshops and Phd Forum 2013, May 20–24, 2013, Cambridge, MA. New York: IEEE, 2013: 268–272.
- [9] SUN X, ZHENG X, YIN Y. Dual-Band Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing with Adaptive Cyclic Prefix [C]// 2018 10th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN), July 1–3, 2018, Chengdu, China. Beijing: IEEE, 2018: 109–113.
- [10] 王英喆, 杜蓉. 基于 FPGA 流水线结构并行 FFT 的设计与实现[J]. 电子设计工程, 2015, 23(4): 53–56.
- [11] 王捷玉, 覃远年. 基于 FPGA 的高速并行 FFT 算法研究[J]. 电子制作, 2015(4Z): 49–50.
- [12] 陈知新. 基于 FPGA 的蝶形运算的设计与实现[J]. 安徽电子信息职业技术学院学报, 2010(5): 21–23.
- [13] ZHENG X, WEI J L, GIDDINGS R P, et al. Simplified adaptively modulated optical OFDM modems using subcarrier modulation with added input/output reconfigurability[J]. Frontier Optoelectronics, 2012, 5(2): 187–194.
- [14] 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.
- [15] ZHANG J J, YUAN W Y, GIDDINGS R P, et al. IFFT stage-dependent minimum bit resolution maps for real-time optical OFDM transceivers[C]// OFC 2014, March 9–13, 2014, San Francisco, CA. NW Washington DC: OSA, 2014: 1–3.
- [16] YANG J, ZHAO G, DONG Y, et al. The design of OFDM base-band data transmission system based on FPGA[C]// 2011 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC), August 8–10, 2011, DengFeng, China. Beijing: IEEE, 2011: 743–746.
- [17] BELABED T, JEMMALI S, SOUAN C. FFT implementation and optimization on FPGA[C]// 2018 4th International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP), March 21–24, 2018, Sousse, Tunisia. Albany: IEEE, 2018: 1–6.
- [18] BHATTACHARYA J, DE S, BOSE S, et al. Implementation of OFDM modulator and demodulator subsystems using 16 point FFT/IFFT pipeline architecture in FPGA [C]// 2017 8th IEEE Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON), October 3–5, 2017, Vancouver, BC. New York: IEEE, 2017: 295–300.
- [19] XU Z, SULLIVAN M O, HUI R. Spectral-efficient. OOFDM system using compatible SSB modulation with a simple dual-electrode MZM[C]// Conference on Optical Fiber Communication (OFC/NFOEC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference 2010, March 23–25, 2010, San Diego, USA. Washington DC: OSA, 2010: 1–3.