

基于FPGA的OFDM基带数据传输系统的设计与实现

周庆芳^{1,2}, 杨 军¹

(1. 云南大学 信息学院, 云南 昆明 650091;
2. 曲靖师范学院 物理与电子工程学院, 云南 曲靖 655011)

摘要:文中设计实现了一个OFDM基带信号处理系统,该设计利用FPGA的可重构性与灵活性,采用基于CORDIC算法流水结构高速浮点蝶形运算单元的FFT专用处理器,以及在自适应调制模式下的增强调制方式(64-QAM)来实现信号的调制,具有较高的传输速率。系统设计合理利用FPGA资源,高度集成在一个FPGA芯片内,简化了系统的复杂度;并最终适配到Altera的EP2C20F484C6芯片上,可稳定运行在100 MHz的时钟频率下;同时该系统具有较高的灵活性与通用性,且结构简单,杂波抑制性好,因此具有一定的应用前景。

关键词:正交频分复用;CORDIC;蝶形单元;快速傅立叶变换

中图分类号:TP309.7

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2013)01-0225-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2013.01.055

Design and Implementation of OFDM Base Band Data Transmission System Based on FPGA

ZHOU Qing-fang^{1,2}, YANG Jun¹

(1. School of Information, Yunnan University, Kunming 650091, China;
2. College of Physics and Electronics, Qujing Normal University, Qujing 655011, China)

Abstract: It designed an OFDM baseband signal processing system. This design used FPGA reconstruction and flexibility, FFT dedicated processor based on high speed floating point butterfly operation unit of CORDIC algorithm flow structure, as well as enhanced modulation mode (64-QAM) in adaptive modulation mode to realize the signal modulation, has the high transmission rate. The System design reasonably used FPGA resources, highly integrated in a FPGA chip inside, simplified the complexity of the system, and finally adapted to the EP2C20F484C6 Altera on a chip, stable operation in 100 MHz clock frequency. At the same time, this system has high flexibility and universality, and simple structure, clutter suppression is good, as a result this has a certain application prospect.

Key words: OFDM; CORDIC; butterfly processing unit; FFT

0 引言

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)的思想是把高速的数据流通过串并转换分配到传输速率相对较低的若干个子信道中,使用多个彼此正交的子载波传输。它利用逆快速傅立叶变换(IFFT)和快速傅立叶变换(FFT)来分别实现调制和解调,是实现复杂度最低、应用最广的一种多载波调制方案^[1]。OFDM是一种调制技术,更是一种多

路复用技术^[2],其拥有较高的数据传输速度和频谱利用率,能有效克服频率选择性衰减信道(frequency selective fading channel)的特性,同时由于快速傅立叶变换(FFT)技术的采用,OFDM系统可以通过硬件快速的实现^[3]。目前OFDM作为核心技术已被多种有线和无线接入标准采纳,包括IEEE802.11a、HIPERLAN/2、DAB、DVB、LTE(4G)、IEEE802.16系列标准等^[4],且已经被广泛使用于现今各式无线通信系统,主要的应用包括:非对称的数字用户环路(ADSL)、ETSI标准的音频广播(DAB)、数字视频广播(DVB)、高清晰度数字电视(HDTV)和无线局域网(WLAN)等^[5]。

文中设计实现了一个OFDM基带数据传输系统,并利用FPGA的可重构性与灵活性,采用基于CORDIC算法流水结构高速浮点蝶形运算单元的FFT

收稿日期:2012-03-23;修回日期:2012-06-26

基金项目:云南省自然科学基金项目(2010cd023)

作者简介:周庆芳(1976-),女,云南人,硕士研究生,主要从事计算机多媒体及EDA应用技术;杨 军,教授,主要从事计算机系统结构、EDA技术方面的研究。

专用处理器,以及在自适应调制模式下的增强调制方式(64-QAM)来实现信号的调制。该系统合理利用 FPGA 资源,高度集成在一个 FPGA 芯片内,不采用任何的专用芯片,大大简化了系统的复杂度,同时具有较高的灵活性与通用性,因此具有一定的应用前景。

1 算法简介

1.1 CORDIC 算法原理

CORDIC 算法可分为旋转(rotation)和定向(vectoring)两种方式,还可分为圆形坐标、双曲线坐标和线形坐标三种方式。

圆形坐标下旋转方式原理公式(1)^[6]如下:

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i - \sigma_i 2^{-i} y_i \\ y_{i+1} = y_i + \sigma_i 2^{-i} x_i \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\{x_i, y_i\}$ 和 $\{x_{i+1}, y_{i+1}\}$ 分别表示旋转前后的向量, $\sigma_i \in \{-1, 1\}$ 表示每次旋转的方向。

由上式可知,该运算只有移位和加减运算。为了获得 σ_i 的值,需另设一个变量 z_i 表示每次旋转后的角度与目标角度的差值,然后利用公式 $z_{i+1} = z_i - \sigma_i \cdot \arctan(2^{-i})$ 进行计算。根据 Jack Volder 的推导,经过 n 次迭代,最终可以得到迭代公式(2)^[7]如下所示:

$$\begin{cases} x_{\text{out}} = x_{\text{in}} \cos \theta - y_{\text{in}} \cdot \sin \theta \\ y_{\text{out}} = x_{\text{in}} \sin \theta - y_{\text{in}} \cdot \cos \theta \\ z_{\text{out}} \rightarrow 0 \end{cases} \quad (2)$$

通过上面的算法介绍可以看出,每次都要先通过计算 z_{i+1} 和 z_i 才能得到 σ_i 的值,这样降低了运算速度。文中采用上述方法来简化 FFT 变换中蝶形运算单元的计算。在设计该蝶形运算单元时,主要问题是解决因迭代带来的时延问题与模修正的精确性问题。

1.2 OFDM 子载波正交性

为了避免子载波之间的相互干扰,OFDM 系统对于子载波之间的正交性要求极高^[8],有关信号之间的正交性可从时域与频域分别来说:

时域

$$\int_{-\infty}^{\infty} x_i(t) x_j^*(t) dt = \begin{cases} 1, i=j \\ 0, i \neq j \end{cases} \quad \Leftrightarrow$$

频域

$$\int_{-\infty}^{\infty} X_i(f) X_j^*(f) df = \begin{cases} 1, i=j \\ 0, i \neq j \end{cases} \quad (3)$$

满足式(3)的条件,即表示两信号间为正交。在多载波传输下,为了确保载送在不同的子载波之间的信号是正交的,对于子载波之间的频率间隔有一定要求。可以由等式(4)的有限频带的带通信号来进行说明解释这一要求:

$$x_m(t) = \cos(2\pi(f_c + f_m)t) = \text{Re}(e^{i2\pi(f_c + f_m)t}) =$$

$$\text{Re}(x_{lm}(t) \cdot e^{i2\pi f_l t}) \quad (4)$$

上式中的 $x_{lm}(t) = e^{i2\pi f_l t}$ 相当于 $x_m(t)$ 的基带信号。假定分析两子载波频率 $\{f_1, f_2\}$ 之间的间隔 Δf , 先计算其互相关性(cross-correlation), γ_{12} 如等式(5)所示:

$$\gamma_{12} = \int_0^T e^{i2\pi f_1 t} (e^{i2\pi f_2 t})^* dt = \int_0^T e^{i2\pi(f_1 - f_2)t} dt = \frac{\sin(\pi \Delta f T)}{\pi \Delta f} e^{i\pi \Delta f T} \quad (5)$$

其中 $\Delta f \triangleq f_1 - f_2$ 为两子载波频率 $\{f_1, f_2\}$ 之间的间隔,在上式中若 $\Delta f T = n$, 其中 n 为一个非零整数,如: $\Delta f = \frac{n}{T}$, 则此时 $\gamma_{12} = 0$ 即代表这两个子载波在信号周期内为正交^[9]。

OFDM 系统具有正交性的信号除了在时域满足式 4 外,还要满足在傅立叶积分区间内每个子载波分支信号必须要有整数倍的周期讯号和相邻两个子载波分支信号的周期数必须相差 1^[10]。如果 OFDM 信号满足了上述的正交特性,子载波间不互相干扰,能够正确的还原出原始信号^[11],如等式(6)所示。

$$\begin{aligned} & \int_{t_i}^{t_i+T} e^{-j2\pi \frac{k}{T} \langle t-t_i \rangle} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} d_n e^{j2\pi \frac{n}{T} \langle t-t_i \rangle} dt \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} d_n \int_{t_i}^{t_i+T} e^{j2\pi \frac{n-k}{T} \langle t-t_i \rangle} dt = d_k T \end{aligned} \quad (6)$$

时域波形和频谱如图 1 所示。

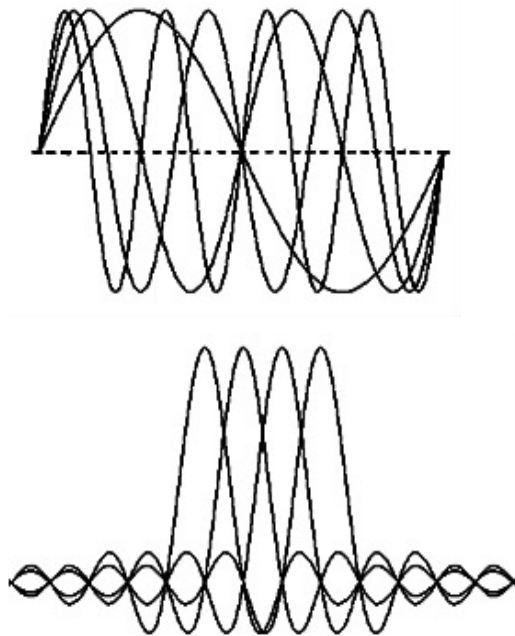


图 1 OFDM 时域频谱与波形

2 系统设计

2.1 OFDM 系统总体设计

OFDM 基带系统框图具体包括信源和信宿、纠错

编码和译码、调制映射和逆映射、IFFT 和 FFT、并/串和串/并变换、信道以及信道估计。当二进制数据流传输到了这个 OFDM 系统,首先是经过信道编码,提高系统的可靠性,降低接收端的误码率。然后进行交织处理,防止突发性的错误导致连续一段数据发生错误,无法进行纠错。交织后的数据然后经过串并变换,降低数据流的率。再经过 QAM 映射,映射成实部和虚部两个部分,提高信道的频谱利用率。经过 IFFT 的变换后变成了将要在信道上传输的多载波信号,然后将这 N 路子载波信号叠加,即进行并串变化,再在每一个 OFDM 符号前加入保护间隔,这样就完成了整个 OFDM 系统基带处理部分,最后经射频电路部分由天线发射出去。图 2 给出了一个 OFDM 系统的结构框图,上半部分为发射端,下半部分为接收端,其中调制映射部分为 64-QAM 映射,虚线框内即为本设计的基带数据传输系统模块。

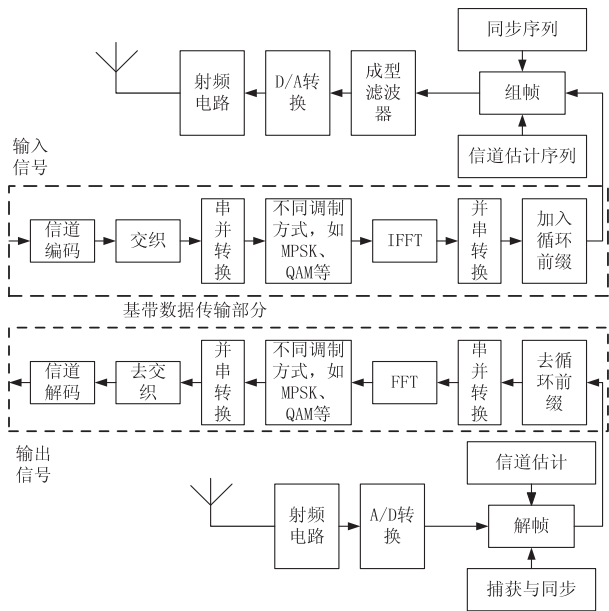


图 2 OFDM 系统结构图

2.2 IFFT/FFT 处理模块

在 OFDM 系统中,主要就是实现子载波正交性来达到频分复用的目的,而 IFFT 和 FFT 模块就是实现信号调制与解调的核心处理部分。

采用大点数的 FFT 处理器能获得更好杂波抑制效果^[12],因此在处理时采用点数为 4096 点。为保证大点数 FFT 元算的实时性,本模块利用 CORDIC 算法在计算矢量方面的优势,简化旋转因子的计算。该 FFT 处理器模型的总体结构如图 3 所示。整个模块由内存控制器、蝶形运算单元、数据流水线模块、加法器,以及外部的 RAM 存储器组成。该模块可参数化设置,可对处理的采样点数,处理的精度进行设置以满足实际需要。

该处理器模块在处理器使能信号的控制下,整个

处理器进入准备状态,并在内存控制器的控制下,读出待处理的原始数据并送入蝶形运算单元以及数据流水线单元,数据经过核心处理单元处理后其结果再与数据流水线单元的输出做加、减运算。最终,计算结果又在内存控制器的控制下重新写入外部存储器。在整个处理过程结束后,由内存控制器单元重置处理器状态,并给出完成信号。

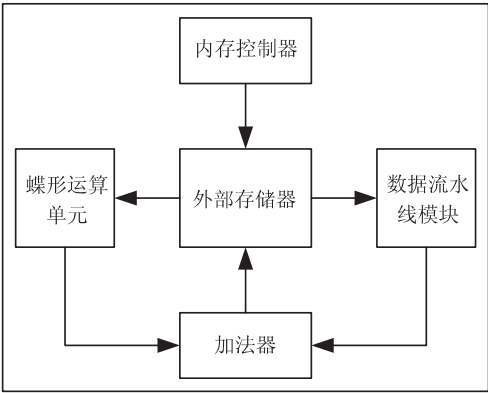


图 3 FFT 模块构架图

3 系统测试

本设计用 VHDL 语言对该设计单元进行了 RTL 级描述,并以 Altera 公司的 EP2C35F672C6 为目标芯片,在 Quartus II 8.0 平台上进行了设计布线,利用 ModelSim SE 6.0 进行了综合仿真,最后在 DE2 开发板上进行了下载验证。

3.1 FFT 仿真

在整个系统的仿真时钟为 50MHz 时,其仿真波形如图 4 所示。图中显示在各级流水线间存在一定的延时与毛刺现象,但并不影响整个系统的正常工作,其运行结果是正确的,达到了预期的设计目标,具有良好的

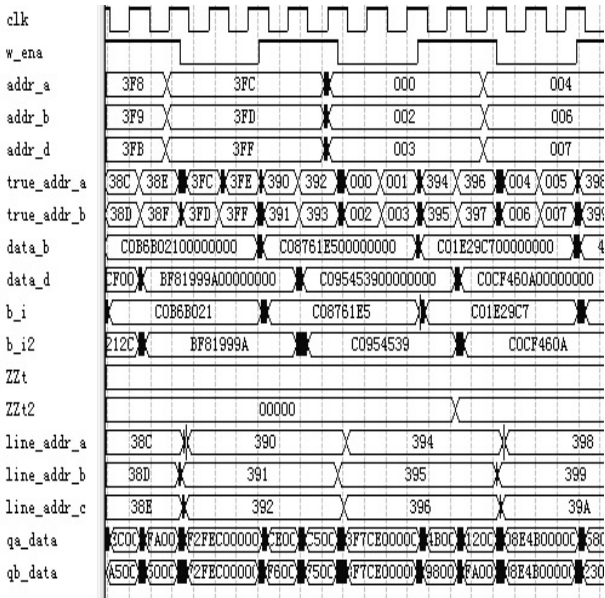


图 4 仿真波形

时性,完全可以满足对本设计的 OFDM 系统调制的要求。

3.2 64-QAM 映射

64-QAM 映射要求数据分成 6 比特一组,再按照格雷码的形式映射到各个子信道的实部(I)和虚部(Q),其中 $b_0b_1b_2$ 决定 I 路取值, $b_3b_4b_5$ 决定 Q 路取值。

$D = (I + jQ) K_{MOD}$,表示各个子信道的数据。

64-QAM 映射输入输出转换关系如表 1 所示。

星座映射如图 5 所示。

表 1 64-QAM 映射输入输出转换表

Input Bits ($b_0b_1b_2$)	I_{out}	Input Bits ($b_3b_4b_5$)	Q_{out}
000	-7	000	-7
001	-5	001	-5
011	-3	011	-3
010	-1	010	-1
110	1	110	1
111	3	111	3
101	5	101	5
100	7	100	7

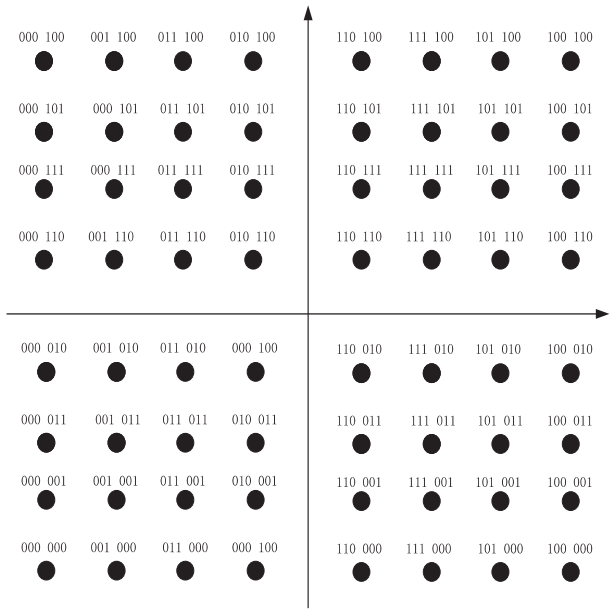


图 5 64-QAM 映射星座图

4 结束语

文中设计实现了一个 OFDM 基带数据传输系统,

并利用 FPGA 的可重构性与灵活性,采用基于 CORDIC 算法流水结构高速浮点蝶形运算单元的 FFT 专用处理器,且该处理器不依赖于存储空间大小,具有结构简单、精度高、杂波抑制性好的特点;并使用在自适应调制模式下的增强。调制方式(64-QAM)来实现信号的调制,具有较高的传输速度。

该系统合理利用 FPGA 资源,高度集成在一个 FPGA 芯片内,不采用任何的专用芯片,大大简化了系统的复杂度,且具有较高的灵活性与通用性,有一定的应用前景。

参考文献:

[1] 杨 军,郭跃东,将慕容. 基于 FPGA 的 FFT 处理器的研究与设计[J]. 计算机技术与发展,2009,19(9):225-227.

[2] 李振娜. 基于 OFDM 系统的调制解调技术[J]. 信息技术,2007(5):54-57.

[3] Lee H. A High-speed Low-complexity Reed-solomon Decoder for Optical Communications[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II:Express Briefs,2005,52(8):461-465.

[4] 张 甜,王祖强,徐 辉. 改进的并行 CORDIC 算法研究及其 FPGA 实现[J]. 电子技术应用,2006(4):106-107.

[5] Jiang Tao, Wu Yiyang. An Overview: Peak-to-Average Power Ratio Reduction Techniques for OFDM Signals [J]. IEEE Transactions on Broadcasting,2008,54(2):257-268.

[6] Wenk M, Luethi P, Koch T, et al. Hardware platform and implementation of a real-time multi-user MIMO-OFDM testbed [C]//ISCAS 2009. [s. l.]:[s. n.],2009:793-793.

[7] 常葆稷,蒋慕蓉,杨 军,等. 基于 FPGA 的 OFDM 系统数据传输仿真实现[J]. 云南大学学报(自然科学版),2009,31(S1):94-99.

[8] 唐佐侠,杨 军,董 寅. 基于 FPGA 的十进制浮点乘法器的设计与研究[J]. 云南大学学报(自然科学版),2010,32(5):526-531.

[9] 李 健. 基于 FPGA 实现 OFDM 基带调制系统[D]. 西安:西北工业大学,2007.

[10] 侯志坚,董军军,李 杰,等. OFDM 中的 FFT 处理器设计及 FPGA 实现[J]. 中国现代教育装备,2010(21):40-42.

[11] 李 攀,田 泽,蔡叶芳,等. 基于 FPGA 的 SOPC 的 PCI 通信接口设计与实现[J]. 计算机技术与发展,2009,19(9):211-214.

[12] 马吉祥,邓 勇. 基于大点数 FFT 的 OFDM 系统调制解调实现[J]. 工业控制计算机,2010,23(6):74-78.