

# 基于FPGA的简易数字信号传输性能分析系统

行韶谔,段衍东,韩涛

(电子科技大学自动化工程学院,成都 611731)

**摘要:**基于FPGA产生伪随机信号和曼彻斯特编码,以MSP430为基本功能控制单元,通过三路低通滤波器和伪随机信号信道噪声来模拟传输信道,设计了一个以数字信号发生器,模拟传输信道和数字分析电路为核心的简易数字信号传输性能分析系统,实现了数字信号传输特性测试。测试表明系统工作稳定,输入信号动态范围大,眼图清晰,达到了设计要求。

**关键词:**伪随机信号;曼彻斯特编码;信号传输;数字分析

**中图分类号:**TN911.72 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-009X(2012)03-0041-06

## A simply-constructed digital signal transmission performance analyzer based on FPGA

Xing Shaoxu, Duan Yandong, Han Tao

(School of Automation, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731)

**Abstract:** This design that is mainly controlled by MSP430 is a simply-constructed digital transmission performance analyzer with an interactive interface containing a digital signal producer, an analog transmission channel and a digital analyzer as its core. The design produces random binary sequences and Manchester codes on the basis of FPGA and uses three low pass filters to simulate the transmission channels while adding high frequency noise to the signal. The test of this design shows that the system, with a large dynamic range, can work stably, and the eye diagram is clear.

**Key words:** random binary sequences; Manchester codes; signal transmission; digital analyzer

## 0 引言

随着现代数字通信技术的快速发展,数字信号传输与处理技术得到了广泛的应用,数字信号在传输的过程中会受到传输线路阻抗和噪声等因素的影响,从而产生传播衰落、码间干扰、邻近波道干扰等问题<sup>[1]</sup>,这就需要用各种各样的通信测试仪器完成数字传输参数的测量与调试<sup>[2]</sup>。数字传输性能分析系统作为一种数字通信系统设计与检测的设备,在数字传输系统的工程施工、验收及日常维护检测等方面发挥着重要的作用。因此,一种简易的、便于维护人员进行现场操作的、价格

低廉的测试仪器便显的尤为重要<sup>[2]</sup>。本文根据2011年全国大学生电子设计竞赛试题《简易数字信号传输性能分析仪》的设计要求,设计了一个基于FPGA产生伪随机信号和曼彻斯特编码<sup>[3]</sup>,以MSP430为基本功能控制单元的简易数字信号传输性能分析系统。本系统主要包括数字信号发生器,传输信道,数字分析电路和控制单元4个部分。

## 1 系统整体设计

根据简易数字信号传输性能分析系统的要求,系统设计包括数字信号发生器,数字信号传输信道,数字分析电路和控制单元4个部分,总体框图

收稿日期:2012-05-17.

作者简介:行韶谔(1991-),男,大学,研究方向:测控技术与仪器方面研究。

如图 1 所示。通过 FPGA 分别产生数字信号  $V_1$ ，模拟信道噪声  $V_3$ 。传输信道由不同截止频率的 3 个低通滤波器来模拟，在数字信号分析电路中，利用

FPGA 对输入信号进行时钟提取和同步，然后将检测信号  $V_4$  和其同步时钟输入到示波器，显示眼图。整个系统由单片机 MSP430 来控制。

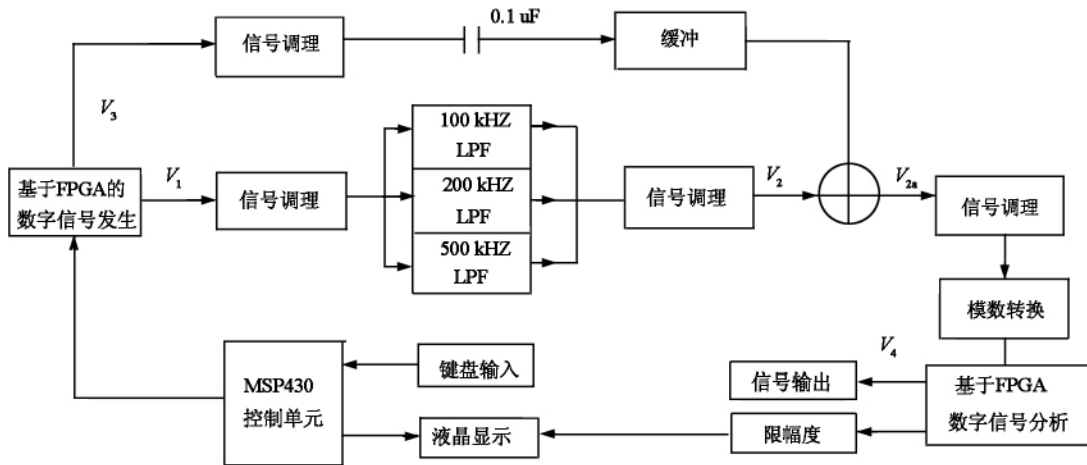


图 1 系统总体框图

数字信号发生器产生  $V_1$  为  $f(x) = 1 + x^2 + x^3 + x^4 + x^8$  的  $m$  序列，数据率由 10 ~ 100 Kbps 按照 10 Kbps 步进可调，而且数据率误差绝对值不大于 1%。输出为 TTL 电平。考虑到可编程逻辑器件有利于数据率和数据格式的灵活产生，并且开发周期很短。在此采用了以 FPGA 为核心的信号发生器，通过编程可以方便地产生多路，任意数据率的伪随机信号，用来模拟传输信道噪声。传输信道幅频特性使用一系列信号调理电路和 3 个低通滤波器来模拟，传输信道中的低通滤波器通带增益和不同截止频率可以根据需要在一定范围内进行设置，为了电路结构简单，调试方便，可以采用简单 RC 网络来进行滤波。

数字分析电路主要进行信号检测、同步信号提取等，可采用整流滤波或数字锁相。在数字通信领域，也可采用滤波法和锁相法直接从接收到的数字信号中提取位同步信号，滤波法是利用窄带滤波器对含定时信息的归零二进制序列进行滤

波，从中滤出所要的位同步分量，并进行整形、移相等处理，即可得到规则的位同步脉冲。但对于曼彻斯特码而言，其本身具有丰富的定时信息，通过捕获窄脉宽来确定码元速率，再采用数字锁相进行同步后，可以得到相应的同步信号，但该方案在低信噪比的情况下质量不高。

## 2 理论分析与计算

### 2.1 数字信号

该系统要求数字信号有两种码型，即  $m$  序列和曼彻斯特码。

$m$  序列产生的一般结构模型如图 2 所示。其中： $a$  是各移位寄存器的状态； $c$  是对应各移位寄存器的反馈系数， $c_i = 1$  表示该级寄存器反馈， $c_i = 0$  不反馈。根据设计要求，数字信号的反馈函数为  $f(x) = 1 + x^2 + x^3 + x^4 + x^8$ ，反馈移位寄存器级数为 8，则得到相应的序列长度为  $2^8 - 1$ ，由反馈函数得到其反馈系数为“100011101”。

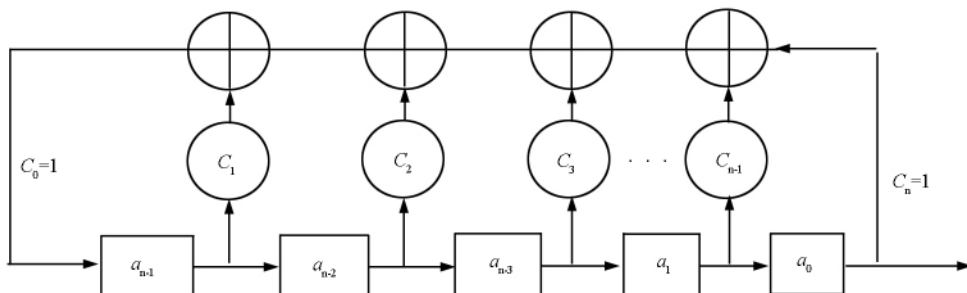


图 2  $m$  序列生成流程示意图

在编码设计中，通过 VHDL 硬件描述语言使相应位做异或运算后反馈到最低位寄存器，输出

最高位寄存器，并不断如此循环，产生一定长度的伪随机序列。对于 10 MHz 的噪声序列，也可以

用这种方法产生。对于所需要的码元速率,以相应的系统主时钟分频后的信号为线性移位寄存器的工作时钟,得到所需编码。曼彻斯特码则是一种特殊的码型,它是由  $m$  序列和  $m$  序列的生成参考时钟信号做与或所得到的,它不再用高低电平来表示 0 和 1,而是采用电平的上升沿和下降沿表示 0 和 1。

## 2.2 同步信号的提取

同步信号的提取是眼图显示所必须的,本设计采用数字锁相相位同步提取,其具体框图如图 3 所示。

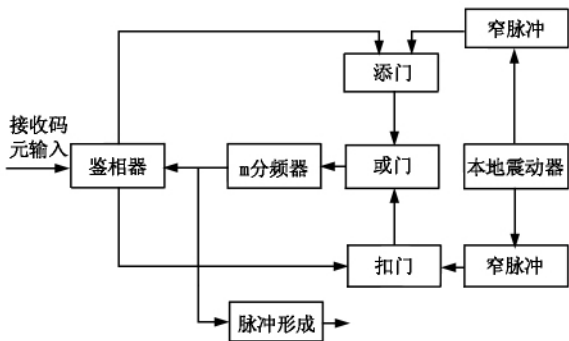


图3 数字锁相环流程示意图

使用  $m$  序列为数字信号时,眼图的同步时钟可由  $m$  序列产生时钟直接供给。当曼彻斯特码为数字信号时,其眼图同步信号需从曼彻斯特码中提取。曼彻斯特码是一种用电平跳变来表示 1 或 0 的编码,每个码元均用两个不同相位的电平信号表示,也就是一个周期的方波,0 码和 1 码的相位正好相反,每一位的中间有一跳变,位中间的跳变既作时钟信号,又作数据信号。针对曼彻斯特码的这种特点,通过对输入信号的窄脉冲的脉宽进行测量,从而确定本地时钟所需要的分频系数,将此系数赋值给本地时钟分频器,得到合适的时钟频率,与输入码元信号进行比较。

本地高频时钟振荡频率为  $(m \times f)$  Hz,即所要提取的位同步信号频率  $f$  的  $m$  倍,其中:  $m$  位

是分频系数。通过鉴相电路比较接收码元与  $m$  分频的输出信号之间的相位关系,相应的产生一个超前和滞后脉冲,分别送至添门和扣门,于是可以实时的加入窄脉冲,由以上方法,反复调整本地时钟相位,以实现位同步。

## 2.3 眼图显示方法

眼图是指利用实验的方法估计和改善传输系统性能时在示波器上观察到的一种图形。观察眼图的方法是:用一个示波器跨接在接收滤波器的输出端,然后调整示波器扫描周期,使示波器水平扫描周期与接收码元的周期同步,由于示波器的余辉效应,扫描所得的每一个码元波形将重叠在一起,从而形成眼图。

根据设计要求,利用数字信号发生器产生的时钟信号进行同步,显示数字信号的信号眼图。此时可以利用示波器的外触发功能,将时钟信号作为外部出发源,同步地触发波形产生,从而在示波器的屏幕上形成眼图。另外本设计也允许将从经噪声等干扰后的数字信号中提取出的时钟信号作为眼图的同步信号。

## 3 系统硬件电路设计

### 3.1 低通滤波器及通带增益调节电路设计<sup>[4]</sup>

根据设计要求,低通滤波器应该具有每 10 倍频 40 dB 的衰减,理论上需要一个二阶 RC 滤波网络,但是由于滤波器过渡带的存在,实际需要 4 阶 RC 网络才能达到在其截止频率 10 倍频时衰减 10 倍频,为调试方便,采用简单的四 RC 低通滤波器,并在每个 RC 网络间中利用高阻抗、低直漂的运放 TL082 进行隔离。由于需要 3 路不同截止频率的低通滤波器,所以在 3 路前后都用拨码开关进行控制。电路图如图 4 所示,图中仅给出一路滤波器电路,其它两路类似。

对于通带增益 0.2~4 倍的要求,我们首先使用电位器进行电阻分压,实现可调衰减 0.2~1 倍,

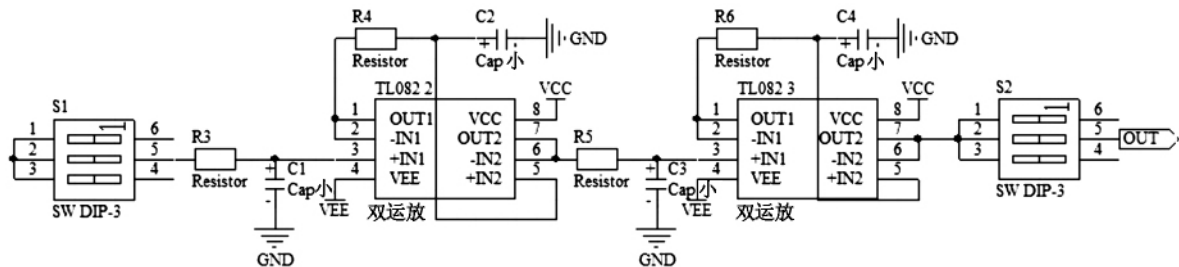


图4 低通滤波器设计电路

再采用 4 倍固定增益放大。为防止放大后信号失真,采用输出幅度可达正负 12 V,高压摆率的电

流型运放 AD811 进行固定增益接近 5 倍的放大,电路如图 5 所示。

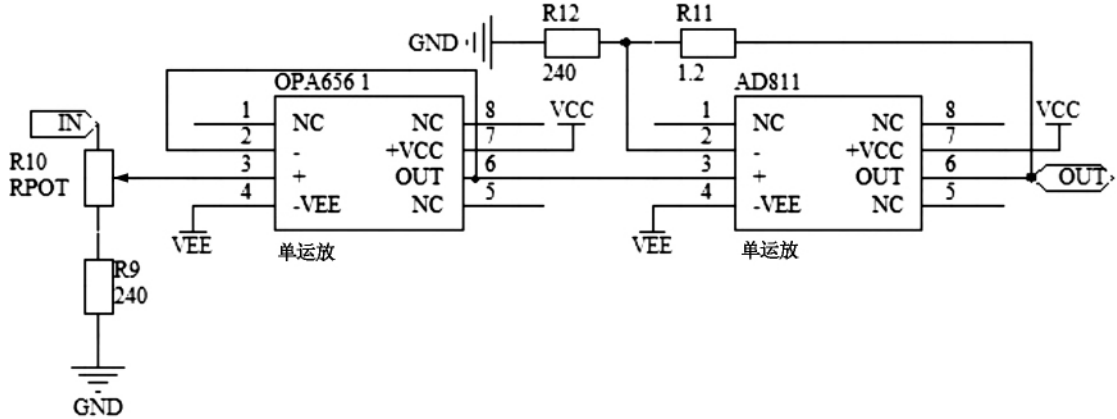


图 5 通带增益调节电路

### 3.2 噪声信号调理与信号相加电路<sup>[4]</sup>

为简化电路,用 FPGA 产生另一组伪随机码实现噪声,幅度利用电阻分压调节,与下一级隔离采用高速运放进行缓冲。加法器制作中,信号幅度最大接近 10 V,噪声频率非常高,普通的高速

运放难以满足要求,经过筛选,选择 AD811 高速电流反馈运放实现加法器,该运放带宽大,工作电压高,使噪声不会因为经过加法器产生失真或者衰减,电路如图 6 所示。

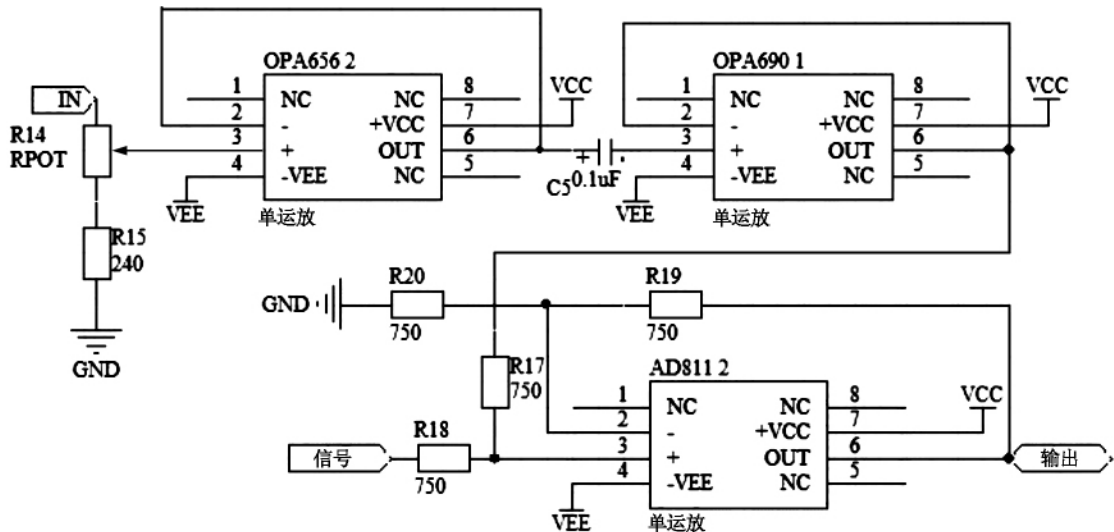


图 6 噪声调理和信号叠加电路

### 3.3 AD 数据处理前信号调理电路<sup>[5]</sup>

由于采用数字同步方案,噪声对 FPGA 的后续处理影响很大,故考虑在 AD 转化器之前加入滤波调理电路滤除噪声,由于数字滤波器对于 FPGA 内部资源占用较大,信号频率与噪声频率差距较大,故模拟滤波器可以非常轻松的完成要求,所以在进入 AD 之间,设计 2 阶 sallenkey 结构的有源滤波器,将信号从噪声中提取出来,为了精确采集信号幅度信息等,我们将 AD 输入电压

范围设置在 1.024 V,因此利用电阻分压对信号进行了相应的衰减。电路如图 7 所示。

## 4 系统软件设计

系统软件是数字信号传输性能分析系统重要组成部分,分为 3 个部分,MSP430 控制程序,前端 FPGA 序列产生算法和 FPGA 数字信号分析程序。

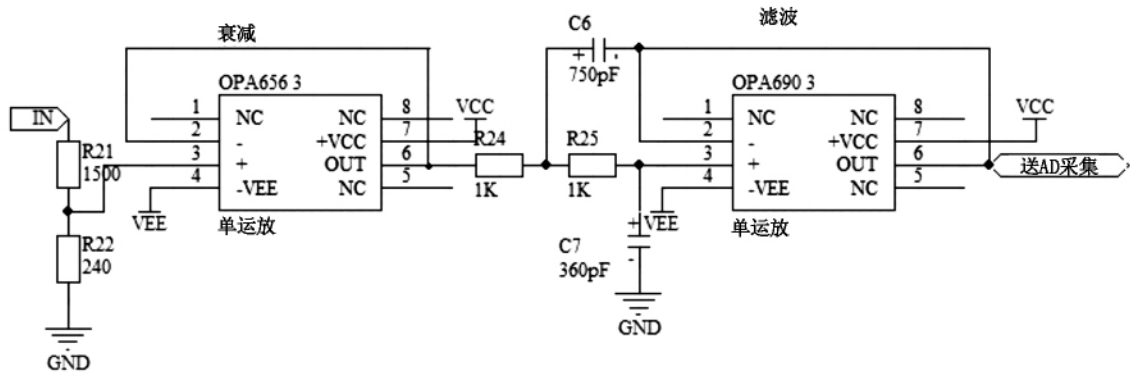


图 7 AD 信号与处理电路

#### 4.1 MSP430 控制框图

MSP430 主要负责按键输入检测,液晶显示,并且置位相应的控制位,进而完成码元速率的切换,输出同步时钟的开关,和编码类型的变换。并且通过读取 FPGA 传送的数据,在液晶上实时显示眼幅度,其框图如图 8 所示。

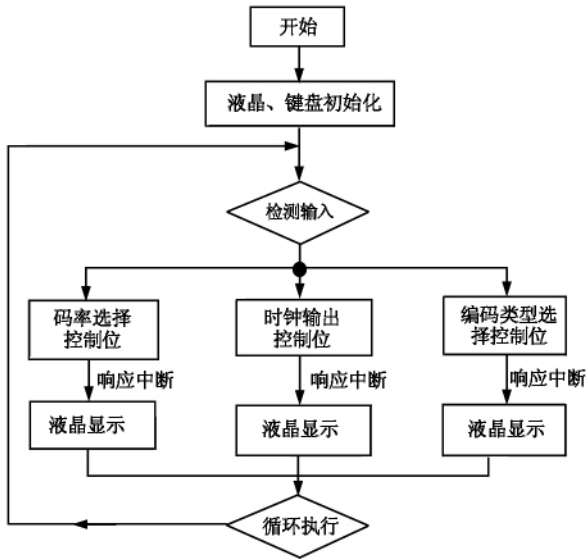


图 8 MSP430 程序系统框图

#### 4.2 基于 FPGA 的 m 序列和曼彻斯特码产生

本设计要求产生  $m$  序列和曼彻斯特码,  $m$  序列即伪随机序列,根据前述原理设计相应的 FPGA 程序,  $m$  序列的产生软件流程图如图 10 所示。曼彻斯特码则是一种特殊的码型,它是由  $m$  序列和  $m$  序列的生成参考时钟信号做与或所得到的,其“0”,“1”不再有高低电平表示,而是分别由上升下降沿表示,根据这一原理,只要简单的将  $m$  序列与其时钟做与或运算即可得到,其生成软件的流程图如图 9 所示。

#### 4.3 FPGA 数字信号分析

信号经滤波器调理后,大部分噪声被滤去,然

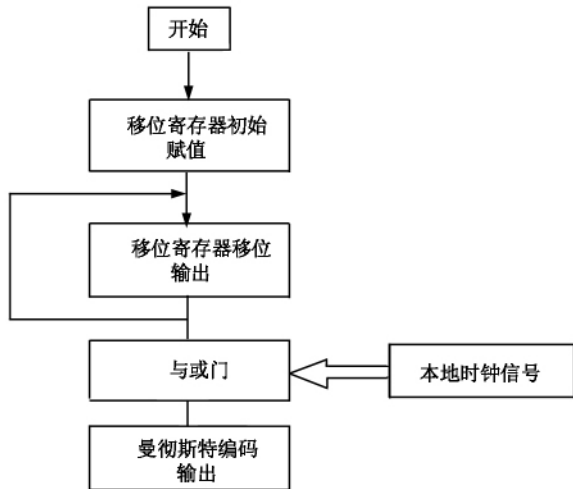


图 9 曼彻斯特码产生流程

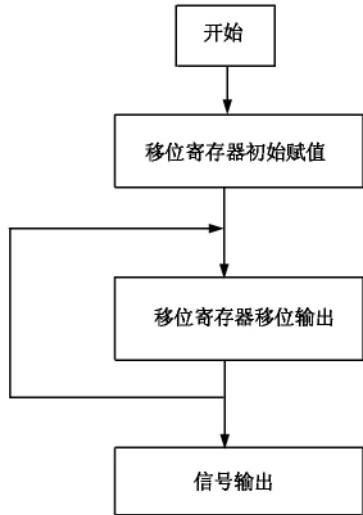


图 10 m 序列产生流程图

后经 AD 采样送入 FPGA,在 FPGA 内部过零比较,整形之后计算脉冲宽度,经多次比较选择最小值判断当前码率,选择相应的系数进行锁相等操作生成相应的同步时钟信号。采用测周法计算脉冲宽度,通过计算相邻两次上升和下降沿之间系统时钟的脉冲数来测量被测脉冲的宽度,由于

FPGA 的系统时钟频率和被测码率之间的关系, 这种方法的测量精度可以满足信号处理要求, 其软件流程图如图 11 所示。

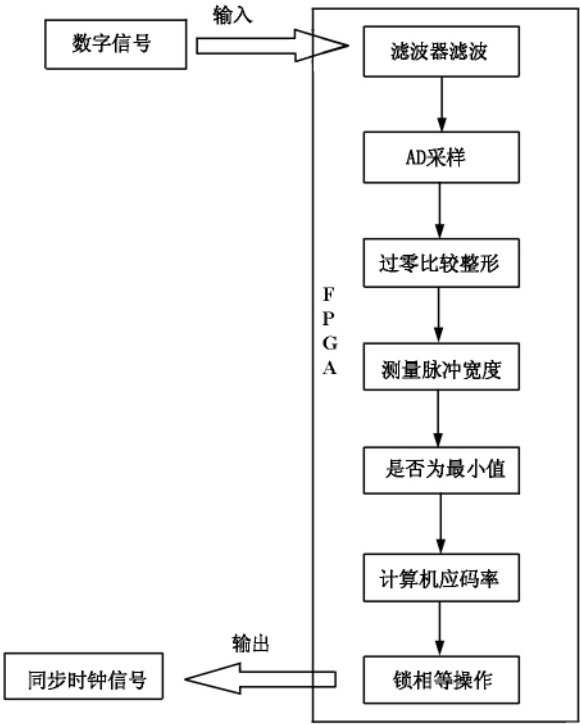


图 11 FPGA 数字信号处理流程图

此外, FPGA 还会存储一段时间内的 AD 所采集到的电压数据, 对此进行分析, 算出幅度大小, 并对数据进行定时刷新, MSP430 经过相关的程序从 FPGA 处获得幅度信息并显示。

5 系统测试与误差分析

在设计完成后, 进行了系统测试, 测试选用的仪器为泰克示波器和 DDS 数字信号发生器, 对其产生的  $m$  序列的实际码率, 码元的电平进行了测试, 同时还对 3 组模拟信道的滤波器的特性进行了测试, 测试其在相应的频率点处的信号幅度, 测试其频率特性是否满足设计指标, 此外还对滤波器的通带增益进行了测试, 测试其放大倍数是否合乎要求。

(1)  $m$  序列信号测试, 见表 1。

(2) 滤波器特性测试, 见表 2。

测试条件: 输入信号为  $1 V_{pp}$  的正弦波, 测试其幅度为  $0.707 V_{pp}$  的频点

(3) 带通增益测试, 见表 3。

试条件: 输入为  $2.7 V_{pp}$  频率  $1 \text{ kHz}$  正弦信号。

表 1  $m$  序列信号测试结果记录表

码率/k	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
实测码率/k	10.00	20.00	30.20	40.00	50.00	59.52	69.44	79.37	89.29	100
码率误差	0%	0%	0.67%	0%	0%	0.8%	0.8%	0.78%	0.79%	0%
实测电平/V	2.55	2.6	2.65	2.58	2.52	2.58	2.54	2.55	2.56	2.56

表 2 滤波器特性测试结果记录表

		$f_c$	$2f_c$	$3f_c$	$5f_c$	$10f_c$
通道一	截止频率	105 kHz	210 kHz	315 kHz	525 kHz	1 050 kHz
	信号幅度	0.707 V	0.312 V	0.13 V	0.037 V	0.026 V
通道二	截止频率	200 kHz	400 kHz	600 kHz	1 000 kHz	2000 kHz
	信号幅度	0.707 V	0.35 V	0.172 V	0.046 V	0.005 V
通道三	截止频率	510 kHz	1 020 kHz	1 530 kHz	2 550 kHz	5 110 kHz
	信号度	0.707 V	0.313 V	0.14 V	0.048 V	0.001 V

表 3 带通增益测试结果记录表 V

	最小值	0.2 倍	4 倍	最大值
通道一	0.52	0.54	10.8	12
通道二	0.53	0.54	10.6	12.2
通道三	0.52	0.54	10.9	12.1

6 结束语

本文根据设计要求, 完成了简易数字信号传输性能分析系统的设计, 并进行了测试。在系统设计中, 我们通过 FPGA 完成了不同码率的  $m$  序

列以及曼彻斯特码等数字信号的发生, 并由 MSP430 控制不同数字信号的输出, 通过信号调理后, 经过截止频率分别为  $100 \text{ kHz}$ ,  $200 \text{ kHz}$ ,  $500 \text{ kHz}$  的低通滤波器, 再与  $10 \text{ MHz}$  的伪随机序列噪声相加, 最后送入 FPGA 进行同步时钟信息的提取, 在示波器上显示出眼图。整个设计过程中, 同步时钟的提取过程是重中之重, 同时怎样在低性噪比条件下提取同步时钟信号成了我们进一步探究的问题。(下转第 53 页)

大到暴雨过程进行了诊断分析,探讨这几个物理量用于暴雨诊断分析的可行性,试图找出对暴雨发生有较好指示意义的因子,得出了一些有意义的结论。

(1) 在 700 hPa 上,湿位涡高值区对应地面上的降水区,用湿位涡的不可渗透性原理,将 MPV 异常高值区与等线配和在我国中东部暴雨中有很好的指示性。

(2) 通过观测资料分析每日 00:00 UTC 在 850 hPa 上的  $MPV_1$ 、 $MPV_2$  和 700 hPa 上的垂直螺旋度,发现凡是出现垂直螺旋度的相对大值区、 $MPV_1$  正值和  $MPV_2$  负值三者重叠的区域,都是降水的大值区; $MPV_1$ 、 $MPV_2$  的正负重叠区,但不是垂直螺旋度的大值区,有可能不出现降水或少量降水,这对降水大值区的预报有很好的指示意义。

#### 参考文献:

- [1] Rossby C G. Relation between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semi-permanent centers of action[J]. J Marine Rev, 1939, 2(1): 38-55.
- [2] Rossby C G. Planetary flow patterns in the atmosphere(supply) [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1940, 66: 68-67.
- [3] Ertel H. Ein neuer hydrodynamischer wirbelsatz[J]. Met Z, 1942, 59: 277-281.
- [4] Hoskins B J, McIntyre M E, Robertson A W. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1985, 111: 877-

946.

- [5] Bennetts D A, Hoskins B J. Conditional symmetric instability - A possible explanation for frontal rainbands[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1979, 105: 945-962.
- [6] 吴国雄,蔡雅萍,唐晓菁. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. 气象学报, 1995, 53(4): 387-404.
- [7] Gao S T, Ping F, Li X, et al. A convective vorticity vector associated with tropical convection; A two-dimensional cloud-resolving modeling study[J]. Geophys Res, 2004, 109: D14106, doi: 10. 1029/2004JD004807.
- [8] Gao S, Cui X, Zhou Y, et al. A modeling study of moist and dynamic vorticity vector associated with two-dimensional tropical convection [J]. Geophys Res, 2005, 110: D17104, doi: 10. 1029/2004JD005675.
- [9] Gao S T, Li X, Tao W, et al. Convective and moist vorticity vectors associated with tropical oceanic convection: A three-dimensional cloud-resolving model simulation[J]. Geophys Res, 2007, 12: D01105, doi: 10. 1029/2006JD007179.
- [10] 赵宇,高守亭. 对流涡度矢量在暴雨诊断分析中的应用研究[J]. 大气科学, 2008, 32(3): 444-456.
- [11] 赵宇,崔晓鹏. 对流涡度矢量和湿涡度矢量在暴雨诊断分析中的应用研究[J]. 气象学报, 2009, 67(4): 540-548.
- [12] Gao S, Lei T, Zhou Y. The moist potential vorticity anomaly with heat and mass forcing in the torrential rain systems[J]. Chin Phys Lett, 2002, 19: 878-880.
- [13] 周玉淑,邓国,雷霆. 湿位涡物质的保守性原理及其应用[J]. 中国科学院研究生院学报, 2006, 23(5): 692-700.

(上接第 46 页)

#### 参考文献:

- [1] 张辉,曹丽娜. 通信原理[M]. 北京:科学出版社, 2007.
- [2] 古天祥,王厚军,习友宝. 电子测量原理[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.
- [3] 段吉海,黄志伟. 基于 CPLD/FPGA 的数字通信系统建模与设计[M]. 北京:电子工业出版社, 2004.
- [4] 童诗白,华成英. 模拟电子技术基础[M]. 北京:高等教育出版社, 2003.
- [5] 张卫平,张英儒. 现代电子电路原理与设计[M]. 北京:原子能出版社, 1997.