

# 基于 ARM 的双路差分同步采样电路设计与实现

徐 晴, 马月红

(石家庄铁道大学 电气与电子工程学院, 河北 石家庄 050043)

**摘要:**随着科学技术的快速发展,FMCW 雷达应用非常广泛,雷达系统对差频信号精确采集决定着测距的精度。为实现对宽带高频信号的精确采样,基于 ARM 单片机设计了一种双路差分同步采样电路系统。该系统不仅可以实现普通数据采样功能,还可以实现多通道、高精度、高采样率的差分同步采样功能。系统以 ARM 单片机为主控芯片,使用 ARM 内部 ADC 模块对雷达系统中频回波信号进行 IQ 双路采集,采集的数据通过 DMA 高速传输,距离信息通过 RS232 串口与外部 PC 通信并实时显示出来。实验分析表明:该系统能够实现 5 MHz 高精度多通道差分同步采样,对 FMCW 雷达系统中频信号差分采样,并能够适当地进行信号处理,具有体积小、通用性强等优点。

**关键词:**ARM;STM32F3;双路采样;差分采样

**中图分类号:**TP335 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2021)01-0090-06

## 0 引言

数据采集系统是电子工程中非常重要的部分,它与传感器技术、信号处理技术、计算机测量技术共同构成了现代化检测技术的基础<sup>[1-2]</sup>。高精度采样系统主要应用于通信、仪器控制、医疗设备等领域,随着科技的不断进步,数字系统对数据采集技术的要求不止是简单的数据采样,而是看重其采样速度、采样模式、采样精度、有效位数(ENOB)等参数。

在雷达系统中,传统的数据采集系统是由片外 AD 采样芯片组成的,目前 FMCW 雷达系统差频回波信号大都是差分信号,使用片外 AD 对差分信号进行差分采集不仅增加了电路的大小,而且成本增高,控制难度增大。由 FMCW 雷达测距原理可知,系统通过对差频信号进行 FFT 变换,计算出差频信号的频率,进而求出目标距离。如果 IQ 差分信号采样不同步,会使测得的频率出现问题,进而影响雷达系统测距精度,ADC 的采样精度也会影响系统后续的距离定标精度。因此设计了一种基于 ARM 的双路差分同步采样电路系统,通过 STM32F3 系列单片机内部 ADC 实现对差频信号高精度同步差分采样,ADC 采样率高达 5 MHz,可同时对多路信号实现高精度、高采样率、高速采样,采集的数据通过 DMA 传输,可以将采集的数据进行存储,通过 RS232 串口总线传输到 PC 上位机进行信号处理、画图、显示<sup>[3-7]</sup>。

## 1 差分同步采样系统整体设计

双路差分同步采样电路系统设计框图如图 1 所示,该系统由电源模块、差分信号模块、ARM 电路、flash 存储模块、串口通信电路、PC 上位机组成<sup>[8]</sup>。其中 ARM 电路为系统的主控,实现对差分信号的差分 ADC 采集,并将采集的差分信号通过 DMA 通道传输。电源模块直接采用 5 V 输入,通过 LFM3117-3.3 芯片转换为 3.3 V 供电电压,这里不再赘述。

收稿日期:2019-11-22 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20190198

基金项目:国家自然科学基金(61601496)

作者简介:徐晴(1995—),男,硕士研究生,研究方向为无线电探测技术。E-mail:690127299@qq.com

徐晴,马月红.基于 ARM 的双路差分同步采样电路设计与实现[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2021,34(1):90-95.

©1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

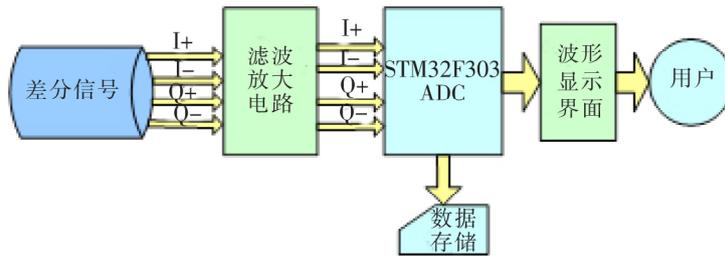


图 1 总体设计框图

双路差分同步采样电路系统工作流程如下:首先差分信号模块产生 2 对差分信号分别为 I+、I- 和 Q+、Q-, ARM 内部 ADC 配置成双路差分同步采样模式, ADC 差分采集差分信号将信号数组存放到 CR 寄存器中,然后通过 DMA 通道传输,系统在 DMA 中断服务函数中对采集的差分信号进行信号处理,系统可以进行信号存储,将采集的信号存放到 SD 存储卡,便于记录信号供后期测试,还可以通过 RS232 串口发送给上位机实现通信,并将信号波形信息显示出来。

## 2 差分同步采样电路硬件设计

### 2.1 ARM 芯片选择

在 FMCW 雷达系统中,雷达中频信号一般是 IQ 双路,并且是差分信号。为了减小系统成本以及电路规模,本设计选用带有内部差分 ADC 的 ARM 芯片来代替片外 ADC,为了实现对高频信号精确采样,要求 ADC 的采样率达到 5 MHz。含有 ADC 的 STM32 系列非常多,但是并不是每一款芯片都可以达到 5 MHz 采样率。此时需要关注 2 个指标,一个是 ADC 支持的最高采样率,另一个是它的模拟带宽。STM32 系统时钟大都在 48 MHz 和 72 MHz,通过设置时钟分频后要保证 ADC 采样率至少为 5 MHz,模拟带宽保证 ADC 模拟部分通带至少达到 2.5 MHz。

市场上做开发板最多的是 STM32F103、STM32F407、STM32F429 系列,并且配套资源齐全,F4 系列的 ADC 采样率可以达到 2.5 MHz,但是其 ADC 没有差分模式。STM32F3xx 具有 5 MHz 采样率的 ADC,并且满足差分采样功能,本设计最终选择 STM32F303 微控制器。该 ARM 以 Cortex-M4 为内核,具有高速、低功耗、实时性等特点,内置 12 位高速 AD 转换器、定时器模块、内部存储模块、DAC 模块等外设,根据数据采集的需求不同,可以实现多种模式 ADC 数据采集。

### 2.2 芯片管脚分配

STM32F303vct 这款主控芯片有 100 个管脚,参考的资料为芯片参考手册及数据手册,通过 ST 意法半导体的原创工具 STM32CubeMx 软件来配置 STM32F303 双路 ADC 差分同步采样模式,选择 ADC1 的通道 1 和通道 2,ADC2 的通道 3 和通道 4 为差分通道,将 ADC 配置成双路规则同步模式,并打开 DMA 请求和 ADC 连续转换模式,ADC1、ADC2 采集到的差分信号同时存放到一个 32 位的数组,其中 ADC1 采集的数据存放到数组低 16 位,ADC2 采集的数组存放到高 16 位。串口选择 usart1,通过串口转 RS232 将数组信号传送给 PC 上位机一边分析处理、显示。ARM 芯片管脚分配关系如表 1 所示。

表 1 STM32F303 管脚分配

系统模块	功能	芯片管脚
系统时钟	RCC_OSC_IN	PF0
	RCC_OSC_OUT	PF1
差分 ADC1	ADC1_IN1	PA0
	ADC1_IN2	PA1
差分 ADC2	ADC2_IN3	PA6
	ADC2_IN4	PA7
USART 串口	USART1_RX	PB7
	USART1_TX	PB6

### 2.3 滤波放大电路设计

系统以雷达系统中频信号为信号源,为了使该系统采集到高质量的差频信号,系统需在 ADC 采样前对信号进行滤波放大处理,滤波放大电路设计包括两级放大电路和一级滤波电路。

系统为了满足微型化、低功耗等要求,如果对 2 对差频信号同时进行滤波放大处理,不仅增加电路规模、功率、成本,而且会引入误差,为此将每路差分信号转成单端信号来处理。第一级放大电路如图 2 所示,该电路主要作用是将差分信号转化成单端信号同时对信号进行放大处理。AD8426ACPZ 是一种轨至轨输出仪表放大器,仅需要一个外部电路来调节功率,而且满足对差分信号放大转化成单端信号的功能。

图 3 为滤波电路,该电路由两级一阶有源低通滤波器组成,中频信号经过滤波电路后有效地滤除高频噪声,系统可以采集到高质量的中频信号。

图 4 为第二级放大电路,该电路主要功能是单端信号转差分信号并对信号放大驱动 ADC 差分采样。ADA4941 是一种低功耗、低噪声差分驱动器,其输出的差分信号具有低失真、高信噪比的特点,可驱动高精度差分 ADC。

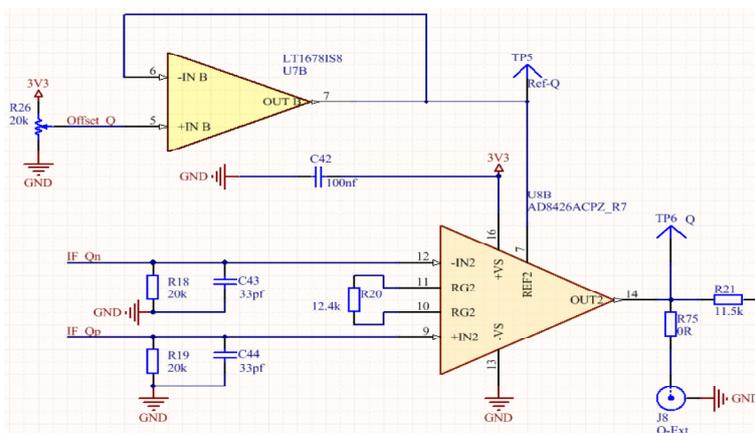


图 2 第一级放大电路

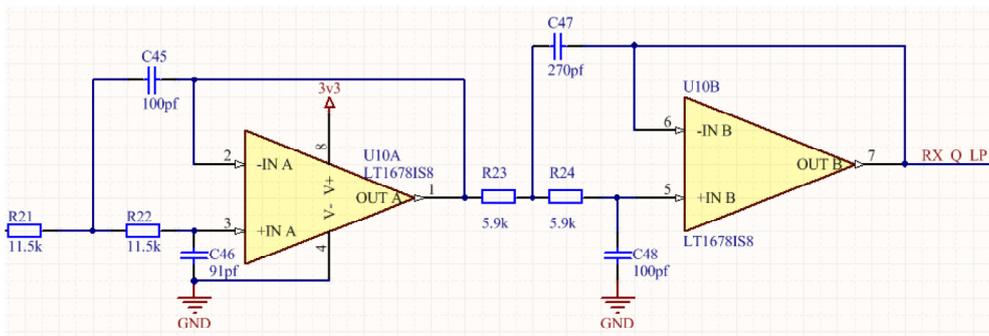


图 3 滤波电路

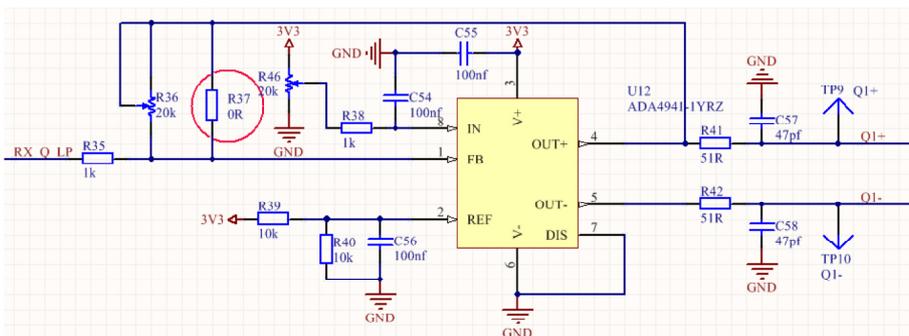


图 4 第二级放大电路

### 2.4 SD 卡存储模块

系统选择 SD 卡作为存储模块,具有较好的稳定性、通用性及容量高、读写速度快等特点。SD 卡通过 SDIO 模式实现与 STM32F303 通信,将 SD 卡的 DATA2、DATA3、CMD、CLK、DATA0、DATA1 引脚与 ARM 微控制器相连。其中 CLK 为 SD 卡的时钟,由 ARM 产生的时钟信号引入。CMD 是命令信号,传输所有的命令及响应。DATA0~DATA3 为数据线,用来传输数据<sup>[9-10]</sup>。系统使用 SD 卡时首先对 SD 卡进行初始化。

## 3 差分同步采样电路系统软件设计

该系统的 ARM 软件设计主要包括:ADC 采样中断模式设计、ADC 采样 DMA 通道模式设计、ARM 内部信号处理。系统初始化好各个模块后,差分信号源产生 2 对差分信号,每路信号经过滤波放大电路后由 ARM 内部 ADC1、ADC2 分别对 I、Q 两路实现差分同步采集,采集信号通过 DMA 传输,当传输的位数与设定的位数相等时会产生 DMA 中断,在 DMA 中断服务函数中可对采集的信号进行加窗、滤波处理,最后通过 RS232 串口将信号发送给上位机,根据设置的串口读取标志位来接收一个完整周期的信号,并可以在上位机实时显示差分同步采样电路采集到的信号波形。

### 3.1 ADC 采样中断模式

STM32F303 内部有 4 个 12 位 ADC,ADC 的电压输入范围为: $U_{REF-} \leq U_{IN} \leq U_{REF+}$ ,其中, $U_{REF-}$ 、 $U_{REF+}$  分别为参考正负电压,由外部引脚决定。ADC 采样中断模式流程如图 5 所示。

选择 PA0、PA1 作为 ADC1 的通道 1、通道 2,信号通过 ADC1 的通道进入规则通道,ADC 设置为软件启动,此时模拟信号转化成数字信号存放到规则数据寄存器中,当存放的数组长度与设定的位数相同时会生成转换结束标志位,在中断服务函数中完成对信号的输出。

### 3.2 ADC 采样 DMA 通道模式

直接存储区访问(DMA)为实现数据高速在外设寄存器与存储器之间或者存储器与存储器之间传输提供了高效的方法。由于 DMA 传输实现数据高速移动无需 CPU 操作控制,与 ADC 采样中断模式相比,ADC 采样 DMA 通道模式大大提高了 ADC 的工作效率。图 6 是 ADC 采样 DMA 模式流程图,信号经过 ADC 管脚进入规则通道,配置 ADC 为差分同步模式,打开 ADC 的 DMA 通道并选择与 ADC 匹配的 DMA 通道,采集数组通过 DMA 通道传输存放到规则数据寄存器中,当采集的数据长度与设定的数值相等时会产生 DMA 中断标志位,在 DMA 中断服务函数中对数组输出。

### 3.3 ARM 内部信号处理

很多情况下系统 ADC 采集到的差分信号并不能采集到整数个周期,系统采集到的信号如果从一个周期中切断,此时时间不连续的原始信号做 FFT 变换会出现信号剧烈变化,测量出的信号就不是很精准,因此 FFT 变换得到的信号频率不是原始信号的频率,也就是所谓的频谱泄露问题。为了获取到精确的信号频率,需要对信号进行滤波加窗处理,在程序 DMA 中断服务函数中,对采集到的信号数组经带通滤波器滤除噪声信号,利用点乘运算对信号加 hanning 窗处理。

(在实验过程中对程序每一步单步调试验证结果的正确性,遇到 ROM 内存不够问题,为了解决该问题

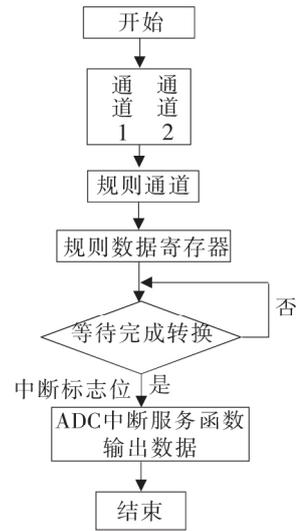


图 5 ADC 中断模式流程图

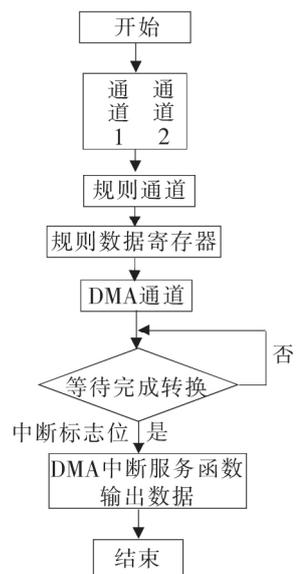


图 6 DMA 中断模式流程图

对程序进行了优化,采用数组复用技术,最终实现了双路差分同步采样功能。

#### 4 实验测试及分析

为了验证系统的正确性,对系统进行了测试,差分同步采样系统如图 7 所示。实验设置系统参数如下:ARM 片外采用 25 MHz 晶体经分频倍频关系,将系统时钟设置为 70 MHz,ADC 时钟 APB2 也为 70 MHz,ADC 时钟分频系数为 1,ADC 采样时间设置为 1.5 个周期,根据芯片手册 STM32F303 计算 ADC 采样率公式

$$f_s = \text{SYSCLK} / (12.5 + \text{SamplingTime}) \quad (1)$$

式中,SYSCLK 为系统时钟 70 MHz;SamplingTime 为采样时间,取值为 1.5,代入式(1)可计算出 ADC 的采样率为 5 MHz。

实验方法如下:以 FMCW 雷达中频信号为信号源,系统对中频波信号差分同步采样,在 ARM 内部对信号进行处理并通过串口输出结果,其结果与雷达系统测量出的结果进行对比。图 8(a) 是差分同步电路采集的雷达中频信号 IQ 双路时域显示,此时雷达系统测量实际距离为 69 cm,经反推计算出差频信号频率为 7.34 kHz,将差分同步采样电路采集的中频信号进行 FFT 运算,计算出中频信号频率为 7.35 kHz,与实际中频信号频率相差 0.01 kHz。图 8(b)是差分同步采样电路采集的中频信号频域图,信号峰值位置为 7.35 kHz。

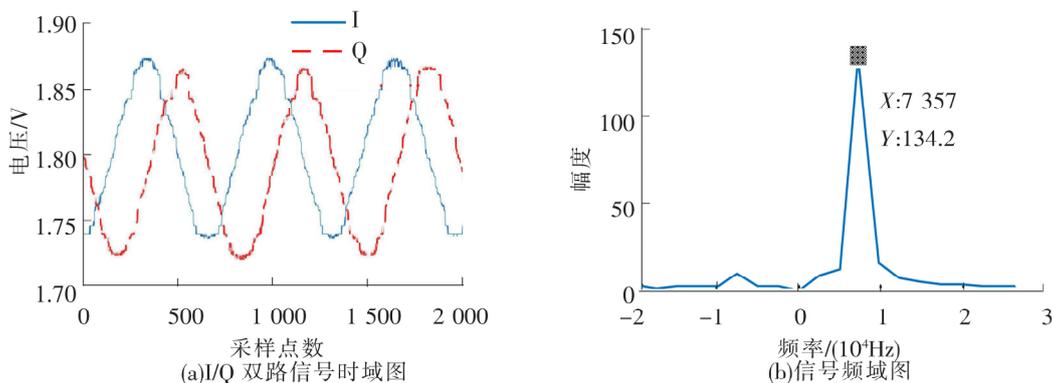


图 8 系统采样中频信号时域及频域

通过雷达系统对不同目标进行探测,雷达测出的中频信号频率与本系统采集的中频信号频率多次对比结果如表 2 所示。从表 2 结果可以看出,该差分同步采样电路采集雷达系统的中频信号与雷达系统计算出的中频信号频率相差无几,满足高精度、大带宽、高采样率的差分同步采样要求。该设计可用于各种雷达系统领域,通用性强。

表 2 测量结果对比

系统测量的中频信号频率	雷达系统测量的中频信号频率	频率误差
5.07	5.03	0.04
7.35	7.34	0.01
17.01	17.03	0.02

#### 5 结论

采用 ARM 单片机为主控芯片,使用 ARM 内部 ADC 实现了双路差分同步采样电路系统。该系统采样率高达 5 MHz,具有多种采样模式,可直接应用在 FMCW 雷达系统领域,具有高采样率、大带宽、采样

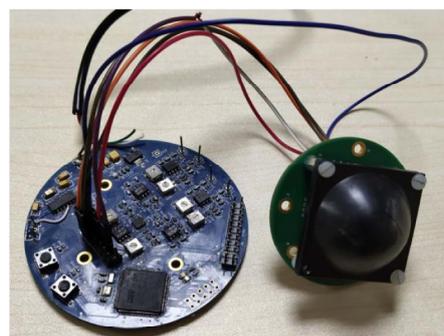


图 7 系统电路

精度高、体积小、通用性强等优点,有很强的实用性和推广价值。

## 参 考 文 献

- [1]杨博,张加宏,李敏,等.基于 ARM 的多通道数据采集系统[J].仪表技术与传感器,2015(2):104-107.
- [2]张健,刘斯,刘洋.基于单片机的高分辨率多通道数据采集系统[J].电子技术与软件工程,2019(5):238.
- [3]王晨辉,吴悦,杨凯.基于 STM32 的多通道数据采集系统设计[J].电子技术应用,2016,42(1):51-53,57.
- [4]赵忠凯,尹达,刘海朝.高速多通道数据采集传输系统的设计[J].火力与指挥控制,2015,40(12):136-140.
- [5]连杰,田小超.基于 STM32 的高精度、大容量、多通道同步数据采集存储系统的设计[J].电子制作,2015(7):28.
- [6]丁君武,段国华,张斌斌.基于 ARM 的双通道数据采集系统的设计与实现[J].电气自动化,2015,37(2):108-110.
- [7]解立强,盖林.ARM+Linux 动态数据采集系统在接触网检测中的应用[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2011,24(1):96-99.
- [8]李晓楠,冯国胜,李倩茹,等.某型汽车信号采集与监测系统设计[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2017,30(2):57-62.
- [9]韩宾,易志强,江虹,等.一种高精度多通道实时数据采集系统设计[J].仪表技术与传感器,2019(9):42-45.
- [10]陈曦,邓振森,焦计平.多通道高速相参同步数据采集与存储系统设计[J].电子测量技术,2013,36(12):104-107.

## Design and Implementation of Two-way Differential Synchronous Sampling Circuit Based on ARM

Xu Qing, Ma Yuehong

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** With the rapid development of science and technology, FMCW radar is widely used. Radar system's accurate acquisition of differential frequency signals determines the accuracy of ranging. In order to realize accurate sampling of broadband and high frequency signals, a dual differential synchronous sampling circuit based on ARM microcontroller was designed. The system can realize not only the common data sampling function, but also the differential synchronous sampling function with multi-channel, high precision and high sampling rate. ARM MCU was the main control chip of the system. ARM internal ADC module was used to collect the echo signal of the radar system in IQ dual channel. The collected data was transmitted at a high speed through DMA, and the distance information was communicated with the external PC through RS232 serial port and displayed in real time. Experimental analysis shows that the system can achieve 5 Hz high-precision multi-channel differential synchronous sampling for the FMCW radar system's intermediate frequency signal differential sampling, and can properly carry out signal processing, with the advantages of small size, strong versatility etc.

**Key words:** ARM; STM32F3; two-way sampling; difference of sampling