

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210144

# 基于 AD9364 的高速率通用遥测系统设计\*

张琦琪<sup>1,2</sup> 马游春<sup>1,2</sup> 郭鑫<sup>1,2</sup> 李超杰<sup>1,2</sup>

(1. 中北大学电子测试技术国家重点实验室 太原 030051; 2. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原 030051)

**摘要:** 针对传统弹载遥测通信系统设备通用性差、设计复杂、码速率较低等问题,文章采用了频谱利用率高、抗干扰能力强的 QPSK 调制解调算法,搭建了 AD9364 和 ZYNQ-7000 的软件无线电零中频收发一体遥测系统。该系统对 PCM 编解码器采集编帧后的数据进行 QPSK 调制,通过 LVDS 数据接口将数据从 PL 端传输至 AD9364 射频芯片,在芯片内部经过混频、上变频、滤波等处理后,通过天线发送出去;天线可以将遥测数据接收回来,经过 AD9364 下变频、滤波之后,传输至 PL 端进行解调,经过载波同步,完成整个遥测系统的收发过程。为实现对载波环路的准确跟踪,文章采用了二阶锁频环辅助三阶锁相环的方式并且提出了新型的 COSTAS 环提高鉴相精度。通过搭建遥测测试系统,测试遥测系统的传输距离并且对收发的结果进行解析,实现了码速率为 10 Mbps 的高速率传输,且传输距离可达 13 km 以上。

**关键词:** 遥测系统;QPSK;AD9364;零中频;高速率

**中图分类号:** TN914.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

## Design of high rate universal telemetry system based on AD9364

Zhang Qiqi<sup>1,2</sup> Ma Youchun<sup>1,2</sup> Guo Xin<sup>1,2</sup> Li Chaojie<sup>1,2</sup>

(1. National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Key Laboratory of Instrument Science &amp; Dynamic Measurement of Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of poor versatility, complex design and low code rate of traditional missile-borne telemetry communication system equipment, this paper adopts QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) modulation and demodulation algorithm with high frequency spectrum utilization and strong anti-interference ability. The integrated telemetry system of software radio zero intermediate frequency transceiver of AD9364 and ZYNQ-7000 is built. The system performs QPSK modulation on the data collected and programmed by PCM coder, and transmits the data from PL (Programmable Logic) terminal to AD9364 through LVDS data interface. After mixing, upconversion, filtering and other processing in the chip, the system sends the data through antenna. Antenna can receive telemetry data back, after AD9364 down conversion, filtering, transmission to PL terminal for demodulation, carrier synchronization, complete the whole telemetry system transceiver process. In order to realize the accurate tracking of frequency skew signal, the second order frequency locked loop is used to assist the third order phase-locked loop and a new COSTAS loop is proposed to improve the phase detection accuracy. By building a telemetry test system and testing the transmission distance and analysis results of the telemetry system, the code rate of 10 Mbps high transmission is realized, and the transmission distance can reach more than 13 km.

**Keywords:** telemetry system; QPSK; AD9364; the zero intermediate frequency; high rate

## 0 引言

随着 MEMS 传感技术的飞速发展,弹上搭载的传感器数量增多,所传输的数据量增大;同时导弹试验过程中对图

像和视频的记录回传<sup>[1]</sup>也大大增加了遥测传输数据量,因此对遥测系统码速率提出了更高的要求<sup>[2]</sup>。现如今,我国靶场常用的遥测体制为 PCM/FM 技术,其传输的码速率只能达到 2 Mbps<sup>[3]</sup>。同时,PCM/FM 技术拥有门限效应,

收稿日期:2022-05-28

\* 基金项目:微纳传感器信号无线引出及测量仪器研制(2018YFB2003103)项目资助

当输入的信噪比低于某个值时,输出端的信噪比就会出现大幅下降。所以迫切需要新的遥测体制。另一方面,由于导弹加速度太大,频率斜升比较快,常用的二阶环路无法很好地对载波进行跟踪锁定<sup>[4]</sup>,因而会导致接收端误码率较高,甚至会导致接收端无法正常跟踪解调。

本文针对上述问题对遥测系统展开研究,重点朝着小体积、低功耗、高速率的方向,研制一款适用于多种环境的遥测系统。由于 QPSK 调制解调方式具有频谱利用率高、误码率低等优点,所以该遥测系统在数字基带部分采用 PCM/QPSK 遥测体制来提高系统的传输速率。同时,遥测接收端借鉴 GPS 接收机的设计思路,采用二阶锁频环辅助三阶锁相环的环路设计来对载波进行跟踪锁定<sup>[5]</sup>,设计的遥测系统可以准确跟踪斜升信号,提高解调数据的准确率。

### 1 总体设计方案

弹载遥测系统主要包括两个子系统<sup>[6]</sup>,一个装载在弹上的发射机系统,一个接收信号的地面遥测接收机系统。前者将采集到的数据编码组帧后发送到遥测发射机的数字

基带处理部分,经过调制处理传输到 AD9364,经过上变频、滤波等操作后,通过功率放大器将频点信号发送出去<sup>[7]</sup>;后者通过天线将信道中所需要接收的频点信号接收回来,经过低噪声放大、下变频和低通滤波处理后,将信号搬移至低中频,通过 QPSK 解调处理下变频至基带信号,经过载波同步实现位同步、帧同步,再将同步后的信号与上位机通信实现数据的存储。

本设计利用软件无线电的设计思路,设计一种零中频架构的遥测系统<sup>[8]</sup>。遥测系统总体框图如图 1 所示,将需要发送的遥测数据通过 ZYNQ 进行调制,调制后的数据通过 LVDS 接口传输到 AD9364<sup>[9]</sup>,在 AD9364 内部经过上变频、带通滤波器、差分转单端、混频器、选择器等一系列操作<sup>[10]</sup>,将射频信号通过天线发送出去,完成全部调制过程;射频信号被天线接收后,经过低噪声放大器传递给 AD9364,AD9364 将数据经过下变频<sup>[11]</sup>,将模拟信号转为数字信号传输至 ZYNQ 中,然后在 ZYNQ 的 PL 端进行 QPSK 的解调,并将数据通过 ZYNQ 内部高速 HP 口传递给 DDR,通过以太网将数据发送给上位机。

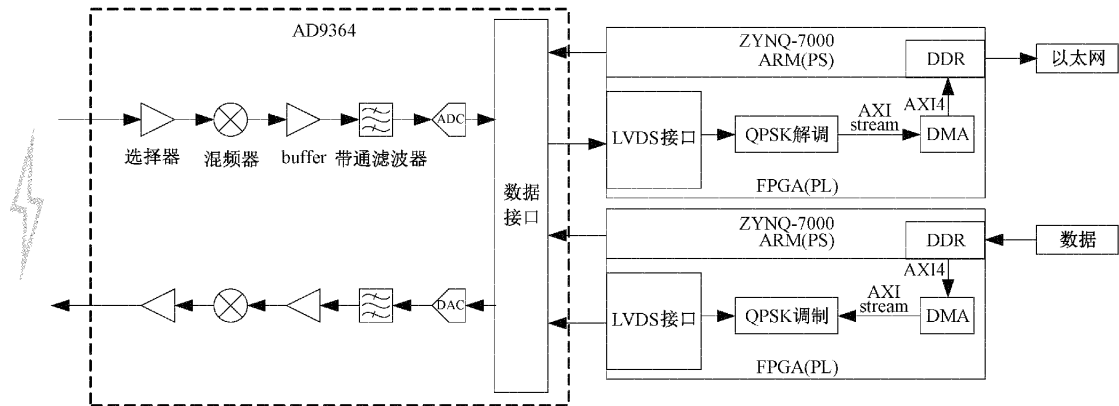


图 1 遥测系统总体框图

### 2 设计原理与实现架构

#### 2.1 QPSK 调制原理

QPSK 调制方法有两种,调相法和相位选择法。在 QPSK 调制系统中,原始信号带宽无限大,但 90% 的能量均集中在主瓣带宽内,相位选择法无法在数据调制前增加滤波,只能对已调信号进行带通滤波。调相法可以在调制前对原始基带信号进行成形滤波,以滤除主瓣外的信号和噪声。因此,为提高发射端的功率利用率,降低噪声的影响,选择调相法。QPSK 调制原理框图如图 2 所示。将待传输的基带信号通过双极性转换得到双极性不归零码,串并转换后分为两路数据速率减半的同相支路信号和正交支路信号,经过成形滤波,分别与载波信号相乘后得到 I 路信号和 Q 路信号。

#### 2.2 QPSK 解调原理

在解调过程中,由于码速率的增大,会导致鉴相结果

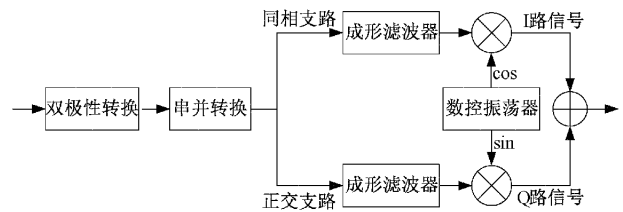


图 2 QPSK 调制原理框图

误差增大,为了降低误码率,鉴相结果要精确。常见的解调算法中,四次方环载波同步法<sup>[12]</sup>适用于模拟解调系统;四相 COSTAS 环<sup>[13]</sup>和四次方环同步法由于需要四路相乘,对硬件资源和设计时序要求高;松尾环<sup>[14]</sup>鉴相结果会引入一些调制噪声;极性 COSTAS 环<sup>[13]</sup>结构简单易于实现,而且只要实现载波同步,就可以精确的解调出原始数据。因此,选择极性 COSTAS 环的解调算法。COSTAS 环常用的鉴相算法有 3 种:

$$\phi_e(t) = \arctan\left(\frac{q_p}{i_p}\right) \quad (1)$$

$$\phi_e(t) = q_p \cdot i_p \quad (2)$$

$$\phi_e(t) = q_p \cdot \text{sign}(i_p) \quad (3)$$

$i_p$  为某一时刻得到的 I 路数据,  $q_p$  为某一时刻得到的 Q 路数据。其中, 式(1)为经典的反正切鉴相器是最准确的。但是对于本文用的软件实现反正切函数时, 默认的反正切后的角度结果为  $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ , 即角度分布在一、四象限。而对于 QPSK 解调系统, 存在 I、Q 两路数据, 星位图的分布为  $[-\pi, \pi]$ , 此时的相位差含有不定性, 无法判断此时的相位差是 I 路相位差还是 Q 路相位差, 鉴相结果容易出现较大问题。而 BPSK 解调系统可以很好的解决这个问题, 只要判断此时反正切后的角度处在哪一个象限, 就可以校正引入的相位差。为了准确选取载波同步后的解调数据, 使误码率降低, 本文在原本的极性 COSTAS 环的基础上提出了新型的 COSTAS 环。用 BPSK 的方法解调 QPSK, 不仅提高了鉴相的准确度, 而且环路锁定的速度更快。

鉴相结束后, 在导弹高速运动的情况下, 加速度太大导致频率斜升较快, 单纯的采用锁相环已经满足不了准确跟踪载波的要求, 本文借鉴 GPS 接收机的方法, 采取二阶锁频环辅助三阶锁相环的环路滤波器去准确地跟踪载波。结合上述两种问题, 设计了如图 3 的 QPSK 解调原理框图。其中 LPF 指的是低通滤波器, 此处用匹配滤波器会有更好的效果。PD 和 PF 分别代表鉴相器和鉴频器, LF 为环路滤波器, NCO 为数控振荡器。

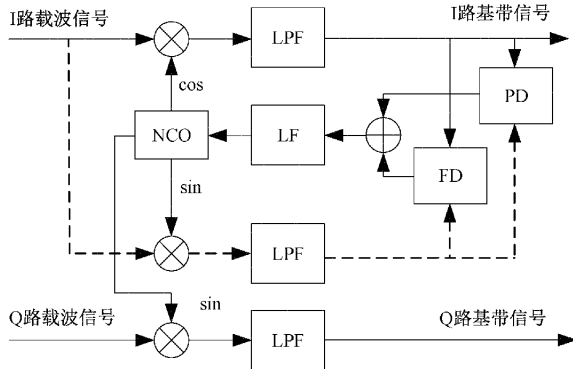


图3 QPSK 解调原理框图

将调制后的 I、Q 两路信号分别与数字振荡器产生的两路正交信号相乘, 相乘后的信号经过匹配滤波器滤除高频分量, 经由鉴频器和鉴相器后进入环路滤波器调整频率和相位, 将调整后的频率控制字结果输入至数控振荡器, 重新产生正交信号继续与调制后的 I、Q 两路信号相乘, 直至 NCO 产生与调制载波同频同相的信号, 达到动态稳定。

### 2.3 成形滤波器和匹配滤波器的设计

为了消除码间串扰, 升余弦滚降滤波器<sup>[16]</sup>拖尾衰减速度快, 能够最大可能的满足对噪声信号的抑制, 所以, 滤波

器采用升余弦滚降滤波器。本设计由发射端的基带成形滤波器和接收端的匹配滤波器两个环节共同实现, 传输系统的传递函数为两者的乘积, 所以每个环节均使用平方根升余弦滚降滤波器<sup>[17]</sup>, 不仅可以得到最佳性能和较低的误码率, 还降低滤波器的实现难度。

为了实现最佳的效果, 利用 MATLAB 生成滤波器系数<sup>[18]</sup>, 将系数导入 VIVADO 的 IP 生成滤波器。滚降系数设置为 0.8, 截断范围参数设置为 4, 单个符号范围的采样个数设置为 8, shape 选择 sqrt, 即选择平方根升余弦滚降滤波器。生成的 MATLAB 频域图如图 4 所示。

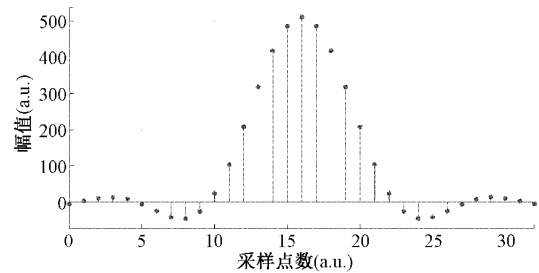


图4 成形滤波器、匹配滤波器频域图

## 3 系统测试与结果分析

### 3.1 环路滤波器设计

为了提高接收的载波跟踪能力, 降低接收误码率, 本文借鉴 GPS 接收机原理, 采用二阶锁频环辅助三阶锁相环的设计思路。

二阶环路噪声带宽的公式为:

$$B_L = \frac{\omega_n}{2} \left( x + \frac{1}{4x} \right) \quad (4)$$

其中,  $B_L$  为环路噪声带宽<sup>[19]</sup>,  $\omega_n$  为环路自然角频率,  $\xi$  为阻尼系数, 阻尼系数越小, 过冲越大, 但对数幅度频率响应下降越快。在工程应用中, 通常选  $\xi = 0.707$ 。

三阶环路噪声带宽的公式为:

$$B_L = \frac{a_3 b_3^2 + a_3^2 - b_3}{4(a_3 b_3 - 1)} \omega_n \quad (5)$$

其中, 根据 GPS 设计公开资料显示<sup>[20]</sup>, 选取  $a_3 = 1.1$ ,  $b_3 = 2.4$ 。本文实现的码速率为 10 Mbps, 因为利用 QPSK 进行调制解调, 每 2 bit 代表一个码元, 所以符号速率为 5 Mbps, 采样频率为 40 Mbps。根据码速率来确定  $B_L$ , 噪声带宽太大, 噪声会进入环路, 噪声带宽太小, 信号会被滤除一部分。由于锁频环和锁相环起的作用不同, 锁频环需要将误差锁定在一个较小的范围内, 方便锁相环进一步跟踪调整。因此, 一般锁频环的噪声带宽的值为锁相环的二倍, 本文设置二阶锁频环噪声带宽  $B_{Lf} = 1.2$  kHz, 三阶锁相环噪声带宽  $B_{Lp} = 600$  Hz。

在 MATLAB 中对上述鉴相方法进行初步仿真, 验证方法的正确性, 接收发射频偏随机选取  $-1$  kHz, 相位偏差随机选取 2 MHz。图 5 为二阶锁相环 MATLAB 仿真图,

图 6 为二阶锁频环辅助三阶锁相环 MATLAB 仿真图。图 5、6 均包含了鉴频器和鉴相器求出的差值,并进行修正的过程以及 COSTAS 环解调出来的数据。图中最上面曲线为鉴频器鉴出的差值并逐步调节的过程,可以看出最后的值相对稳定在 0 的范围内并伴随有微小波动。图中中间曲线为鉴相器鉴出的差值并逐步调节的过程,最后稳定在 0 值。当鉴频器和鉴相器的值趋于 0 附近时,说明解调结果已经收敛。在数据图中,较窄的方形条为原始数据,震荡逐渐收敛为 0 的为 BPSK 解调的 Q 路数据,较宽的方形条为 QPSK 解调出的 I 路数据。由于 QPSK 解调出的 Q 路数据和 I 路数据仅有相位相差 90°,不予显示。当 BPSK 解调的 Q 路数据为 0 时,即为解调完成。由图 5、6 的对比可以清晰地看出,二阶锁相环下解调结果收敛所需采样点约为  $3.3 \times 10^6$ ,二阶锁频环辅助三阶锁相环的解调结果收敛所需采样点约为  $1.5 \times 10^6$ 。因此,新型的 COSTAS 环采用二阶锁频环辅助三阶锁相环的环路滤波器可以使环路的锁定更快。

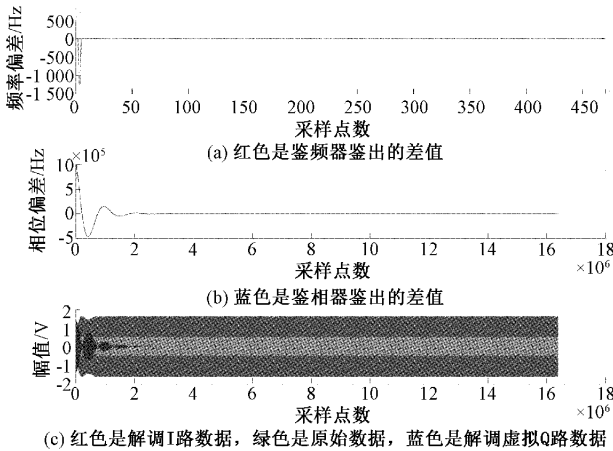


图 5 二阶锁相环的 MATLAB 仿真图

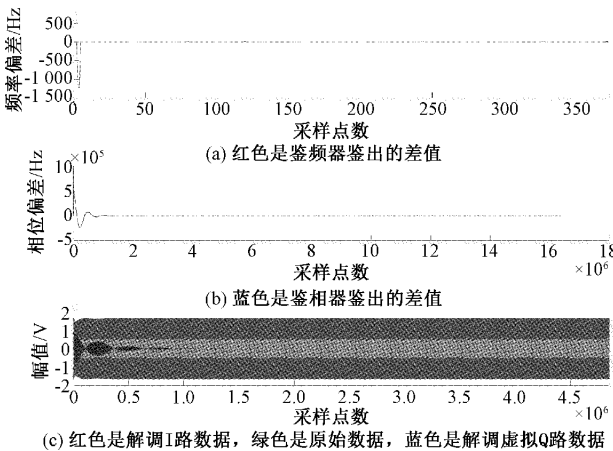


图 6 二阶锁频环辅助三阶锁相环 MATLAB 仿真图

### 3.2 仿真结果

按照图 2 的 QPSK 调制原理图进行设计,调制时将传

输的基带数据进行双极性、串并转换,通过成形滤波器将突变的数据变得平滑,然后与载波相乘,即可得到调制后的数据。图 7 为 QPSK 调制结果图, fir\_i 和 fir\_q 分别为经过成形滤波后数据平滑之后的结果, dac\_data\_i 和 dac\_data\_q 分别为调制之后的 I 路数据和 Q 路数据。

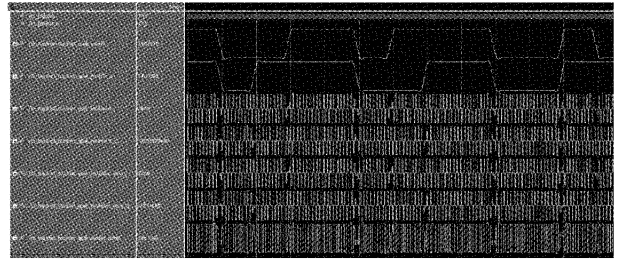


图 7 QPSK 调制结果图

按照图 3 的 QPSK 解调原理进行设计,解调时将 I 路信号、Q 路信号分别与数控振荡器产生的 cos 信号、sin 信号相乘,会出现高频分量与低频分量叠加的结果,必须将高频分量滤除,此时需要匹配滤波器进行滤波。解调的重点在于产生同频同相的载波,只要载波完美复刻,那么解调结果的精度也会提高。利用 BPSK 的 Q 路和 QPSK 的 I 路进行解调,产生载波即可得到精确的解调结果。环路滤波器的仿真结果如图 8 所示, di 和 dq 分别为解调后的 I 路和 Q 路数据, dq 为 BPSK 的 Q 路数据。由图 8 可以看出,黑线标注位置为载波同步的时刻, I 路和 Q 路在黑线标注位置之前已经呈现稳定趋势。因此,用 BPSK 的方法解调 QPSK 可以准确定位到载波同步的时刻,使解调结果更加精确。

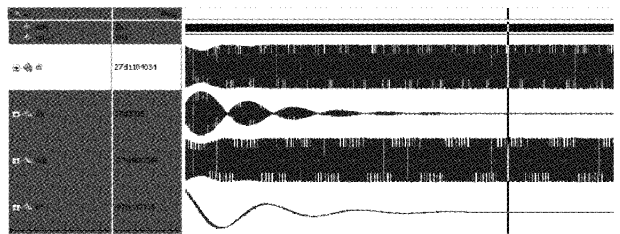


图 8 环路滤波器仿真结果

### 3.3 遥测通信测试

对弹载遥测系统进行收发测试,测试系统由遥测发射机、地面接收机、直流电源、计算机和频谱分析仪构成。遥测发射机发射频率设置为 2 260 MHz,采样频率为 40 MHz。频谱分析仪中心频率设置为 2.26 GHz,内部补偿设置为 -60 dB,不同设计环境下的频谱分析结果如图 9 所示。图 9(a)为 QPSK 调制下加滤波器的频谱测试结果,图 9(b)为 QPSK 调制下不加滤波器的频谱测试结果。从图中可以看出,添加滤波器后,较不加滤波器能量更集中,降低了码间干扰,提高了发射效率,降低了发射功耗。

地面接收机接收频率设置为 2 260 MHz,采样频率 40 MHz,将遥测接收到的数据进行存储,由于导弹飞行速

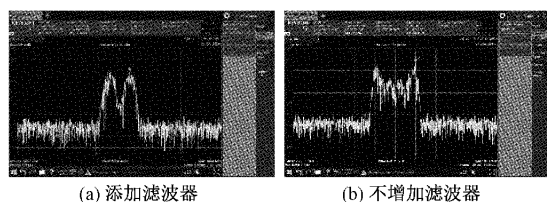


图9 不同设计环境下的频谱分析结果

度较快,存储数据量达到 50 MB 即可停止数据存储。多次在码速率为 10 Mbps 下使用专业的遥测数据分析软件对存储的数据进行解析,设置每行数据量为 256。遥测数据分析软件解析数据图如图 10 所示。每一行的数据均为从 00 递增至 FF,接收端接收的数据与发射端发送的数据一致,实验验证成功。

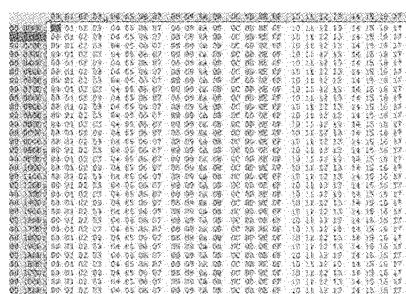


图10 遥测数据分析软件解析数据图

在室外进行距离测试,将发射机放在高度为 50 m 的空中,接收机距离 13 km 处开始接收数据,经解析后,数据解析正确。

## 4 结 论

本文从高码速率的设计角度出发,提出了一种以 AD9364 射频芯片作为射频前端,ZYNQ 作为系统主控的高码速率通用遥测系统设计。通过设计匹配滤波器、新型的 COSTAS 环和二阶锁频环辅助三阶锁相环的环路滤波器结构,分别解决了传统的遥测系统码速率低、鉴相结果不准确、码间干扰大,频率斜升信号导致解调结果误码率高等问题。

为了验证上述方法设计的准确性,对其进行仿真验证、时序验证、频谱分析和实际通信验证,结果表明,所设计的遥测系统满足设计指标,并且具有体积小、码速率高等特点,通信测试距离可达 13 km 以上,适用范围广,满足多行业遥测通信需求。

## 参考文献

- [1] 全维超,周殊伦,鲍中华,等. 遥测图像采集装置软件的设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(8): 100-104.
- [2] 胡磊. 多符号检测和 Turbo 乘积码技术在高码率 PCM-FM 遥测系统中的应用研究[J]. 数字技术与应用, 2019, 37(5): 104-105, 107.

- [3] 张远帆. 遥测中的多符号检测算法研究和接收机实现[D]. 北京:北京邮电大学, 2020, DOI:10.26969/d.cnki.gbydu.2020.003130.
- [4] 张伟佳. 高动态频率快速锁定技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2021, DOI:10.27005/d.cnki.gdzku.2021.000307.
- [5] 苏丽,余卫国,熊建林. 从航天遥测地面记录器到航天遥测地面系统云[J]. 遥测遥控, 2017, 38(3): 1-6.
- [6] 李超杰,马游春,赵阳,等. 基于 AD9364 的弹载小型遥测发射系统设计[J]. 电子测量技术, 2021, 44(12): 133-138.
- [7] 李金义,樊鸿清,余子威,等. 非合作目标 TDLAS 室内二氧化碳遥测[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10): 229-236.
- [8] 孙南南,周洪波,张隽康,等. AD9364 射频捷变收发器的配置方法[J]. 无线电工程, 2019, 49(8): 738-742.
- [9] 栾东海,肖慧敏,王庆博,等. 基于 AD9364 的小型化航空遥测系统设计[J]. 遥测遥控, 2018, 39(5): 33-36, 45.
- [10] 朱童,艾冬生,张景鹏,等. 基于 AD9361 芯片的弹载一体化射频前端[J]. 探测与控制学报, 2021, 43(3): 64-69.
- [11] 周三. 基于嵌入式 SOC 手持式频谱仪的硬件设计与实现[D]. 成都:电子科技大学, 2015.
- [12] 王志超,王平连. 一种用于高速 QPSK 解调的四次方环载波恢复电路[J]. 电讯技术, 2012, 52(8): 1312-1316.
- [13] 蹇尧. 基于 COSTAS 环的 BPSK 信号解调的研究与仿真[J]. 中国新通信, 2017, 19(15): 60-61.
- [14] 孙会楠,邢彦辰. QPSK 调制解调系统的设计与仿真[J]. 太原学院学报(自然科学版), 2020, 38(2): 51-58.
- [15] 冯雪峰. 基于 AD9361 的无线收发系统设计与实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2021, DOI:10.27060/d.cnki.ghbcu.2021.000732.
- [16] 杜勇. 数字调制解调技术的 MATLAB 与 FPGA 实现: Xilinx/VHDL 版[M]. 北京:电子工业出版社, 2017.
- [17] 卓妍彬. 中远程亚音速无人机无线数据传输系统的设计与实现[D]. 南京:南京邮电大学, 2021, DOI:10.27251/d.cnki.gnjdc.2021.000361.
- [18] 杨小洪,余春泉. 基于波形优化的深度调制识别方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(10): 186-193.
- [19] 赵玉生. 基于 SOC 的高灵敏度卫星导航接收机技术研究[D]. 北京:北方工业大学, 2020, DOI:10.26926/d.cnki.gbfgu.2020.000340.
- [20] 韩艳. GPS/BDS 双模软件接收机设计与实现[D]. 大连:大连海事大学, 2018.

## 作者简介

张琦琪,硕士研究生,主要研究方向为测试计量技术及仪器、遥测通信技术。

E-mail: 2832413043@qq.com

马游春(通信作者),博士,副教授,主要研究方向为测试计量技术及仪器、光纤光栅传感技术。

E-mail: 798965939@qq.com