

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106403

# 基于扩频通信的弹载发射机设计

刘雨顺 管雪元 赵一帆

(南京理工大学瞬态物理国家重点实验室 南京 210096)

**摘要:** 随着国防科技的不断发展,扩频技术的应用越来越广泛。针对身管武器在飞行时的通信需求,设计了一种基于扩频通信的发射机。给出了系统的硬件设计框架,系统由射频前端芯片 AD9361、数字基带处理芯片 FPGA 和外围电路组成;其中外围电路包括电源模块、时钟模块、巴伦馈线接口、串口和调试接口等。通信系统软件层面采用 BPSK 调制技术和扩频技术,其中扩频调制部分采用了 Gold 平衡码和三级 RAM 缓存方案。最后,依托某弹道测量项目进行遥测试验,利用地面接收站接收发射机发送的数据,记录调制波形、计算接收数据的误码率,验证了所设计的弹载发射机平台的可靠性和扩频调制方法的正确性。

**关键词:** 扩频通信;发射机;Gold 码;BPSK 调制

**中图分类号:** TN914.42 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

## Design of missile borne transmitter based on spread spectrum

Liu Yushun Guan Xueyuan Zhao Yifan

(State Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** With the continuous development of national defense technology, spread spectrum technology is more and more widely used. In order to meet the communication requirements of gun barrel in flight, a transmitter based on spread spectrum technology is designed. The system consists of RF front-end chip AD9361, digital baseband processing chip FPGA and peripheral circuits. The peripheral circuit includes power module, clock module, balun feeder interface, serial port and debug interface. The software of communication system adopts BPSK modulation technology and spread spectrum technology, and the spread spectrum modulation part adopts Gold balanced code and three-level RAM buffer scheme. Finally, based on a ballistic measurement project, the telemetry test is carried out, using the ground receiving station to receive the data sent by the transmitter, recording the modulation waveform and calculating the bit error rate of the received data, which verifies the reliability of the designed missile borne transmitter platform and the correctness of the spread spectrum modulation method.

**Keywords:** spread spectrum communication; transmitter; Gold code; BPSK modulation

## 0 引言

扩频通信因其抗干扰能力强、隐蔽性好、频谱密度低等诸多的优点在军事和民用通信中得到广泛的应用<sup>[1]</sup>。随着移动电话的兴起和科技不断地进步,通信行业的发展使得频带资源变得越来越紧张,如何高效地利用频带已经成为通信业界研究的重点<sup>[2]</sup>。20世纪60年代,大规模、超大规模集成电路、微处理器、数字信号处理等新型器件问世,使得扩频通信技术有了重大的发展和突破<sup>[3]</sup>。1985年5月美国联邦通信委员会(FCC)作出一项举措,发布了将扩频通信技术应用到民用通信的通告,这使得扩频技术的应用

变得更加广泛,也使得频带资源得到了高效利用<sup>[4]</sup>。目前扩频通信技术已经成为雷达、测控、测距、导航、军事等领域中不可或缺的关键技术<sup>[5]</sup>。

扩频通信的基本特点是传输信息所用的信号带宽远大于信息本身的带宽,因此可以在信噪比很小的情况下进行信息传输,增强了系统的抗干扰性和隐蔽性<sup>[6]</sup>。此外,扩频通信还可以结合时分多址和码分多址等技术,实现多目标通信,也提高了频带的利用率。

因此,研究了一种基于扩频技术的弹载发射机,有别于常规的通信方式,可以为身管武器提供可参考的试验数据,同时满足其飞行时的通信需求。

收稿日期:2021-04-16

## 1 系统硬件构成与结构设计

### 1.1 硬件器件选择

射频前端部分选用了射频收发芯片 AD9361,它是 ADI 公司生产的一款高集成度、高性能的射频收发器。传统的射频模块是由分立元件来进行搭建,在项目研发、调试、应用和升级方面都存在很多缺点。而 AD9361 是在一块芯片上集成了所有必要的 RF 信号模块、混合信号模块、数字信号处理模块以及数据接口模块等,极大地提高了射频模块的使用效率。在性能上,AD9361 完全可以满足当前多种通信标准的需求,它的工作频率范围为 70 MHz~6 GHz,工作带宽为 200 kHz~56 MHz,支持频分双工(FDD)和时分双工(TDD)系统,可以应用于各种通信系统的通信和数据采集<sup>[7]</sup>。

基带处理部分,FPGA 的主要任务是初始化配置 AD9361<sup>[8]</sup>、基带调制解调、信道编码以及提供 RS422 接口。考虑到 FPGA 内部基带算法对于数字信号处理方面的要求不高。同时系统设计中没有高速串行接口,所以不需要高速串行收发器资源。此外,FPGA 外接的外设主要包括 AD9361、SPI FLASH、RS422 接口芯片等,这些芯片对 FPGA 的 I/O 资源占用比例相对不大。无线电系统功能所需要的硬件资源主要是可编程逻辑块 CLB 和 RAM。同时考虑到弹载硬件系统在实际应用时,对功耗、尺寸和稳定性的要求比较高,选择了 Xilinx 公司的小封装低功耗的 Artix-7 系列 FPGA,其中 XC7A50T-2CPG236I 的逻辑资源和块 RAM 资源丰富,同时具有 10 mm×10 mm 的 CPG236 封装,可以满足设计要求<sup>[9]</sup>。

### 1.2 硬件框架

系统硬件组成如图 1 所示,系统主要有 FPGA 基带处理模块和射频前端模块组成,外围电路由电源模块、RS422 模块、时钟模块、缓存模块、调试接口和天线组成。

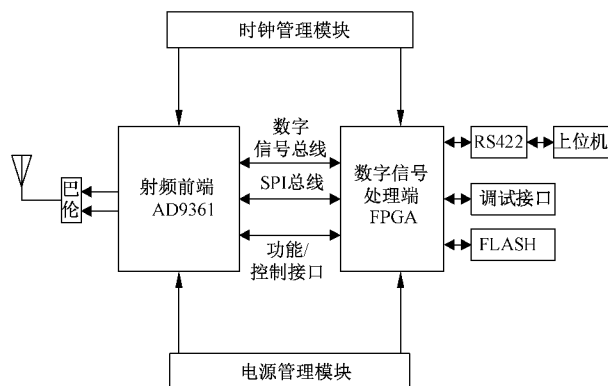


图1 硬件平台总体设计

## 2 通信系统软件设计

如图 2 所示为系统软件设计方案,其中信源编码在 RS422 接收数据和缓存后,利用 NRZ\_L 编码;在扩频部

分,采用的方案是利用 Gold 码和差分编码的乘积<sup>[10]</sup>;接下来利用 DDS 正弦波发生器,通过 BPSK 调制完成对信源数据的处理;最后将处理后的数据发送至射频前端,经 AD9361 发送出去。

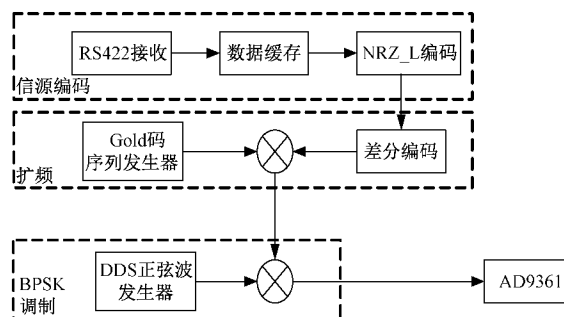


图2 发射系统设计方案

### 2.1 信源编码设计

由于 UART 串口通信属于异步通信,存在较长时且不确定的数据包间隔,不利于实现基带连续的码元传输;同时数据接收后传输至 NRZ\_L 编码模块在 FPGA 中属于跨时钟域传输,极易产生亚稳态、采样丢失、潜在逻辑错误等问题<sup>[11]</sup>。设计了一种三级 RAM 的缓存方案,如图 3 所示。

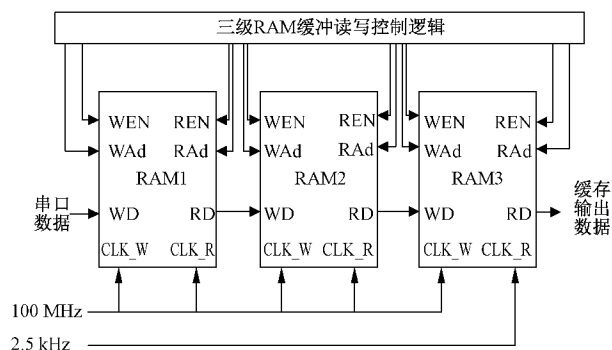


图3 三级 RAM 缓存原理

如图 3 所示,设计采用三级 RAM 缓存方案。采用 3 块双口 RAM 进行数据的三级缓存,将每块双口 RAM 设置为一侧写入,一侧读取。图中 WD 为 8 位输入接口,RD 为 8 位数据读取接口,WEN 为写使能,REN 为读使能通过三级缓存的缓存方式,可以改善异步通信传输不连续的问题<sup>[12]</sup>。

### 2.2 扩频调制设计

随机码的设计时扩频系统的重要环节,平衡 Gold 码是码序列中“1”的数量比“0”的数量多一个的 Gold 码<sup>[13]</sup>。平衡 Gold 码是一种常见的随机码,有着优秀的自相关性,在扩频通信中,伪随机码的平衡与否十分关键,是影响系统通信质量的重要因素之一。与非平衡码相比,平衡码具有更好的载波抑制度和频谱特性<sup>[14]</sup>。为了提升系统的保密性能、抗干扰性能和屏蔽性能,也为了减小系统的载漏,需要尽量降低码的不平衡性。表 1 所示为级数  $n$  为奇数时平衡与非平衡码和载波抑制的关系<sup>[13]</sup>。

表 1 平衡与非平衡码对比结果

n	码长	码中 0 与 1 差值		载波抑制/dB	
		平衡	非平衡	平衡	非平衡
3	7	1	5	8.45	1.46
5	31	1	9	14.90	5.37
7	127	1	17	21.04	8.73
9	511	1	33	27.08	11.90
11	2 047	1	65	33.11	15.00
13	8 191	1	129	39.13	18.03

根据需求,扩频 PN 码采用 10 阶平衡 Gold 码,码周期长度为 1 023,设计产生的平衡码族内共有 513 条具有良好的自相与互相关特性的 Gold 码序列。构造平衡 Gold 码产生器方法如下。

选优  $m$  序列优选对 2415、2011(八进制),基准本原多项式和配对本原多项式由式(1)和(2)得到:

$$2415: f_1(x) = 1 + x^2 + x^3 + x^8 + x^{10} \quad (1)$$

$$2011: f_1(x) = 1 + x^3 + x^{10} \quad (2)$$

设上述序列的特征多项式是  $f_1(x)$ , 序列的特征相位由  $g(x)/f(x)$  确定,  $g(x)$  为生成函数,可以得到生成函数的表达式如式(3)所示,其阶数  $\leq n$ 。

$$g(x) = \begin{cases} \frac{d[xf(x)]}{dx}, & n \text{ 为奇数} \\ f(x) + \frac{d[xf(x)]}{dx}, & n \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2),得到二进制域表达式如式(4)所示。

$$g(x) = 2 + 4x^2 + 5x^3 + 10x^8 + 12x^{10} \quad (4)$$

$$\text{化简得: } g(x) = x^3$$

所以特征多项式的线性移位寄存器的特征相位由高到低为:1001110100,平衡 Gold 码发生器结构如图 4 所示,将特征相位写入特征多项式寄存器中,此时特征多项式  $f_1(x)$  产生的  $m$  序列处于特征相位,使  $f_2(x)$  多项式的第 1 个相位为 0,对应与  $f_1(x)$  特征相位“1”,其余位置不全为“0”,即可得到  $f_2(x)$  的相对相位为  $2^9 - 1 = 511$  个,加上  $m$  序列优选对 2415、2011(八进制)产生的两条序列共有 513 条平衡 Gold 码序列。

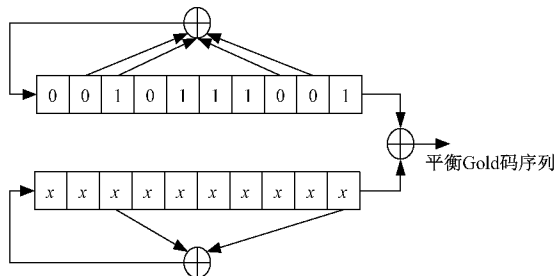
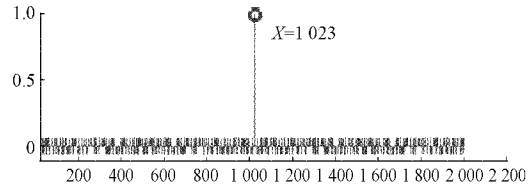


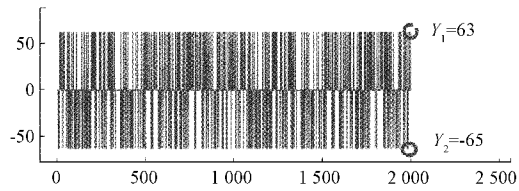
图 4  $n=10$  的平衡 Gold 码发生器

产生的平衡 Gold 码自相关和互相关特性仿真结果如

图 5 所示,自相关运算一组平衡 Gold 码序列,在 1 023 处出现尖峰 1,具有优良的自相关性。两个不同平衡 Gold 码互相关运算值大于 -65,小于 63,互相关性符合要求。此平衡 Gold 码可以应用于扩频系统中。



(a) Gold 码自相关



(b) 两组 Gold 码互相关

图 5 Gold 码自相关和互相关特性

### 2.3 BPSK 调制的 FPGA 设计

数字信号对载波相位调制称为相位键控 (PSK),是通过数字基带信号控制载波的相位,使得载波相位发生跳变的一种调制方式<sup>[16]</sup>。相对于 ASK 和 FSK 系统来说,PSK 系统抗噪声能力更强,因此应用较多。

在 BPSK 调制中,“0”对应的载波相位为 0,已调信号为:  $\cos\omega_c t$ ;“1”对应的载波相位为  $\pi$ ,已调信号为:  $\cos(\omega_c t + \pi) = -\cos\omega_c t$ ;两个已调信号中都有  $\cos\omega_c t$ ,采用幅度调制来实现,只需在幅度调制之前增加一个映射即可。BPSK 调制实现原理如图 6 所示。

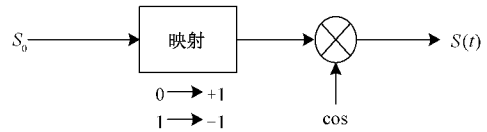


图 6 BPSK 调制原理

图 7 为在 FPGA 中的 BPSK 设计原理<sup>[17]</sup>。

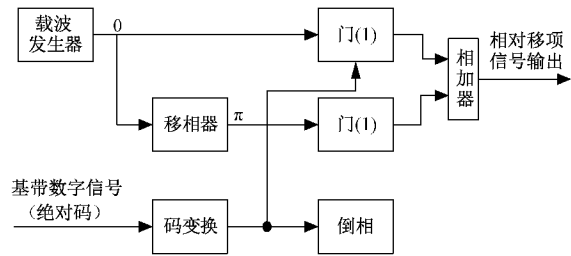


图 7 BPSK 设计原理

## 3 系统运行与测试

### 3.1 试验框架

将设计的软件无线电发射机装在试验弹体内,弹体内装有 GPS 接收机。遥测试验整体结构如图 8 所示,以帧头

为 0x55AA 格式的 GPS 数据会传入弹载 MCU,并通过所设计的发射机发送,最后通过地面站接收机的接收情况,来验证所设计的发射机的功能是否完整可靠。

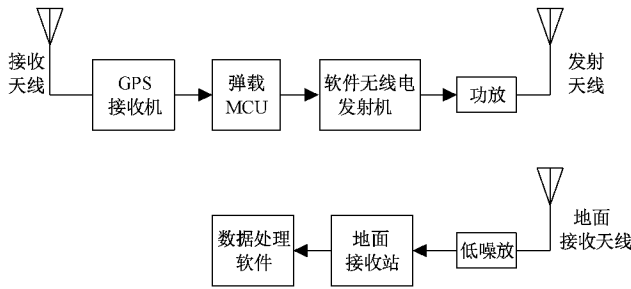


图 8 整体试验结构

### 3.2 遥测试验

在实验室环境下,搭建好发射机系统和地面接收站,设置地面站接收中心频率为 2.25 GHz,解调方式为 BPSK。打开发射机电源,记录地面站设备接收到的遥测数据并保存。

扩频前:2.5 Kbit/s,扩频后:2.557 5 Mbit/s,传输码型:NRZ\_L,平衡码 Gold 码周期为 1 023。

可以看到,信号发射频谱如图 9 所示,跨度 5 MHz,功率为 -55 dBm。

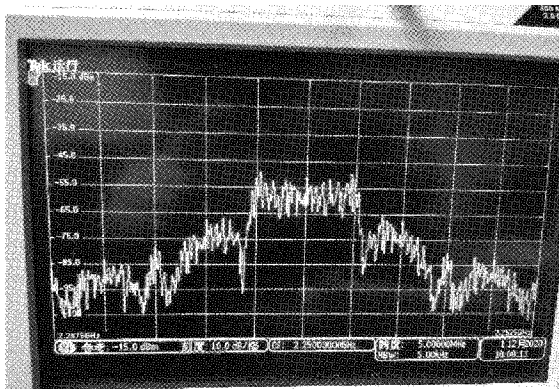


图 9 发射频谱

图 10 为发射机运行时,地面站监控软件监控到的实时接收状态,载波锁定且子帧副帧均已同步,发射机运行状态正确。

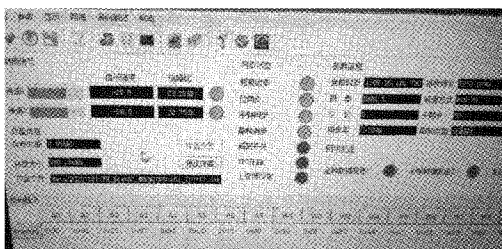


图 10 同步状态实时监控

利用 MATLAB 软件对遥测数据进行处理,处理结果

如图 11 所示,误帧率为 0.031,符合设计要求。

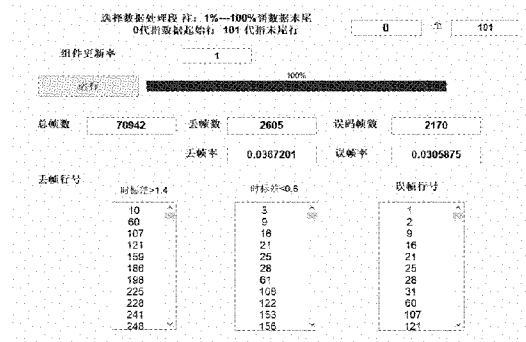


图 11 MATLAB 软件求解误码率结果

通过 BES 读取遥测地面接收站记录的数据,以 16 进制打开,帧头 0x55AA 成功捕获并完整的记录下来,如图 12 所示。

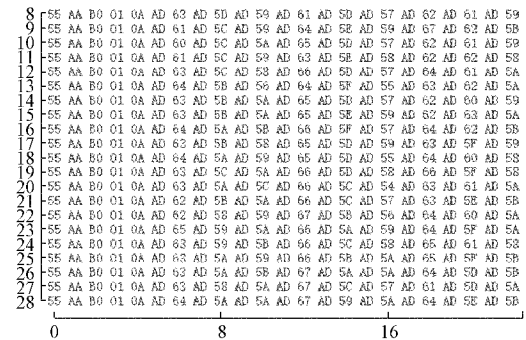


图 12 地面站接收数据的列表显示

查看解析后的 GPS 数据,绘制经度、纬度、高度和 GPS 接收机卫星接收数的曲线,如图 13 所示,经纬度变化曲线符合飞行轨迹,高度曲线为抛物曲线,卫星接收数正常。由此判定 GPS 数据解析正确,发射机工作状态正常,数据传输通路正确。

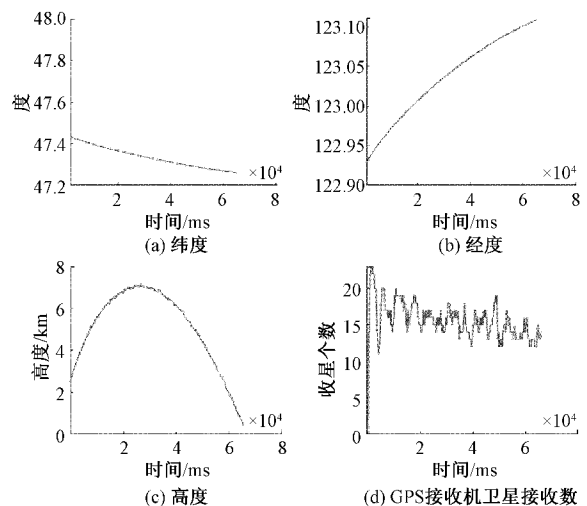


图 13 GPS 数据解析曲线

## 4 结 论

该软件无线电发射机以基带 FPGA 和射频前端 AD9361 为架构,通过 BPSK 调制和扩频的方式进行通信。深入研究了 Gold 平衡码对扩频系统的影响,选择了周期长度为 1 023 的平衡 Gold 码进行扩频,计算了它的自相关和互相关性,并引入三级缓存 RAM,保证了系统数据传输的稳定性。试验结果表明,丢帧率在合理范围之内,调制波形正确,传输的 GPS 数据解析正确。该设计方案通过扩频,克服传统通信方式易受外部环境干扰的缺点,可以将信息加密,使其不易被截获,提升了通信系统的可靠性和安全性,为后续研究奠定了一定的基础。

### 参考文献

- [1] 何一甬. 基于 FPGA 的直接序列扩频技术的研究与实现[D]. 成都: 成都理工大学, 2019: 1-3.
- [2] 林晓峰. 弹载小型化 S 波段遥测发射机的设计与实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2019: 3-4.
- [3] 罗小巧, 姜龙, 秦亚萍, 等. 基于 FPGA 的数字基带相关接收系统的设计[J]. 电子测量技术, 2012, 35(2): 130-134.
- [4] 蔡元存, 戚华兴, 吴以华. S 波段锁相环调频发射机设计[J]. 遥测遥控, 2011, 32(2): 18-24.
- [5] 刘剑锋, 戴旭初, 徐国微, 等. 非合作情况下 WCDMA 系统期望小区信号分离与多径 DOA 估计[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(11): 166-171.
- [6] 于凯. 基于 FPGA 的直扩通信系统中伪码同步技术的研究[D]. 保定: 河北大学, 2020: 2-3.
- [7] 丁睿. 基于 AD9361 的弹载扩频通信系统设计与实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2019: 47-53.
- [8] 苏新. 基于 AD9361 的软件无线电硬件平台的设计与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018: 10-14.
- [9] 罗亨. 基于 AD9361 的 OFDM 无线通信技术研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2019: 10-12.
- [10] 黄晓城. 基于 FPGA 的直扩通信系统研究与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014: 12-15.
- [11] 钱鑫. 基于扩频测控系统的关键技术设计与实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2017: 17-18.
- [12] FARUQUE S. Radio frequency modulation made easy[M]. SpringerBriefs in Electrical and Computer Engineering, 2017.
- [13] EGAN W F. Advanced frequency synthesis by phase lock [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, DOI: 10.1002/9781118171172.
- [14] 陆兴华, 崔倩. 基于扩频技术的智能家居控制指令网络传输优化[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(2): 142-146.
- [15] 刘崇磊, 尹力, 普湛清, 等. 基于声场模型的北极冰下扩频通信性能研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(12): 255-264.
- [16] 陈爱军. 深入浅出通信原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018: 251-253.
- [17] 郭黎利, 李北明, 窦峥. 扩频通信系统的 FPGA 设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 104-106.

### 作者简介

刘雨顺, 工程硕士, 主要研究方向为仪器仪表工程、扩频通信技术。

E-mail: 976023449@qq.com

管雪元, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为测试计量技术及仪器。

E-mail: 309234310@qq.com