

doi: 10.7690/bgzdh.2024.01.010

一种低成本跳频测控系统

张定云¹, 余治民²

(1. 中国空空导弹研究院通信技术研究所, 河南 洛阳 471009; 2. 空装驻洛阳地区第一军事代表室, 河南 洛阳 471009)

摘要: 针对外场试验中接力测控和一站多机测控通信中的多址接入以及试验中的数据非法接收等问题, 设计一种基于 AD9361+Zynq SOC 硬件构架, 上下行均采用 PCM/FM 调制方式的跳频测控通信系统。该系统既支持连续通信波形, 又支持时分跳频通信波形。内场试验结果表明: 该跳频测控系统工作稳定, 数据接收可靠, 并具有任务规划简单、节点配置灵活的特点。

关键词: 跳频; PCM/FM; 多址接入

中图分类号: TN763 **文献标志码:** A

A Low Cost Frequency Hopping Measurement and Control System

Zhang Dingyun¹, Yu Zhimin²

(1. Communication Technology Institute of China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China;

2. No.1 Military Representative Office of Air Force Equipment in Luoyang District, Luoyang 471009, China)

Abstract: Aiming at the multi-address access requirements of relay TT & C and multi-station TT & C communication in outfield test and solving the problem of illegal data reception in the test, a frequency hopping TT & C communication system based on AD9361 + Zynq SOC hardware architecture is designed, which uses PCM/FM modulation in both uplink and downlink. The system supports both continuous communication waveforms and time-division frequency-hopping communication waveforms. The infield test results show that the frequency hopping measurement and control system works stably, receives data reliably, and has the characteristics of simple task planning and flexible node configuration.

Keywords: frequency hopping; PCM/FM; multiple access

0 引言

由于 PCM/FM 调制方式为恒包络调制, 发射端功放可工作于饱和状态, 功率利用率高; 解调端可使用非相干解调式, 抗频偏能力强而被广泛应用于各类飞行器的测控通信系统。随着国内飞行试验任务的快速增加, 试验场在试验密度趋于饱和的同时还经常面临 2 个问题: 1) PCM/FM 的解调算法简单, 测控数据易于被非合作方非法接收解调和解读; 2) 在需要远距接力测控或一站多机测控时任务规划复杂, 经济性较差。

目前, 国内外对于测控数据非法接收问题主要采用多参数排列帧格式和信源加密方法^[1]。多址接入方面, 目前, 工程上常采用扩频码分或定频频分的方式进行多址接入^[2], 但传统方法无法有效地同时解决多址接入、宽带传输和数据安全性问题。近年来, 跳频通信被越来越多的引入国内通信系统, 多集中于跳频通信电台, 另外余晓玫、赵新颖等^[3-4]研究了跳频通信技术在船用通信系统的应用, 赵洪峰、张攀等^[5-6]研究了跳频通信在数据链通信中的应

用, 马传焱^[7]对无人机测控系统中的抗干扰技术进行了分析, 但均未给出具体实现方案。

笔者基于 AD9361+Zynq SOC 的硬件构架设计一种紧凑的 PCM/FM 跳频测控通信系统, 通过实测表明跳频速率可达到 500 跳/秒, 大大增加了非合作方接收解调测控信号的难度; 同时, 通过赋予不同类型通信端机以不同的设备编号即可将地面站和飞行器纳入测控网络, 进行多站接力和一站多机通信。

1 测控系统初始化策略

测控系统由地面主站、地面从站和飞行端机组成。根据任务需求确定需要的地面通信站数量, 将飞行航迹起始端布设的地面站编号设置为 0, 其他站点编号可顺序设置, 10 以下为地面号段。同时, 在各地面站设置好飞行端机数量、飞行端机预设编号以及时元内总时隙数和本站发射时隙。任务开始前, 飞行端机依次上电, 上电后默认编号均为 10, 10~99 为空中号段。主站依据事前设置的飞行端机数量和编号, 使用配置帧依照飞行端机上电顺序为飞行端机分配新的设备标号、可用时隙编号及总时

收稿日期: 2023-09-13; 修回日期: 2023-10-17

第一作者: 张定云(1981—), 女, 河南人, 硕士。

隙数。飞行端机在配置阶段即与主站完成跳频同步。

单站单机为多站多机的简化,初始化策略相同,也可使用缺省设置,即主站编号为 0,飞行端机编号为 10,时元内时隙数为 2,主站和飞行端机各占 1 个发射时隙。

以 2 站 4 机 1 个时元 10 个时隙为例,测控系统时隙划分如图 1 所示。

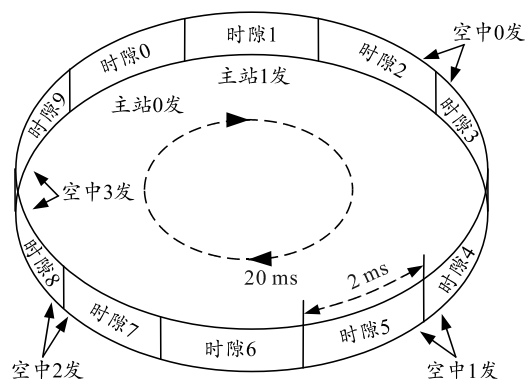


图 1 测控系统时隙划分

2 端机硬件实现方案

本文中端机使用典型的软件无线电设计思想,地面和空中飞行端机硬件平台相同,实现如图 2 所示。

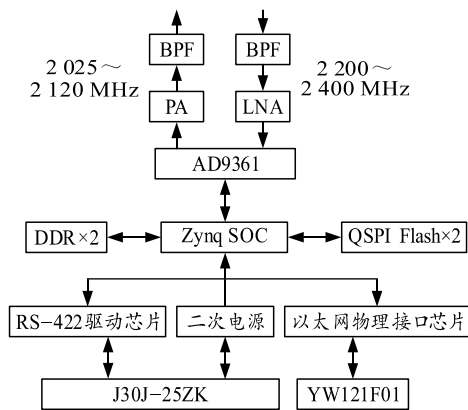


图 2 端机硬件实现

地面站数据接口使用以太网,飞行端机数据接口使用 RS-422。为满足快速上电要求,Zynq SOC 芯片的加载方式选用 QSPI \times 8 的方式。S 波段射频信号的收发混频均由 AD9361 完成。AD9361 与 Zynq SOC 之间的接口使用 LVDS 模式。由于 Zynq SOC 的 PS 参考始终精度较差,笔者使用 PL 端的温补晶振作为无线通信信号处理参考时钟,同时该时钟也用作 AD9361 的参考时钟。跳频捕获、跟踪的工作时序控制由 PL 完成,AD9361 跳频本振的配置由 PS 完成,PL 通过 IRQ-F2P 中断来触发 PS 中断进行跳频配置。本文中硬件平台所使用的各芯片均可

进行全国国产化原位替代。经实际测试,在不使用快速锁定功能的情况下,AD9361 的本振锁定时间不大于 0.2 ms。

3 跳频同步策略

本系统使用 R-S 码序列作为跳频序列^[8]。正常工作时每个时隙 1 跳,每个时隙持续时间为 2 ms,每个时隙内的时间划分如图 3 所示。

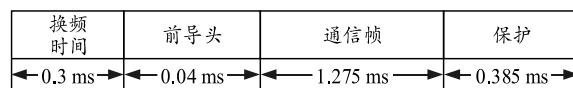


图 3 跳频时隙内时间分配

图中:前导头为 4 组“0x55AA”,用于实现 AGC 和位同步的快速闭环;通信帧长设计为 255 字节,通信速率为 1.6 Mbps,通信帧由帧头、TOD 信息、发射时隙分配表、发射节点 ID 号、接收节点 ID 号、CRC-16 和 R-S 信道编码校验字节组成;保护时间用于消除通信距离时延和跳频同步误差的影响。本文中所支持的最大通信距离为 40 km,为简化系统同步复杂度,不进行往返计时。

跳频同步使用同步字头法,地面站主站作为系统的时间基准,从站和空中端机通过接收解调主站发射信号同步字头中的 TOD 信息与主站进行时间同步。笔者设计跳频频点数为 64 个,因此在 1 s 内同一跳频频点将会多次出现。在跳频同步的捕获阶段,除主站为 1 个时隙 1 跳外,其他端机均 1 个时元 1 跳,这样既可以防止因某个或某些特定频点被干扰而无法使用导致跳频捕获不能完成的情况,又可在较短时间内实现跳频捕获。从站和空中端机的跳频同步流程如图 4 所示。

4 位同步算法

常用的位同步算法分为 Gardner^[9]、早迟环^[10]等闭环方式和数字计数开环方式^[11]。由于笔者采用跳频通信,为猝发通信,要求位同步算法可以实现快速同步。闭环方式的位同步算法跟踪精度更高,在低信噪比条件下性能更好,但由于环路的存在,无法实现快速锁定;开环算法采用过零检测计数的策略,可在一个码元内完成同步,但低信噪比条件下存在过零干扰的问题。笔者采用数字开环牵引早迟门闭环的位同步方式实现码元时钟的恢复,其算法如图 5 所示。有效接收信号判断模块由滑动相关器搜索到任意一组前导头“0x55AA”后给出一个重置信号对早迟环 NCO 进行牵引;如果开环电路一直搜索不到前导头,则早迟环 NCO 仍然依据自

身时序进行工作。

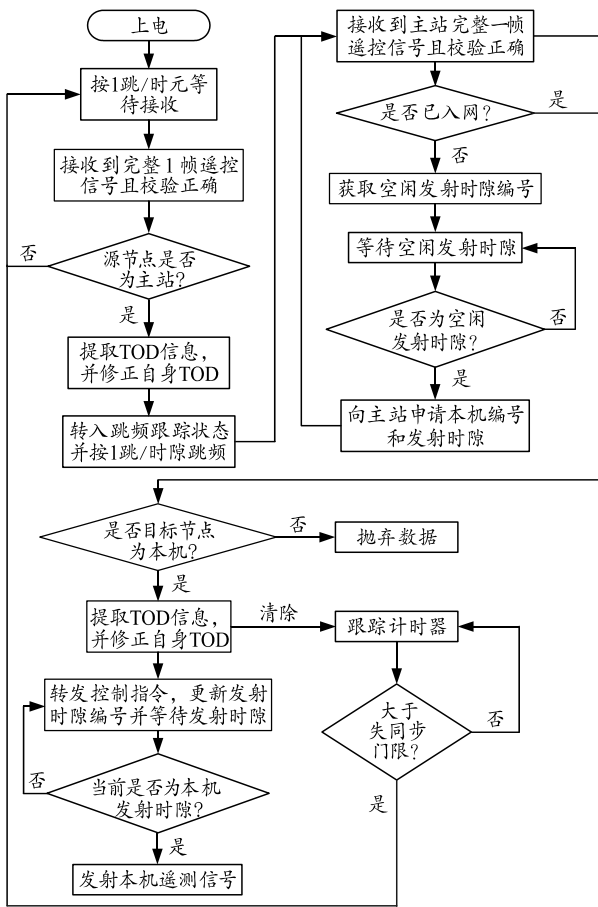


图 4 从站和空中端机的跳频同步流程

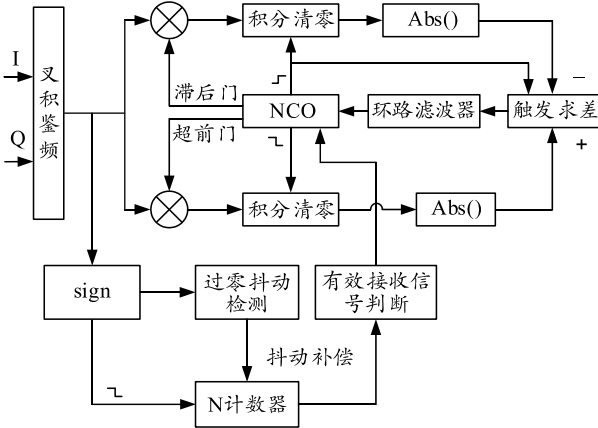


图 5 码元时钟恢复原理

5 实测结果

通过对系统进行实测表明，系统接收灵敏度可达到-90 dBm，端机的跳频同步和入网可在 1 s 内完成，跳频测控系统工作良好。

6 结束语

笔者设计一种低成本的跳频测控通信系统，跳频速率可达到 500 跳/秒，跳频同步算法简单有效，系统内端机分时工作，互不干扰，且具有任务规划简单、节点配置灵活的特点。

参考文献:

- [1] 杨廷梧. 航空飞行试验遥测理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017: 215-216.
- [2] 刘嘉兴. 飞行器测控与信息传输技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 325-328.
- [3] 余晓玫, 谭祥, 张媛. 差分跳频通信技术在船用通信系统的应用[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(6): 94-96.
- [4] 赵新颖. 舰船无线通信中数据链测试技术的研究[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(20): 108-110.
- [5] 赵洪峰, 周焘, 刘益吉, 等. 超视距机载武器双向数据链通信方法研究[J]. 上海航天, 2018, 35(5): 103-109.
- [6] 张攀, 马文平. 一种新型无人机数据链抗压制干扰技术的研究[J]. 测控技术, 2018, 37(1): 125-127.
- [7] 马传焱. 无人机测控系统抗干扰技术与应用分析[J]. 飞航导弹, 2006(11): 9-11.
- [8] 张鹏. 跳频通信中跳频图案与跳频同步的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007: 17-20.
- [9] GARDNER F M. A BPSK/QPSK Timing-Error Detector for Sampled Receivers[J]. IEEE Transactions on Communications, 1986, 34(5): 423-428.
- [10] JOHN G, PROAKIS. 数字通信[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 262-264.
- [11] TAKASAKI Y. Optimizing Pulse Shaping for Baseband Digital Transmission with Self-Bit Synchronization[J]. Communications, IEEE Transactions on [legacy, pre-1988], 1980, 28(8): 1164-1172.