

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210810

基于UZ2400的弹载遥测发射机设计

付珩 管雪元 胡威

(南京理工大学瞬态物理国家重点实验室 南京 210096)

摘要:为了有效应对精确打击武器飞行试验遥测需求的变化与增长,提出一种基于Zigbee技术的弹载导航信息的无线传输系统设计方案。无线遥测网络节点以ARM+UZ2400架构为核心,根据遥测试验需求,采用两级功率放大结构对输出射频信号进行放大,弹载发射天线采用基于套筒结构的小型化偶极子天线设计,有效解决弹上可用空间不足的问题。系统的软件部分依据IEEE 802.15.4标准设计数据处理框架,完成导航信息的传输。最后,搭建遥测网络节点数据传输系统的测试框架,完成对通信链路质量和数据传输准确性的测试。试验结果表明,接收的信号强度指标误差稳定在0.505,16个通道水平方向坐标精度、垂直方向坐标精度、水平方向测速精度以及垂直方向测速精度的与设计指标一致率分别为81.25%、100%、100%、100%。由此可以认为该系统能够在2.4 GHz频段实现对遥测目标的实时位置信息以及速度信息进行准确、稳定地传输,并且满足弹上系统小型化、通用性的设计要求。

关键词:UZ2400; Zigbee; 小型化; 遥测网络; 发射机

中图分类号: TP212 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510. 5015

Design of missile-borne telemetry transmitter based on UZ2400

Fu Heng Guan Xueyuan Hu Wei

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

Abstract: In order to effectively cope with the change and growth of telemetry requirements of precision strike weapon flight test, this paper proposed a wireless transmission system design scheme of missile navigation information based on Zigbee technology. The node of wireless telemetry network was based on ARM+UZ2400 architecture. According to the requirements of telemetry test, a two-stage power amplifier structure was adopted to amplify the output RF signal. The missile transmitting antenna was designed with a miniaturized dipole antenna based on sleeve structure, which effectively solved the problem of insufficient available space on the missile. In the software part of the system, the data processing framework was designed according to IEEE 802.15.4 standard to complete the transmission of navigation information. Finally, the test framework of the telemetry network node data transmission system was built to test the quality of communication links and the accuracy of data transmission. The test results showed that the Received Signal Strength Indicator error stabilized at 0.505, and the consistency rates of horizontal coordinate accuracy, vertical coordinate accuracy, horizontal velocity accuracy and vertical velocity accuracy with the design indicators of 16 channels were 81.25%, 100%, 100% and 100%. Consequently, the system can accurately and stably transmit the real-time position information and velocity information of the telemetry target in 2.4 GHz band and met the design requirements of miniaturization and versatility of the missile system.

Keywords: UZ2400; Zigbee; miniaturization; telemetry network; transmitter

0 引言

纵观近年来局部战争,精确打击武器在夺取战场主动权、打击预定作战目标等方面发挥着极为重要的作用^[1]。在精确打击武器的飞行试验过程中,为了有效降低试验过程中数据损坏或丢失的概率,通常采用遥测技术来实现数

据的实时采集^[2]、传输^[3]以及处理^[4]。弹载遥测系统为精确打击武器及其子系统的优化设计、验证、定型提供重要的数据依据^[5]。

目前全球范围内成熟度最高、应用最广泛的遥测标准是20世纪60年代由美国靶场司令委员会制订的IRIG 106标准,采用脉冲编码调制(pulse code modulation, PCM)实

现测试对象与地面接收站之间“点对点”单向数据传输。伴随着武器设计与制造技术的发展,为了更好地适应现代化战争的需求,武器飞行试验评估的重点逐渐从单一平台功能的测试转为试验整个作战体系的有效性^[6],由此带来的数据传输带宽增长、上行无线通信链路建立、遥测接收数据快速处理^[7]以及通用遥测设备小型化^[8]等需求,给飞行试验遥测系统带来了新的挑战。2004 年,美国国防部依托试验与评价核心投资计划^[9]提出采用成熟的商用双向无线网络实现遥测数据传输并启动了增强遥测网络系统(integrated network enhanced telemetry,iNET),该系统在现有的 PCM 串行数据流遥测链路的基础上,增加射频通信网络,实现具有双向、宽带传输以及动态组网能力的综合遥测网络。近年来随着软件无线电技术以及网络技术的快速发展,能够满足小型化、高精度以及多目标 3 个条件的主要技术路线主要包括码分多址以及频分多址复合技术和网络化遥测技术。2016 年,Yang 等^[10]提出了包含逻辑靶场技术框架、网络空间的增强空地遥测网络系统(air-ground network enhanced telemetry,agNET),填补了我国在该领域的空白。Zhu 等^[11]提出基于多跳结构的网络化遥测系统,每个节点可以与一个或多个对等节点通信。此外,引入 TCP/IP 五层网络模型搭建遥测网络^[12],加入网络处理器将 PCM 码流封装为 TMoIP 包流,可以极大地提升多播传输能力,节约传输带宽。近年来,软件无线电技术(software defined radio,SDR)的快速发展为小型化弹载无线数据传输系统奠定了坚实的基础,当前弹载发射机大多采用“软件定义射频前端+主控芯片”的架构,通过扩频技术^[13]、CPFSK 调制^[14]等方式提升频带的利用率。

本文引入物联网领域成熟的 Zigbee 技术,提出一种基于 IEEE802.15.4 标准的小型化弹载无线传输系统设计,在 2.4 GHz 频段实现遥测数据传输,可以有效解决传统多目标遥测系统,研发成本较高、开发和维护难度较大以及缺少协议层标准作为理论支撑的问题。

1 系统总体设计

本文设计的小型化弹载遥测系统采用 ARM+UZ2400 的架构,GPS 卫星接收机采集到的导航信息,在主控制器 STM32F103 的控制下,将采集到的数据通过 SPI 总线传输到以 UZ2400 为核心的射频前端。由于弹体尺寸狭小,弹上可用空间比较有限,因此小型化弹载遥测网络终端节点的实现是整个系统的关键。图 1 所示为弹载小型化遥测系统的总体框架,包括导航信息采集模块、电源模块、控制器模块、射频前端、收发天线以及串口通信模块,用于实现对导航信息的实时采集、传输以及处理。

2 系统硬件构成与结构设计

2.1 射频前端电路设计

结合实际应用场景,本文采用 UBEC 公司生产的

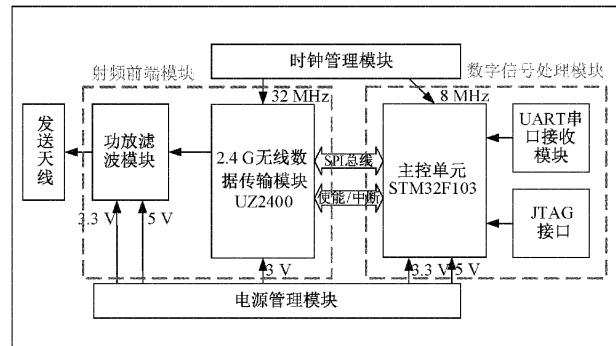


图 1 系统总体硬件框架

UZ2400 射频收发芯片,UZ2400 属于串行总线控制设备,图 2 所示为其物理层架构,主要由 128 字节的发送 FIFO 和接收 FIFO、CSMA/CA 控制器、自动 ACK 响应能力、内置的 AES-128 安全加密引擎以及数字信号处理等单元组成,具有处理 MAC 层报文的能力,工作频率在 2 405 MHz 至 2 480 MHz 之间,可以很好地兼容 IEEE802.15.4-2006 标准的物理层规范。在 2.4 GHz 频段下采用正交频移键控(offset quadrature phase shift keying,O-QPSK)调制技术以及直接序列扩频(direct sequence spread spectrum,DSSS),有效提高信噪比的同时,减少频谱扩展,改善旁瓣问题^[15]。

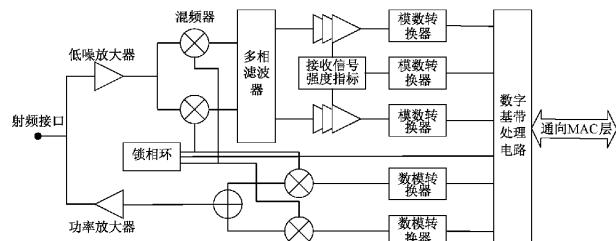


图 2 UZ2400 物理层架构

UZ2400 的发送是基于直接升频序列转换的,经过 SPI 总线传输得到的数据送入芯片内部的发送 FIFO 中,系统为数据加上前置序列以及起始帧。随后将物理层协议数据单元(physical protocol data unit,PPDU)的每个字节的 4 位 LSB(s_0, s_1, s_2, s_3)映射为一个数据符号,每个字节的 4 位 MSB(s_4, s_5, s_6, s_7)映射为下一个数据符号。当中心频点为 2 450 MHz 时,物理层采用 16 元准正交调制技术,根据循环移位和/或共轭(即奇数索引码片值反转)产生 16 个近似正交的伪随机噪声(pseudo noise,PN)序列并与 4 位信息比特(即数据符号)之间建立映射关系,用半正弦脉冲整形的 O-QPSK 将连续的表示数据符号的 32 位码片序列调制到载波上。其中,偶索引码片调制到 I 相载波上,奇索引码片调制到 Q 相载波上,并且 I 相载波和 Q 相载波之间存在时序偏移。差分射频信号经由 RF_P 和 RF_N 端口输出,经天线附近的巴伦完成差分转单端,由于实际的电路与仿真结果存在一定误差,因此需要在巴伦输出端口增加一

级阻抗修正电路将输出阻抗匹配到 50Ω , 经过修正后的射频信号经由天线发送到空间中, 射频前端电路设计如图 3 所示。

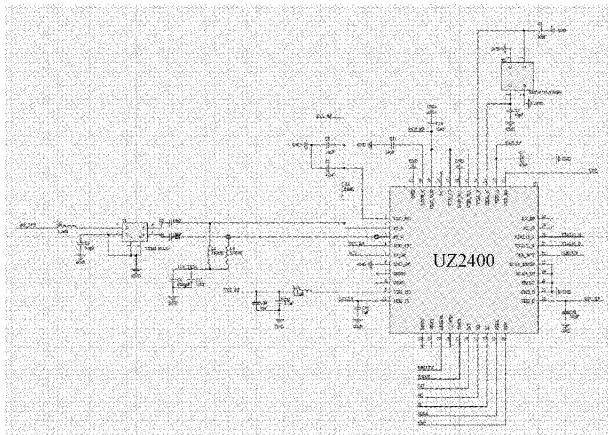


图 3 基于 UZ2400 的射频前端原理图

由于信号调制电路产生的信号功率较小, 无法直接辐射到空间中, 因此在射频前端的设计过程中, 功率放大器的设计是其中重要的一环。遥测系统中通信传输距离与发射功率之间的关系如式(1)所示。

$$P_r = P_t + G_r - 20\lg\left(\frac{4\pi \times D \times f}{c}\right) + G_r + L_c \quad (1)$$

结合课题背景以及前期设计要求, 无线传输距离须达到 5 km, 因此本设计采用两级功率放大结构, 射频前端的增益为两级放大电路增益之和, 一、二级放大电路的 S 参数仿真结果如图 4 和 5 所示, 因此理论放大量值为 $9.580 + 23.579 = 33.159$ (dBm), 满足设计要求。

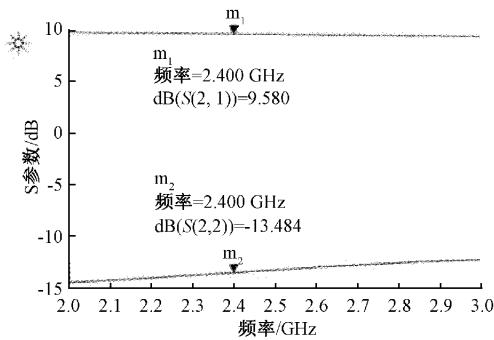


图 4 一级功率放大电路仿真结果

2.2 数字信号处理模块设计

数字信号处理模块是整个电路的核心部分, 考虑到低功耗和性价比的因素, 本设计选用 Cortex-M3 系列的 STM32F103RC 芯片作为无线遥测网络节点的微控制器。该芯片集成了 32 位的 RISC 内核, 支持浮点运算, 最高工作频率可以达到 27 MHz, 内置 512 KB 的 flash 存储器以及 64 KB 的 SRAM, 同时具有丰富的 I/O 端口与外设: 包含 3 个 12 位的 ADC、4 个 16 位通用计时器以及丰富的标准

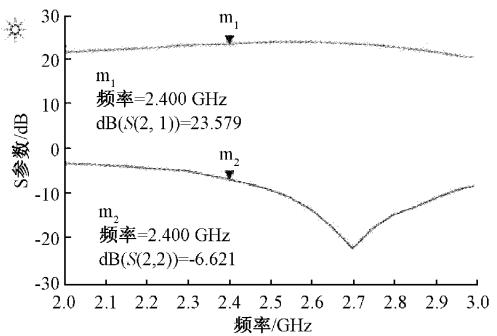


图 5 二级功率放大电路仿真结果

通信接口如 I²C、SPI、CAN、UART 等, 可用于驱动和调试 UZ2400 芯片^[16]。导航信息经由合并成帧后通过 UART 串口输入到微控制器 STM32F103RC 中, 经过软件协议栈中物理层和 MAC 层依次加载, 将数据通过 SPI 总线传输到 UZ2400, 完成一次数据采集与处理。

2.3 天线及阻抗匹配网络设计

结合小型化和 2.4 GHz 频段的要求, 本设计在弹载发送天线的外形方面设计了一种小型的、优化的偶极子天线^[17], 偶极子天线采用套筒结构, 具有良好的阻抗匹配特性。为了实现小型化设计, 通过中间弯曲和末端增稠来减小尺寸来实现, 可以分别作为电感和电容负载, 图 6 所示为减小平面套筒天线尺寸的过程。图 6(a)是一种传统的平面套筒天线。套筒的长度和宽度分别主要影响天线的谐振频率和阻抗带宽。图 6(b)由图 6(a)端部加厚制成, 相当于电容负载。图 6(c)是通过在图 6(a)的中间弯曲而制成的, 可以使得此的馈电结构能够获得偶极子臂之间所需的 180° 的相位差。图 6(d)是套管在中间弯曲, 同时在端部加厚, 相当于感应负载和电容负载同时, 电抗抵消。在某种程度上, 这种电感和电容负载可以在不损失带宽的情况下减小天线尺寸, 馈电端口尺寸为 $W_1 \times L_1$, 设在辐射贴片中心。其中 W_1 为 2 mm, W_2 为 1 mm, W_3 为 3.5 mm, L_1 为 1.5 mm^[18]。

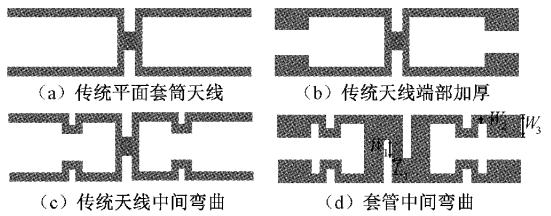


图 6 天线设计过程

对于馈线端口 L_1 的宽度, 由 50Ω 阻抗匹配的特性决定。计算方法如式(2)所示, 其中 ϵ_r 为板介电常数, FR4 的介电常数为 4.4; W 为待求走线宽度, Z 表示阻抗, 取 50Ω ; h 为板厚度 0.8 mm, T 是辐射贴片厚度可忽略不计, 最后求得 L_1 约为 1.5 mm。套筒天线的 S 参数仿真结果如图 7 所示。

$$Z = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1.41}} \ln \frac{5.98 \times h}{0.8 \times W + T} \quad (2)$$

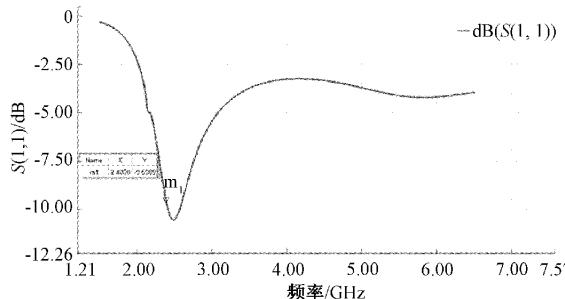


图 7 天线仿真结果

3 系统软件部分设计

3.1 SPI 通信接口初始化

由于 SPI 支持全双工通信并且数据传输速率大于 I^C 协议, 因此本设计采用 SPI 协议实现微控制器与射频芯片之间的数据和控制信号的传输。在 SPI 通信模式下 FIFO 的地址结构分为两个部分, 即 8 位寻址的短寄存器和 16 位寻址的长寄存器, SPI 接口的配置过程如下: 根据从设备的特性, 本设计采用模式 00, 即时钟极性 (clock polarity, CPOL) 和时钟相位 (clock phase, CPHA) 均选择低电平触发模式; 配置 NSS 模式软件控制, 用软件的方式, 控制 SPI 从设备的片选, 分频系数为 8, 传输速率设置为 4.5 MHz; 最后调用库函数 SPI_IxS_ReceiveData 实现 SPI 数据的收发。

SPI 接口的短寻址模式的时序如图 8 所示, 当接收到通信请求时, 主机通过将 SEN 端口的信号拉低并初始化端口 SCLK 来发起读/写操作。相应地主机将地址字段通过 SI 端口发送给从机, 对于短寻址模式的地址为 8 位, MSB 通常为 0, LSB 置 0 表示从机接收到地址字段后, 将数据通过 SO 端口发送给主机、置 1 表示, 地址字段发送完成后, 主机直接将数据写入从机的对应地址中。长寻址模式的传输时序与短寻址模式相似, 区别在于长寻址模式地址字段的有效位为 10 位。

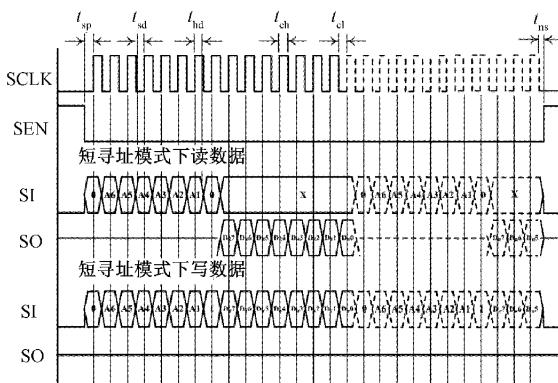


图 8 SPI 数据传输时序图

3.2 无线射频初始化

射频芯片 UZ2400 的配置过程如图 9 所示。

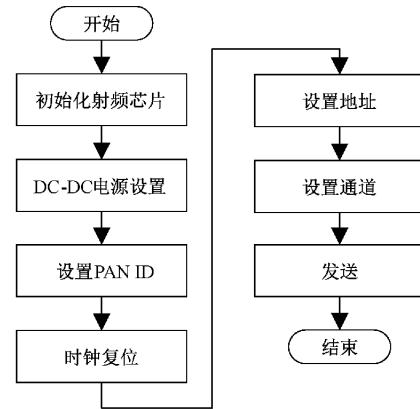


图 9 UZ2400 配置流程

首先, 需要对射频芯片进行初始化, 主要包括芯片的接口模式配置、关键引脚复位和版本信息核对等, 微控制器通过 SPI 接口给指定的寄存器写入特定的值以实现对 UZ2400 的初始化。初始化后, 需要进行内部时钟复位的配置, UZ2400 使用 16 MHz 系统时钟校准时钟频率。将 LREG0x20B[4] 设置为“1”, 然后继续轮询 LREG0x20B, 直到 LREG0x20B[7] 的值变为“1”。然后可以通过式(3)计算时钟校准的周期。

$$P_{clock} = \frac{62.5 \times C}{16} \text{ (ns)} \quad (3)$$

如果睡眠时钟频率高于预期值, 则需要配置 LREG0x220[4:0] 以降低时钟频率。新的时钟周期如式(4)所示, 并将该值填入寄存器 SLPACK 即可。

$$P_{clock_new} = P_{clock} \times 2^{LREG0x220[4:0]} \quad (4)$$

其次, 将寄存器 LREG0x250[4] 的值配置为 1 开启电压转换, 为射频电路独立供电。最后, 设置射频前端的载波频率, 通过 RFCTRL0 寄存器配置来选择发送通道, 并在初始化函数执行后进行通道配置。

3.3 遥测数据传输

遥测数据的发送流程如图 10 所示, 首先, 依次将 MAC 帧长度、MAC 帧控制字、传输次数、地址信息以及 MAC 帧负载填入地址位于 0x000 到 0x07F 的长地址存储空间中的 TX_FIFO 中, 并设置 SREG0x1B[2] 为‘1’, 打开接收端确认, 如果没有收到返回确认消息, 发送端会重新发送报文, 直至达到预设的最大发送次数。其次, 设置 SREG0x1B[1:0] 为‘11’, 将数据包发送到 TXMAC 中自动生成先导序列、数据帧开始分隔符以及帧检查序列 (FCS), 执行 CSMA-CA 算法将数据封包进行发送。再次, 查验 SREG0x31[0] 决定是否向微控制器发出硬件中断信号。最后, 查验 SREG0x24[0] 状态, 若 SREG0x24[0] 为‘0’, 表示接收到确认信号, 数据传输成功。

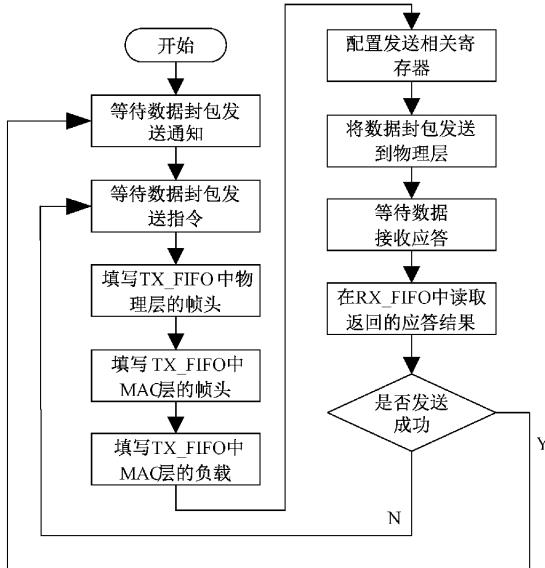


图 10 以 64 bits 长地址格式发送数据封包的发送流程

4 试验验证与分析

4.1 试验框架

本文设计的基于 Zigbee 技术的遥测网络节点发射机的试验框架如图 11 所示。GPS 卫星接收机收到卫星模拟机发送出的导航信息, 经过处理与采编后, 将给数据添加帧头 EB90 组成数据帧, 随后将导航数据通过 UART 串口输入到基于 ARM+UZ2400 架构的遥测发射机中并通过天线将射频信号发送到空间中。最后通过地面遥测接收机接收弹载终端发送的遥测数据, 验证发射机的可靠性和数据传输的准确性。

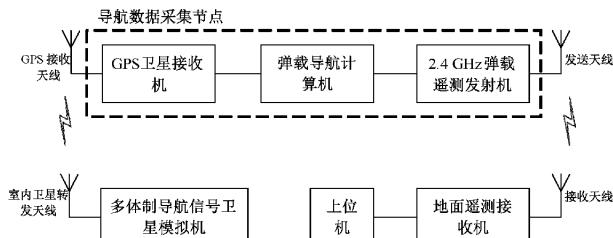


图 11 系统整体试验框架

4.2 通信链路性能测试

在实验室环境下进行传输质量测试前需要进行链路测试。首先对地面遥测接收机进行参数配置, 设置接收中心频率为 2 450 MHz, 解调模式设置为 O-QPSK, 传输码型为 RNRZ-L, 码速率设置为 1 Mbps, 子帧长度设置为 80。随后, 启动发射机建立数据传输链路, 等待接收机载波锁定、位同步、子帧同步及副帧同步完成后, 开始记录遥测数据。接收数据后, 需要分析验证连接质量指标(link quality indication, LQI) 以及接收信号强度指标(received signal strength indication, RSSI) 查验链路的稳定性。

$$RSSI = -(-81 - \frac{LQI \times 91}{255}) \quad (5)$$

根据 LQI 和 RSSI 的参考转换式(5), 计算 LQI 对应的理论 RSSI 值。通过对理论 RSSI 值与实际接收的 RSSI 值得到 RSSI 误差查验数据传输链路的稳定性。如图 12 所示, 随着试验次数的增加, RSSI 误差稳定在 0.505, 表示遥测通信链路稳定性较好。

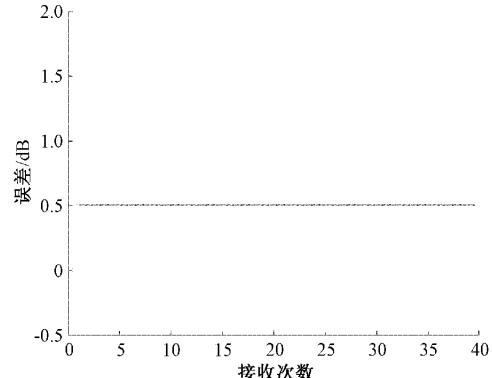


图 12 RSSI 误差分析结果

4.3 数据传输精度测试

本文弹载遥测发射机数据传输精度试验中, 对于数据包中不同类型的导航数据采用不同的精度查验方法, 假设 n 个坐标测量点, 每个测量点水平方向坐标的标准值为 $(long_{bk}, lat_{bk})$, 接收测量值为 $(long_{ik}, lat_{ik})$, 水平坐标的精度通过圆概率误差(circular error probability, CEP)衡量^[19], 计算方法如下:

$$\begin{aligned} E_{CEP} &= 0.5887 \times (\sigma_{long} + \sigma_{lat}) \\ \sigma_{long} &= \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (long_{ik} - long_{bk}) - \zeta_{long}}{n}} \\ \sigma_{lat} &= \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (lat_{ik} - lat_{bk}) - \zeta_{lat}}{n}} \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)中 ζ_{long} 与 ζ_{lat} 分别表示经度和纬度的理论值与接收测量值之间的误差的期望。同理, 对于测量点的高度的误差 E_H 按式(7)计算:

$$E_H = 0.6745 \times \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (H_{ik} - H_{bk})^2}{n}} \quad (7)$$

对于速度误差的衡量, 本文采用三向速度分量的原始值与接收测量值的标准差。

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{EN} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (\sqrt{v_{Eik}^2 + v_{Nik}^2} - \sqrt{v_{Ebk}^2 + v_{Nbik}^2})^2}{n}} \\ E_U = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (\sqrt{v_{Uik}} - \sqrt{v_{Ubk}})^2}{n}} \end{array} \right. \quad (8)$$

测试过程中,首先将接收到的遥测数据通过高速以太网口传输到上位机。其次在上位机中,根据数据传输协议对接收数据进行解算并统计接收数据的误帧率以及丢帧

率,数据解算结果如图 13 所示,当中心频点为 2 450 MHz 时,误帧率为 5.388×10^{-5} ,丢帧率 6.386×10^{-5} ,满足设计要求。



图 13 数据解算结果

最后将卫星模拟机内部的原始导航数据读出作为参考基准,根据式(6)~(8)计算 CEP、高度概率误差、水平速度的标准差以及天向速度的标准差,对 16 个通道的数据传输精度结果如表 1 所示。

表 1 传输精度测试结果

通道 编号	水平方向 坐标精度	垂直方向 坐标精度	水平方向 测速精度	垂直方向 测速精度
1	1.344 3	1.526 1	0.086 3	0.173 3
2	1.167 3	1.576 5	0.057 2	0.242 7
3	0.844 8	1.351 6	0.043 5	0.129 4
4	1.058 2	1.418 3	0.044 3	0.133 1
5	0.350 9	0.863 3	0.066 1	0.142 1
6	0.927 6	1.090 0	0.174 5	0.156 4
7	0.312 6	0.645 1	0.036 1	0.156 4
8	3.413 2	2.843 4	0.044 3	0.151 2
9	0.775 4	0.946 3	0.034 3	0.154 6
10	1.058 2	1.418 3	0.044 3	0.133 0
11	1.526 6	1.464 5	0.046 7	0.147 5
12	1.844 8	6.622 8	0.065 5	0.120 5
13	1.859 4	7.263 0	0.064 3	0.095 5
14	1.591 9	7.383 0	0.033 6	0.048 5
15	2.011 1	8.030 2	0.053 2	0.073 8
16	2.215 7	7.489 0	0.070 1	0.123 4

精度是衡量遥测系统的重要指标,是进一步对遥测数据定量分析的必要前提。弹载遥测传输设备的误差主要包来源于 3 个部分:数字传输系统的误差、信号采编电路引起的误差以及信号传输过程中路径干扰、非线性失真等。本文设计的弹载遥测发射机中 13 个通道(约 81.25%)的水平方向坐标位于以 CEP 为半径圈定的圆之内,与 CEP 定义的符合度较好。根据遥测系统设计精度要求,垂直方向坐标精度、水平方向测速精度、垂直方向测速精度的一致率分别为 100%、100%、100%,遥测数据调制正确,满足设计要求。由此可知,本次遥测系统精度试验采用 CEP 与标准差较为合理,可以准确反映被试遥测系统的传输精度性能。

4.4 实物测试

实测环境下,搭建弹载遥测发射系统与地面遥测接收机测试环境。具体测试流程如下:首先将发射机置于高度距地面 50 m 平台上,地面接收机在距离 5 km 处接收数据。随后配置地面遥测接收机参数,参数设置同 4.1 节,确认配置参数后,发射机上电,上位机监控软件观测接收机的实时接收状态。图 14 所示为发射机运行时,监控软件观测到的实时接收状态,载波锁定且符号、子帧以及副帧均同步,弹载发射机与地面接收机之间的数据传输链路稳定。稳定后开始记录数据。

为了验证遥测数据传输的正确性,解析接收到的遥测数据,并绘制经度、纬度、高度以及 GPS 收星数的变化曲线如图 15 所示。接收到的导航数据与模拟机输出飞行轨迹相符且卫星接收数正常,由此判定遥测数据解析正确,数据传输链路稳定,发射机符合设计要求。

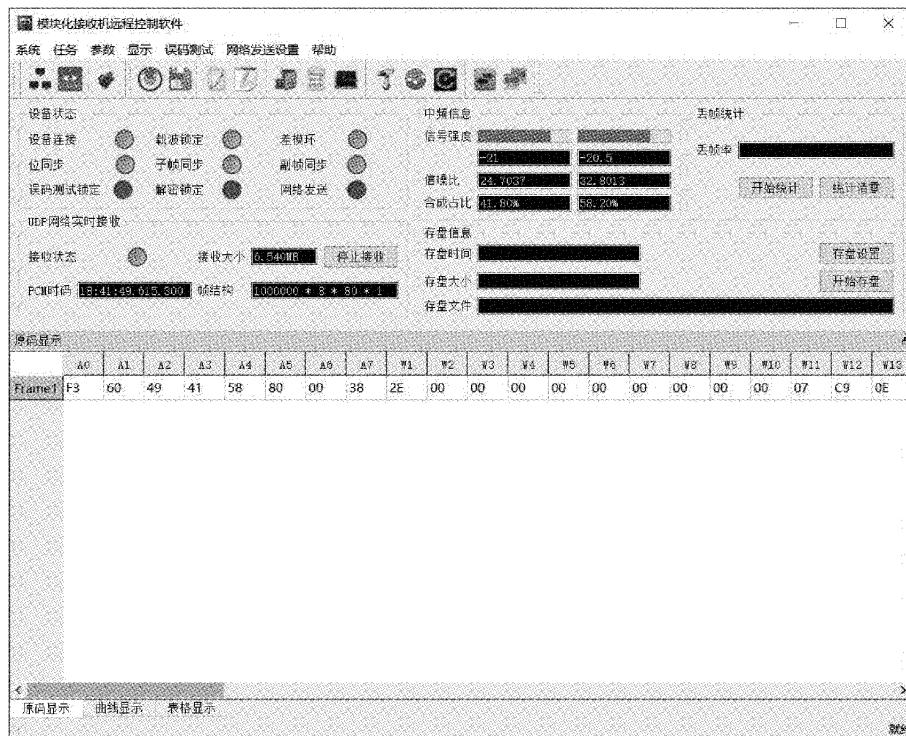


图 14 接收状态实时监控

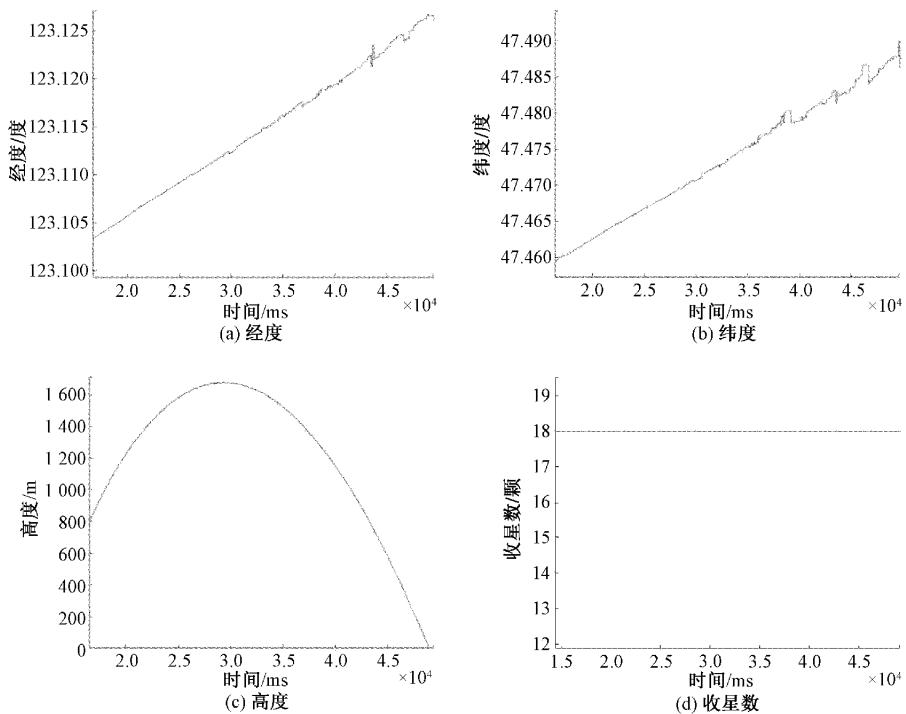


图 15 遥测数据解析曲线

5 结 论

在多目标协同试验的需求牵引下,传统的单向点对点遥测开始向空地一体化遥测网络转变,由此,本文提出一

种基于 Zigbee 技术的弹载遥测网络终端发射系统设计。该发射机以 STM32F103RC 为主控芯片,搭配射频芯片 UZ2400 组成遥测发射系统核心架构,并据此完成相应核心模块的设计;深入研究 IEEE802.15.4 标准中的 MAC

层、物理层以及数据传输过程,根据 UZ2400 射频芯片的特性,完成弹载发射端的数字信号处理模块、射频前端模块等的设计;依据弹体外壳尺寸,设计基于套筒结构小型化偶极子天线。在实验室环境下,16 个发送通道的中心频率准确且 RSSI 误差为 0.505,传输的导航数据的丢帧率、误帧率以及准确度在合理区间。结果表明,本设计方案通过直接序列扩频与 OQPSK 调制等方式提高了系统可靠性和安全性,解决了传统 PCM/FM 遥测体制缺少协议层标准支撑等问题,具有一定的应用价值。

参考文献

- [1] 王雅琳, 刘都群, 李学朋, 等. 俄乌冲突中俄精确打击武器运用研究[J]. 战术导弹技术, 2022, 43(3): 107-115.
- [2] 刘远东, 余诚刚, 杨纯宇, 等. 外场通用型飞机飞参系统的数据采集系统设计[J]. 中国测试, 2020, 46(S2): 123-127.
- [3] 田思维, 朱爱军, 贾树泽, 等. 基于遥测数据频域特征的气象卫星故障诊断方法[J]. 电子测量技术, 2021, 44(14): 158-162.
- [4] 石磊, 朱洪海, 于雨, 等. 基于双目立体视觉的波浪参数遥测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(3): 99-104.
- [5] 马文超, 涂卫军, 李科连, 等. 弹载遥测系统总体关键技术的研究与应用[J]. 遥测遥控, 2021, 42(6): 78-83.
- [6] 罗清华, 彭宇, 周鹏太, 等. 航空飞行试验新一代网络化遥测技术浅析[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(2): 261-270.
- [7] 白效贤, 杨廷梧, 袁炳南. 航空飞行试验遥测技术发展趋势与对策[J]. 测控技术, 2010, 29(11): 6-9.
- [8] 刘明, 马亚平, 李宏. 智能化机载测试系统关键技术综述[J]. 中国测试, 2018, 44(7): 99-104.
- [9] CARVALHO M A, LEITE N P O, D'AMORE R. iPCM telemetry protocol: reliability and bandwidth improvement for PCM IRIG-106 [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 56(1): 155-166.
- [10] YANG T, ZHANG Z. Development of integrated air-ground test network[J]. Measurement and Control, 2016, 24(5): 1-4.
- [11] ZHU H, DONG Q, LIU M. Telemetry system based on MESH network and its application[C]. 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems(ICAIIS), IEEE, 2020: 217-220.
- [12] 罗煜缤, 李洪, 周广铭, 等. 基于 IP 的遥测网传输综述[J]. 宇航计测技术, 2021, 41(2): 1-7.
- [13] 刘雨顺, 管雪元, 赵一帆. 基于扩频通信的弹载发射机设计[J]. 电子测量技术, 2021, 44(9): 66-70.
- [14] 马游春, 李超杰, 李晋芳, 等. 零中频架构的 CPFSK 弹载遥测发射机设计[J]. 电子测量技术, 2022, 45(4): 134-138.
- [15] KUMAR S, MAJHI S. Blind symbol timing offset estimation for offset-QPSK modulated signals [J]. ETRI Journal, 2020, 42(3): 324-332.
- [16] MARIE T F B, HAN D, AN B. Microcontroller design for security system: Implementation of a microcontroller based on STM32F103 microchip[J]. International Journal of Embedded Systems, 2019, 11(5): 541-550.
- [17] 苏金花, 陈星. 一种水平全向平面偶极子阵列天线[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019, 17(4): 627-631.
- [18] FU S, ZHAO X, LI C, et al. Dual-band and omnidirectional miniaturized planar composite dipole antenna for WLAN applications [J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2021, DOI: 10.1002/mmce.22863.
- [19] 张乐, 李武周, 巨养锋, 等. 基于圆概率误差的定位精度评定办法[J]. 指挥控制与仿真, 2013, 35(1): 111-114.

作者简介

付珩,硕士研究生,主要研究方向为遥测通信技术,信道编译码理论,调制解调技术等。

E-mail:fuheng1024@163.com

管雪元,硕士,副研究员,主要研究方向为测试计量技术及仪器等。

E-mail:1075574745@qq.com