

# 基于脉冲超宽带的星载高速无线数据网络设计<sup>\*</sup>

周莉<sup>1,2</sup> 谢义方<sup>1</sup> 安军社<sup>1</sup> 熊蔚明<sup>1</sup> 薛长斌<sup>1</sup>

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院计算技术研究所 北京 100190)

**摘要** 针对卫星内高速数据通信现有的点对点 LVDS 线缆通信带来的线缆束缚、布局困难、成本增加的难题,提出一种基于脉冲超宽带的星载高速无线数据网络设计方案,介绍了脉冲超宽带收发机、高速无线网络协议和无线网络节点软硬件设计的关键技术. 发射机采用阶跃恢复二极管(SRD)产生皮秒级脉冲信号;超宽带脉冲接收采用幅度检测方法;无线高速网络协议设计参考美国军用数据总线标准 MIL-STD-1553B 协议,采用时分制指令响应机制,对 1553B 标准的许多指标进行扩展以适应 UWB 无线信道和高速传输特点,并通过 FPGA 成功实现. 测试显示,地面演示系统应用层数据传输误码率小于  $10^{-9}$ ,表明了基于脉冲超宽带的星载高速数据网络设计的可行性和可靠性.

**关键词** 脉冲超宽带,星载无线数据网络,通信协议, MIL-STD-1553B 总线,空间应用

**中图分类号** V 443.1

## Design of a Wireless Spacecraft High Speed Data Network Based on IR-UWB

ZHOU Li<sup>1,2</sup> XIE Yifang<sup>1</sup> AN Junshe<sup>1</sup> XIONG Weiming<sup>1</sup> XUE Changbin<sup>1</sup>

1(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

**Abstract** Impulse Radio Ultra-Wide Band (IR-UWB) is one of the promising techniques in the future aerospace application because of its distinguishing features of low power, high capacity, anti-multipath and simple structure. Design of a spacecraft high speed data network based on IR-UWB is presented. Design of the IR-UWB transceiver, the wireless communication protocol and the hardware and software of the nodes are described in detail. The transmitter is based on the physical mechanism of fast recovery of the Step Recovery Diodes (SRD), and the receiver is based on the tunnel diode circuit for impulse amplitude detection. Design of the communication protocol refers to the American military data bus standard MIL-STD-1553B protocol, which is a time division command/response multiplex data bus. The design is tested and verified by the FPGA. The test results indicate the system design is reasonable.

\* 国家重大科技专项项目(TY3Q20110015)和中国科学院空间科学战略性先导科技专项项目(XDA04070000)共同资助

2016-09-13 收到原稿, 2017-04-18 收到修定稿

E-mail: zhouli@nssc.ac.cn

**Key words** IR-UWB, Wireless Spacecraft data networks, Communication protocol, MIL-STD-1553B, Aerospace application

## 0 引言

目前航天器内通过星载数据总线将分布式的航天器各分系统和有效载荷数据统一集成管理。航天器内的数据传输包含不同的信号,例如高低电平命令信号、模拟信号、数字信号以及各类串行总线信号等。这些信号线缆在航天器内部错综分布,不仅增加了发射重量体积和成本,还给地面调试和装配等增加了大量工作<sup>[1]</sup>。日臻成熟的地面无线网络技术为星载数据网络提供了技术储备。根据数据信号特点,在星载数据网络中有三个典型的应用场合适合应用无线数据网络技术,包括低速率的面向环境监控和遥测信息采集的星载无线传感器网络<sup>[2]</sup>,中速率的面向替代星载数据总线的星载光无线数据总线<sup>[3]</sup>和高速率的面向星载大数据块传输的高速星载数据网络。

WiFi<sup>[4]</sup>和UWB<sup>[5]</sup>是两种常用的高速率无线局域网技术。WiFi技术发展较成熟,已广泛应用于家庭和商业领域中,但相对于UWB,其功耗很高,抗多径差,易对星上其他无线设备产生干扰。此外WiFi主要是面向互联网和用户,硬件实现和协议复杂,不适合应用于星载数据网络<sup>[5]</sup>。而IR-UWB带宽很宽,脉冲极窄,抗多径能力强,对其他设备干扰小,并且系统实现简单。由于目前没有适合空间应用的成熟UWB通信协议,这里提出一种基于IR-UWB的

星载高速无线数据网络设计方案,并对构建星载无线高速数据网络的关键技术进行介绍,包括IR-UWB收发机、UWB通信协议和节点软硬件设计。

## 1 系统架构

传统的星载数据系统通过采用星载数据总线(包括1553B, CAN, 1394, Spacewire等)将航天器中各子系统和有效载荷等连接,共同构成分布式计算网络,实现综合化系统内部的信息共享以及系统综合化控制<sup>[6]</sup>,如图1所示。作为星载数据系统的子系统,星载高速无线数据网络连接至星载数据总线,可以在星载计算机的命令和控制下实现对卫星有效载荷的控制、数据采集、处理和存储等功能,同时作为高速无线数据网络的无线总线控制器WBC,实现高速无线数据网络中数据通信的调度和控制功能。高速无线数据网络在不改变传统星载数据系统架构<sup>[2-4]</sup>的基础上,取代现有的点对点LVDS线缆通信,在载荷管理器的控制下采用脉冲超宽带无线组网技术实现节点间的高速数据传输。

根据应用需求,高速无线数据网络包含若干节点,其中包括1个无线总线控制器(WBC)和若干无线终端设备(WRT)。无线网络采用星型拓扑,在WBC的控制和命令下进行通信。无线总线控制器将

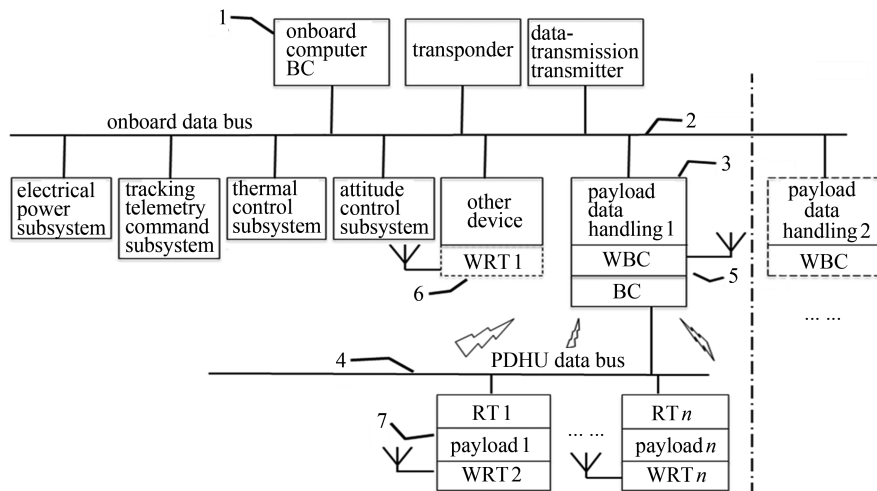


图1 基于IR-UWB的星载高速无线数据网络体系

Fig. 1 Wireless spacecraft high speed data network based on IR-UWB

载荷管理器集成在一个机箱中, 例如图 1 中的节点 3, 其为有效载荷系统管理器, 是卫星数据总线中的一个 RT, 也是有效载荷分系统的总线管理器 BC, 同时可作为无线网络中的 WBC. 有效载荷数据总线 4 为可选项, 也可用高速无线数据网络实现其现有功能, 由载荷具体需求决定是否连入到有效载荷数据总线 4 中. 有高速数据传输需求的节点 6 可以作为卫星数据总线中的一个 RT, 同时也是无线网络中的一个 WRT; 节点 7 仅是无线网络中的一个 WRT. 在卫星多舱体的情况下, 根据实际需求可以配置多个载荷管理器 3, 每个载荷管理器控制一个高速无线网络.

无线网络中每个节点的正常工作需要节点软硬件相互配合完成. 每个节点均包括一个 UWB 收发机, 网络协议的可靠性建立在可靠的物理层基础上.

## 2 关键技术

### 2.1 IR-UWB 收发机

为向未来空间探索提供新的技术支持, 中国科学院国家空间科学中心近年来逐步开展了超宽带技术

及其航天应用研究, 这里星载高速无线数据网络物理层采用该中心自主研发的超宽带原理样机<sup>[7-9]</sup>如图 2 所示. IR-UWB 收发机包括超宽带发射机、超宽带接收机、超宽带天线, 若收发信机共用天线, 还包括一个收发高速开关.

发射机按功能划分为纳秒级脉冲产生电路、高速开关、皮秒级脉冲产生电路和脉冲整形电路, 主要核心器件包括 D 触发器、反向器、微波三极管、微带电感、阶跃恢复二极管、肖特基二极管及其附属电路<sup>[7-9]</sup>. D 触发器产生宽度为几纳秒的脉冲经反向器整形后驱动微波三极管. 微波三极管在脉冲信号驱动下由截止状态进入饱和状态. 同时, 在微波三极管集电极产生宽度为几纳秒、幅度与电源电压相当的电压脉冲. 该脉冲经阶跃恢复二极管、肖特基二极管及其附属电路整形后输出<sup>[9]</sup>. 本脉冲发生器结构简单, 成本低, 受外触发信号质量影响小, 其产生的高斯脉冲如图 3 所示, 宽度为 263 ps, 带宽为 2.3 GHz (-10 dB), 幅度为 5 V, 重复频率达 150 MHz, 振铃水平为 0.3%, 相对于已公开报道的其他脉冲发生器具有明显优势. 由于 IR-UWB 时域上发送信号时刻极

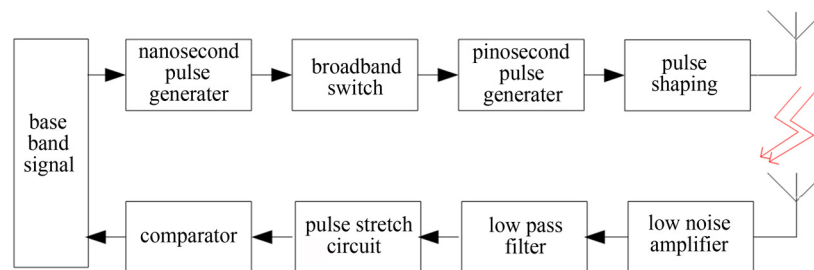


图 2 超宽带原理样机工作原理

Fig. 2 Block diagram of the IR-UWB transceiver

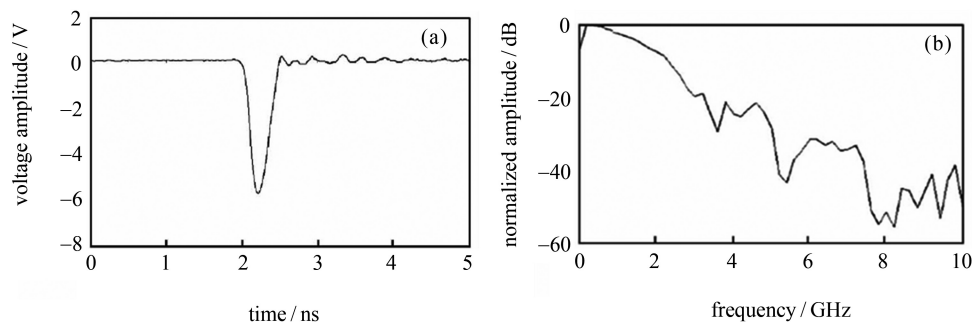


图 3 单脉冲时域波形 (a) 和单脉冲频谱 (b)

Fig. 3 Time domain waveform of monopulse (a) and frequency spectrum of monopulse (b)

低, 脉冲宽度仅为 263 ps, 且功率谱密度极低, 不会对其他星上射频设备 (测控应答机、数传发射机等) 产生影响.

这里采用的非相干接收机 [10,11] 由宽带低噪声放大器、滤波器、脉冲展宽电路及比较器组成. 接收机采用的是基于隧道二极管的幅度检测方法, 将检测到的皮秒级窄脉冲展宽为几纳秒的宽脉冲, 再通过比较器与参考电压相比.

利用隧道二极管的伏安特性捕获方法可以避开极高的采集时钟要求, 其工作原理如图 4 所示. 检测脉冲利用恒流源使隧道二极管工作在 A 点, 当输入脉冲的幅度较大时, 使隧道二极管的工作点从单稳谐振 A 点越过 P 点进入负阻抗区的 B 点, 而 B 点为隧道二极管的不稳定区, 其工作点立即转移到 C 点, 与此同时隧道二极管的电压大幅上升, 此时电压与预设的门电平相比较, 识别有无脉冲信号, 判决为 1 或者 0 输出.

### 2.2 通信协议设计

目前没有适合空间应用的成熟 UWB 通信协议, 这里设计了一种基于 1553B 协议的星载高速无线数据网络通信协议. 由于 1553B 总线的传输速率只有  $1 \text{ Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$ , 不适合用于高速数据传输, 所以对传统的 1553B 总线进行改进, 以适应 UWB 物理层, 改进后的协议称为高速 1553B 协议 (HS1553B). HS1553B 通信协议的设计思想是: 网络中有且仅有一个中央集权的无线网络控制器 WBC, 若干个无线终端设备 WRT 和一个无线网络监测器 WMT; 节点在网络控制器 WBC 的控制下以一种有序的方式访

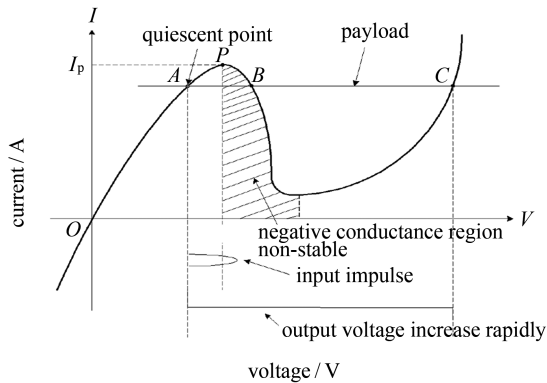


图 4 隧道二极管的伏安特性曲线

Fig. 4 Volt-ampere characteristics of tunnel diode

问介质并且节点访问介质的时间是可以预测的, 不存在冲突问题, 在重负载的情况下具有较高的介质利用率和可靠性; 网络中的通信均由网络控制器 WBC 发起和组织的, 网络控制器 WBC 向网络中节点发出命令, 各终端设备接收到命令后根据命令的定义处理消息, 抛弃与本节点无关的消息, 对与本节点相关的消息做出响应, 网络控制器 WBC 接收到相关节点的响应后根据响应数据判断本次通信是否成功, 若不成功根据计算机软件的设置决定是否重新发送本条命令.

HS1553B 协议层次如图 5 所示, 自下向上依次为物理层、数据链路层、网络层和应用层, 其中物理层由 IR-UWB 收发器、天线等硬件组成, 应用层由计算机上层软件实现, 数据链路层和网络层采用可编程逻辑器件 FPGA 实现. 物理层与数据链路层的接口实现发送信号、接收信号和收发器的收发使能信号. 数据链路层实现数据的编解码、收发使能信号控制、纠错控制、基带信号与编解码模块之间的接口转换等功能. 网络层实现通信协议的逻辑, 主要是无线总线控制器 WBC 和无线终端设备 WRT 功能; 向下接收数据链路层解码的数据, 传递要输出编码的数据; 向上实现与应用层的接口交互. HS1553B 协议的设计参考 MIL-STD-1553B 标准, 针对 UWB 信道和高速传输特点, 对 1553B 标准的许多指标进行扩展 [12], 如校验码、有效数据位、传输速率等, HS1553B 协议与标准 1553B 协议的对比如表 1 所示.

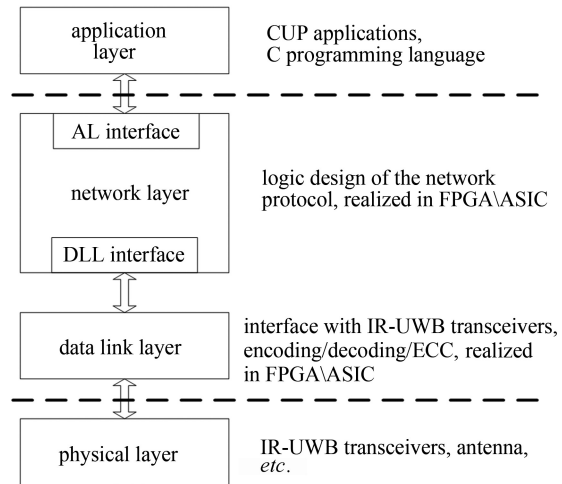


图 5 星载高速无线数据网络协议层次

Fig. 5 Protocol hierarchy of the wireless network

表 1 MIL-STD-1553B 与 HS1553B 比较

Table 1 Comparison between the HS1553B and MIL-STD-1553B protocol

	MIL-STD-1553B	HS1553B
物理层	双绞线	UWB 信道
编码方式	曼彻斯特编码	曼彻斯特编码
传输速率	$1 \text{ Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$	$5\sim 50 \text{ Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$ , 可设
物理层速率	$2 \text{ Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$	$10\sim 100 \text{ Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$ , 可设
网络容量	1 个 BC, 1 个 MT, 31 个 RT	1 个 BC, 1 个 MT, 31 个 RT(可扩展)
有效数据位	16 位	32 位
消息长度	$\leq 32$ 个 16 位字	$\leq 1024$ 个 32 位字
字类型	命令字、数据字、状态字	命令字、数据字、状态字
校验码	1 位奇偶校验, 不可纠	7 位 ECC 校验, 纠一检二
冗余	AB 总线冗余	AB 总线冗余
切换总线重发	支持	支持
传输机制	BC2RT(S), RT2BC, RT2RT(S), 广播, 方式命令	BC2RT(S), RT2BC, RT2RT(S), 广播, 部分方式命令
通信模式	半双工	半双工
响应时间	$4\sim 12 \mu\text{s}$	软件可设

HS1553B 通信协议 IP 核<sup>[13]</sup>设计功能模块的划分如图 6 所示, 包括 AXI 从设备接口、寄存器/模式使能模块、BC 模块、RT 模块、RAM 仲裁模块、共享 RAM、通道选择模块、编码器模块、解码器模块、计时器模块等, 为适应外部使用的 CPU 型号和其访问总线的类型, 还有一个可配置的应用层接口, 包括常见的计算机接口总线标准 PCI 总线、ISA 总线等. 计算机通过 AXI 总线访问寄存器模块和内部共享 RAM, 完成 HS1553 协议 IP 核的初始化、使能和数据操作. BC 和 RT 模块根据配置的寄存器和内部 RAM 数据完成通信控制功能. 通道选择模块完成 A, B 通道选择的功能, 通过控制收发器的接收使能和发送禁止信号控制总线的使用. 编码器首先完成 32 位数据位的 ECC 编码, 再将 ECC 编码后的 39 位并行数据编码为串行的曼彻斯特码, 然后将曼彻斯特码变为物理层可识别的基带信号. 解码器首先将物理层识别的基带信号变为曼彻斯特码, 再将串行的曼彻斯特码译码为 39 位并行数据, 然后进行 ECC 校验, 并将校验结果发送给上层模块. 编码器与基带信号之间的转换如图 7 所示.

设计的 HS1553B 协议 IP 核具有以下特点.

(1) 参考 MIL-STD-1553B 总线规范制定了 32 位系统的 HS1553B 协议, 支持 WBC 和 WRT 功能.

(2) 工作方式 (WBC 还是 WRT) 由软件配置.

(3) 内部 RAM 进行 ECC 校验, 实现“纠一检二”的容错功能.

(4) 工作在 WRT 模式时, 支持非法指令表验证、子地址控制字查询表、消息描述栈功能.

(5) 网络层与数据链路层相对独立, 可以更换编解码器模块以适应不同的物理层.

(6) 支持脉冲式的超宽带收发机, 可适应多种传输速率, 最高支持  $100 \text{ Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$ .

(7) 为了适应多种速率, 协议可配置寄存器控制 WBC 和 WRT 的等待和响应时间.

(8) 应对物理层的随机特性, 传输数据采用 ECC 校验传输, 在接收端进行 ECC 校验, 实现“纠一检二”的容错能力.

(9) 应对物理层的异步传输特性, 传输的命令字和数据字前增加 256 位前导码, 用于同步和稳定通信, 以降低应用层有效数据的误码率.

(10) 为避免传送 0 信号时信道长时间为 0, 传输的数据为曼彻斯特编码, 然后对曼彻斯特编码进行归

零码设置, 以适应 IR-UWB 收发器的物理层特性.

(11) IP 核的资源利用率高, 灵活性好, 可移植性高, 可扩展性强, 命令字和状态字中还有保留位可以进行后续扩展, 例如 WRT 地址、发送和接收子地址的个数、消息可传输的最大数据字个数等.

HS1553B 通信协议 IP 核应对航天环境特殊性采取的可靠性措施包括: 应对单粒子翻转, RAM 区采用 ECC 校验; 应对物理层的随机特性, 传输数据采用 ECC 校验传输; 应对物理层的异步传输特性, 传输的命令字和数据字前增加 256 位前导码; 为避免传送 0 信号时信道长时间为 0, 传输的数据为曼彻斯特编码; 采用 AB 双冗余通道, 当一个通道出错时, 切换到另一个通道重传.

HS1553B 通信协议 IP 核采用自顶向下的设计方法, 使用 Verilog 硬件设计语言进行编程, 通过了模块仿真验证、片系统仿真验证和 FPGA 验证, 验证结果表明符合设计预期.

### 2.3 节点软硬件设计

节点是网络的基本组成单元, 网络通信功能是通过节点相互协作实现的. 节点根据功能分为无线总线控制器 (WBC)、无线终端设备 (WRT)、无线监视器 (WRT) 三种设备, 可以采用相同的硬件, 设备功能的区分通过软件设置实现. 节点设计分为硬件设计和软件设计.

图 8 给出连接到卫星 1553B 总线和载荷 1553B 总线上的载荷管理器硬件功能工作原理, 其也是高速无线数据网络的网络控制器 WBC 的工作原理. 载荷管理器的硬件功能设计主要包括计算机最小系统、标准 1553B 总线接口、HS1553B 协议接口、UWB 收发器和其他外围电路. 计算机模块使用的芯片为龙芯 LS1E, NOR Flash 和 EEPROM 为程序存储器, SDRAM 为数据存储器, 挂在 LS1E 的外部存储器 EMI 接口. 计算机软件完成传统 1553B 总线网络与高速无线数据网络之间的数据交互.

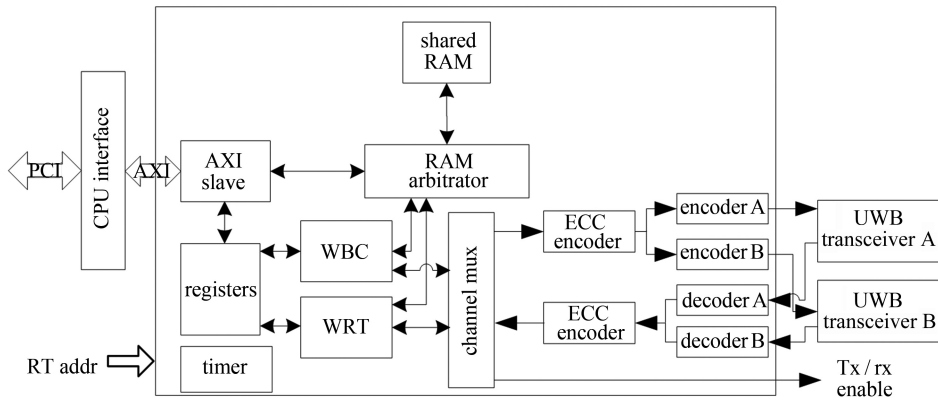


图 6 HS1553B 总线协议 IP 核功能模块划分

Fig. 6 Functional structure of the HS1553B IP core

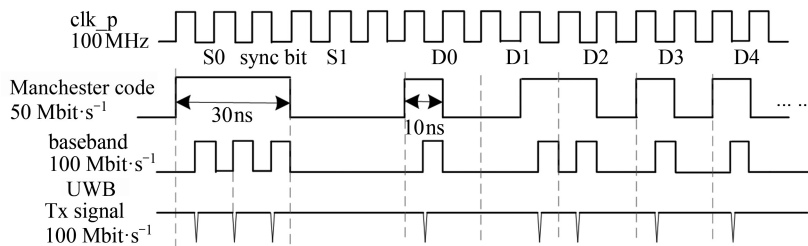


图 7 编解码器与基带信号关系

Fig. 7 Signal formatting between codec signals and baseband signals

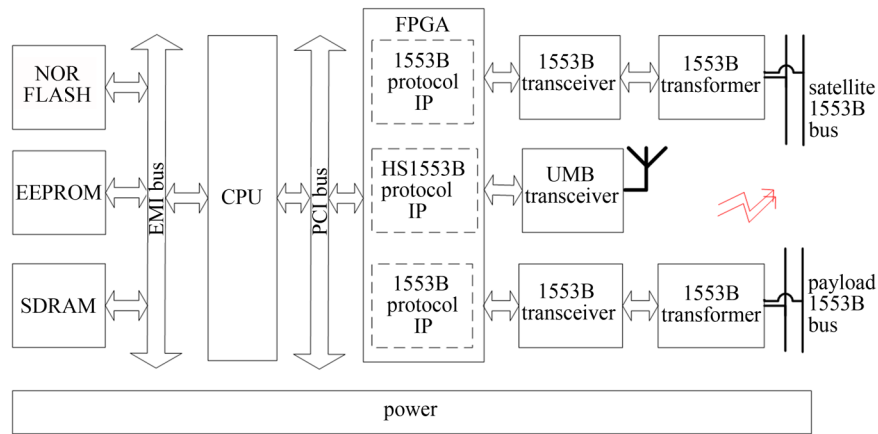


图 8 连接到 1553B 总线的节点硬件功能原理

Fig. 8 Hardware design of the nodes in the 1553B bus

标准 1553B 总线接口电路设计成熟, 由协议芯片、收发器和变压器组成。HS1553B 协议接口目前采用 FPGA 实现, 可以将 HS1553B 协议 IP 核和两个 1553B 协议 IP 核<sup>[14]</sup>等相关逻辑集成到一片 FPGA 中, CPU 地址译码的逻辑电路也可以放到 FPGA 中, 省去译码器和总线驱动器等元器件, 从而大大降低节点的质量体积和功耗, 利于节点的轻小型化。该 FPGA 采用通用技术 PCI 总线连接到龙芯 LS1E 上, PCI 总线的 DMA (Direct Memory Access, 直接内存存取) 操作可以实现 CPU 对外设的高速访存。PCI 功能可以采用 FPGA 内部的 PCI 核实现, FPGA 在 PCI 总线上作为从设备。

UWB 收发器和天线可以做成标准化产品, 对协议芯片保留标准的硬件接口, 例如 SMA 接头, 实现设备的即插即用。

图 8 所示为高速无线网络中最复杂的节点功能组成, 功能简单的节点在图 8 基础上进行剪裁即可。

### 3 功能验证

为了模拟 UWB 技术在航天器舱内应用的场景, 本系统的功能验证实验环境在一个  $18\text{ cm} \times 16\text{ cm} \times 7\text{ cm}$  的密闭铝制模拟机箱内进行。

HS1553 通信协议 IP 核采用自顶向下的设计方法, 使用 Verilog 硬件设计语言进行编程, 通过了模块仿真验证、芯片系统仿真验证和 FPGA 验证。搭建的 FPGA 验证平台如图 9 所示, 其由 XILINX 的 ML402 开发板、IR-UWB 收发机和 PC 机组成,



图 9 地面演示系统实验照片

Fig. 9 FPGA verification platform

由 FPGA 完成设计的实验, 并将实验结果输出到 PC 机进行显示。

#### 3.1 IR-UWB 收发机误码率测试

HS1553 通信协议的可靠运行是建立在可靠的物理层设计基础上的, 首先对 IR-UWB 收发机的误码率进行测试。

测试方法是 FPGA 向 IR-UWB 收发机发送一定数目的脉冲个数, 并对接收机接收到的脉冲进行采样计数, 接收结束后将脉冲计数结果发送给上位机显示, 从而可以计算误码率大小。测试速率为  $1 \sim 100\text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$  之间的典型值, 包括 100, 90, 80, 70, 60, 50, 40, 32, 25, 20, 16, 10, 8, 4, 2, 1  $\text{Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

图 10 所示为  $100\text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$  速率的误码率实验时, 通过 ChipScope 采集的 FPGA 管脚和内部信号波形。从图 10 中可以看出在两个脉冲的延时后接收信号采集到脉冲。



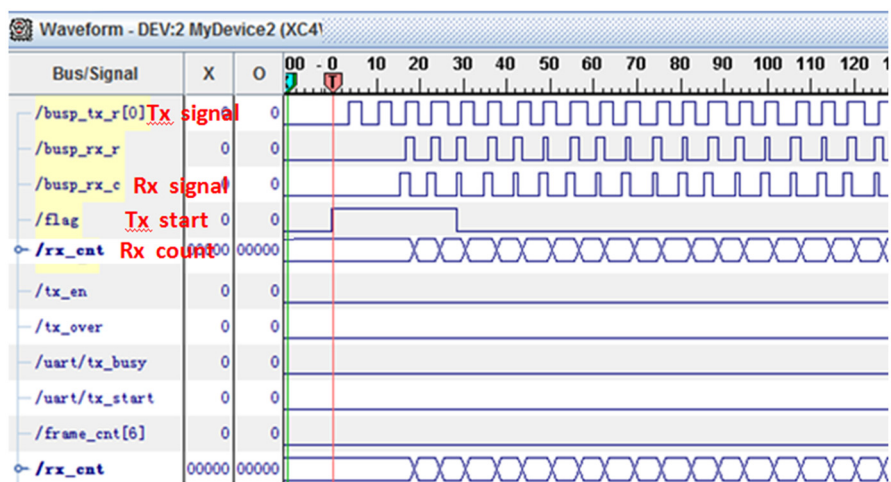
图 10 100 Mbit·s<sup>-1</sup> 误码率测试启动时的波形

Fig. 10 Signals captured during the BER test

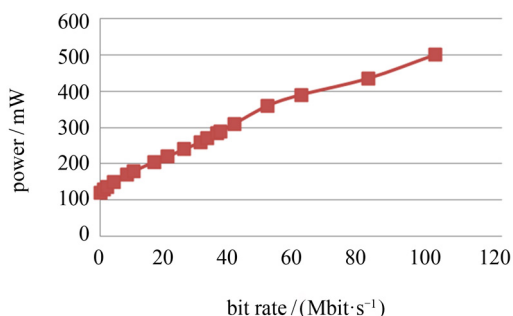


图 11 IR-UWB 收发机随速率变化的功耗曲线

Fig. 11 Power consumption curve of the IR-UWB with transmission speed

发送脉冲产生速率为 FPGA 时钟 PLL 模块的输出时钟, 脉冲采样时钟采用的频率为 300 MHz, 每种速率测试至少  $2^{32}$  个脉冲. 1~100 Mbit·s<sup>-1</sup> 内典型传输速率的测试实验中, FPGA 均能正确计数, 因此 IR-UWB 收发机在当前测试环境下, 误码率非常低, 小于  $10^{-9}$ .

### 3.2 IR-UWB 收发机功耗测试

在误码率测试实验中, 对 IR-UWB 收发机的供电电流进行记录, 得到的功耗曲线如图 11 所示, 供电电压为 +5 V. 从图 11 中可以看出, 随着传输速率的增加, IR-UWB 收发机功耗线性增加.

### 3.3 编解码实验

在进行 HS1553B 协议层设计之前, 需要先从编解码器模块的性能进行测试. 在 IR-UWB 收发机误码率测试实验中, 发送的是连续脉冲; 在编解码实

验中采用 HS1553B 编解码模块, 传输曼彻斯特编码后的连续数据. 编码输出的速率为 100 Mbit·s<sup>-1</sup>, 解码器使用的采样时钟频率为 300 MHz, 实验中通过 FPGA 的采集波形发现每次启动数据传输时, 前 5 个数据不能正确解码, 这是因为前几个数据有粘连, 并且粘连数据的宽度比发送数据宽度窄, 如图 12 所示. 但是 5 个数据之后的连续数据均可以正确译码. 这种现象的产生是由于 IR-UWB 接收机需要一段调整时间进入稳定工作状态. 解决办法是在编码器输出的第一个数据前加上一段先导码, 用于数据同步和稳定. 经实验验证后, 先导码长度采用了 256 个脉冲, 在逻辑上易于实现.

第一个编码数据采用先导码, 经实验验证, FPGA 的采样时钟频率降为 200 MHz, 译码也可以正确进行, 译码的错误率低于  $10^{-9}$ .

### 3.4 HS1553B 协议功能验证实验

功能验证实验的 FPGA 设计包括 1 个实验控制状态机、2 个 HS1553B IP 核 (一个初始化为 WBC, 另一个初始化为 WRT)、通道选择模块和 UART 通信模块. 由于只有一台 UWB 收发机, 而 1553B 协议本身是时分复用的, 因此将 WBC 与 WRT 模块的输出进行分时复用, 例如 WBC 发送时 WRT 接收, WRT 发送时 WBC 接收. 验证实验包括 IP 核支持的全部消息类型: BC2RT, RT2BC, RT2RT, 广播, 部分方式命令. 实验使用的 IR-UWB 收发机物理层速率为 100 Mbit·s<sup>-1</sup>, 由于采用曼彻斯特编码, 有效传输速率为 50 Mbit·s<sup>-1</sup>.



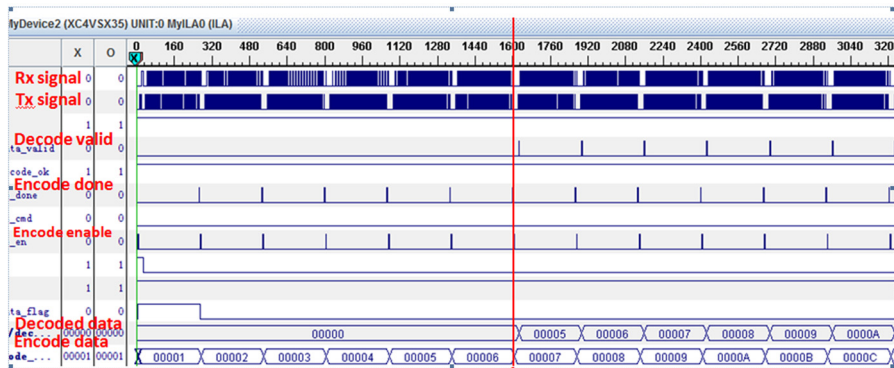


图 12 IR-UWB 收发机编解码实验启动时的波形

Fig. 12 Signals captured as the en-decoder test beginning

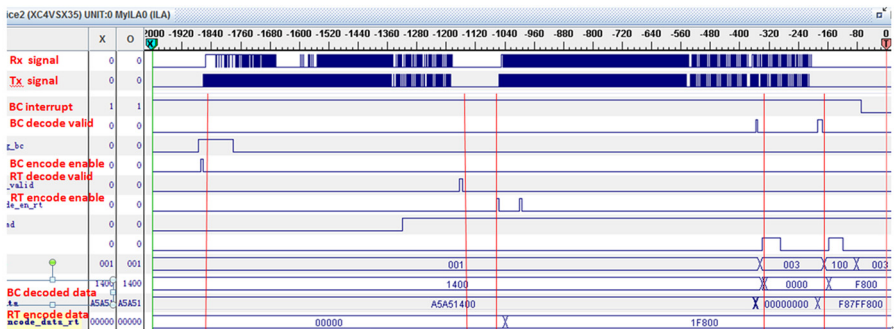


图 13 捕捉的 WRT-to-WBC 类型消息

Fig. 13 WRT-to-WBC signals captured during the HS1553B test

验证实验的流程如下: FPGA 上电配置结束后, 状态机等待 PC 上位机通过串口向 FPGA 发送命令, 若收到命令 5A, 状态机开始初始化配置 WBC 和 WRT 的寄存器, 清零 RAM 区并向发送 RAM 区写数据, 然后启动 WBC 开始实验, WBC 和 WRT 将实验过程中的数据存储到 RAM 区; 通信实验结束后, 状态机依次读取 WBC 和 WRT 的 RAM 区, 将读到数据与发送的值进行对比, 然后将对比结果通过串口在 PC 机上打印; 比较结束后, 读取 WBC 和 WRT 的通信状态指示, 并通过串口打印出来。

验证实验过程中通过 Xilinx 的 Chipscope 软件捕捉 FPGA 内部信号, 如图 13 所示, 捕捉一条 WRT 发送上一命令字的方式命令。首先 WBC 使能编码器发送命令字, 在 IR-UWB 收发机的发送管脚和接收管脚可以捕捉到信号, 发送管脚和接收管脚有一定的传输时延, 另外编码模块设计时在命令字和状态字的开始增加了 256 bit 的前导码, 用于稳定和同步数据, 降低应用层数据的误码率。WRT 接收到命令字

并解码正确后, 解析命令字并做出响应, 回复一个状态字和一个数据字, 从图 13 中 BC 接收的数据可以看出状态字为 0, 表明此次通信正常; 数据字为 RT 的上一命令字 0xf87ff800。通信结束后, 可以看到 BC 中断拉低到有效状态。虽然命令字和状态字前的前导码在一次数据传输中占一定开销, 但当一次传输的数据量较大, 例如为 1024 个数据字时, 前导码的开销仅占 1.18%, 这对于要求可靠性的高速数据传输是可以接受的。

状态机中设置单次实验循环 256 次, 每个循环包括 9213 个数据字, 每个数据字为 39 位 + 3 个同步位, 实验测试应用层数据传输的误码率低于  $10^{-9}$ 。实验结果表明了基于 IR-UWB 的星载高速数据网络系统通信的可行性和可靠性。

## 4 结论

无线网络技术的空间应用研究是当前研究热点

之一. 本文提出一种基于 IR-UWB 的星载高速无线数据网络设计方案, 用于替换卫星中传统的三线制 LVDS 通信. 介绍了构建星载无线高速数据网络的关键技术, 包括 IR-UWB 收发机、UWB 通信协议和节点软硬件的设计, 构建了地面演示系统并进行网络通信验证, 实验结果证明了基于 IR-UWB 的星载高速无线数据网络系统的可行性和可靠性.

HS1553B 协议接口目前采用 FPGA 实现, 在后续研究工作中, 设计目标是将 CPU 核、HS1553B 协议 IP 核、标准 1553B 协议 IP 核等相关逻辑集成到抗辐照 ASIC 芯片中. UWB 收发器和天线形成标准化的产品, 对协议芯片保留标准接口, 不但可以实现节点的轻小型化, 而且增加了系统的灵活性. 脉冲超宽带技术在未来空间探索中具有广阔应用空间<sup>[15]</sup>.

## 参考文献

- [1] TAN Weizhi, GU Yingqi. Space Data System [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2004: 23-31 (谭维焯, 顾莹琦. 空间数据系统 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2004: 23-31)
- [2] SUN Zhaowei, XING Lei, XU Guodong, *et al.* Wireless RF bus design for an intra-satellite [J]. *J. Harbin Eng. Univ.*, 2012, **33**(1): 881-886 (孙兆伟, 邢雷, 徐国栋, 等. 卫星内无线射频总线设计 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, **33**(1): 881-886)
- [3] WALTERS S C, SCHNEIDER W, DARRIN M A G, *et al.* Infrared communications for small spacecraft: from a wireless bus to cluster concepts [J]. *Proc. SPIE*, 2001, **4395**: 200-213
- [4] CHEN Wenzhou. WiFi technology research and applications [J]. *Data Commun.*, 2008(2): 14-17 (陈文周. WiFi 技术研究及应用 [J]. 数据通信, 2008(2): 14-17)
- [5] WANG Pengyi. Ultra Wideband Covert Communication Technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 89-90 (王鹏毅. 超宽带隐蔽通信技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 89-90)
- [6] LUO Zhiqiang. Avionics Integrated Systems [M]. Beijing: Beijing Aerospace University Press. 1990: 3-10 (罗志强. 航空电子综合化系统 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1990: 3-10)
- [7] ZHU Jingguo. The Experimental Research of 1553B Wireless Network Based on IR-UWB [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2006 (朱精果. 基于 IR-UWB 的 1553B 无线网络的实验研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006)
- [8] ZHOU Li, AN Junshe, XIE Yifang, *et al.* Design of the network protocol of a wireless spacecraft high speed data network [J]. *J. Natl. Univ. Def. Technol.*, 2014, **36**(5): 1-7 (周莉, 安军社, 谢义方, 等. 基于 1553B 协议的星载高速无线数据网络协议的设计 [J]. 国防科技大学学报, 2014, **36**(5): 1-7)
- [9] XIE Yifang, FANG Guangyou. Equi-amplitude tracing algorithm based on base-band pulse signal in vital signal detection [J]. *J. Electron. Inf. Technol.*, 2009, **31**(5): 1132-1135 (谢义方, 方广有. 基于无载频脉冲雷达信号等幅度追踪法检测生命信号 [J]. 电子与信息学报, 2009, **31**(5): 1132-1135)
- [10] QIAO Beibei, XIONG Weiming. A synchronization scheme for IR-UWB communication-ranging systems [J]. *Telecommun. Eng.*, 2011, **51**(11): 53-57 (乔贝贝, 熊蔚明. 适用于超宽带通信测距复合系统的同步机制 [J]. 电讯技术, 2011, **51**(11): 53-57)
- [11] LIU Lihua, DAI Shun, XIE Yifang, *et al.* A novel ultra-short monocycle pulse generator for ultra-wideband through-wall detecting radar [J]. *Trans. Beijing Inst. Technol.*, 2011, **31**(1): 92-95 (刘丽华, 戴舜, 谢义方, 等. 新型超宽带穿墙雷达单周期窄脉冲产生技术 [J]. 北京理工大学学报, 2011, **31**(1): 92-95)
- [12] BRACKNELL D R. The MIL-STD-1553B data bus: what does the future hold? [J]. *Aeron. J.*, 2007, **111** (1118): 759-766
- [13] XIE Yifang, HUANG Yonghui, XIONG Weiming. A preliminary study on UWB communication and ranging technology [J]. *J. Spacecr. TT&C Technol.*, 2013, **32**(6): 496-500 (谢义方, 黄永辉, 熊蔚明. 脉冲超宽带通信与测距技术初步研究 [J]. 飞行器测控学报, 2013, **32**(6): 496-500)
- [14] ZHOU Li, AN Junshe, XIE Yan, *et al.* Design of a 1553B IP core based on ASIC technology [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2014, **34**(1): 127-136 (周莉, 安军社, 谢彦, 等. 基于 ASIC 技术的 1553B IP 核的设计 [J]. 空间科学学报, 2014, **34**(1): 127-136)
- [15] GUO Huadong, WU Ji. Space Science & Technology in China: A Roadmap to 2050 [M]. Beijing: Science Publishing Company, 2009: 67-70 (郭华东, 吴季. 中国至 2050 年空间科技发展路线图 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 67-70)