doi:10.11887/j.cn.201405001 http://journal.nudt.edu.cn

星载高速无线数据网络协议的设计*

周 莉[1,2],安军社[1],谢义方[1],熊蔚明[1],薛长斌[1]
(1. 中国科学院 空间科学与应用研究中心,北京 100190;2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:星载无线数据网络可以解除航天器内错综复杂的线缆网的束缚,是航天器轻小型化的重要技术储备。旨在替代航天器内现有的点对点三线制的低电压差分信号线缆,提出了一种基于脉冲超宽带(IR-UWB)技术的星载高速无线数据网络的设计方案,并重点介绍了高速无线网络协议的设计和实现。网络协议设计参考了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,按物理层、链路层、网络层和应用层进行了详细说明,以适应星载高速率无线数据传输的要求,具有灵活性高、可靠性高、扩展性高的特点。网络协议的IP核经过地面演示系统进行验证,实验测得应用层数据传输的误码率小于10^{-9}。

关键词:星载无线数据网络;通信协议;脉冲超宽带;MIL-STD-1553B总线;空间应用
中图分类号:TN915 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2014)05-001-07

Design of the network protocol of a wireless spacecraft high speed data network

ZHOU Li[1,2], *AN Junshe*[1], *XIE Yifang*[1], *XIONG Weiming*[1], *XUE Changbin*[1]
(1. Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Wireless spacecraft data networks can unburden the wire problems of the spacecraft, which makes it a promising technology for spacecraft light miniaturization. To replace the peer-to-peer three-wire Low Voltage Differential Signaling cables in spacecrafts, design of a wireless spacecraft high speed data network based on Impulse Radio Ultra Wideband was proposed. The wireless communication protocol referring to the American military data bus standard MIL-STD-1553B protocol was described in detail. The communication protocol adopted the time division command response mechanism, and its physical layer, data link layer, network layer and application layer were designed to meet the requirements of the wireless spacecraft high speed data communication. The design of a demonstration of the spacecraft high speed data network was tested and verified. It is proved that the system bit error rate is less than 10^{-9}. The design of the protocol IP core is flexible, reliable and scalable.

Key words: wireless spacecraft data networks; communication protocol; impulse radio ultra wideband; MIL-STD-1553B; aerospace application

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的数据统一集成管理,MIL-STD-1553B总线以其高可靠性、实时性的优异性能广泛应用于航天器上。但1553B总线的传输速率仅为1Mbps,不适用于高速率的大数据量数据。目前航天器内高速数据传输常采用三线制的低电压差分信号(Low Voltage Differential Signaling,LVDS)线缆实现。LVDS是利用非常低的电压摆幅(约350mV)在2条印制电路板(Printed Circuit Board,PCB)走线或1对平衡电缆上通过差分进行数据的传输,即低压差分信号传输。三线制的LVDS信号为数据信号、时钟信号和控制信号三大类,无论传输数据还是传输时钟,都采用差分信号对的形式进行传输。因此1路LVDS就包括6根线缆,而LVDS是点对点的单工通信,所以要实现2个节点的双向通信就需要12根平衡电缆。随着航天器探测任务的增多和探测功能的扩展,航天器内的高速数据传输的线缆问题是一个亟待解决的问题。这些信号线缆在航天器内部错综复杂、交织成网,是每个航天器的"噩梦",不仅增加了发射重量、体积和成本,而且给地面调试和装配等增加了大量的工作[1]。

航天器内特殊的环境对高速数据传输的具体要求包括:一、协议简单可靠,易实现;二、电磁兼

* **收稿日期**:2014-02-12
基金项目:国家重大科技专项资助项目(TY3Q20110015);中国科学院空间科学战略性先导科技专项资助项目(XDA04070000)
作者简介:周莉(1986—),女,山东莱阳人,博士研究生,E-mail:zhouli@nssc.ac.cn;
安军社(通信作者),男,研究员,博士,博士生导师,E-mail:anjunshe@nssc.ac.cn

容性好,抗多径能力强;三、低功耗;四、器件的抗辐照特性,包括协议芯片和分立元器件。

脉冲超宽带技术(Impulse Radio Ultra Wideband, IR-UWB)具有带宽很宽、脉冲极窄、抗多径能力强、功耗低、对其他设备的干扰极小、且系统实现简单、可以直接通过天线传输、不需要对正弦载波进行调制等优点[2],适用于航天器内的高速数据通信,可以取代繁冗的 LVDS 线缆。2002 年联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)开放了 UWB 的频谱 3.1 ~ 10.6 GHz, UWB 一直是工业界和学术界的研究热点,近两年在航空航天界也备受青睐。但目前没有适合星载高速数据传输的 UWB 通信协议,本文提出了一种基于 1553B 协议的星载高速无线数据网络的设计方案,重点介绍星载无线高速数据网络的通信协议设计。

1　系统架构

由于航天任务的特殊性和高可靠性要求,无线数据网络的航天器内应用的技术路线分为几个阶段:飞行验证、非关键功能部件运行、传统的星载数据网络的备份、关键功能部件运行。因此,本文提出的基于 IR-UWB 技术的星载高速无线数据网络的设计方案,如图 1 所示,在不改变卫星系统架构的前提下[3],将无线网络作为星载数据网络的一个子系统,连接到星载数据总线上,可以在星载计算机的命令和控制下实现数据通信。

目前最常用的 1553B 总线的时分制命令响应的特性,非常适合卫星高速串行异步数据通信,本文提出星载高速无线数据网络的设计参考 1553B 总线标准[4],网络中包括 1 个无线总线控制器(Wireless Bus Controller, WBC)、若干个无线终端设备(Wireless Remote Terminal, WRT)和 1 个无线监视器(Wireless Monitor, WMT)。WBC 是网络中的主设备,无线网络中任何通信的发起都是由 WBC 控制, WRT 在 WBC 的命令控制下进行数据传输。WMT 用于对无线通信过程进行监测和存储。根据 IR-UWB 的特点,无线网络拓扑采用星型拓扑,网络中的节点可以仅作为无线网络的 1 个终端设备(如图 1 中节点 3),也可以与星载数据总线上的设备结合起来作为 1 个终端设备(如图 1 中节点 2)或者网络控制器(如图 1 中节点 1),其中节点 1 是有线网络和无线网络的网关。在复杂多舱体的情况下,可设置中继转发节点(Wireless Repeater, WRPT)用于舱体间节点的数据转发。无线网络中的每个节点都包括 1 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。

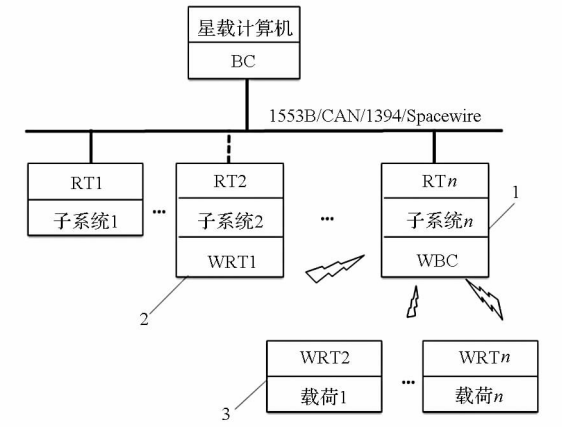


图 1　基于 IR-UWB 的星载高速无线数据网络体系

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

2　通信协议

1553B 总线是集中控制型的确定型访问机制,节点以一种有序的方式访问介质,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。考虑到空间应用的可靠性要求,高速无线数据网络协议采用集中控制型的确定型访问机制[5]。1553B 总线的传输速率只有 1Mbps,不适用于高速数据传输,需要对传统的 1553B 总线进行修改[6],以适应 UWB 信道和高速数据传输需求,改进后的协议称之为高速 1553B 协议(HS1553B)。

根据功能划分,HS1553B 协议的分层如图 2 所示,自下向上为物理层、数据链路层、网络层和应用层。下面将依次介绍各层的功能设计。

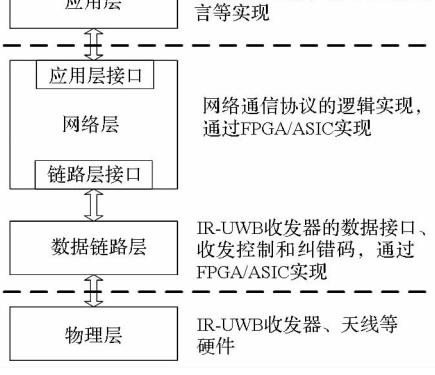


图 2　星载高速无线数据网络协议层次

Fig. 2　The protocol hierarchy of the wireless spacecraft high speed data network

2.1　物理层

物理层由 IR-UWB 收发器、天线等硬件组成,

本文采用中科院空间中心超宽带课题组自主研发的脉冲超宽带原理样机[7-10]。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 1 个收发高速开关。

脉冲超宽带发射机由微波三极管、微带电感、阶跃恢复二极管(SRD),肖特基二极管等构成的脉冲源产生脉冲信号[7-10],脉冲宽度可达 392ps,重复频率可达 150Mbps,脉冲振铃低于 3‰,高斯脉冲波形如图 3 所示。接收机采用的是基于隧道二极管的幅度检测方法,将检测到的皮秒级的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,对波形进行整形。物理层的详细设计见参考文献[7-10]。

IR-UWB 目前主要采用脉冲位置调制(PPM)、二进制移相键控(BPSK)、通断键控(OOK)或脉冲幅度调制(PAM)等调制方式携带信息,其中 OOK 调制方式最简单,不需要进行相位精确对准,硬件实现最简单。所以发射机采用的调制方式为开关键控 OOK,1 个基带脉冲的上升沿触发 1 个超宽带窄脉冲,经由天线辐射出去,如图 4 所示,相当于归零的 OOK。

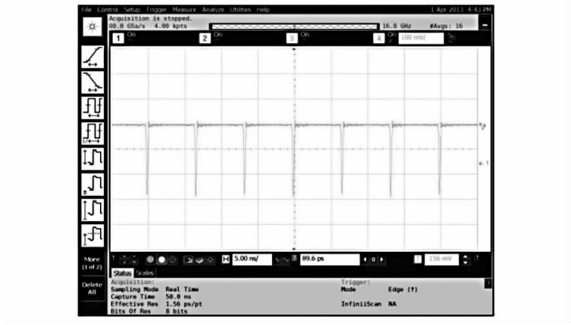


图 3　高斯脉冲串(重复频率 150MHz)

Fig. 3　The Gaussian pulse train of repitition frequency 150MHz

2.2　链路层

物理层与数据链路层的接口是发送信号、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、收发使能信号的控制、纠错控制、基带信号与编解码模块之间的接口转换等功能。设计的链路层与网络层相对独立,根据不同的物理层特性设计相应的编解码模块和纠错控制,物理层可以是 1553B 总线、485 总线、红外信号、IR-UWB 信号等,通过基带信号与编解码模块之间的接口转换,转换为编解码模块可以识别信号。通过配置编码时钟模块匹配物理层的传输速率。协议链路层目前通过 FPGA 实现。

1553B 总线、485 总线、红外信号、IR-UWB 信号等信号的特点是都容易实现基带信号与曼彻斯特码之间的转换。如图 4 所示,链路层的编解码模块是基于曼彻斯特码,先高后低为逻辑 1,先低后高为逻辑 0,在 FPGA 内容易实现曼彻斯特码与基带信号之间的转换,即对曼彻斯特进行扫描,每 500ns 产生 1 个基带脉冲。曼彻斯特码的优势是利于系统同步,避免传送信号时信道长时间为 0。在接收机端,每收到 1 个 UWB 脉冲就输出 1 个 6 ~ 8ns 的基带脉冲信号输入到 FPGA 中供 FPGA 采集,再由 FPGA 恢复成译码器可以识别的曼彻斯特码。

为提高协议的传输能力,协议中的字定义为 32 位;由于无线信道的不确定性和突发性,链路层采用 32 位的 ECC 校验,每个字可实现纠一位检两位的功能,提高了系统的可靠性。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,然后将曼彻斯特码转换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 位的并行数据,然后进行 ECC 校验,并将解码数据和校验结果等信息发送给上层模块。

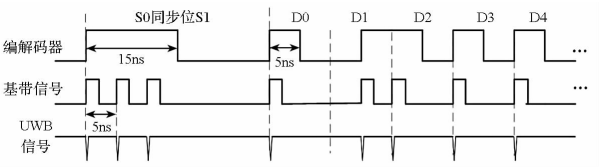


图 4　编解码器与基带信号的转换

Fig. 4　Signal formatting between codec signals and baseband signals

2.3　网络层

网络层为通信协议的逻辑设计,目前由 FPGA 实现,主要是 WBC 和 WRT 的功能;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 协议设计参考 MIL-STD-1553B 标准[4],字类型包括命令字、数据字和状态字三种,为提高协议的传输能力,字位数扩展为 32 位,并对命令字、数据字和状态字的定义进行相应的调整,如图 5 所示。其中命令字中定义消息长度由 5 位扩展为 10 位,使得单条消息长度最长为 2^{10} 个 32 位的数据字,大大提高了协议的传输能力。由于无线信道的不确定性和突发性,消息长度不宜定义得过长,避免消息重发率高。命令字中的 RT 地址、子地址、消息长度位均可以根据实际应用进行扩展,自主研发的协议 IP(Intellectual

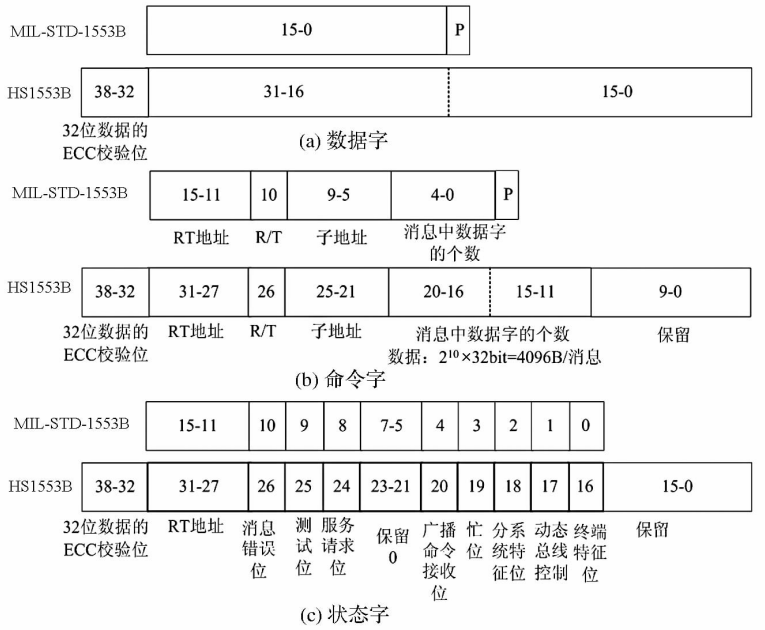


图5　HS1553B与标准1553B的字定义

Fig. 5　Word definition in the HS1553B and standard 1553B protocol

Property)核具有优异的可扩展性和灵活性,例如,网络节点较多时,可以对RT地址位进行扩展。

HS1553B协议的数据传输形式为命令响应的方式,包括WBC-to-WRT、WRT-to-WBC、广播、WRT-to-WRT、方式命令,其数据传输过程如图6所示。网络中任何通信的发起都是由WBC控制的,网络中的WRT侦听网络中的命令字,根据接收到的命令字判断是否响应。为了适应不同的应用速率需求,不同于标准的1553B协议1Mbps速率,HS1553B协议的数据速率可以通过计算机软件设置,支持的应用层速率为1~50 Mbps内的整数速率。标准1553B协议中定义的网络响应时间为4~14μs,在HS1553B协议中响应时间也可以通过计算机软件设置。为提高系统的可靠性,HS1553B协议支持重发机制,在设定时间内,若没有收到WRT的状态字,WBC重发命令。HS1553B协议与标准1553B协议的对比如表1所示。

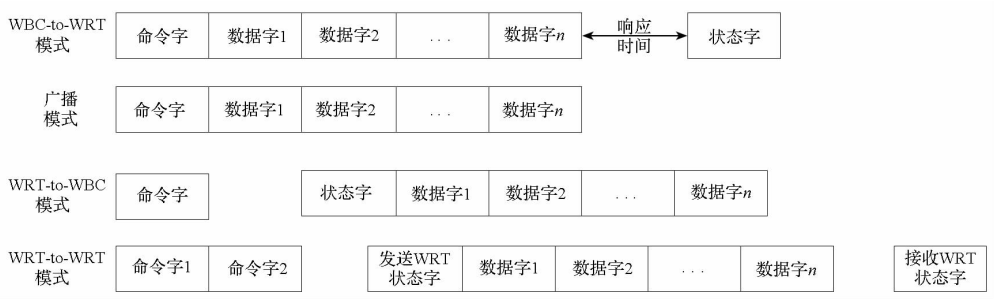


图6　高速无线数据网络支持的数据传输形式

Fig. 6　The data transfer form in the HS1553B protocol

高速数据网络协议HS1553B目前通过FPGA实现,HS1553B协议IP核[11]的逻辑设计采用Verilog硬件设计语言进行编程,其功能模块框图如图7所示,分为:编解码器、解码器、ECC编码、ECC编解码、通道选择、WBC、WRT、RAM仲裁、共享发送RAM、共享接收RAM、AXI从设备接口、寄存器、计时器、应用层接口、输入输出接口等模块;其中,编码器模块、解码器模块、ECC编码模块、ECC编解码模块、通道选择模块属于数据链路层;其余模块属于网络层。数据链路层和网络层相对独立,更换数据链路层的编解码器模块,可以将本IP核应用到其他的物理层。

由于WBC和WRT功能不同时有效,所以WBC和WRT模块可以共享其他模块,可以大大减小IP核的功耗和开销。计算机通过AXI总线访问寄存器模块和内部的共享RAM,完成HS1553协议IP核的初始化、使能和数据操作。WBC和WRT模块根据配置的寄存器和内部

RAM 的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,来控制总线通道。

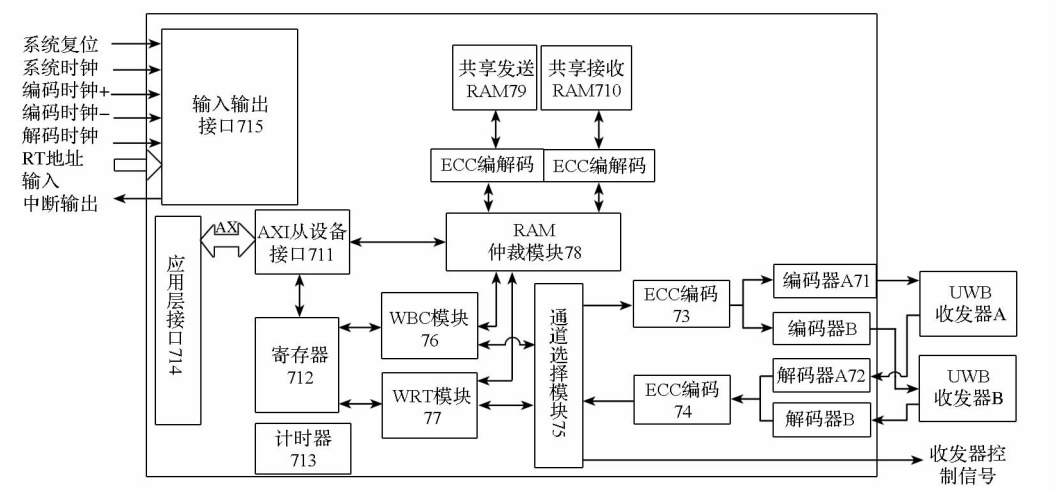


图 7　HS1553B 总线协议 IP 核功能模块划分

Fig. 7　The functional structure of the HS1553B IP core

表 1　MIL-STD-1553B 与 HS1553B 比较

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

	MIL-STD-1553B	HS1553B
物理层	双绞线	UWB 信号
网络拓扑	总线型	星型
编码方式	曼彻斯特编码	曼彻斯特编码
传输速率	1Mbps	1 ~ 50 Mbps,可设
物理层速率	2Mbps	2 ~ 100 Mbps,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	≤32 个 16 位字	≤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 ~ 12μs	软件可设

2.4　应用层

应用层由计算机上层软件实现,通过应用层接口访问 HS1553B 协议 IP 核内部资源,从而控制整个通信过程。为了适应外部使用的 CPU 的型号和其访问总线的类型,需要设计 1 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 总线接口[12]、ISA 总线接口等。高速数据传输对 CPU 的访问速度也提出要求,支持直接内存存取(Direct Memory Access,DMA)操作的 PCI 总线是解决高速访存的技术之一,可以采用 FPGA 内部的 PCI 核实现。

3　可靠性设计

HS1553B 通信协议 IP 核应对航天环境的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,能够实现纠一位检两位;应对物理层信道的随机特性,发送端将待发送的每一个数据均采用 ECC 编码,接收端将接收到的数据进行 ECC 校验,能够在 32 位数据中实现纠一位检两位;应对物理层异步传输的特性,传输的命令字和状态字前增加 256 位的前导码,用于数据同步;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 协议接口目前采用 FPGA 实现,空间应用时需要进行加固设计,如关键逻辑进行三模冗余、定期刷新,以适应空间的辐照环境。空间应用的分立器件如微波三极管、微带电感、阶跃恢复二极管、肖特基二极管等根据器件的等级进行升级筛选。

在后续的研究工作中,设计的目标是将 CPU 核、HS1553B 协议 IP 核、标准的 1553B 协议 IP 核

等逻辑集成到抗辐照的 ASIC 芯片[13]中,可以大大降低节点的质量、体积和功耗,利于设备的轻小型化,而且为 HS1553B 空间应用提供硬件基础。UWB 收发器和天线形成标准化的产品,对协议芯片保留标准的硬件接口,如 SMA 接头,实现设备的即插即用。由于 HS1553B 协议与物理层之间的相对独立,保证了 HS1553B 协议的灵活性和可扩展性,HS1553B 协议也可以应用到星载光纤通信中。

4　功能验证

HS1553 通信协议 IP 核采用自顶向下的设计方法,使用 Verilog 硬件设计语言编程,通过了模块仿真验证、芯片系统仿真验证和 FPGA 验证。

基于 IR-UWB 技术的星载高速无线数据网络目前已获得在某科学卫星上进行搭载实验的机会,预计在 2015 年实现首次飞行试验[14]。搭载实验的目的是验证基于 IR-UWB 的星载高速数据网络的可行性和可靠性,对 UWB 收发机在空间模拟环境实验中特性进行摸底。搭载实验环境是在载荷管理器的一个机箱内,因此本文中的验证实验是在一个 18cm × 16cm × 7cm 的铝制模拟机箱内进行的。这个环境对于 UWB 信号而言,是非常恶劣的,IR-UWB 接收天线收到的信号拖尾严重,多径效应非常明显,严重影响通信速率。应对这种环境,通过改变 IR-UWB 接收机检测电路的检测工作点,解决多径效应。因此,当 UWB 技术在航天器内的相对宽敞一点的密闭环境中应用时,多径效应会有所改善,系统的误码率更低。

由于项目目前处于功能验证阶段,基于 IR-UWB 技术的星载高速无线数据网络在空间环境模拟实验中的性能测试实验还未开始,现阶段根据搭载实验的环境,设计的 FPGA 验证平台包括 1 个 Xilinx 的 ML402 开发板、1 套 IR-UWB 收发机[10]和 1 台 PC 计算机。设计的 FPGA 验证实验如图 8 所示,包括 1 个实验控制状态机、2 个 HS1553 IP 核(1 个初始化为 WBC,1 个初始化为 WRT)、通道选择模块和 UART 通信模块。由于 1 台 UWB 收发机实验设备限制,而 1553B 协议本身是时分复用,每一时刻最多只有 1 个节点在发送,所以将 WBC 和 WRT 模块对收发机的信号通过通道选择模块进行分时复用,如 WBC 发送时 WRT 接收,WRT 发送时 WBC 接收。实验使用的 IR-UWB 收发机的物理层速率为 100Mbps,应用层有效传输速率为 50Mbps。验证实验验证的消息类型包括 IP 核支持的全部消息类型:BC2RT,RT2BC,RT2RT,广播,部分方式命令。

验证实验的流程为:WBC 和 WRT 的配置信息提前写到 FPGA 内,例如待验证的消息设置、WRT 的命令响应设置等,通过 FPGA 上电配置完成 WBC 和 WRT 的初始化;FPGA 上电配置结束后,控制状态机等待 PC 上位机通过串口向 FPGA 发送启动命令,若收到命令 5A,状态机开始配置 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,并将对比的结果通过串口在 PC 机上显示;最后,控制状态机读取 WBC 和 WRT 的通信状态指示,并通过串口在 PC 机上显示。

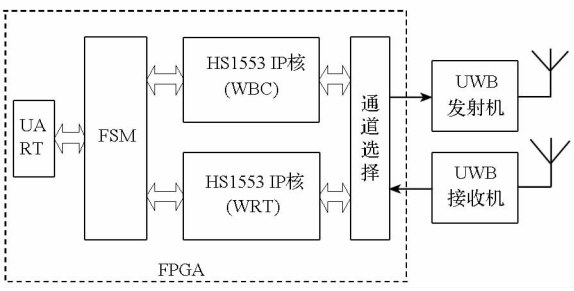


图 8　验证实验 FPGA 设计

Fig. 8　System design of the verification tests in FPGA

验证实验过程中可以通过 Xilinx 的 Chipscope 软件捕捉 FPGA 的内部数据,如图 9 所示,捕捉的是 1 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,另外由于是异步通信,所以在命令字和状态字的开始加上了 256bit 的前导码,用于数据同步,从而降低应用层数据的误码率。WRT 接收到 WBC 发送的命令字并解码正确后,解析命令字并做出响应,回复 1 个状态字和 1 个数据字,从图 8 中的 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,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的开销,但当一次传输的数据较大时,如 1024 个数据字,前导码的开销仅占 256 × 2bit/[(1 个命令字 + 1 个状态字 + 1024 个数据字) × 42bit] = 1.18%,对于可靠性要求高的高速数据传输也是可以接受的。

状态机中设置单次实验循环 256 次,每个循环包括 6142 个数据字,每个数据字为 39 位 + 3 个同步位,实验测试的应用层数据传输误码率低

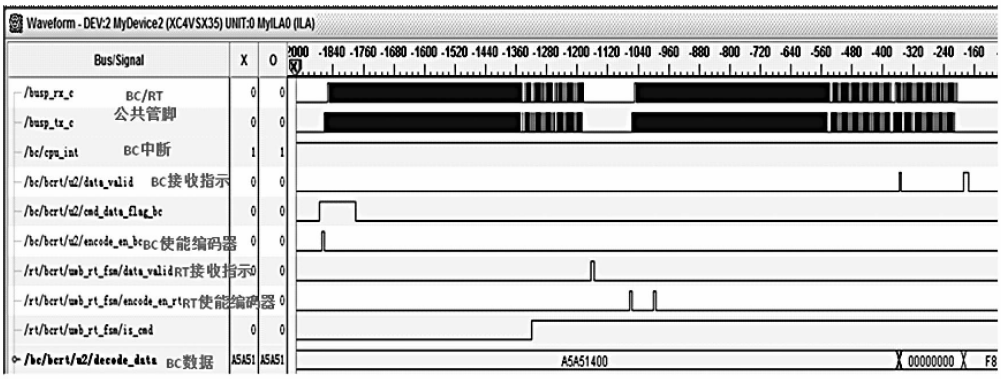


图 9　验证实验过程中捕捉的 FPGA 内部数据

Fig. 9　FPGA signals captured in the verification test

于 10^{-9}。实验结果表明基于 1553B 协议的星载高速数据网络系统通信的可行性和可靠性。

5　结论

星载无线数据网络可以解除航天器内错综复杂的线缆网的束缚。对 IR-UWB 的研究目前有较多成果,主要集中在收发机前端设计及其芯片实现、信道估计、定位等方面,论文成果和已有成果相比较,优势在于设计了一种基于 1553B 协议的高速无线数据网络协议,实现了基于脉冲超宽带技术的无线网络中节点间的高速数据通信,物理层最高传输速率为 100Mbps。具有简单易于实现、可靠性高、扩展性强的优点,为 IR-UWB 技术的空间应用奠定了基础[14]。

参考文献(References)

[1] 谭维炽,顾莹琦. 空间数据系统[M]. 北京:中国科学技术出版社,2008:6 - 12.
TAN Weizhi, GU Yingqi. Space data system[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2008: 6 - 12. (in Chinese)

[2] 王鹏毅. 超宽带隐蔽通信技术[M]. 北京:电子工业出版社,2011:88 - 91.
WANG Pengyi. Ultra wideband-covert communication technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011:88 - 91. (in Chinese)

[3] 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,1990:4 - 10.
LUO Zhiqiang. Avionics integrated systems[M]. Beijing: Beijing Aerospace University Press, 1990: 4 - 10. (in Chinese)

[4] Military specification: hybrid microcircuits, general specification for (S/S by MIL-PRF-38534C)[S]. Military Specifications and Standards, 1992.

[5] 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(空间科学与应用研究中心),2006.
ZHU Jingguo. The experimental research of 1553B wireless network based on IR - UWB[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Space Science and Applied Research Center), 2006. (in Chinese)

[6] Bracknell D R. The MIL-STD-1553B data bus: What does the future hold[J]. The Aeronautical Journal, 2007, 111(1118): 231 - 246.

[7] 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.
XIE Yifang, FANG Guangyou. Equi-amplitude tracing algorithm based on base-band pulse signal in vital signal detecting [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009,31(5):1132 - 1135. (in Chinese)

[8] 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.
QIAO Beibei, XIONG Weiming. A synchronization scheme for IR-UWB communication-ranging systems [J]. Telecommunication Engineering, 2011,51(11):53 - 57. (in Chinese)

[9] 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.
LIU Lihua, DAI Shun, XIE Yifang, et al. A novel ultra-short monocycle pulse generator for ultra-wideband through - wall detecting rada [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology,2011,31(1):92 - 95. (in Chinese)

[10] 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.
XIE Yifang, HUANG Yonghui, XIONG Weiming. A preliminary study on UWB communication and ranging technology[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2013,32(6):496 - 500. (in Chinese)

[11] 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.
ZHOU Li, AN Junshe, XIE Yan, et al. Design of a 1553B IP core based on ASIC technology[J]. Chinese Journal of Space Science,2014,34(1):127 - 136. (in Chinese)

[12] PCI Special Interest Group. PCI local bus specification revision 2.3[S]. 2001.

[13] 周莉, 安军社,方青文,等. 一种面向航天器综合电子的 ASIC 芯片设计[J]. 空间科学学报, 2014, 34(4):497 - 504.
ZHOU Li, AN Junshe, FANG Qingwen, et al. Design of an ASIC chip for spacecraft integrated avionics[J]. Chinese Journal of Space Science, 2014, 34(4): 497 - 504. (in Chinese)

[14] 郭华东,吴季. 中国科学院空间领域战略研究组. 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.
Guo Huadong, Wu Ji. Space science & technology in china: a roadmap to 2050[M]. Beijing: Science Press, 2009:67 - 70. (in Chinese)