

# 基于 IR-UWB 的无线总线实验研究

朱精果<sup>1,2</sup>, 王 宇<sup>1</sup>, 徐志明<sup>1,2</sup>, 王 俊<sup>3</sup>

(1. 中科院光电研究院, 北京 100190; 2. 中科院研究生院, 北京 100049; 3. 中科大电子工程与信息科学系, 合肥 230027)

**摘 要:** 针对虚拟卫星需要通过无线媒介将卫星近距子终端可靠地联结成系统的应用需求, 在研究 IR-UWB 技术和星载总线两者特点的基础上, 提出基于 IR-UWB 的总线型无线网络的解决途径, 结合 1553B 协议进行了可行性分析。并在现有条件下设计和搭建 1553B 点到点试验平台进行了实验研究, 实验表明从功能上来看, IR-UWB 具有作为设备间实时无线互连物理层的潜力, 为进一步研究打下了基础。

**关键词:** 脉冲无线电; 超宽带; 无线总线; 1553B 协议

**中图分类号:** TN915.02      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1328(2009)05-2116-06

**DOI:** 10.3873/j.issn.1000-1328.2009.05.062

## 0 引言

卫星内部各子终端常采用总线方式进行数据交互。IEEE1394 和 I<sup>2</sup>C 被 NASA 选作 X2000 探测计划的高速、低功耗的总线标准<sup>[1]</sup>。1553B 是顺应航空电子综合化趋势提出来的总线协议, 具有极高的可靠性和实时可确认性<sup>[2]</sup>, 1553B 总线在卫星系统中已成熟应用。

美国国防高级研究计划局(DARPA)开展的“未来、快速、灵活、分块、独立飞行信息交换飞行器”(F6 系统)的虚拟卫星预研, 计划用一组小型化、独立发射、无线网络、群集飞行航天器模块, 替代传统的大型整体式卫星<sup>[3]</sup>。虚拟卫星概念引出对无线总线(bus in the sky)的需求, 即需要用无线将整体式卫星总线上各子设备可靠地联结成系统。

UWB 比较适合在中短距离通信<sup>[4]</sup>, 且具有空间容量大、低功耗、抗干扰、结构简单兼具精确定位功能等优点<sup>[5-6]</sup>, 文献[3]提出 UWB 的抗干扰兼有定位功能等特点将使其成为虚拟卫星子设备间互连的一种可能的手段, NASA 也已开展了基于 IR-UWB 空间近距应用的开发<sup>[7-8]</sup>。为了探索终端间高可靠互连的途径, 本文对 IR-UWB 技术进行了调研和技术跟踪, 经过分析提出基于 IR-UWB 的无线总线的新方向, 但 IR-UWB 技术还处于研究和开发阶段, 比较 IEEE1394 和 I<sup>2</sup>C 等数据总线协议, 1553B 总线协

议采用集中式控制方式, 机制简练且有效, 易于实现, 所以现阶段提出基于 IR-UWB 进行 1553B 无线总线的实验方案, 验证 IR-UWB 用作实时总线物理媒介的可行性, 为进一步研究打下基础。

## 1 IR-UWB 无线技术

### 1.1 IR-UWB 的特点

1993 年, 美国南加州大学的 R. A. Scholtz 在国际军事通信会议发表论文, 论证了采用冲激脉冲进行跳时调制的多址技术, 从而开辟了将冲激脉冲作为无线电通信信息载体的新途径<sup>[5]</sup>。

美国联邦电信委员会(FCC)关于超宽带设备带宽的规定<sup>[9]</sup>: -10dB 的相对带宽大于 0.2 或占用带宽大于 500MHz。

IR-UWB 的主要优点如下:

(1) 数据传输速率高(空间容量大)

UWB 频带极宽, 意味着在一定信噪比要求下, 可实现极高速率的可靠传输, 或在一定传输速率下, 在很低的功率谱密度下实现可靠传输。

(2) 低功耗

由于 IR-UWB 可工作在极低的信噪比门限, 因此平均发射功率很低, 其功率谱密度极低。

(3) 抗干扰能力强

UWB 信号具有非常低的功率谱密度, 信号可以与其他系统共享频带, 实现共存。极窄的脉冲信号

具有抗多径能力。

(4) 安全性高

UWB 系统的发射功率谱密度极低,信号极难被非授权方所截获或检测,具有极强的安全性。

(5) 结构简单

UWB 系统射频、模拟以及信号处理部件都相对较简单,容易实现全数字化。

(6) 高测距精度

极窄脉冲具有内在的高精度测距能力。信号带宽达到几个 GHz,定位精度能达到厘米级。

(7) 穿透性强

UWB 脉冲信号含有丰富的低频分量,可应用于需要穿透物体进行成像、检测、监视、测量和通信的场景。

1.2 IR-UWB 的性能分析

根据 C. E. Shannon 的有扰信道容量公式:

$$C = B \cdot \log_2(1 + S/N)$$

其中,  $C$  是信道容量,  $B$  为频带宽度,  $S$  是有用信号功率,  $N$  是噪声功率。

由式(1)可知,为了提高信道容量  $C$ , 可以从两种途径实现,即加大带宽  $B$  或提高信噪比  $S/N$ 。

为了有效辐射,产生的脉冲应无直流分量,高斯函数的各阶导函数都是满足这一条件的,所以一般用高斯函数的各阶导函数来生成研究超宽带脉冲信号。

单用户 PPM-UWB 的误码率:图 1 是文献[10]采用高斯二阶导脉冲,在 AWGN 信道下仿真的误码率与信噪比的关系曲线。

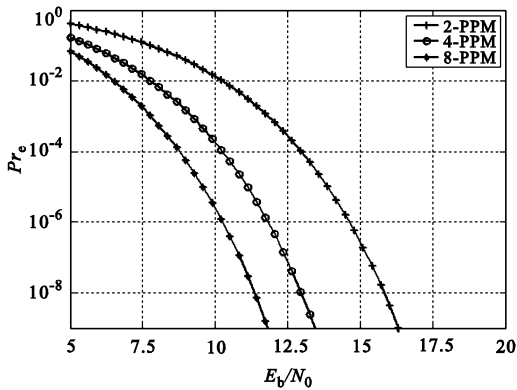


图 1 AWGN 信道下 M-PPM 调制的 BER 性能曲线  
Fig. 1 BER curve of M-PPM modulation over an AWGN channel

链路预算:在满足 FCC 功率要求下,采用高斯二阶导脉冲,误码率为  $10^{-5}$  时仿真出来的传输距离 - 数据速率的关系曲线见图 2,近距时 UWB 可以获得较高的传输速率。需要说明的是,虽然 FCC 对民用 UWB 的功率谱密度有严格的限制,但在军用 UWB 系统中,并没有频率和发射功率的硬性规定。

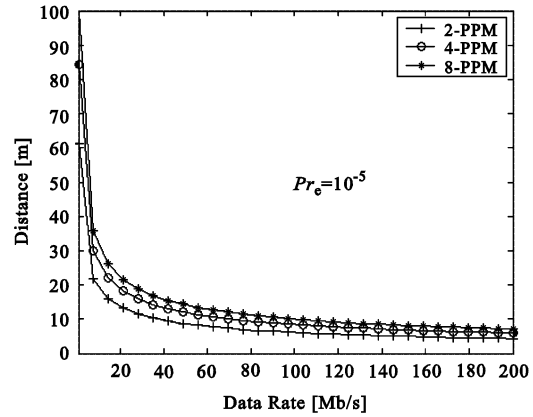


图 2 误码率为  $10^{-5}$  时 M-PPM 调制下速率与距离关系曲线  
Fig. 2 Data rate VS. distance curve of the M-PPM modulation where BER =  $10^{-5}$

1.3 IR-UWB 的关键技术

IR-UWB 的关键技术包括信道模型、信号的设计及成形技术、调制和接收、捕获和同步、天线设计、UWB 通信系统的 MAC 设计,与其它通信系统的频谱共存、兼容技术和基于 UWB 技术的通信网络协议等。

2 基于 IR-UWB 技术的无线总线应用方案

2.1 可行性分析

因 1553B 协议是实时高可靠的数据总线,机制简练且有效,本文参照广泛应用的 1553B 协议来分析基于 IR-UWB 技术的无线总线。

基于 IR-UWB 的无线总线的几个主要指标分析:

(1) 数据传输速率:现 1553B 总线为 1Mbps,但在很多应用中已经显现出难以满足终端间实时数传的要求,IR-UWB 的空间容量高,在中短距离时有较好的性能,能较好地满足将来高可靠实时数据总线数据传输速率的发展需求。

(2) 实时性:1553B 的超时响应时间为  $4 \sim 12 \mu s$ 。虚拟卫星子终端间引入无线后必然要对总线的响应时间进行适当调整,UWB 接收机主要有相干接收机和非相干接收机两种方式,非相干接收机

系统捕获和同步时间比相干方式快,可以达到微秒量级,可以满足实时性要求,本文采用非相干方式进行实验。

(3) 可靠性: 1553B 总线的误字率(字长 20bits)要求一般为  $10^{-7}$ [2]。图 1 中 AWGN 信道下 M-PPM 调制的 UWB 误码率曲线,采用 FEC 前向纠错理论上可以满足 1553B 误码率要求,无线技术的误码率一般比有线方式低几个数量级别,IR-UWB 模块的误码率将随着该技术的发展而降低,我们可根据无线的特点制定相应的纠错和重传机制。

从影响实时总线的几个主要指标来看,IR-UWB 跟其他传统的无线方式相比较,更适合作为近距离高可靠实时总线的物理媒介,而且能比较好地满足实时数据总线抗干扰和数据传输速率发展的要求。

### 2.2 体系结构

基于 UWB 的通信系统是以 UWB 作为物理层并结合具体应用的完整的体系结构,现提出的应用主要包括无线 USB、无线 1394[11] 和 IP/UPNP 等,体系结构见图 3,采用 UWB 物理层,通过 MAC 控制媒体接入,在汇聚层公共平台上实现 USB、1394 和 IP/UPNP 等协议。

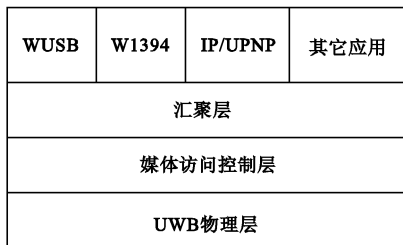


图 3 UWB 通信系统体系结构

Fig.3 UWB communication system architecture

### 2.3 基于 IR-UWB 的无线总线拓扑结构

对于卫星中各子终端需共享总线的系统,各个终端间都有可能进行通讯,引入 IR-UWB 无线后,可采用全网互连的网形拓扑结构,在各个终端的有效半径范围内组网。

## 3 试验平台的搭建及实验结果

本文实验研究的主要目的是考察 IR-UWB 用作无线总线物理层的可行性,验证主要指标对系统实现的影响,总线协议基于 1553B。

### 3.1 实验平台的设计

考虑到已知的 IR-UWB 技术物理层尚处于研究

和开发阶段,实验方案的设计是基于中科大自主开发的一套 IR-UWB 单工演示系统,该系统采用阶跃恢复二极管(SRD)脉冲发生器,非相干解调[12],IR-UWB 演示系统的基本参数如下:

- (1) 通信方式:单工;
- (2) 脉冲形式:高斯二次脉冲,50% - 50% 宽度为 170ps;
- (3) 工作频段:900MHz ~ 3GHz;
- (4) 平均发射功率: -35dBm;
- (5) 峰值传送速率:10Mbps。

由于只有一套 IR-UWB 单工系统,我们主要是考察 1553B 协议的控制机制与 IR-UWB 的适应性实验研究,所以本实验搭建 1553B 点到点数据互连平台。

1553B 总线端采用两块带 DDC 协议芯片的板卡进行互连实验。由于 DDC 协议芯片集成了总线收发器,设计一块接口转换电路,并利用一块 CPLD 对 1553B 信号流进行转发处理,经大量测试,该点到点有线互连平台稳定可靠。然后将一路有线切换给无线模块,无线模块对 1553B 数据流进行实时转发处理即可。

### 3.2 实验平台的搭建

按图 4 方式搭建具体的实验平台,PC1 作为 1553B 总线控制器(BC),PC2 作为 1553B 远程终端(RT),1553B 双绞线上的信号流通过整流变压后,波形处理模块对 1553B 信号进行实时捕获和转发,BC->RT 的数据传输用 IR-UWB 无线收发模块,RT->BC 的数据传输用有线方式。

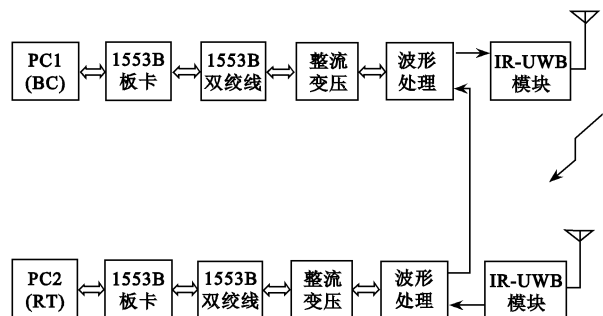


图 4 结合 IR-UWB 的 1553B 的点到点实验平台

Fig.4 Block diagram of the 1553B point-to-point test platform with IR-UWB wireless module

IR-UWB 无线模块的结构见图 5,其中上、下方框内结构分别为基带的发送前端和接收后端。发送前端采样、捕获 1553B 同步头,如后组帧,帧头采用

13 位巴克码,用(7,4)分组码进行信道编码后,采用 10Mbps 脉冲重频并通过 IR-UWB 射频模块发送;接收后端采用非相干方式将接收到的脉冲串经采样、捕获帧头后进行信道解码,并产生双相信号给 1553B 接口模块。

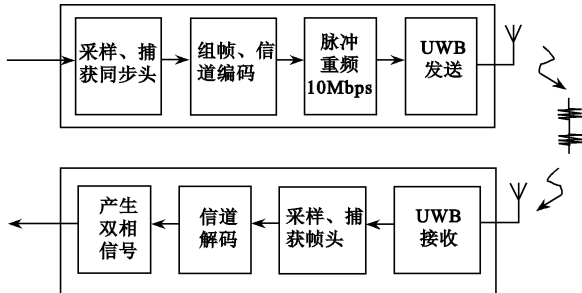


图 5 互连实验中 IR-UWB 无线模块结构  
Fig. 5 IR-UWB wireless baseband module structure

### 3.3 实验数据及分析

实验中引入 IR-UWB 单工无线模块的 1553B 点对点互连可以进行双向数据收发。表 1 是测试过程中,BC 端利用 IR-UWB 无线模块向 RT 端发送广播消息的实测数据,命令字 F821 表示总线控制器给远程终端广播一个数据字,数据字由 4 个 16 进制数组成,表示发送的数据字内容,选择 AAAA、5555、FFFF 是根据 1553B 标准给的测试数据字,每次广播传输的消息数是 1000000 次。

式(2)是表 1 中有效接收消息中错误消息率的计算公式,式(3)是总误消息率的计算公式。

$$\text{接收消息中错误率} = \frac{\text{有效接收消息数} - \text{正确消息数}}{\text{有效接收消息数}} \quad (2)$$

$$\text{总误消息率} = \frac{\text{发送消息数} - \text{正确消息数}}{\text{发送消息数}} \quad (3)$$

表 1 IR-UWB 传送广播消息的数据及错误消息率  
Table 1 IR-UWB transmission of data broadcasting messages and the messages error rates

无线间距	命令字	数据字	传输消息数	有效接收消息数	正确消息数	有效接收消息中错误率	总误消息率
0.5 m	F821	AAAA	1000000	998350	998326	2.40397e-05	0.001674
	F821	5555	1000000	998214	998212	2.00358e-06	0.001788
	F821	FFFF	1000000	998052	998051	1.00195e-06	0.001949
1 m	F821	FFFF	1000000	984367	984367	0	0.015633
	F821	5555	1000000	922764	922763	1.0837e-06	0.077237
	F821	AAAA	1000000	991274	991262	1.21056e-05	0.008738
2 m	F821	AAAA	1000000	984471	984470	1.01577e-06	0.01553
	F821	AAAA	1000000	992203	992201	2.01572e-06	0.007799
	F821	FFFF	1000000	993605	993604	1.00644e-06	0.006396
3.2 m	F821	5555	1000000	969785	969750	3.60905e-05	0.03025
	F821	5555	1000000	982758	982741	1.72983e-05	0.017259
	F821	AAAA	1000000	973846	973807	4.00474e-05	0.026193
	F821	FFFF	1000000	983557	983543	1.42341e-05	0.016457

注 1:实验中接口电路设计时有线互连的最大长度为 3.2m,所以无线模块天线收发测试间距为 0.5 ~ 3.2m;

注 2:因 1553B 终端需检测接收到消息的前 5 位才记录该消息,如前 5 位有错误,则对该消息不予响应及记录,故出现表中有效接收消息数比发送消息数少的现象;

注 3:1m 时数据字 AAAA 和 3.2m 时数据字 5555 的第 2 组数据是将发送端天线角度调整 90°后的实测值。

实验中得到的数据:

(1) 时延:用逻辑分析仪测得 IR-UWB 基带单工收发模块间的时延是 8.7μs。

(2) 消息错误率:实验中总误消息率最好为 0.0016,最差为 0.077,数据分布见图 6。

图 7 是有效接收到的消息中与发送消息不一致

的实测值分布图,误字率为 10<sup>-5</sup>量级。

实验分析:

(1) 单工引入 8.7μs 的时延可以满足实时总线的时延要求。

(2) 因 1553B 终端需检测接收到消息的前 5 位才记录该消息,图 6 中总误消息率较高,但图 7 中有

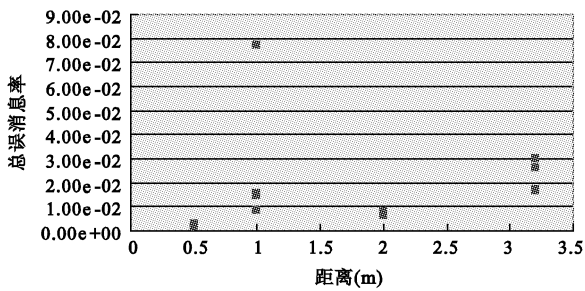


图 6 在 3.2m 距离内总误消息率实测值

Fig. 6 Total messages error rate VS. distance.

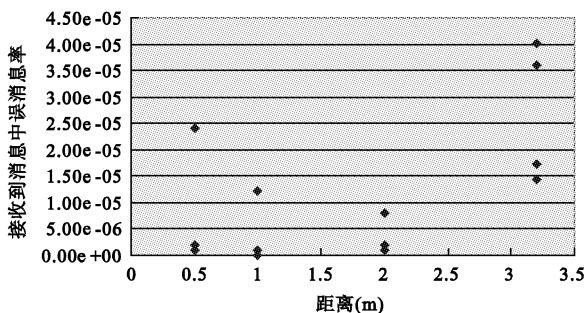


图 7 有效接收消息中错误消息率实测值

Fig. 7 Messages error rate of the effective receive messages

效接收到的消息中误字率可以达到  $10^{-5}$  量级,说明消息中前 5 位的误判率较高,这需要对 IR-UWB 模块的捕获和同步方法做进一步的研究,单工演示平台是项目过程中的开发版本,射频部分采用分立元件,同时为获得低时延,采用了较简单的前向纠错方式,故误码率的提升空间较大。

(3) 本次实验研究的局限性和不足:采用的无线单工平台是项目过程中的开发版本,无线模块的稳定性需进一步提高;因为是单工模块,只进行了点对点实验,没有展开多终端的总线型无线网络的实验;由于接口电路线长的影响,仅测试到 3.2m 距离;仅针对 1553B 的 1Mbps 数传速率进行了测试。

(4) 通过点到点测试,得到了具体的时延和误消息率指标,基本上达到了实验验证的目的,但尚需进一步深入研究基于 IR-UWB 的无线实时总线网络的实时性、有效性、可靠性、时延和电磁兼容性等,及进行模块化开发和设计。

#### 4 结论

本文根据虚拟卫星子终端互连的特点,在 1553B 有线总线的基础上,引入 IR-UWB 技术,分析了基于

IR-UWB 的无线实时总线的应用方案。并在现有的开发资源上,给出了 1553B 点到点互连的实验方案,设计和搭建了双向数据传输的点到点互连平台。实验表明从功能上来看,IR-UWB 具有作为设备间实时无线互连物理层的潜力,但需要针对总线型无线网络的节点间距、数传速率、时延和组网方式等因素做进一步研究。该实验研究可为 IR-UWB 的应用研究和无线总线的开发提供一些参考。

#### 参考文献:

- [1] 周庆瑞, 孙辉先. IEEE1394 网络拓扑结构的可靠性研究[J]. 宇航学报, 2008, 29(4): 1408 - 1413. [ZHOU Qing-rui, SUN Hui-xian. On reliability of physical topology for IEEE 1394[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(4): 1408 - 1413 (in Chinese).]
- [2] MIL-STD-1553B. Aircraft Internal Time Division Command/Response Multiplex Data Bus[S]. USA F, 1986.
- [3] O. Brown, Paul Eremenko. Fractionated space architecture; a vision for responsive space[C]// In Proceedings of the 4th Responsive Space Conference, American Institute of Aeronautics & Astronautics, 2006.
- [4] Jeff Foerster, et al. Ultra-wideband technology for Short-or Medium-range wireless communications[D]. Intel Technology Journal, 2001.
- [5] Scholtz R A, Multiple access with time-hopping impulse modulation[C]// Proc. MILCOM, 1993: 447 - 450.
- [6] Fontana R J, Larrick J F, Cade J E. An ultra wideband communication link for unmanned vehicle applications[C]// Proceeding of AUVS197, 1997.
- [7] Ni J, Arndt D, Ngo P, Phan C, et al. UWB tracking system design for free-flyers[C]// AIAA Space 2004 Conference and Exposition, 2004.
- [8] Ni J, Barton R. Design and performance analysis of a UWB tracking system for space applications[C]// IEEE/ACES Intl. Conf. on Wireless Communications and Applied Computational Electromagnetics, 2005: 3 - 7.
- [9] Federal Communications Commission. Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems[R]. Ultra-Wideband (UWB) First Report and order, 2002.
- [10] Maria-Gabrielle Di Benedetto, Guerino Giancola. 著, 葛利嘉, 等译. 超宽带无线电基础[M]. 电子工业出版社, 2005: 119 - 122. [Maria-Gabrielle Di Benedetto, Guerino Giancola. Understanding Ultra Wide Band Radio Fundamentals[M]. Publishing House of Electronics Industry, 2005: 119 - 122.]
- [11] Massa Nakagawa, Honggang Zhang, Hideaki Sato. Ubiquitous homelinks based on IEEE 1394 and ultra wideband solutions[J].

- IEEE Communications Magazine, 2003(5): 74 - 82.
- [12] 林广, 王俊, 王卫东. 一种基于边沿/门限检测的 IR-UWB 非相干接收方法[J]. 计算机仿真, 2007, 24(2): 315 - 321.
- [LIN Guang, WANG Jun, WANG Wei-dong. An impulse radio ultra-wideband receiver based on edge/threshold detection[J]. Computer Simulation, 2007, 24(2): 315 - 321 (in Chinese).]

作者简介:朱精果(1977 -),男,中科院光电研究院博士生,研究方向为飞行器综合电子技术和超宽带无线技术。

通信地址:北京市海淀区中关村南二条 1 号 8701 信箱 (100190)

电话:(010)62576924

E-mail:zhujingg@mails.gucas.ac.cn

## The Experimental Research of Wireless Bus Based on IR-UWB

ZHU Jing-guo<sup>1,2</sup>, WANG Yu<sup>1</sup>, XU Zhi-ming<sup>1,2</sup>, WANG Jun<sup>3</sup>

(1. Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Department of Electronic Engineering and Information Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** With the emergence of the concept of virtual satellite and the increasing demands for exchanging data in or between electronic systems, reliable wireless interconnection between spatially separated devices is of great interest recently. This paper studied the technical characteristics of both impulse radio Ultra Wide-Band (IR-UWB) and on-board data bus protocols. It was concluded that IR-UWB could be utilized as the physical layer of data bus to provide a solution for the reliable wireless interconnections between terminals. In order to testify the feasibility of this solution, we carried out a wireless data exchanging experiment between 1553B terminals using IR-UWB. The results of the experiment indicate that IR-UWB is a potential physical medium for wireless bus network.

**Key words:** Impulse radio; Ultra Wide-Band (UWB); Wireless bus; 1553B protocol