

AFDX 终端测试技术的研究与实现

刘道煦, 吴华程

(成都天奥测控技术有限公司, 成都 611731)

摘要: AFDX (航空电子全双工切换以太网) 作为大型客机和运输机上的主流机载通信网络, 其应用越来越广泛, 对 AFDX 网络及设备的测试需求也必将与日俱增; 针对这一需求, 提出了一种 AFDX 终端测试技术的实现方法; 该方案使用大规模 FPGA 和高性能嵌入式处理器, 实现了一个 AFDX 终端系统及终端测试功能; 应用结果表明其较好地满足了航空电子网络数据传输的实时性和可靠性需求, 并能对 AFDX 网络的功能和主要性能指标进行测试; 该测试终端具备最大 128 个虚拟链路、1~128 ms 带宽分配间隙, 可进行协议解码分析、故障注入与检测、误码率测试以及 IRIG-B 时戳等测试功能。

关键词: AFDX; 端系统; 测试

Research and Implementation of AFDX End System Test Technology

Liu Daoxu, Wu Huacheng

(Chengdu Spaceon T&C Technology Corporation Ltd, Chengdu 611731, China)

Abstract: Avionics Full Duplex Switched Ethernet (AFDX) is the major choice of communication network on airliner, and is equipped widely to the real liner. Aiming at the test demand of AFDX network, an approach to implement the AFDX test technology is proposed, which comes true on FPGA and embedded processor. With this approach, an AFDX end system is implemented along with AFDX network test function. The application results of the end system demonstrate that this technology can meet reliability and real-time requirements of avionics data transmission, and can also achieve the target of testing AFDX network performance. This end system is provided with 128 VLs and is able to handle BAG values in range 1ms to 128ms. Its test function mostly includes protocol decoding and analysis, fault injection and detection, bit error rate test, and IRIG-B time stamp.

Key words: AFDX; end system; test

0 引言

随着航空电子系统复杂度的不断增加, ARINC429 和 1553B 等上世纪广泛使用的相对成熟的总线技术, 传输带宽已经不能适应高速发展的航空电子设备及子系统之间的通信需求, 为了解决这一问题, 出现了一系列的新兴总线技术, 如 FC、AFDX (Avionics Full Duplex Switched Ethernet) 等^[1-2]。AFDX 借鉴以太网成熟的技术, 适应了机载航空电子系统的网络传输延迟确定性、安全性、可靠性、维护性的要求, 在大型客机和运输机上得到了成功应用, AFDX 代表了机载数据总线发展趋势。随着 AFDX 总线技术在机载数据总线领域得到越来越多的应用, 对 AFDX 总线及设备的测试保障也会越来越重要。

针对 AFDX 总线的维护和测试需求, 本文通过基于 PXI 总线的 AFDX 终端测试模块相关技术和设备的研究开发, 探讨其具体实现的方法和途径, 以满足国内对 AFDX 终端通信及总线测试的各类需求, 提升新一代航空数据总线的测试保障能力^[3-5]。

1 AFDX 终端系统概要

终端系统嵌入到每个航电子系统中, 将航电子系统和 AFDX 网络连接起来。一个完整的 AFDX 终端系统包含了物理层接口、链路层、网络及传输层、以及服务应用层等。图 1 所示为端系统设计的原理框图。

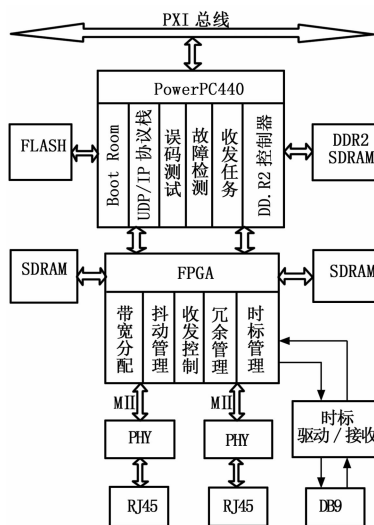


图 1 端系统设计框图

使用高性能 FPGA 芯片实现 AFDX 链路层协议, 主要包括以太网 MAC、发送带宽分配、抖动控制、完整性检测、时标同步与产生等功能。高性能 PPC 嵌入式处理器运行 Vx-works 实时操作系统, 实现 AFDX 的网络层协议, 如 TCP、UDP、IP、ICMP、ARP 等, 并配合 FPGA 完成总线通信、故障注入、协议测试等功能。

2 端系统关键技术研究

2.1 流量整形和实时调度技术

AFDX 流量整形是指虚拟链路 (VL) 的带宽分配机制,

收稿日期: 2013-12-25; 修回日期: 2014-02-16。

作者简介: 刘道煦 (1977-), 男, 湖北人, 工学硕士, 主要从事测控技术以及基于 VXI、PXI 和 PXI-E 的测控产品方向的研究。

实现带宽分配机制也就是要实现各个虚拟链路的带宽分配间隙 (BAG)^[6-9], 如图 2 所示。

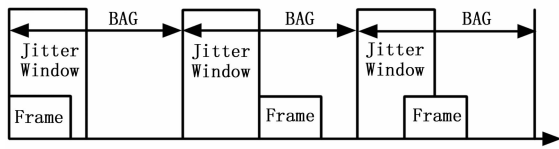


图 2 BAG 示意图

当一个给定的终端系统需要把数据传输到多个虚拟链路上时, 虚拟链路的数据帧被允许延迟到最大的抖动值, 来限制终端系统的瞬时帧速率, 从而适应其它虚拟链路上的数据帧。为了提高带宽利用率, 保证重要数据的可靠传输, 阻止虚拟链路受到来自相同物理连接的其它虚拟链路的干扰, 需要限制虚拟链路的传输速率和帧长度。因此, 每个虚拟链路的带宽分配需要考虑到带宽分配间隙、虚拟链路能够传输的最大帧长度、和最大抖动边界这 3 个条件的限制。

为了实现 AFDX 的实时调度功能, FPGA 在实现流量控制时, 采用 TDM 实现原理, 将发送窗口划分成多个时隙, 每个时隙的大小由软件指定 (即由软件指定 BAG 和 Jitter 的值), 以保证不同虚拟链路上的数据报文通过不同的时隙进行发送。该功能的实现原理如图 3 所示。

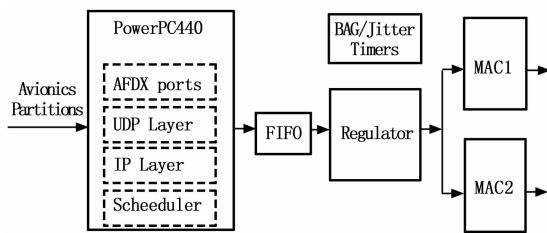


图 3 AFDX 发送调度原理

图 3 中, Scheduler、Regulator、BAG/Jitter Timers 三者配合实现了一个智能调度器, Scheduler 能够对所有虚拟链路的待发送报文进行有效排序, 并送入 FIFO, 而 Regulator 则根据 BAG 计时器的值来对不同虚拟链路的报文在精确的时隙上进行发送, 同时 Regulator 还要对计时器进行复位和计数控制。

2.2 完整性检测和冗余管理技术

一般情况下, 在 AFDX 系统中有两个独立的交换网络: A 网络和 B 网络。

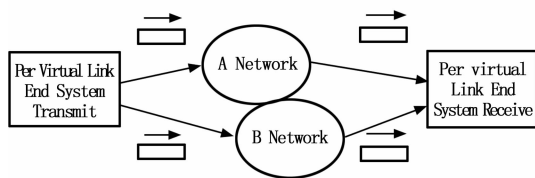


图 4 冗余网络示意图

发送端系统发出的数据帧被复制后, 分别发送到 A、B 两个网络中, 因此在通常情况下, 接收端系统会收到两个互为冗余的数据报文。

在端系统的接收通道中, 冗余帧处理的基本原则是: 首先, 进行完整性检测, 即检查帧序号 (SN) 是否符合顺序要求; 然后, 进行冗余处理, 端系统确定是接收该帧, 或者是由

于该帧是一个已到达帧的备份而丢弃之。如图 5 所示。

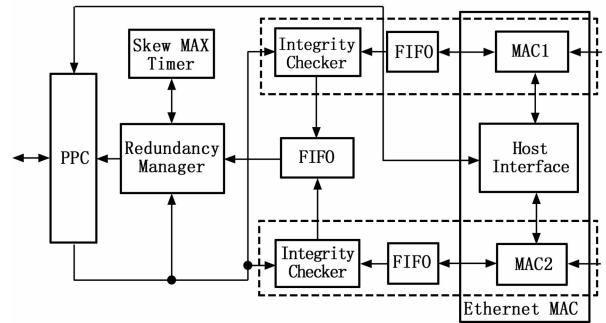


图 5 AFDX 接收原理

在实际逻辑设计中, 完整性检测和冗余帧处理所采用的实现方法均以各帧的序列号 SN 为基本依据, 把当前帧 SN 与之前接收到的同 VL 的帧 SN 进行比较, 从而决定是保留该帧还是去掉该帧。

3 协议测试与解码分析

通过对 MAC、IP、ICMP、IGMP、ARP、TCP、UDP 等协议进行解码分析, 根据协议定义的报文格式, 对报文的报头、长度、类型、数据载荷、校验等字段进行测试并解析出相关内容, 供测试管理软件进行分析, 以便开展协议的遵从性测试。

在发送通道上, 可以增加发送虚拟链路的数量, 增加数据报文的长度, 进行不间断的循环发送, 从而增大 AFDX 网络的数据流量。通过这种方式可以对 AFDX 网络进行可靠性和压力测试, 检测网络交换机和其它终端设备的性能。

另外在接收方向上还实现了丰富的过滤和触发功能, 支持的过滤和触发方式有 UDP 端口号、虚拟链接、IP 地址、MAC 地址、软件触发等。在进行协议测试和解码分析时, 该功能可以进一步增强接收控制的灵活性。

4 故障注入与故障检测

AFDX 协议故障注入和故障检测功能是通过软件和 FPGA 相互配合而实现的, 通过该功能可以对 AFDX 网络和设备的容错性能进行测试。

软件发生器可以对发送的报文进行任意编辑, 包括帧头、帧长、载荷、校验等, 当然它主要是编辑一些诸如 UDP/IP 这些网络层的故障错误模板卡进行发送, 而链路层的故障注入则是通过 FPGA 来实现的。同样, 故障的检测功能也分为链路层和网络层两个方面。

设计中支持注入和检测的故障类型主要有循环冗余校验 (CRC) 错误、帧间隙 (IFG) 错误、帧过长错误、帧过短错误、IP 头校验错、TCP/UDP 校验错等。

5 误码率测试

误码率 (BER) 测试包含误码产生和接收两个部分。误码图形 (伪随机序列或自定义图形) 在 PPC 中产生, 用户选择好图形后设置到 PPC 中, PPC 根据设置生成对应的图形序列, 并加载到 AFDX 报文中。在接收部分, 根据设置的图形模式, 先进行图形同步工作, 同步上后, 再计算误码率的大小。误码率测试的基本原理如图 6 所示。

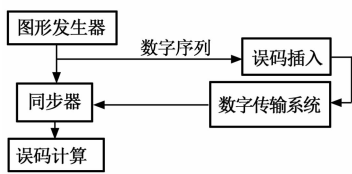


图 6 误码率测试原理

误码率测试可由发送设备和接收设备两个设备组成，亦可由带收发功能的同一个设备组成。发端产生连续的比特流，作为通信系统的信源数据；收端接收系统的比特流，并将其与本地产生的码型和发端相同的比特流进行比较，从而完成误码率测试。BER 的准确程度随着传送位数的增加而增加，如果要获得完全准确的 BER 则需要无限的数据传输，但在工程上是无法实现无限数据传输的，因此通常采用两种方法来测试误码率，即定时误码和定数误码，误码率 (BER) 表示如下：

$$BER = \frac{\text{在平均间隔时间内的误码个数}}{\text{在平均间隔时间内传输信息的总数}}$$

误码率测试可以反映 AFDX 网络的传输性能。设计中实现的误码率测试功能还可以在发送端主动插入误码，插入方式可以是以一定的比例连续插入，也可以是手动单次插入。在发送端主动插入误码可以用来测试网络设备的容错性能。

6 结论

本文提出了一种 AFDX 终端系统的实现方案，并重点对终端系统关键技术、AFDX 协议测试技术的实现方法进行了分析。

目前该技术已成功应用在 PXI 和 PCI 总线多款型号的 AFDX 测试模块中，证明了其实用性和可靠性。所提出的技术和方法在类似的 AFDX 设备开发中也具有较好的参考价值。

参考文献：

- [1] ARINC 664, Aircraft Data Network, Part 7: Avionics Full Duplex Switched Ethernet (AFDX) Network [S]. 2005.
- [2] 王 骥, 杨永田, 徐 光. 确定性实时以太网在航空电子系统中的应用 [J]. 航空电子技术, 2006, 37 (3): 29-32.
- [3] Bisson K, Troy Troshynski. Switched Ethernet Testing for Avionics Applications [J]. IEEE A&E Systems Magazine, May, 2004: 31-35.
- [4] Anand M, Vestal S, Dajani-bronwn S, et al. Formal Modeling and Analysis of the AFDX Frame Management Design [A]. Proceedings of the 9th IEEE International Symposium on Object and Component-oriented Real-time Distributed Computing [C], IEEE Press, 2006.
- [5] 李浩峰. AFDX 网络测试研究现状分析 [J]. 计算机应用, 2009, 128 (2): 64-66.
- [6] 刘明哲, 徐皓冬, 毕宇航. 确定性实时以太网通信协议研究 [J]. 仪器仪表学报, 2005, 26 (8s): 505-507.
- [7] 陈 昕, 周拥军, 万剑雄. AFDX 端系统关键技术的研究与实现 [J]. 计算机工程, 2009, 35 (5): 1-3.
- [8] 牛仕奇, 严胜刚, 任向隆. AFDX 终端系统实现方案研究 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (12): 2507-2520.
- [9] 白 焱, 王 勇, 李俊鹏. 基于 FPGA 的 AFDX 终端接口卡设计 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (12): 3282-3285.

(上接第 1350 页)

优先考虑 30 mA, 当额定漏电动作电流等于或小于 30 mA 时要求保护动作时间小于 0.1 s, 当额定漏电动作电流大于 30 mA 时要求小于 0.2 s。

表 1 间接接触漏电故障测试结果

漏电流检测值(mA)	动作电流(mA)	故障位置(m)	动作时间(ms)
6.4	30	19	68
6.6	30	17	70
6.2	30	21	60

表 2 直接接触漏电故障测试结果

漏电流检测值(mA)	动作电流(mA)	故障位置(m)	动作时间(ms)
26	Any	16	35
33	Any	13	36
38	Any	11	33

通过对模拟漏电信号的测试，以及从测试结果可以得出，整个系统运行稳定，故障检测准确，并没有发生死机等状况，根据间接漏电检测与直接漏电检测结果与实际的漏电位置距离对比，误差在 10% 以内，基本可以满足对电气线路漏电故障

的检测定位需求。

5 结语

本系统以单片机为控制核心，提出基于零序电路为触发信号对漏电故障进行检测，能够在低压供电线路发生漏电故障后，及时检测到故障的发生并定位，对于对于微小故障演变为大故障起到了预防作用，从而减小故障停电范围，便于寻找漏电故障。缩短漏电停电时间，提高了供电的可靠性。

参考文献：

- [1] 苏国营. 漏电保护器的安全性能与应用分析 [J]. 科技信息 (学术研究), 2006, (5): 43-45.
- [2] 蔡 辉, 王志贤. 信号处理在虚拟仪器测试系统中的应用 [J]. 国外电子测量技术, 2003, (4): 28-31.
- [3] 陈斯平. 低压供电线路漏电故障在线检测电路的研究 [J]. 科技信息, 2012, (9): 32-33.
- [4] 王永进. 基于 DSP 的漏电保护器的理论研究和设计 [D]. 西安: 西安科技大学, 2011.
- [5] 沈韦华, 陈洪涛, 沈锦丰. 基于最佳匹配算法的精密零件检测研究 [J]. 科技通报, 2013, 29 (5): 97-99.