

AFDX 网络系统测试设计与实现

苗佳旺^{1,2}, 乔飞¹, 盖峰²

(1. 清华大学, 北京 100083; 2. 北京旋极信息技术股份有限公司, 北京 100094)

摘要: AFDX (avionics full-Duplex switched ethernet) 作为新型航空总线技术, 已经在空客 A380/400M、波音 B787 等飞机上得到成功应用; AFDX 网络的出现为航空电子系统的发展提供了一种高实时性和可靠性的解决方案; 如何有效论证一个 AFDX 网络系统的实时性和可靠性成为了 AFDX 网络系统测试方面的一个重要课题; 通过采用数据收发, 网络监控和故障注入的方式对 AFDX 网络系统的可靠性进行有效的评测, 实现了一种 AFDX 网络系统测试和评估系统; 经过测试, 该测试系统可以有效地对 AFDX 网络系统的可靠性进行评估和测试。

关键词: AFDX; 端系统; 交换机; 虚拟链路; 测试

Design and Implement of AFDX Network System Testing

Miao Jiawang^{1,2}, Qiao Fei¹, Gai Feng²

(1. Tsinghua University, Beijing 100083, China;

2. Beijing Watertek Information Technology Co., Beijing 100094, China)

Abstract: As a new type of aviation bus technology, AFDX (Avionics Full-Duplex Switched Ethernet) has been successfully applied to Airbus A380/400M, Boeing B787 and other aircraft. The emergence of the AFDX network provides a high real-time and reliability solution for the development of the avionics system. How to effectively demonstrate the reliability of a AFDX network system has become a major issue in the AFDX network system testing. Through the use of data transceiver, network monitoring and fault injection, the reliability of AFDX network system is evaluated effectively, and a AFDX network system test and evaluation system is implemented. After testing, the test system can effectively evaluate and test the reliability of AFDX network system.

Keywords: AFDX; end system; switch; virtual link; test

0 引言

AFDX 是一种具备高可靠性, 传输时间确定性和实时性等优点的总线, 目前速率支持为 10 Mbps, 100 Mbps 两种。它充分利用商用以太网技术的成熟度, 通过控制不同虚拟链路数据传输速率的方式提高了总线的实时性, 通过完整性校验、冗余管理技术实现了总线传输的高可靠性, 通过使用固定配置表的模式实现传输路径的确定性, 通过采用全双工交换机、异步传输模式等方法来减少总线竞争。以上技术极大地提升了 AFDX 总线在航空电子系统通信应用中的性能。

AFDX 网络由端系统、交换机、虚拟链路组成, 采用双冗余星型拓扑结构, 终端之间通过虚链路交换数据。虚链路定义了一条消息的源地址和目的地址, 其中源地址只有一个, 每一个虚链路都有自己的带宽。虚链路是 AFDX 网络的通信基础, 在系统中端系统通过虚链路进行数据帧的交换。

本文将重点阐述 AFDX 网络系统测试系统的测试方法、实现方式和验证平台。本文将对 AFDX 网络的主要特点进行说明, 并对测试中使用的数据收发, 网络监控和故障注入等测

试方式进行深入介绍。本文同时将对网络测试设备系统的组建和测试实现进行详细说明。

1 AFDX 总线特点

作为一款高性能的航空总线, AFDX 主要具备以下特点, 高实时性, 完整性检查, 冗余管理和网络拓扑确定性。

1.1 高实时性

高实时性在于 AFDX 定义了一种基于时间片的虚拟链路传输模式, 每一条虚拟链路的最大传输带宽是确定的, 同时虚拟链路的最小时间片可以达到 1 ms, 充分保证了数据传输的实时性。

虚拟链路 VL 速度计算公式: $Speed = L_{max}/BAG$, 其中 Speed 代表虚拟链路 VL 的最大传输速度, L_{max} 表示该虚拟链路上传输的数据帧的最大字节数, BAG 表示该数据帧的 BAG 值, 以上数值在组网时确定。

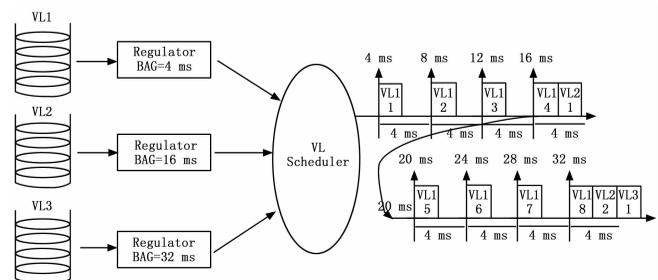


图1 数据包发送调度过程

根据 ARINC 664 Part7 协议的要求, VL 的 BAG 要求为:

收稿日期: 2018-02-09; 修回日期: 2018-03-16。

作者简介: 苗佳旺(1986-), 男, 山西省河曲县人, 高级工程师, 主要从事航空总线测试方向的研究。

乔飞(1977-), 男, 博士研究生, 副教授, 主要从事低功耗集成电路关键技术、低功耗媒体处理芯片设计和低功耗传感器关键技术方向的研究。

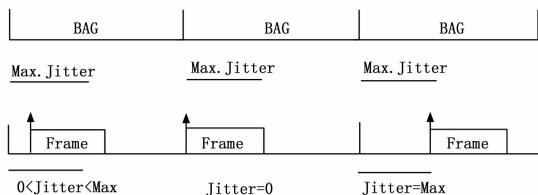


图 2 VL 参数 BAG 和 Jitter

1、2、4、8、16、32、64、128 ms 之中的一个值。

控制抖动 Jitter 的要求为：

$$\left\{ \begin{aligned} \max_jitter &\leq 40 \mu s + \frac{\sum_{i \in (\text{set of VLs})} (20 \text{ bytes} + L^{\max} \text{ bytes}) \times 8 \text{ Bits/Bytes}}{Nbw \text{ bits/s}} \\ \max_jitter &\leq 500 \mu s \end{aligned} \right.$$

注：Nbw=100 M bits/s (或者 10 M bits/s)，该参数与物理网速有关。

1.2 高稳定性

AFDX 网络的高稳定性主要通过冗余网络保证，AFDX 网络数据可以同时通过两个交换网络进行数据传输，通过冗余管理协议实现冗余数据剔除。冗余备份模式在航电领域使用广泛，AFDX 网络引入冗余管理极大地提高了总线的稳定性。

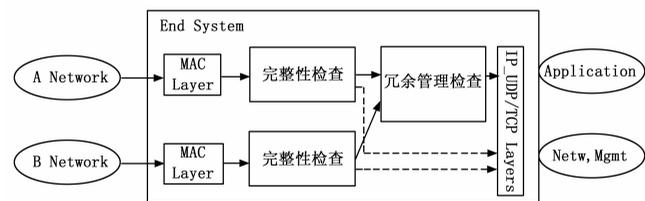


图 3 接收管理模块主要工作模型

1.2.1 完整性检查

完整性检查是根据每一个虚拟链路接收到的数据帧的连续进行检查。AFDX 协议规定，每一个虚拟链路发送的数据帧的序号必须是连续的，从 1 到 255 进行循环（复位后的第一个数据帧序号为 0，循环模式为 0->1->...->255->1->...）。

帧序号在 [PSN+1, PSN+2] (PSN: Previous Frame SN, 前一个数据帧的帧序号) 这个区间内的数据帧都被接收，也即当前一个数据帧收到的为 PSN，那么下一个收到的数据帧应该是 PSN+1，如果收到 PSN+2 则认为是 PSN+1 这个数据帧丢失，否则则认为收到的为错误数据帧。

每次检查的都是上一次收到的数据帧的帧序号，无论该数据帧是否通过完整性检查帧。序号为 0 的数据帧必须被接收。在本地复位逻辑发生后的第一个接收到的数据帧要被接收。

1.2.2 冗余管理

在 AFDX 协议中，为了增强通信的稳定性，协议中通过增加冗余通路方式实现通信的高稳定性。冗余管理的主要工作是根据接收到的数据包的 Sequence Number 和通道编号进行冗余管理。将符合要求的数据包整理存储，然后上传到应用层。

1) 冗余管理是针对每一个 VL；

- 2) 冗余管理部分可以通过配置表项选择关闭或开启；
- 3) 冗余管理工作必须建立在完整性检查之后；
- 4) 冗余管理的基本规则是“先到先收”。所谓先到先收就是，对 A、B 两个通道收到的数据包，先收到的数据包被接收存储，后收到的数据包被丢弃。

接收部分冗余规则处理：

1) 冗余管理只存区间 [SN - SkewMax/BAG, SN] 外的数据帧，也即如果 SkewMax=5 ms, BAG=1 ms, rn=7, 那么区间为 [2, 7] 也即如果下面收到的数据帧序列号为 2~7 中的任意一个都不被接收。

2) 如果某时刻接收到的数据帧与接收到的上一个数据帧的时间差超过了 SkewMax, 那么接下来的数据帧需要被接收。

1.2.3 确定性网络

AFDX 网络主要由端系统和交换机组成，信息交互方式由端系统一端系统，端系统—交换机—端系统两种方式组成。在每次组网时，AFDX 网络中所有虚拟链路必须是确定的，也即系统中每个端系统之间的通信链路是确定的，每个通信链路的带宽以及相应的通信端口也是确定的。确定性的网络配置充分保障了 AFDX 网络数据的实时性，稳定性以及延时的确定性，进而保障数据可靠有效地进行传输。

2 AFDX 网络系统测试

AFDX 网络系统测试的主要内容如下：

- 1) AFDX 终端节点通信测试；
- 2) AFDX 终端节点通信性能测试；
- 3) AFDX 交换机性能测试。

测试方法：

1) 通信测试：通过标准测试设备对被测 AFDX 端点进行测试，测试通信能力。

2) 网络监控：通过监测设备对每一个网络通信端口的数据以及相关的时间参数进行分析，评测网络性能。

3) 故障注入：注入定向的错误信息对网络进行测试。

2.1 通信测试

2.1.1 数据发送

数据产生是指测试设备可以按照端系统数据发送标准生成标准 AFDX 数据帧。测试设备利用标准数据帧对系统通信性能进行功能和性能方面的测试。主要的测试手段列举如下：

1) 通信数据验证：利用随机数据生成的方式生成标准 AFDX 数据帧对端系统的通信正确性进行验证；

2) 满负载测试：生成 10 Mbps 的 AFDX 网络进行满负载测试，验证被测端设备是否具备进行满负载通信的能力。生成 100 Mbps 的 AFDX 网络进行满负载测试，验证被测端设备是否具备进行满负载通信的能力；

3) 超小包满负载测试：通过超小包数据帧间隔较小的方式验证 AFDX 端系统的数据处理能力；

4) UDP 协议测试：数据包生成，测试被测端系统处理 UDP 格式数据的能力；

5) ICMP 协议测试：数据包生成，测试被测端系统处理 ICMP 格式数据的能力。

2.1.2 数据接收

数据接收是指测试设备具备接收待测设备端系统发送数据

的能力。通过对接收数据的每一个数据帧进行的完整性, 冗余性, 数据 CRC, 帧长度错误, 半字节数据进行有效识别, 进而对待测设备端系统的数据发送能力和发送协议完整性进行测试评估。

2.2 网络监控

网络监控主要目的是通过对网络中传输的数据和网络状态的监控完成对 AFDX 网络的功能和性能的分析 and 评估。该功能主要用于对整个网络的负载, 交换机处理延时, 每个虚拟链路传输过程中的数据帧间隔的稳定性、完整性进行有效分析和评估。网络监控功能需要通过监控网络中传输的数据帧, 并对数据帧进行时间和状态进行标注。

1) 端系统评估: 通过对网络中每个数据帧的状态进行分析可以判断每个端系统数据发送功能是否正确。通过对一个虚拟链路上的多个数据帧的监控分析, 可以评估该虚拟链路调度能力是否满足协议要求, 进而判断该虚拟链路所在端系统是否满足设计指标。

2) 交换机性能评估: 通过对经过交换机的多个虚拟链路的数据帧的时间差进行分析, 可以评估交换机的交换延时。

3) 网络系统评估: 通过对网络系统中监控到的所有数据信息和状态信息进行综合评估可以分析网络中的错误状态, 链路负载等综合信息。进而评估整个网络系统的运行状态。

2.3 故障注入

根据 AFDX 网络的层级, 对属于不同层级的故障进行有效地注入, 通过逆向的方式判断每个端系统和交换机的数据接收检错能力, 每个虚拟链路的完整性, 冗余管理校验的能力, 以及每个数据接收端的鲁棒性。主要的注入错误如下。

1) 数据错误: 通过修改网络中数据帧中的数据, 注入数据错误, 用于验证端系统的数据接收和检错能力。

2) 完整性错误: 通过修改网络中某特定虚拟链路的完整性相关字段, 用于验证端系统的完整性校验能力。

3) 抖动延时注入: 通过对网络中某特定虚拟链路的部分数据帧人为加入延时, 验证接收端对于虚拟链路数据帧间隔抖动的处理能力。

4) 物理断路: 通过将网络物理断路实现模拟网络断路的故障以及网络连接不稳定的故障。

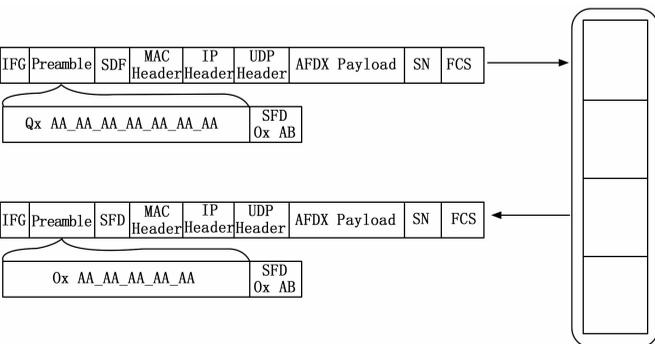


图 4 故障注入示例

如图 4 所示为一种修改前导码的故障注入功能, 通过将前导码 (0xAA) 的数量由 7 个修改为 5 个, 测试接收端对短前导码数据帧的容错能力, 进而验证接收设备的鲁棒性。

3 AFDX 关键技术

3.1 系统时标同步技术

系统时标是指对经过网络测试设备的网络每一个数据帧的时间进行标注。数据帧时间标志主要用于对 AFDX 网络中的关键参数, 虚拟链路的实时性和交换机的交换延时进行有效评估。可见数据帧时间标志对于一个实时系统进行评估的重要性。时标的同步能力和时标精度是系统时标技术的关键。时间同步能力保障当前网络系统中所有的采集设备是基于同一个时间标准对数据帧进行时间标注。高精度的时间标注用于保障数据帧时标测量的准确度。

本方案中采用一种光纤时钟同步技术保障该系统每个采集节点的基准时间和时钟的一致性。该系统提供 64 位, 精度为 10 ns 的时标对系统中的每个数据帧进行标注。

3.2 网络监控延时控制技术

网络监控设备作为一个串接设备串接在网络中, 每个物理链路的数据帧都要通过采集设备。采集设备的延时大小和延时稳定性将直接影响每个虚拟链路的实时性和完整性等参数, 所以必须严格控制数据帧通过网络监控设备的延时。

本方案使用两种方式控制数据通过网络监控设备的延时。

1) 零延时模式: 零延时模式是通过旁路物理信号的方式得到网络信号, 尽力地减少旁路信号的能量, 减少对主链路的影响。从而实现信号经过采集设备 0 延时。

2) 固定延时模式: 固定延时模式目的是为了为了满足设备进行故障注入的需求, 如果需要对网络进行故障注入, 就必须让数据帧通过监控设备, 所以就做不到零延时。本方案使用软件可配置的固定延时的方式, 实现 AFDX 网络数据帧经过网络监控设备延时固定。

4 网络系统测试方案实现与分析

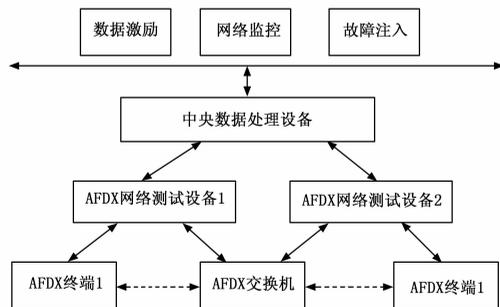


图 5 AFDX 网络系统测试结构图

根据 AFDX 网络系统测试要求, AFDX 网络系统测试方案主要通过数据激励, 网络监控, 故障注入功能实现对网络系统的测试。方案通过采用由 AFDX 网络测试设备, 中央数据处理设备组成硬件系统和由数据激励模块, 网络监控模块和故障注入模块组成软件系统实现 AFDX 网络系统测试。

中央数据处理设备负责运行数据激励、网络监控和故障注入, 将模块产生的控制命令和数据信息发送到网络测试设备。网络测试设备通过配置命令完成相应的数据收发, 网络监控和故障注入功能。

4.1 数据激励

数据激励模块负责产生不同测试环境下的激励数据, 并将

激励数据配置到网络测试设备中对终端或者交换机进行测试。通过配置不同的测试激励测试 AFDX 终端在不同情况下的数据接收能力。数据激励模块生成的数据同时用于交换机的交换性能测试。

数据激励模块将生产的激励数据和发送策略通过中央数据处理设备发送到 AFDX 网络测试设备, AFDX 网络测试设备根据配置策略将数据发送到 AFDX 网络完成测试。

4.2 网络监控

网络监控主要由 3 个部分组成: 数据帧监控, 虚链路时序监控, 网络状态监控。通过对网络系统的监控可以分析 AFDX 网络系统中各端系统的数据发送功能, 每一个虚链路的性能, 交换机的交换延时以及整个网络环境的负载等参数实现 AFDX 网络系统评估。

AFDX 网络测试设备负责对 AFDX 网络系统中的数据进行采集, 并对每个数据帧进行时标标注和状态标注。时标标注用于标注每个数据帧的时间信息, 状态标注用于标注数据帧的状态, 如是否发生错误, 错误状态等信息。同时网络采集设备还负责采集所在网络的状态信息, 如网络链路平均速度, 最高速度, 最低速度, 每个 VL 的链路速度以及整个网络发生的错误状态等信息。

中央数据处理设备负责收集各个网络测试设备的监控数据, 并使用网络监控模块对 AFDX 网络系统进行评估。

4.2.1 数据帧监控

如图 6 所示, 网络监控模块将个网络测试设备采集的数据帧载入到数据帧分析模块中实现对整个网络的数据帧监控。通过将网络拓扑的树形结构和监控数据的对应, 可以对不同虚拟链路的数据帧进行检查。对于错误数据, 监控软件会对相应的数据帧标注不同的颜色以区分正常数据帧。

No.	Type	Source	Destination	Virtual Link	Length
90347	0.000.000.000	10.1.2.11900	10.1.3.11900	101.039FD	1518
90348	0.000.123.040	10.1.2.11900	10.1.3.11900	101.039FD	1518
90349	0.000.000.000	10.1.2.11900	10.1.3.11900	101.039FD	1518
90350	0.000.123.040	10.1.2.11900	10.1.3.11900	101.039FD	1518
90351	0.000.255.020	10.1.2.11900	10.1.3.11900	101.039FD	1518
90352	0.000.000.000	10.1.2.11900	10.1.3.11900	101.040FD	1518
90353	0.000.123.040	10.1.2.11900	10.1.3.11900	101.039FD	1518
90354	0.000.000.000	10.1.2.11900	10.1.3.11900	101.039FD	1518
90355	0.000.123.040	10.1.2.11900	10.1.3.11900	101.039FD	1518
90356	0.000.255.020	10.1.2.11900	10.1.3.11900	101.040FD	1518
90357	0.000.000.000	10.1.2.11900	10.1.3.11900	101.040FD	1518
90358	0.000.123.040	10.1.2.11900	10.1.3.11900	101.039FD	1518
90359	0.000.000.000	10.1.2.11900	10.1.3.11900	101.039FD	1518
90360	0.000.123.040	10.1.2.11900	10.1.3.11900	101.039FD	1518
90361	0.000.000.000	10.1.2.11900	10.1.3.11900	101.040FD	1518
90362	0.000.001.200	10.1.2.11900	10.1.3.11900	101.040FD	1518
90363	0.000.121.040	10.1.2.11900	10.1.3.11900	101.040FD	1518
90364	0.000.001.200	10.1.2.11900	10.1.3.11900	101.039FD	1518
90365	0.000.122.040	10.1.2.11900	10.1.3.11900	101.020FD	1518

图 6 数据帧网络监控

4.2.2 虚链路时序监控

数据帧时序分析主要用于对不同虚拟链路的的时序进行分析。通过使用该功能可以分析每个虚拟链路的实时性和完整性, 进而判断是否满足设计要求。同时该功能也可以通过分析每个虚拟链路过交换机的延时对交换机的交换性能进行评测。

4.2.3 状态统计

状态统计功能主要包含每个 AFDX 网络的实时网络的数据收发速率, 每个虚拟链路实时数据收发的速率、最大速率, 每个虚拟链路收发数据帧数量, 总传输字节数, 错误数等信息。测试系统通过对以上信息的统计进行 AFDX 网络系统的

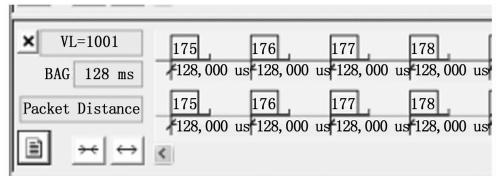


图 7 虚链路时序监控

性能评估。

4.3 故障注入

故障注入中, 故障注入模块负责根据不同的测试需求配置不同的故障注入策略, 中央数据处理设备负责将故障注入模块产生的故障注入策略下发到 AFDX 网络测试设备, AFDX 网络测试设备负责根据故障注入策略执行相应的故障注入功能。

故障注入模块实现两个功能, 主动发送故障数据和对网络中传输的数据帧进行故障注入。根据 AFDX 网络的层级, 对属于不同层级的故障进行有效地注入, 通过逆向的方式判断每个端系统和交换机的数据接收检错能力, 每个虚拟链路的完整性, 冗余管理校验的能力, 以及每个数据接收端的鲁棒性。图 8 所示即为本次故障注入策略配置界面图。

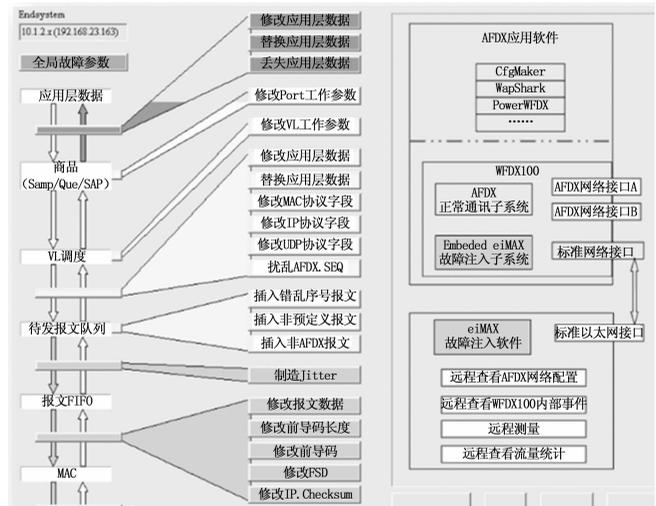


图 8 故障注入界面

4.4 网络系统测试分析

网络系统测试方案实现的测试系统在每台飞机航电系统的测试实验中, 对航电 AFDX 网络中的各通信终端, 交换机, 以及虚链路的功能和性能进行了全面测试。实验表明网络系统测试方案中的数据激励模块, 数据监控模块和故障注入模块配合使用可以有效地分析 AFDX 网络系统中的各个参数, 较好地完成了对该飞机航电系统中 AFDX 网络系统测试和评估。

5 结论

目前 AFDX 已经成功应用于国内大飞机项目, 如何有效地对 AFDX 总线网络进行分析和测试变得非常有意义。本文在论述 AFDX 网络测试方法的基础上提出了一种用于 AFDX 网络的测试解决方案。通过数据收发, 网络监控和故障注入等手段实现 AFDX 网络的全面测试。并以此设计了一款测试设