

基于 TAN 技术的高可用机载通讯网络设计

Design of the Airborne Ethernet based on TAN

刘志坤¹ 童一峻¹ 王毅芳¹ 赵智雅² 代雪涛²

(1. 中国船舶工业系统工程研究院 2. 北京恩易通技术发展有限公司)

摘要: 机载网络系统是航空电子系统中实现信息传输与控制集成的重要载体。不同于普通的工业通讯网络,机载网络系统对信息传输有着实时性、可靠性和安全性的严格要求。由于通讯网络在应用过程中具有很大的约束性和复杂性,其功能和性能的改进一直是国际航空工业领域和实时通信领域研究的热点。本文针对机载网络高可用的技术特点,提出了一种基于 Time Aware Network (TAN) 技术的新型机载通讯网络解决方案,并进行了性能测试。试验结果表明,本方案在网络的实时性、可靠性、安全性、带宽增长和时间触发控制系统等方面有着明显的技术优势。

关键词: 时间明晰网络 机载通讯 时间触发控制系统 航空电子系统 确定性网络

1 引言

航空科技和工业化能力是一个国家综合实力的集中体现,也是国防安全的重要支撑,是世界强国争夺的技术制高点。“国产大飞机”项目和“中国制造 2025”计划的提出是实现迈入制造强国行列的重要战略目标。反映航空工业自动化水平的重要标志就是网络集成的能力。

机载网络技术是一种在飞机平台上的局域网技术,负责将飞机平台上各个设备、模块、部件等连接,是航空电子系统重要组成部分,是机载电子各子系统、各功能区之间互联互通的重要基础。

2 机载通讯网络发展历程和趋势分析

机载网络通讯就是一种在飞机平台上的计算机局域网技术,本质上属于实时局域网。不同于一般的工业通讯网络,机载系统特别强调严格的实时性、强的容错能力和高可靠性,因此有特定的性能评价指标。

在最初的分立式航空电子系统阶段,信息传递采用 ARINC429 点对点的传输方式。之后为了满足信息共享的需求采用 1553B 总线互连,着重强调通信的实时性和可靠性。为了解决数据总线带宽不足的缺点,美国 ANSI 和 SAE 组织分别提出了光纤分布数据接口和线形令牌传递总线两种令牌传递网络。目前机载网络逐渐发展为具有灵活性的交换式网络通讯,光纤通道 FC、全双工以太网 AFDX 和时间触发以太网 TTE 被新型机载互连系统所采用。

随着信息化技术的快速发展与智能化技术的逐渐成熟,新一代航空通讯技术对通讯平台的性能提出了更高的要求:

(1) 机载网络一体化

一体化网络可以使用一种通信链路来满足机载互联系统的所有需求。为了满足机载系统各功能分区不同传输需求,网络应具备高带宽,低延时,强容错能力与易扩展性等特性,在全局范围内使用一种网络通信,能够减少硬件接口形式,优化网络结构,且节省成本。

(2) 高精度网络时钟和基于时间触发的以太网控制系统

机载通信的不确定性源于网络中不同节点同时发送数据而引起的碰撞。利用时间触发机制对通信任务进行全局时间规划，可以规避通信任务之间的无序性，避免数据之间碰撞、干扰，极大提高机载通信的确定性，其实现基础是整个网络要具有良好的时钟同步，保证时间的一致性。

(3) 软件定义的网络资源灵活配置

随着机载系统的发展，其需要处理的信息量越来越大，响应速度越来越高，对总线现场化，网络化的要求也逐渐提高，仅仅采用总线式结构已经远远不能满足需求。网络化系统能够跨越通信所能及的多个区域，不再需要点到点地将大量的硬线或总线连接到制定的控制器上，而是将终端设备就近接到网络中来，做到通信链路的共享。

3 机载集成网络解决方案

3.1 时间明晰网络的技术原理

TAN是一种基于时间的工业通信技术，该技术针对大规模智能控制系统的通讯需求，针对确定性网络、时效性网络和SDN的发展趋势，提出的以GOS（Guarantee of Service即保障服务）取代传统的网络QOS（Quality of Service即服务质量）的解决方案。

如图 1 所示，TAN 技术在 OSI 参考模型的 L2 上定义了自己采用的用于链路层数据传输的帧结构：



图 1 TAN 帧结构示意图

TAN 网络具有如下技术特性：

- (1) 兼容不同的网络传输速率，带宽能够达到 10Gb/s 以上，并具有可扩展性和可伸缩性，支持总线型、标准以太网和无线组网设备的综合一体化网络接入；
- (2) 提供重要数据传输保障机制，传输时延和抖动可控，具有消除抖动的能力和最坏传输保障机制；
- (3) 根据飞机种类和电子系统的不同，支持任意和复杂的网络拓扑结构，整网全面提升数据级别的容错能力，遇到网络故障可以实现零毫秒自愈；
- (4) 具有信息安全保障机制，可随时对网络拓扑变化、数据帧的确切路径、数据帧入网时间和传输时延、接入设备等做精准的网络观察，实现网络的透明化让黑客无处藏身；
- (5) TAN 整个网络时钟同步精度 < 500ns，接入设备可以从网络获取精确的时钟进行同步，网络中的数据也都具有微秒级的时间属性；
- (6) 控制系统按照目标时间下发控制指令，多个被控设备可以从 TAN 网络获取时间和控制数据，完成控制动作；
- (7) 多种总线协议的机载终端经 TAN 网络进行数据传输，将各种总线资源视为网络资源的延伸，网络可以使用单播来模拟总线通信；
- (8) 可对目前的机内无线通信技术做加固传输，有效改善了在安全性、不确定性、稳定性和实时性等方面不能与有线通信相比的不足。

3.2 时间明晰网络特性

3.2.1 TAN 网络的确定性

TAN 采用双通道架构应对实时和非实时流量调度, 实现确定性和非确定性的网络融合传输。TAN 的确定性传输具有低时延和抖动小的特点, 为数据的端到端传输提供了实时性保障。

TAN 网络确定性含义:

(1) 传输时延上界: 实时通道数据帧经过一个网络节点的时延 $< 3 \mu s$, 从源节点到目标节点计算如果有 N 个网络节点, 那么数据帧在网络中的传输时延绝对 $< 3N \mu s$ 。传输时延有上限保证了在规定的有效的时间内可以完成通信。

(2) 传输时延可测: 网络中每个数据帧的传输时延都有微秒级的记录, 网络在提供基础通信服务的同时, 也能将传输时延告知关键应用。如果终端掌握了精确的数据传输的时延, 不仅可以轻易判别出数据的时间有效性, 还能通过终端软件算法来消除传输带来的时延抖动。

如图 2 所示, 可以根据对实时性的不同需求, 对不同系统进行优先级划分, 数据可分为实时通道和标准通道进行传输, 实时通道数据的传输优先于标准通道。

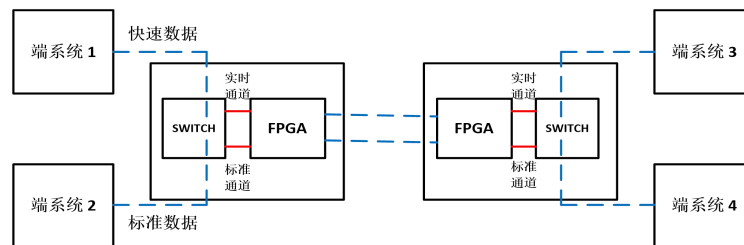


图 2 TAN 网络传输模型

如图 3 所示, 终端系统数据进入 TAN 网络, SWITCH 芯片对数据进行识别, 进而由 FPGA 模块对数据进行优先级的判断, 不同优先级数据通过实时/标准通道进行传输。

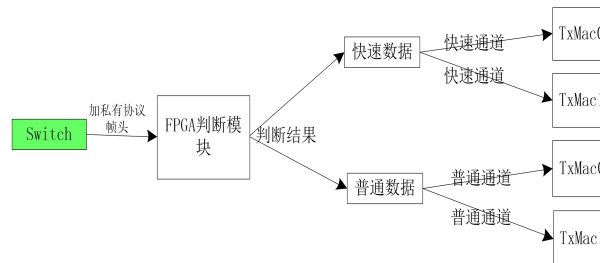


图 3 TAN 网络数据传输逻辑

如图 4 所示, 每条通道具备优先级且支持优先通信机制: 高优先级通道打断低等级的通信, 从而保障高优先级通道的低时延转发。完成转发后, 低等级通道恢复通信, 且在相邻的交换机重组被打断的数据帧。

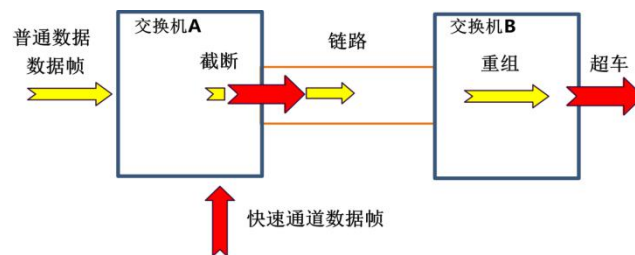


图 4 TAN 网络工作原理

3.2.2 TAN 机载以太网的高可靠性

现代飞机（民用、军用）的多样性及其内部结构的复杂性，和越来越多的机载设备、传感器、控制器的广泛分布，要求有更加灵活的组网方式，能够在传统二层网络上打破以太网对网络拓扑结构的限制。TAN 网络支持任意/复杂的网络拓扑结构，通过复杂拓扑构建更多的数据传输路径，将网络的风险分摊到每台交换机和不同的路径上，当局部网络发生故障时不会影响数据的高可靠传输，实现了真正意义上的零自愈网络。

TAN 网络的可靠性是指在规定时间内、一定条件下，网络自身完成规定功能的能力。网络可靠性是网络设计和规划的重要参数之一。飞行器工作在严酷的环境下，需要执行很多飞行关键或任务关键的机载任务，因此需要机载电子系统具有高可靠性、高安全性与很强的容错能力。当机载网络采用交换式网络进行系统互连，信息之间交联情况复杂，同时系统各功能区分区内部与功能分区之间存在着多样的传输需求，进一步增加了机载网络可靠性评价的复杂性。

提高计算机网络系统的可靠性通常可以采用容错技术来实现。容错技术就是在系统结构上通过增加冗余资源的方法来避免故障造成的影响，即使出错或发生了故障，系统的功能也不会受到任何影响。

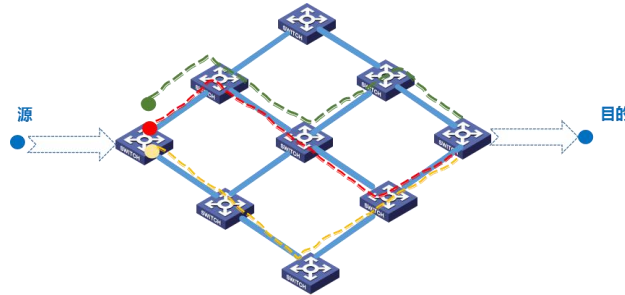


图 5 TAN 网络容错能力模型

如图 5 所示，TAN 网络在两点通信之前，为其规划出多条不同路径。同一时刻，用户的一份数据，在网络中从单一路径转变成多条路径同时转发多份相同数据，数据具备更高的可靠性以及容错能力。数据在起点被复制成多份，选取不同的路径（最多 4 条），向目的地传输。当网络出现问题时，只要还有一条或多条路径存在，数据仍能无损的到达目的地，对于用户系统来说，都能收到完整的数据，网络的故障对业务系统没有任何影响。

3.2.3 TAN 网络的高安全性

TAN 网络是机载系统数据传输的支持手段，由于其数据传输所支持的应用可能包含安全关键任务，因此系统必须要通过数据分析对机载网络安全性进行综合且全面的检查。

TAN 网络除了传统的设备状态检测和告警，还能为用户或第三方的安全设备提供网络数据的非接触式采集功能，实现机载网络的完全透明化，并能及时感知到“未知的未知”风险。

如图 6 所示，TAN 网络的可观察性主要体现在以下几点：

- (1) 网络拓扑以及拓扑变化可见
- (2) 每个数据帧的入网时间、到目的地的网络时延可测
- (3) 每个数据帧经过的确切路径可知
- (4) 可对网络上接入的设备做精准观察

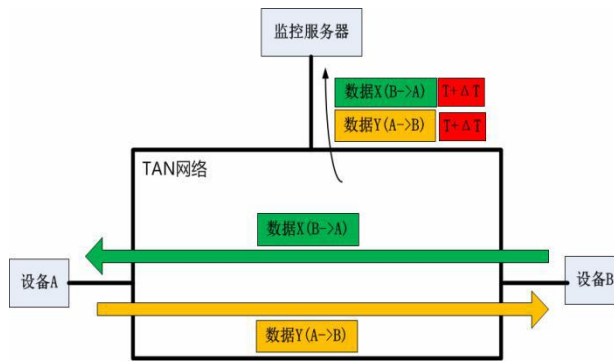


图 6 TAN 网络的可观察性

4. 基于 TAN 技术机载一体化网络设计

在机载网络发展过程中，网络支持的节点越来越多，网络结构也越来越灵活，带宽容量与传输速率也越来越高，新一代机载网络也要随着机载系统的需求而向更高性能方向发展。

针对于机载系统在带宽、实时性、可靠性及安全性等方面不同的需求，充分结合机体构造、机载设备分布情况等，利用 TAN 网络技术的功能特点，采用如图 10 所示的网络拓扑架构，使其满足机载电子系统的要求。

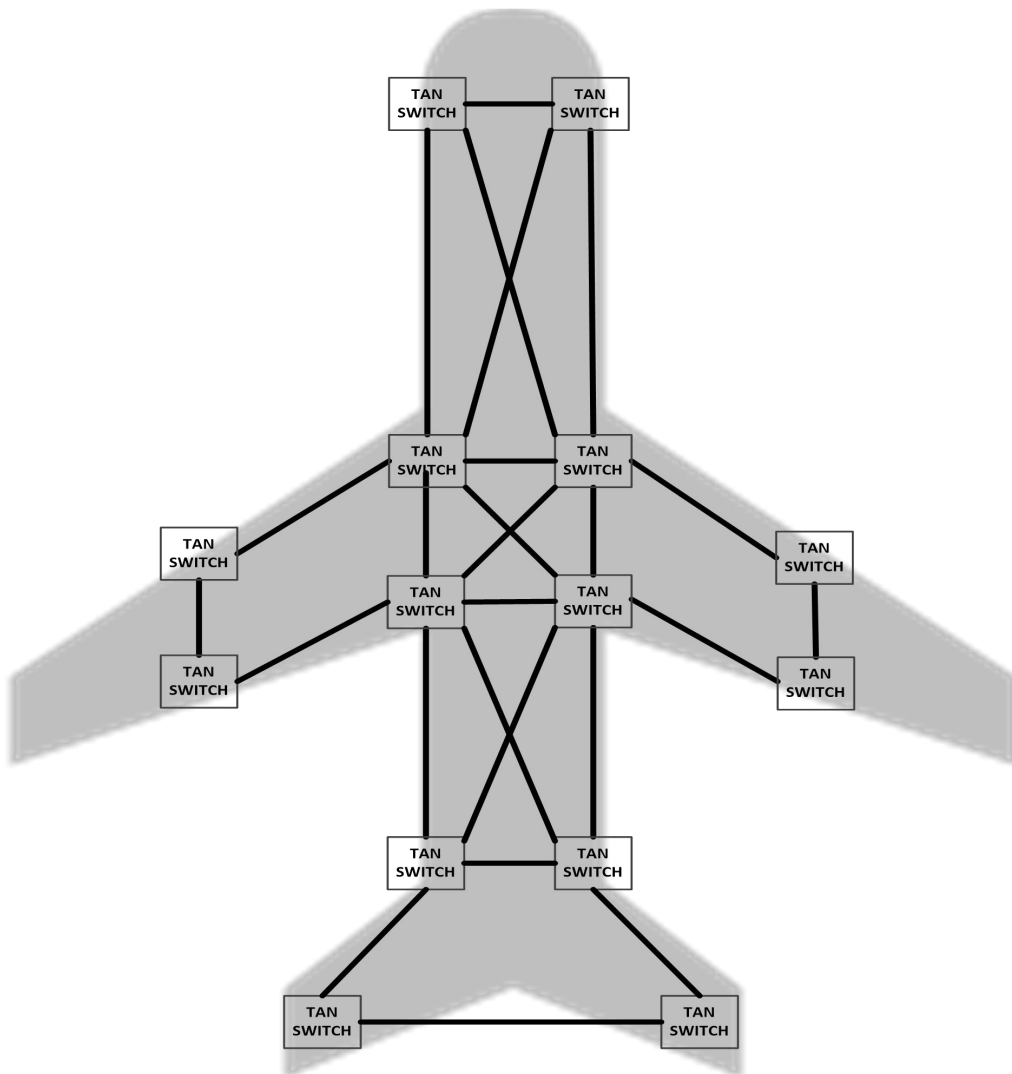


图 7 TAN 机载一体化网络示意图

灵活地网络拓扑结构，为机载系统间提供了更多的通信路径，保证了系统通信的安全性及可靠性。TAN 技术充分利用了已有的所有通信路径，智能路由会同时选择多条不同路径，数据在传输的过程中，TAN 网络能够把收到的一份数据，复制多个相同数据包分别选择不同路径向同一个目的地传输。数据的多路径传输技术和智能路由技术使通信的风险分摊到网络的不同设备和不同路径上。

5. 机载一体化通讯网络原理测试

5.1 确定性功能测试

测试目的：在指定的间隔内发送带时标的数据帧，记录发送和接收时的时间标，求出延时时间。测试数据帧丢包阈值为 0，所得数据均为无丢包前提下。

测试方法：

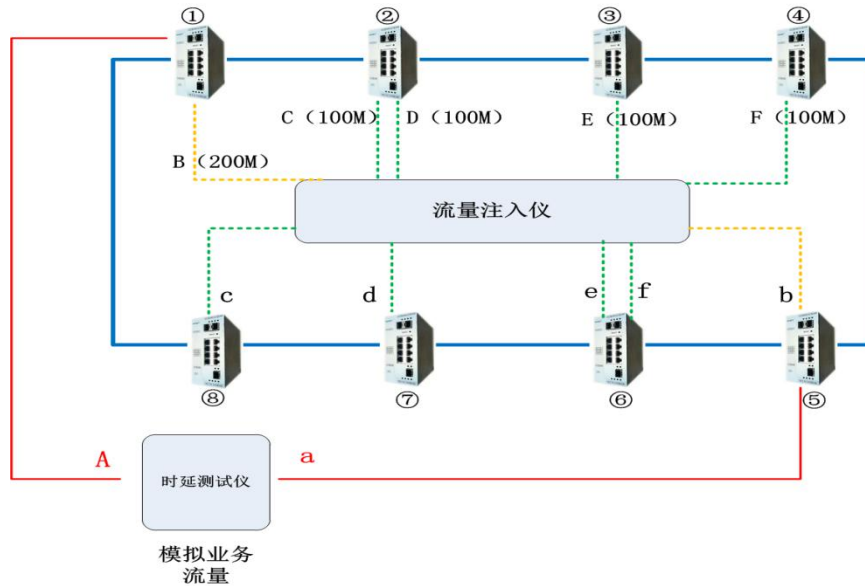


图 7 确定性测试方案

如测试组网图，时延测试仪模拟 20M 业务流量（实时通道），以帧长 64、128、256、512、1024、1280、1518 进行发送和接收，A<->a 为双向流，接入环网中距离最远的 2 台交换机。

在 NE9000 上配置 A<->a 的测试流进入交换机的实时通道。测试过程中，交换机一直处于时间同步功能开启状态（1s 对时 1 次）。

使用流量注入仪进行 600M 背景流量注入（标准通道）：

B<->b 注入双向/200M/1500 字节的流量；

C<->c 注入双向/100M/1500 字节的流量；

D<->d 注入双向/100M/1500 字节的流量；

E<->e 注入双向/100M/1500 字节的流量；

F<->f 注入双向/100M/1500 字节的流量；

测试数据：存储转发时延表示测试仪 A 端口到 a 端口的整个过程（经过整个网络）的端到端时延。

测试结果汇总

帧长(字节) 占有率(%) 最小存储转 平均存储转 最大存储转 时延抖动 us(最大-最小)

		发时延(us)	发时延(us)	发时延(us)	
64	20	10.056	12.347	14.456	4.4
128	20	11.016	13.287	15.336	4.32
256	20	13.096	15.362	17.416	4.32
512	20	17.176	19.44	21.496	4.32
1024	20	25.416	27.626	29.656	4.24
1280	20	29.496	31.721	33.656	4.16
1518	20	33.256	35.53	37.496	4.24

Frame Length (Bytes) Share (%) Minimum Storage and Forwarding Delay (US), Average Storage and Forwarding Delay (US), Maximum Storage and Forwarding Delay (US), Delay Jitter (Maximum-Minimum)

测试结论：通过 NE9000 的快速通道，在 600M 的背景流量情况下，不仅保障了低时延传输，更提供了稳定的确定性，时延抖动在 $2\mu s * n$ 的范围内。

5.2 可靠性功能测试

测试目的：网络支持零自愈网络，在链路中断时，数据不丢失。

测试方法：

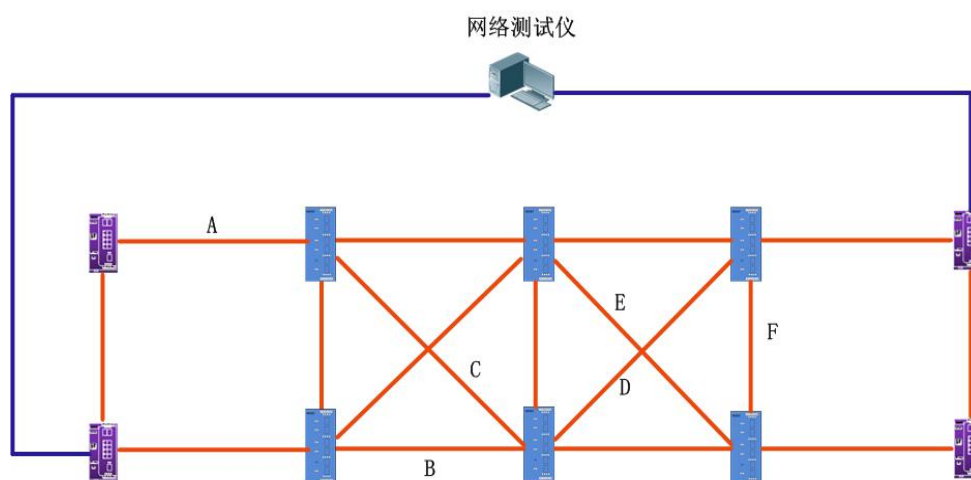


图 7 可靠性测试方案

如图搭建测试环境，使用网络测试仪以帧长 64、128、256、512、1024、1280、1518 进行发送和接收，速率为 100M。

依次断开 A、B、C、D、E、F 链路；

恢复 A、B、C、D、E、F 链路

测试结论：在网络测试仪发送和接收数据过程中，依次断开 A—F 链路，发送端数据包数量与接收端数据包数量一致，数据无丢失。

5.3 安全性功能测试

测试目的：可对网络中接入的设备进行非接触式监听，能够实时采集到设备的通信报文。

测试方法：

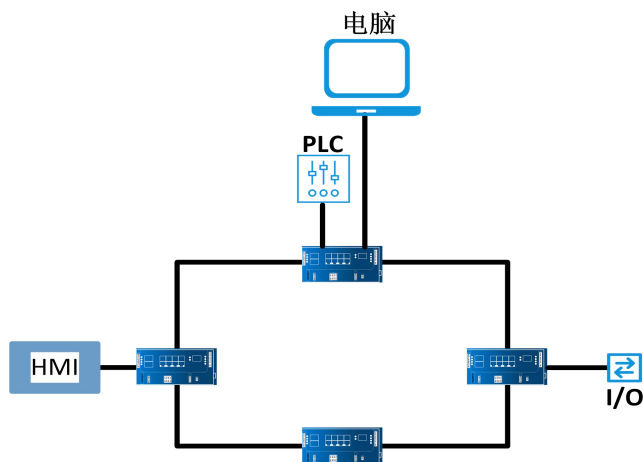


图 8 安全性测试方案

如图搭建测试环境，PLC 定义为被监听对象，在 PLC 与 I/O 通信过程中，PLC 收到的所有数据包将被实时获取。

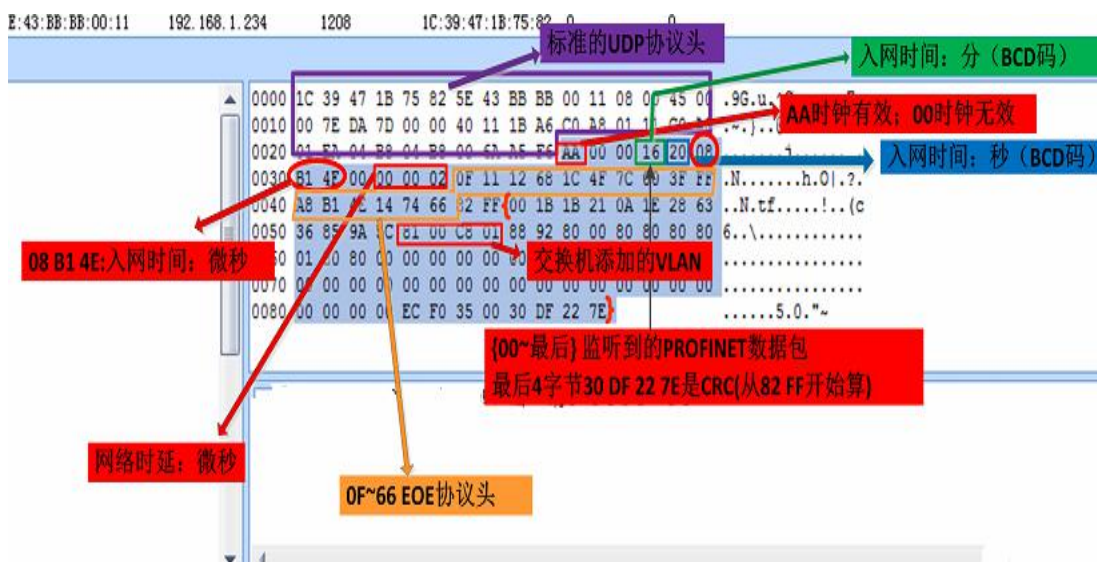


图 9 监听功能测试结果

测试结论：如图所示，以 PLC 某一包数据报文为例，监听数据包信息包含了 PLC 原始通信数据报文、报文入网时间、报文传输时延等。

6. 结论

结合机载系统对于通讯技术的需求，本文在可靠性、实时性、安全性等方面对 TAN 技术进行了充分

的原理分析及性能测试。基于 TAN 技术设计的机载集成网络支持复杂拓扑，能够将机载系统发出的数据生成多份（2-4 份）同时在网络中进行传输，从而保证在网络出现故障时，机载各系统间的正常通讯，提高了网络的健壮性；同时，网络系统还提供了双通道架构（实时通道、标准通道），双通道机制可以将机载系统进行优先级的划分，保证系统数据传输的确定性，且通道之间的数据互不影响；此外，网络具备诊断监听的能力。网络拓扑、网络故障点等能够实时显示，机载系统间的通信路径可观察，网络传输路径不再是不可见的，而能够做到实时观察，对于某些重要的机载系统或设备，能够对其进行实时监听，保证其通讯的可靠性。通过实验室环境下的原理测试，验证了 TAN 技术的有效性。基于 TAN 技术设计的机载集成网络集成度高，可靠性好，具有一定的技术先进性和广阔的市场应用空间。

参考文献：

- 1 熊华钢, 王中华.先进航空电子综合技术[M].北京: 国防工业出版社, 2009.
- 2 刘晓敏.机载光传输网络组网与生存性能分析研究[D].北京: 北京航空航天大学, 2014.
- 3 潘勇, 黄进勇, 胡宁.可靠性概论[M].北京: 电子工业出版社, 2015.
- 4 章筠.计算机网络可靠性分析与设计[D].杭州: 浙江大学, 2012
- 5 邱爱华, 张涛, 顾逸东.航天器可应用实时以太网分析[J].空间科学报, 2015, 35, (3): 368-380.
- 6 熊华钢.机载高速数据总线系统研究[D].北京: 北京航空航天大学, 2004
- 7 姜振.航空电子统一网络关键技术研究[D].北京: 北京航空航天大学, 2004
- 8 林强.基于光纤通道的航空电子统一网络实时通信研究[D].北京: 北京航空航天大学, 2005
- 9 陈彩, 熊华钢, 罗志强.多路数据总线通讯传输方案优化[J].电光与控制, 1996, 3: 31-36.
- 10 刘成.时间触发 AFDX 网络关键技术研究[D].北京: 北京航空航天大学, 2013
- 11 何峰.航空电子系统综合调度理论与方法[M].北京: 清华大学出版社, 2017
- 12 熊颖.机载时间触发光网络关键技术研究[D].北京: 北京航空航天大学, 2017