

时间同步技术在机载以太网中的应用研究

严莉¹ 杨敏跃¹ 张志平¹ 刘永强¹

YAN Li YANG Minyue ZHANG Zhiping LIU Yongqiang

摘要

随着现代飞机航电系统的发展,在分布式开放型系统架构下,以太网技术被应用于飞机机载任务系统的通信和数据传输中。机载任务系统是一类对于实时性要求较高的系统,各网络节点需要精确的时间同步。因此,需对各时间同步技术进行研究。对同步以太网(SyncE)、卫星授时、AS6802协议、IEEE1588协议等方案的起源、原理、特点以及目前的应用情况进行了介绍,并分析了各种技术的优缺点、机载以太网环境下的适用性。最后,对各技术进行了总结对比,对未来机载以太网时间同步方案的发展进行了展望。

关键词

机载以太网;时间同步;SyncE;AS6802;IEEE1588

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.09.003

0 引言

由于机载网络往往随着航空电子系统的发展需求而演进,随着现代飞机机载任务系统的数字化和网络化程度的提高,航空电子系统逐渐从封闭式模式向分布式开放型系统架构转换^[1],机载网络也从最初的总线式网络向交换式网络、从传统FC网络向更具开放性的以太网发展,机载以太网作为一种高速数据传输和通信方式,逐渐成为飞机系统中不可或缺的一部分。

在飞行过程中,飞机各个子系统之间需要进行精确的时间同步,以确保数据传输的准确性和系统的稳定性。区别于传统总线式网络与FC网络中的时间同步技术,以太网时间同步技术有其特有的开放性兼容性,种类繁多,原理不同,各有其特点,因此本文对其进行了总结与比较。

在当前研究中,时间同步技术可能指频率同步或相位同步。频率同步又称时钟同步,是指在分布式系统中各节点时钟走时的快慢一致,各节点允许保持一个固定的时间差。相位同步是指通过一定方式保持各网络节点任何同一时刻呈现的时间一致,或误差值在允许范围内,高精度的相位同步往往需要建立在频率同步的基础上。

除了精度,稳定性也是时间同步重要技术指标,通常通过测量时间差并持续观测记录后求方差衡量。机载环境要求微秒级同步精度,对同步的稳定性有一定要求,硬件成本、抗干扰能力、设备扩展性也需考虑,因此本文从各以太网时间同步技术原理和当前技术发展的角度一并探讨了在机载环境的应用情况或应用能力。

1 同步以太网

同步以太网(synchronous ethernet, SyncE)是一种通过在物理层上传递时钟信息实现频率同步的方案,于2006年由国际电信联盟(ITU)提出,SyncE相关标准包括G.803、G.8260、G.8261、G.8262、G.8264、G.781及G.784^[2]。SyncE的工作原理是在两台直连设备物理层传输的串行数据流中插入时钟信息,在接收端利用锁相环技术,对接收到的物理层信号进行时钟恢复,并利用恢复出来的时钟信息校准本地时钟频率,然后继续传递给下一级时钟做参考,通过逐级传递使全网的时钟同频。

根据其原理可以发现,SyncE技术不影响上层网络数据包传输,反之,网络丢包、延迟拥塞也不影响时钟信息的传递,因此具有同步质量好,简单易于实现的特点。其缺点在于SyncE技术的时钟发送与提取工作是由底层网络接口卡中的PHY芯片完成,部分低速以太网芯片不支持该功能。但随着高速以太网在机载领域的应用和发展,SyncE要求的全网所有设备均支持SyncE将在未来得以实现。

SyncE技术目前在5G通信网络基站中研究较多,例如文献[3]详细介绍了5G设备SyncE电路设计、以太网PHY接口设计、程序设计。除此之外,由于其仅实现频率同步,不影响高层时间报文传输,也可与其他网络时间同步协议结合使用,使其可以达到更加高的同步精度^[4]。如有硬件支持,这种结合方式非常适用于机载嵌入式环境,补充了网络同步协议持续报文对实时网络拥塞带来的同步误差。

2 无线电波授时

无线电波授时包括短波授时台(BPM)、长波授时台

(BPL) 以及最常用的卫星授时。由于短波授时精度不高, 以及我国北斗卫星系统的建设与发展, 目前短波授时通常作为辅助手段使用^[5], 长波授时则在航海领域应用较广。各种无线电波授时的工作原理类似, 以北斗卫星授时为例, 是由卫星实时向地面广播无线电信号, 信号中携带协调世界时 (universal time coordinated, UTC) 信息, 由于卫星上使用的星载原子钟精密程度非常高, 使广播的标准时间信息十分精确。当地面接收机的位置固定与卫星距离已知时, 无线电波速即光速, 通过简单的乘法即可得到信号接收所需时间, 随之计算出地面接收机接收时刻。当地面接收机的位置不固定时, 通过多个卫星, 将位置坐标及信号接收时间作为未知数构建方程组, 可以同时解出位置信息和标准接收时刻, 然后对本地时钟振荡器进行驯服^[6]。

采用卫星直接授时方法时, 各个设备通过接收器来直接获取同一时钟源信号, 这种方法同步误差小, 成本低、覆盖范围广, 但由于授时的偏差受大气层参数变化、电磁效应等周边环境的影响, 抗干扰能力差^[7]。另外, 部分嵌入式环境下各节点时间通常只需同步, 并不需要和 UTC 一致。卫星授时全网并不适用于机载环境, 通常与其他同步技术结合使用。

3 网络时间协议

网络时间协议 (network time protocol, NTP) 由美国 Delaware 大学 Mills 教授于 1985 年提出^[8], 经历近 40 年发展, 目前有五个版本, 最新版本为 2010 年提出的 NTPv4, 新版改进了安全性认证和时钟选择能力且支持 IPv6 网络。除此之外, 发展出简单网络时间协议 (simple network time protocol, SNTP), 它是 NTP 的子集, 不提供错误管理和过滤等^[9], 用于跨广域或者局域网同步。NTP 协议原理如图 1, 通过客户端主动向时间服务器发送时间请求 UDP 报文实现。

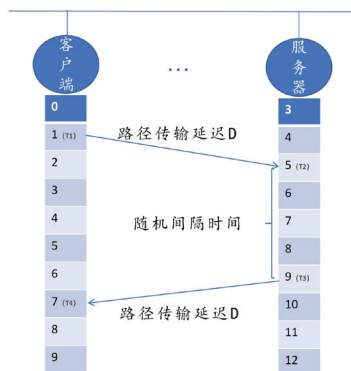


图 1 NTP 协议原理

通过时间服务器回复并带上其标准时间戳的报文交互过程, 客户端拥有了四个时间戳 $T_1 \sim T_4$, 从而计算传输占用时间 D (式 1) 以及本地时间和服务器时间差值 F (式 2):

$$D = [(T_2 - T_1) + (T_4 - T_3)] / 2 \quad (1)$$

$$F = [(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)] / 2 \quad (2)$$

目前的 NTP 服务器大多使用卫星授时作为网络时间基准^[10], 客户端通过与其主动且持续地发起请求实现同步。由于 NTP 基于 UDP 数据报传输, 传输延迟与网络负载相关, 存在延迟不对称, 建立在来回路径传输耗时一致的前提下计算的 D 和 F 会存在较大误差。纯软件方式获取的操作系统时间也会受到协议栈和系统调度影响, 因此同步精度一般在毫秒级^[11]。另外, NTP 仍旧存在较大的安全性问题, 使用时需聚焦于其安全性提升^[12]。

因此, 尽管 NTP 协议提供了一系列额外的机制和算法来保证协议的健壮性, 技术成熟且成本低廉, 但通过网络报文传输实现的同步的稳定性会受到网络延迟、网络拥塞的影响。目前仅用于对时间精度要求不高的复杂网络环境, 并不适用于机载这类对同步精度有着更高要求的网络。

4 精密时间协议

4.1 PTP 协议

精密时间协议 (precision time protocol, PTP) 最早于 2002 年由 IEEE 批准发布, 又称 IEEE1588 协议, 于 2008 年发布其 v2 版本, v2 版本不兼容 v1 版本, 且在路径延迟测量机制、报文格式及中继节点类型上有了改进^[13], 目前应用最广。

PTP 协议设计了主时钟动态选择算法, 选定主时钟后原理如图 2 所示, 类似 NTP, 但由主时钟发起同步, 从时钟通过报文交互中计算与主时钟时间差值, 并完成对本地时钟的修改, 同步过程由软件实现, 通信使用 UDP 或数据链路层收发帧均可, 分为 E2E 模式与 P2P 模式。E2E 模式下从节点测量的是到主节点整段链路的延迟, 部分中继节点可以对驻留时间进行补偿添加到时间同步报文之中会更精确; P2P 模式则是分段测量路径延迟, 时钟节点只保存自身与相邻节点的延迟数据, 通过 SYNC 报文经过路径点延迟及驻留时间被不断添加入报文中得到总延迟, 从而计算主从时间差。

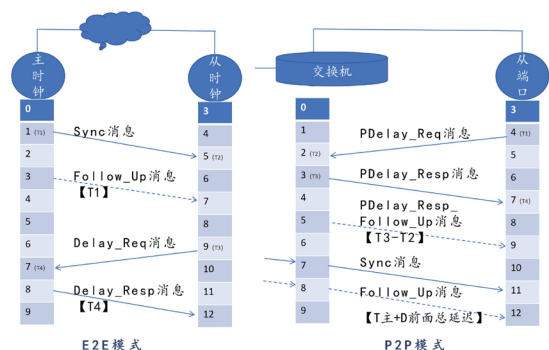


图 2 PTP 协议原理

根据协议原理, 需要获取 $T_1 \sim T_4$ 四个时间戳, 通常采用硬件方式获取, 准确度高, 而软件只执行报文解析、发送

与延迟测量算法。如今国外各大公司相继推出了支持 PTP 协议时间戳的 MAC 模块，国内相关领域的厂商也已经生产出能够支持 PTP 的硬件，并形成了一定的应用规模^[14]，因此，目前可用专门的芯片来实现高精度时间戳的加盖^[15]。考虑低成本时，PTP 报文的检测及时间戳加盖也可以在原有硬件的基础上，通过 FPGA 逻辑编程实现，还可以与 NTP 协议一样通过纯软件方式获取系统时间实现，但精度会有一定影响。PTP 协议实现方式多样，其中软硬件结合方式由于在精度和成本中做了平衡，同步精度可达亚微秒级，在机载嵌入式领域应用广泛。

4.2 PTP 相关协议

目前车载环境常用的时间敏感网络（TSN）协议簇中规定的 802.1AS 时间同步协议是对 PTP 具体实现方案的一个侧写，又称 gPTP 协议，固定规定延迟测量为 P2P 模式，采用数据链路层收发帧实现^[16]，并扩展了上层媒体层标准。P2P 模式需要交换机等中间节点具备延迟补偿和相邻路径延迟测量能力，若中间节点存在普通交换机，则不可行，通常当全网设备都支持 P2P 时，gPTP 协议才用于机载环境。

除此之外，欧洲核子研究组织（CERN）和德国重离子研究中心（GSI）在 2008 年提出的 White Rabbit（WR）时间同步技术是基于 PTP 时间同步的重大改良，综合了 SyncE 频率同步以及全数字双混频鉴相器 DDMTD 技术，实现了千兆光纤网络的亚纳秒级时钟同步^[17]。由于结合了 SyncE 频率同步，不再需要 PTP 主时钟高频率的传送同步报文来持续时刻一致，又可以通过 DDMTD 将主从时间差线性放大来提高测量精度，通过计算路径延迟时引入光纤非对称系数消除往返延迟不一致的误差，WR 技术具有极高的同步精度，通常在皮秒级。但 WR 技术对于硬件环境有着高要求，通常用于国家大型科学测量中心，例如中国的 LHAASO 项目^[18]。在国外，俄罗斯的 Tunka-HiS-CORE 宇宙射线探测器^[19]、地中海下的立方公里级中微子望远镜^[20]和契伦科夫望远镜阵列^[21]也采用了 WR 技术作为时间同步方案。WR 技术因其兼容性不佳，无法集成光纤以外的设备，并不适用于目前的机载以太网环境，随着光纤通信在机载环境的普及，未来将具有应用价值。

5 AS6802 时间同步

AS6802 是 2011 年由 SAE 提出的时间触发以太网（TTE）标准^[22]，可以增强通信确定性，其中规定了一种容错性高的时间同步技术作为时间触发通信的基础，同步精度在微秒级。它将设备节点分为同步控制器（SM）、压缩控制器（CM）和同步客户端（SC）。如图 3 所示，各设备通过数据链路层帧交互实现同步，由 CM 负责接收由各个 SM 定期

发出的 PCF 帧，执行固化算法修正发送时刻，开启压缩算法计算出时间“均值”，将这一基准时间加载于 PCF 中再反馈至网络中 SM 节点以及 SC 节点，SM 和 SC 接收后调整本地时间^[23]。

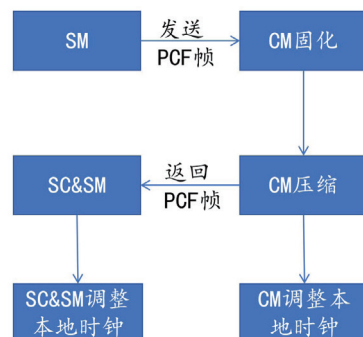


图 3 AS6802 时间同步原理

AS6802 同步基准是全局时间不受单点故障的影响，并且在继承 PTP 透明时钟路径延迟累加、时间戳加盖的基础上增加自身独有的容错机制，包括冷启动服务握手、压缩计算的观察窗、各种功能模型的接收窗以及结团检测等，从而很好地解决了 IEEE 1588 的局限性^[24]。

当下 TTE 技术几乎完全被计算机技术公司 TTTech 所垄断，该公司推出的多款商用 TTE 设备已在国际航空电子系统和汽车工业等领域的研究中得到广泛应用。但国内对于 TTE 的研究和应用总体尚处于起步阶段，且 TTE 并不支持底层的传输确认与重传，不支持高优先级的非周期事件处理，在航空航天等安全关键系统应用上依然存在一些隐患和缺陷^[25]，故而伴随着的时间同步技术也较少实际采用。

6 总结与展望

当前研究中，时间同步各种协议和方案被提出并得到验证。通过综述和分析，可以得出表 1 结论。同步以太网（SyncE）、卫星授时、NTP 协议、AS6802 协议及 PTP 相关协议等方案都具有各自的优缺点和适用性，选择合适的方案应根据具体硬件设备环境、精度要求、成本预算等进行。例如，与商用以太网不同，机载网络拓扑结构固定，因此侧重拓扑自适应的时间同步协议并不需要。部分嵌入式环境下处理资源有限，因此复杂性较高的同步技术并不适用。随着飞机航电系统的不断发展和高速无损网络技术的进步，时间同步技术在机载以太网中的应用还有进一步改进和发展的空间。例如，随着网络接口卡处理资源的扩展，时间同步所需软件可以通过改良轻量化地实现在网络接口卡中运行，降低对主处理器资源的占用。再如，随着支持时间同步高精度时间戳加盖的硬件的使用，配合路径延迟滤波及动态频率补偿算法，可以进一步提高同步的稳定性。同时，

若开辟新的可能性，结合人工智能和物联网等新兴技术，可以探索更加智能化的时间同步方案，推动航空电子系统的不断进步和完善。

表 1 时间同步方案对比

	SyncE	卫星授时	NTP	PTP	WR	AS6802
功能	频率同步	相位同步	相位同步	相位同步	相位同步	相位同步
实现	物理层	物理层	传输层	数据链路或传输层	物理和数据链路层	数据链路层
精度	—	—	毫秒	亚微秒	皮秒	微秒
优点	稳定性	可靠性	便捷性	多样性	高精度	容错性
缺点	成本高	抗干扰差	安全性及精度低	容错性差	兼容性差	复杂性高
应用	5G 基站	国家授时中心	因特网	物联网	科学测量中心	航空航天网络

总的来说，随着机载网络发展到以太网阶段，时间同步的重要性凸显，时间同步技术在机载以太网中的应用研究具有重要的理论意义，可为机载以太网时间同步方案的设计、实际应用的考量、未来创新发展的方向提供综合化的思路。

参考文献:

[1] 孟悦,王世奎,刘智武.机载时间敏感网络关键技术研究[J].航空计算技术,2023,53(4):130-134.

[2] International Telecommunication Union. Timing and synchronization aspects in packet networks: G.8261[S]. Geneva, Switzerland: ITU, 2006.

[3] 邓兵.同步以太网在 5G 网络设备中的应用[J].科技创新与应用,2022,12(14):167-171.

[4] 李由由.基于 PTP+SyncE 的时间同步技术研究[实现][D].西安:中国科学院大学(中国科学院国家授时中心),2021.

[5] 左兆辉,淮鸽,戴群雄.短波授时在高精度授时领域的应用[J].计算机与网络,2021,47(24):55-58.

[6] 刘娅,李孝辉,赵志雄,等.基于北斗卫星的纳秒级全球授时系统[J].导航定位与授时,2022,9(3):14-22.

[7] 左兆辉,戴群雄,王铮.基于导航卫星的高精度授时技术[J].集成电路与嵌入式系统,2024,24(1):78-82.

[8] 王震,满令伍,张道伟.基于 NTP 的轻量化时间同步设计[J].指挥信息系统与技术,2022,13(2):91-94.

[9] 迟宗岭,宋宪均,高景斌.SNTP 协议分析及其在 CPR1000 系统中的应用[J].自动化博览,2021,38(10):64-67.

[10] 孙桀,徐刚.基于北斗卫星导航系统的 NTP 服务器设计[J].信息技术与信息化,2019(9):137-139.

[11] 龙波,张宇,黄徐瑞晗,等.基于 NTP 协议的网络授时系统设计[J].计量与测试技术,2019,46(5):1-2.

[12] 张旭博,黄河,廖章梁.NTP 协议安全分析[J].通信技术,2020,53(11):2806-2810.

[13] IEEE.Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems: IEEE Std 1588-2008[S]. American:IEEE, 2008.

[14] 李培基,李卫,朱祥维,等.网络时间同步协议综述[J].计算机工程与应用,2019,55(3):30-38.

[15] 韩一德.基于 IEEE1588 协议的高精度时钟同步系统研究与实现[D].太原:中北大学,2021.

[16] IEEE.Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications: IEEE Std 802.1AS-2020 [S]. American: IEEE, 2020.

[17] 方维.White rabbit 时间同步技术研究与应用[D].杭州:中国计量大学,2021.

[18] 李成.大型物理实验装置高精度时间同步技术研究[D].合肥:中国科学技术大学,2012.

[19] PORELLI A, BOGORODSKII D, BRÜCKNER M, et al.Timing calibration and directional reconstruction for Tunka-HiSCORE[J].Journal of physics,2015,632:012041.

[20] MUSICO P.The central logic board for the KM3NeT detector: design and production[J]. Nuclear instruments & methods in physics research,2016,824:322-323.

[21] AHARONIAN F, AKHPERJANIAN A G, BAZER-BACHI A R, et al. Detection of extended very-high-energy gamma-ray emission towards the young stellar cluster Westerlund 2[J]. Astronomy & astrophysics, 2007,467(3):1075-1080.

[22] Gooch J W.Society of automotive engineers[M].Encyclopedic Dictionary of Polymers.Berlin:Springer Science+Business Media, LLC, 2011:673.

[23] 陈思成.基于 AS6802 的 TTE 同步机制的设计与实现[D].西安:西安电子科技大学,2023.

[24] 曹家亮.基于 AS6802 的分布式系统时间同步技术研究[D].西安:西安电子科技大学,2022.

[25] 张振刚.时间触发以太网 TTE 的时间特性辨析[J].电子元器件与信息技术,2018(10):59-62.

【作者简介】

严莉(1998—),女,湖北大悟人,硕士研究生,研究方向:计算机网络。

(收稿日期: 2024-06-04)