

面向时间协同的巡飞弹集群信息采集控制方法

李健一¹ 楚要钦¹ 李航¹

LI Jianyi CHU Yaoqin LI Hang

摘要

为了适应更加复杂的作战环境,巡飞弹集群协同打击成为重要发展方向。集群协同可以在不提升单机复杂度的情况下,利用共享信息有效提升制导精度。在协同作战中,信息融合是实施精准打击的重要手段,然而存在多传感器采集到的信息时间不一致的问题,导致融合后的精度不高。对此,提出一种面向时间协同的巡飞弹集群信息采集与控制方法,通过采用时间触发(TTP)总线实现系统内与系统间的时间同步,利用本地UTC时间控制数据的同步采集和纳秒级别的时间戳标注,能有效获得相同时刻的采集数据,提升信息融合效果。同时,在三个节点上进行了TTP同步通信的硬件实现和验证,为后续工作奠定基础。

关键词

时间协同;巡飞弹;集群;时间触发;TTP

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.08.027

0 引言

随着制导技术的发展,集群协同技术越来越多地被关注。无论是从仿生学角度,还是从工程领域已经取得的研究成果来看,协同多个个体共同完成某一任务可以取得比单个个体更加优异的性能。尽管在多年发展过程中,导弹的精度、速度、力度均得到了快速提升,但在导弹制导任务中,单枚导弹在探测范围、制导精度和打击效果等方面仍然具有很大的局限性^[1]。例如在红外导引头探测过程中,可能受到诱饵弹、太阳强光等因素的影响,导致跟踪失败。然而,如果使导弹集群构成网络,则可以通过多弹协同、信息共享的方式提升整体制导精度,并有效增强打击力度。

面对越来越复杂的战场环境,若想进一步提升单枚导弹制导精度和速度,就需要通过改进软件和硬件增强导弹性能。比如设计更加复杂的目标检测算法,增强制导时的抗扰能力;使用雷达/红外双模导引头^[2],利用两者间的互补性增强全程制导能力。这些方法提高了对算力、空间等方面的要求,势必会对硬件设计和结构设计带来极大挑战。同时,导弹设计倾向小型化、轻量化,除了在结构设计上进行优化外^[3],还要考虑功能简化。使用多弹协同方式可以减轻对单枚导弹能力的需求,通过不同功能巡飞弹间相互配合,可以增强整个作战系统的效果。

巡飞弹集群共享信息可以获得目标的多角度信息,通过信息融合、协同控制技术能够提升制导精度、增强打击效果。为了获得准确的制导率解算结果,在多传感器信息融合时需要使用集群中不同巡飞弹在同一时刻采集到的数据。

同时,在单个巡飞弹内部各个设备间也需要做到同步信息采集和控制信号输出,使高速巡飞弹的作动更精准。因此,单个巡飞弹系统内与集群系统间的时间协同信息采集和控制就尤为重要。

1 巡飞弹集群时间协同通信框架构建

巡飞弹系统内的通信节点一般包括飞控计算机、卫星接收机、数据链和惯导、舵机等节点。飞控计算机是通信架构中的控制中心,负责与巡飞弹内部所有分系统进行通信,并通过电源实现对其他节点的上电控制。数据链是巡飞弹内部通信与巡飞弹之间通信的信息交换中心,通过系统内总线自动收集巡飞弹内部各设备传感器信息,传输给集群其他巡飞弹,同时接收来自集群的信息在系统内分发。卫星接收机通过全球导航定位系统获得巡飞弹的精确空间位置和UTC时间,提升精确制导能力^[4]。

为了保证系统内与系统间的同步信息采集与控制,需要选择具有时间同步特性的系统内通信总线,保证各节点在信息采集与控制时参考相同时钟,提高多传感器信息采集同步精度,实施精准控制。在实现系统内各节点信息采集同步的基础上,进一步实现集群间共享信息的时间同步。导弹系统内时间同步是一个重要的研究方向,已有学者在此方面做出系统设计,如秒脉冲时间轴开窗保护方法^[5]。

1.1 面向时间协同的系统内总线选择

目前巡飞弹内部总线类型有多种,主要有RS422/RS485、1553B等,其中RS422/RS485采用单余度差分线形式,主从节点之间采用点对点通信,从节点之间无法通信^[6]。该类型总线使得巡飞弹内部线缆多、通信效率低、系统互联

复杂,信息难以在整个系统内及时传输,并且协议不具备时间同步功能,无法实现系统同步。1553B 总线为双余度通信总线,由总线控制器(BC)、远程终端(RT)和总线监控器(BM)构成,各节点采用总线型连接,由 BC 发送命令字控制 RT 发送或接收总线数据。RT 节点之间进行数据传输前,需要 BC 节点向两个 RT 节点分别发送相应的命令字控制此次通信^[7]。因此,1553B 总线也存在通信效率低的问题,且其单节点成本高,无法提供系统时间同步。

从系统各节点时间同步以及通信效率的角度进行考虑,选择总线型连接的时间触发协议(TTP)总线作为系统内通信总线。TTP 定义了全局时钟的概念,所有数据传输活动都基于全局时钟进行,由全局时钟可以获得系统内统一的全局时间。系统利用这样的通信协议可以使参与通信的各节点基于全局时间进行数据收发。TTP 的核心在于通过容错机制和通信节点的分布式时钟修正算法,使得各节点遵循的工作时钟保持一致,这个一致的时钟即为全局时钟。因此,TTP 有效保证了各节点工作的时间同步性,形成多传感器信息同步采集的硬件基础。

总线型的 TTP 支持挂在总线上的各节点进行一发多收型通信,减少了线缆连接数量,有效简化系统交联关系。TTP 总线按照预设置信息,进行周期性通信调度,预设置信息存放在 MEDL 表中在初始化时进行配置。将一个完整通信周期称为簇周期,其中包含多个 TDMA 周期。每个 TDMA 分为多个时间槽,用以分配给通信节点做数据发送。在调度中每个通信节点只能在分配给自己的时间槽内发送数据,此时总线上其他节点均可接收数据,无总线冲突,通信效率较高。时间槽的划分基于全局时钟,因此各节点通信时间是系统内同步且确定的^[8]。簇周期和时间槽划分如图 1 所示。

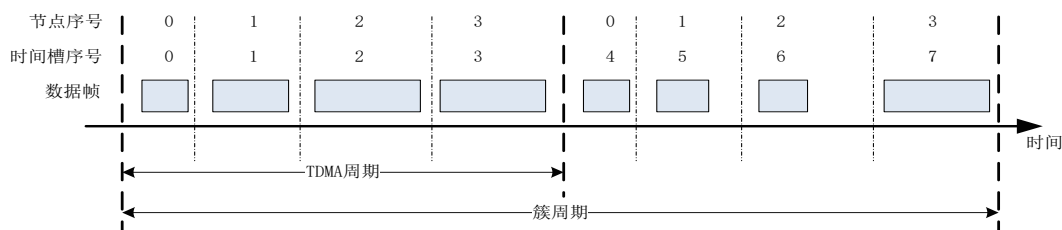


图 1 簇周期及时间槽划分示意图

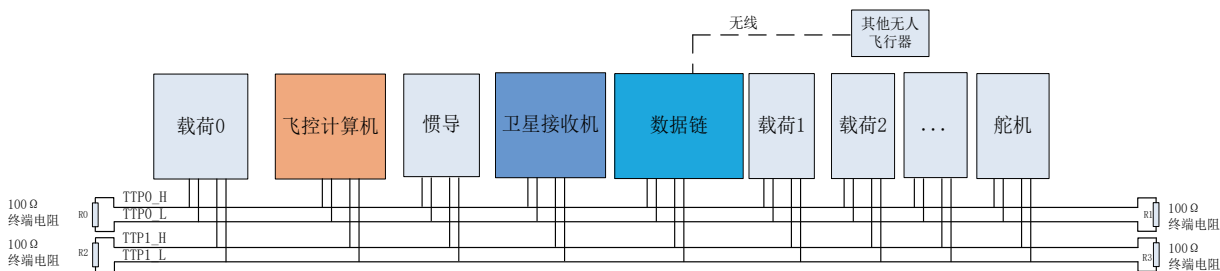


图 2 基于 TTP 总线的时间协同通信框架

1.2 基于 TTP 总线的时间协同通信框架

TTP 总线可设置为双余度通信,采用差分信号传输,增加通信可靠性。基于 TTP 总线的集群时间协同通信框架如图 2 所示,其中单个巡飞弹系统内包括飞控计算机、卫星接收机、数据链、惯导、舵机、任务载荷等通信节点,系统内的同步通信靠节点按总线配置收发数据完成。飞控计算机节点负责 TTP 总线型网络通信模式的确定及变更,通过配置加载 MEDL 表实现。数据链节点用于和集群中的其他巡飞弹进行信息交互,它通过 TTP 总线收集系统内各节点的采集数据,也向各节点分发来自其他巡飞弹的共享信息。

卫星接收机节点的内部时钟精度最高,在做分布式时钟同步时可将其看作主时间节点,不对其进行本地时钟修正操作。其他节点作为从时间节点通过 TTP 总线完成分布式时间修正算法,使本地时钟与卫星接收机的本地时钟同步,通过此方法可以实现系统内同步至卫星时间。由于卫星时间(UTC 时间)是统一确定的,当集群中每个巡飞弹的系统全局时间均统一至卫星时间后,整个集群的时间也实现统一,奠定了时间协同的基础。

系统启动完成同步后,各节点按照预设时间参与总线通信与信息采集。如惯导节点按照设定的定时周期,定时启动陀螺仪、加速度计等信息的采集并处理,按照 MEDL 表中分配的 SLOT 槽,定时将惯测信息通过总线广播给其他节点。

2 巡飞弹集群时间协同信息采集与控制

2.1 基于时间戳的信息采集与控制

集群协同作战通常采用信息融合技术提升作战能力,在融合时使用同一时刻采集到的多传感器数据则能进一步提升解算精度。因此,需要实现集群中各巡飞弹能够基于某个基准时间采集到同一时刻的数据。使用基于 TTP 总线的时间协

同通信框架，可以利用时间触发协议实现单个巡飞弹系统内的时钟同步，并可通过对协议的特殊设置，使得同步后的全局时钟为卫星接收机时钟，系统内的本地时间即为卫星接收机时间（UTC 时间）。集群中各系统内均完成 TTP 同步后，即可实现整个集群以 UTC 时间为全局基准时间进行数据采集、传输。

在具有全局基准时间的条件下，可采用基于预设时间的定时触发方式驱动离散量采集器、AD 采集器及其他类传感器进行数据采集，同时为采集到的数据标注时间戳。在做信息融合时，即可使用具有相同时间戳的数据协同解算。具体方法是在采集节点的处理器中预存需要采集数据的时间值，系统同步后正常运行并持续计算本地 UTC 时间。设置比较器比较本地 UTC 时间和预设时间，当二者一致时即产生采集触发信号。采集触发信号控制采集设备进行数据采集，将采集到的数据传回处理器，并将预设的采集时间作为时间戳加在数据上一并存储。

对于高实时性要求的控制信号，可采用同样的方式进行输出。使用比较器比较本地 UTC 时间和预设控制时间，当二者一致时，向离散量输出单元发送触发信号，使其输出控制信号。基于时间戳的信息采集与控制框架如图 3 所示。

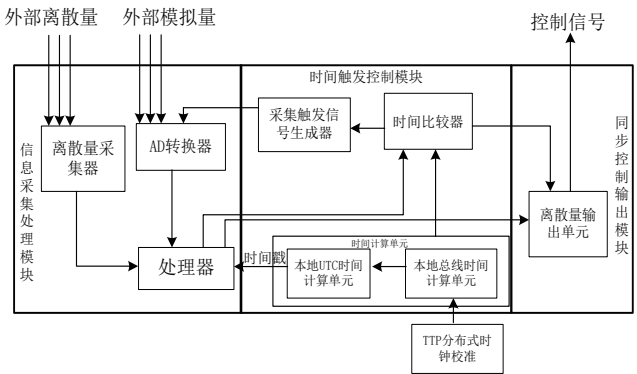


图 3 基于时间戳的信息采集与控制框架

2.2 基于 TTP 总线的本地 UTC 时间获取

具体而言，在 TTP 中定义了系统内每个节点本地的细粒度时钟（mt）和粗粒度时钟（MT），其中系统全局时钟参考 MT，mt 对应节点本地晶振产生的时钟。在一个系统完成 TTP 分布式时间同步后，各节点可以根据系统完成同步后经过的 MT 和 mt 个数，计算出本地总线时间。由于各节点经过 TTP 的时钟修正后 MT 的同步精度可以达到纳秒（ns）级，因此使用此方法计算出的不同节点本地总线时间之间的误差也为 ns 级。该误差对于信息融合的影响很小。

节点的本地 UTC 时间是指各节点基于自身时钟与卫星接收机时间计算出的 UTC 时间。该时间可以在获得本地总线时间的基础上，结合卫星接收机秒脉冲对应的 UTC 时间

计算得到，各节点间的本地 UTC 时间误差在 ns 级，与实际 UTC 时间的误差由秒脉冲精度决定，通常在 1 μ s 内。得到本地 UTC 时间后，可以完成基于时间戳的信息采集与控制，且该时间戳可以精确到 ns 级别。

3 巡飞弹内通信节点硬件验证

3.1 节点系统架构

在系统中，每个挂在 TTP 总线上的通信节点都具有相同的架构，如图 4 所示，节点包括带有处理器的主机、TTP 协议控制层、编解码层、隔离驱动层。

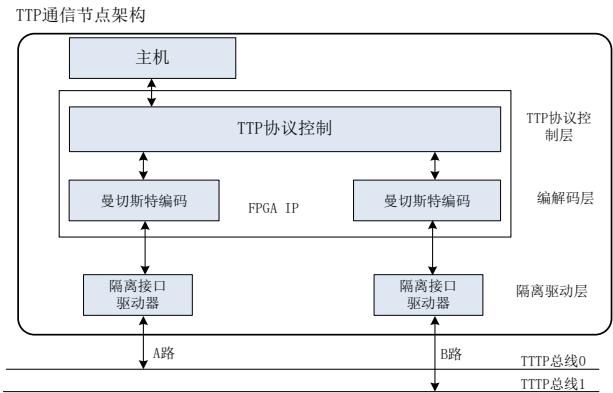


图 4 TTP 通信节点架构

其中，主机用于配置加载并解析 MEDL 表，按预设时间槽将发送数据放入对应的地址空间，同时从相应地址空间取走接收到的总线数据。TTP 协议控制层具备数据链路层特点，完成 TTP 不同类型帧的打包和解析，并按照 MEDL 表的时间槽分配进行数据收发控制^[9]，实现节点成员的协议状态转换，识别总线故障并完成兼容操作。同时，TTP 的分布式时钟同步也在该层实现。编解码层对帧数据进行编解码操作，通常使用误码率较低的曼彻斯特编码，通过电平跳变对二进制数据进行编码，具有很好的抗干扰能力，但数据传输速率为调制速率的一半^[10]。隔离驱动层用来连接总线和编解码层，将编码后的数据驱动后传输到总线上。同时，采用变压器隔离或电容隔离的方式对驱动器两端进行隔离，避免总线中节点故障对总线通信的影响。

在硬件设计时，对协议控制层和编解码层进行逻辑 IP 封装，IP 核可以灵活嵌入不同设备中，方便使用和移植。

3.2 多节点同步通信实现

在 TTP 验证系统的主节点上对 TTP 总线同步通信进行实现和验证。由于实现分布式时钟同步至少需要三个通信节点，除主节点外再设置两个 TTP 子节点（节点 1、节点 2）。各节点在 FPGA 上嵌入 TTP 协议 IP 核以实现 TTP 协议控制及编解码层。三个节点均选用集成隔离电源的容隔式驱动器实现隔离驱动层。为了保证 TTP 总线信号的质量和稳定性，

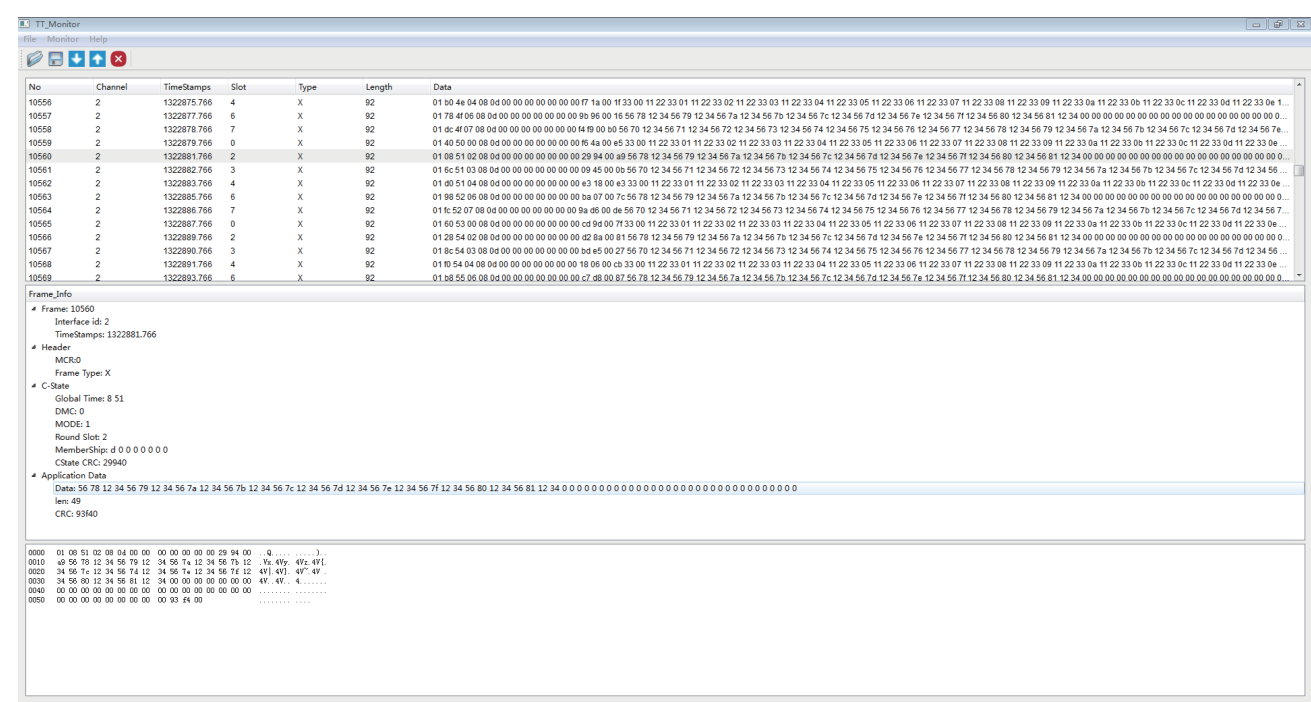


图 5 总线监控软件监控结果

TTP 总线使用千兆网线。通过使用两个隔离驱动器和总线连接，实现双余度传输。

测试时，首先对三个节点进行 MEDL 表配置，在一个 TDMA 中为每个节点均匀分配一个时间槽用于发送数据。在应用层封装 TTP 的发送、接收、MEDL 表解析函数，每个节点运行的数据发送测试程序中，先将 MEDL 表加载到逻辑中，并调用 MEDL 表解析函数对本节点的发送地址进行解析，再调用发送函数将自定义的数据放到正确的地址空间。FPGA 中的 IP 核可实现从地址取数据，并在分配给自己的时间槽中发送给驱动器。数据接收测试也遵循相同的流程。

使用串口和总线监控两种方式，对三个节点的时钟同步和数据收发情况进行监控。测试过程中，三个节点可以完成时钟同步，均处于 Active 协议状态。三个节点串口均可以正确打印出本节点的接收数据和发送数据，在总线监控软件上也可以看到总线传输的每帧数据的发送时间槽序号、帧类型，以及该帧中的数据信息，如图 5 所示。

4 结语

本文提出了一种面向时间协同的巡飞弹集群信息采集与控制方法，可以有效解决协同作战中信息融合时间不同步的问题。通过硬件实现验证了三个节点的 TTP 同步通信功能，说明了该设计的可实施性。目前 TTP 总线的速率最高可设置 5 Mbps，为适应越来越复杂的作战环境和对大量数据的传输要求，需要进一步提升总线通信速率。未来可使用支持百兆传输速率的 M-LVDS 收发器作为接口驱动，并采用更优编解码方式提升传输可靠度。

参考文献：

- [1] 赵恩娇. 多飞行器协同作战关键技术研究综述 [J]. 战术导弹技术, 2020(4):175-182.
- [2] 刘珂. 雷达 / 红外双模导引头技术在空空导弹上的应用展望 [J]. 航空兵器, 2018(1):15-19.
- [3] 罗楚养, 孙毓凯, 王文博, 等. 空空导弹结构技术的研究进展 [J]. 航空兵器, 2019, 26(5):1-10.
- [4] 罗建军, 袁建平, 刘祥林. 卫星导航系统的发展及其军事应用 [J]. 全球定位系统, 2001(1):25-29.
- [5] 张继国, 丁岐鹄. 某型地空导弹系统时间同步设计 [J]. 雷达科学与技术, 2018, 16(6):596-600+607.
- [6] 闫利军, 高志远. 基于 DSP 和 FPGA 的多通道 RS422 总线采集技术研究 [J]. 硅谷, 2014, 7(14):53-55.
- [7] 杜改丽, 封治华, 王勇. 1553B 总线协议分析及应用 [J]. 仪器仪表用户, 2007(2):6-7+12.
- [8] TTP Communication Protocol[Z]. Aerospace Standard, 2011.
- [9] 陈思, 葛红娟, 杨宗翰, 等. 基于 TTP 协议的飞机配电系统通信仿真研究 [J]. 航空计算技术, 2014, 44(6):95-99.
- [10] 付林, 任志平, 刘承杰. 基于 FPGA 技术的曼彻斯特编码器设计 [J]. 现代电子技术, 2007(17):55-56+59.

【作者简介】

李健一(1997—), 女, 河北邢台人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 嵌入式计算机。

(收稿日期: 2024-05-16)