

软件定义航空集群机载战术网络

赵尚弘, 陈柯帆, 吕娜, 王翔, 赵静

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077)

摘要: 航空集群是受生物集群行为启发而产生的一种全新航空作战力量体系, 在引发未来航空作战力量运用方式产生新变革的同时, 也将给作为集群成员间联系与沟通纽带的机载战术网络(ATN, airborne tactical network)带来全新的挑战。基于航空集群作战应用需求, 对航空集群机载战术网络(ATNAS, airborne tactical network of aeronautic swarm)进行了介绍, 分析了航空集群作战应用对航空集群机载战术网络的基本能力需求, 总结了将软件定义网络(SDN, software defined network)设计思想运用于航空集群机载战术网络构建的优势; 在此基础上, 提出软件定义航空集群机载战术网络(SDATN-AS, software defined airborne tactical networking for aeronautic swarm), 并对其基本架构进行了阐述; 归纳总结了软件定义航空集群机载战术网络的未来研究方向和挑战。对支持未来航空集群成员间高效信息交互的机载战术网络形态进行了探索, 为明确未来机载战术网络的演进方向提供了参考和借鉴。

关键词: 航空集群; 机载战术网络; 软件定义网络; 网络服务; 任务规划

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Software defined airborne tactical network for aeronautic swarm

ZHAO Shang-hong, CHEN Ke-fan, LYU Na, WANG Xiang, ZHAO Jing

(School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: Aeronautic swarm was a new kind of aeronautic operational system inspired by biological swarm behaviors. While leading to a new usage way of future aeronautic operational resources, aeronautic swarm would bring new challenges to the airborne tactical network(ATN), which was as a bond between the swarm members. Based on the operational demand of aeronautic swarm, the airborne tactical network of aeronautic swarm(ATNAS) was introduced, The basic capability requirements of ATNAS were analyzed, and the advantages of applying the SDN network design idea to the construction of ATNAS were also summarized. Then on the bases above, software defined airborne tactical networking for aeronautic swarm(SDATN-AS) was proposed. The basic architecture of SDATN-AS was described, and a series of future research directions and challenges relating to SDATN-AS were also summarized. A new exploration of the ATN's morphology was made which supported the efficient information interaction of aeronautic swarm members, and reference and guidance were offered for deciding the development orientations of ATN in the future.

Key words: aeronautic swarm, airborne tactical network, software defined network, network service, mission planning

1 引言

航空领域一直以来都是体系化全域战场的重要组成部分, 随着战争思想与具体技术的不断发展, 未来航空作战将面临高度不确定性、高度动态

性和高度对抗性的战场环境, 促使航空作战理念、模式不断演进。

实现作战能力全而强的航空平台长期以来都是军事航空领域的主要研究目标, 随着日益复杂化的战场环境对作战效能要求的不断提高, 受平

收稿日期: 2017-02-24; 修回日期: 2017-06-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61472443)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(No.61472443)

台载荷、平台机动性、平台隐身性、电磁兼容性等需求限制,令航空平台本身具备充分满足任务需求、灵活适应战场环境的多样化作战能力已变得愈加困难。使一定数量、能力各异的有人/无人航空平台组成航空集群,在复杂多变的战场环境中根据任务需求动态组织与协同,通过平台间作战能力的优势互补,灵活适应复杂多变的战场环境,已成为突破航空平台作战效能瓶颈、满足未来航空作战任务需求的重要途径。DARPA (defense advanced research projects agency)启动的小精灵项目、ONR(office of naval research)开展的低成本无人机蜂群技术项目等均可看作是未来航空集群的雏形。相较于传统机群以平台为中心的作战理念,航空集群更加强调以网络为中心,利用网络的高效信息交互能力,航空集群成员才能实现快速的反应能力、超强的决策能力、灵活的自组织能力和高效的协同能力,从而以网络优势为基础,依托体系优势,弥补航空平台自身作战效能的局限性。

目前,对于航空集群的研究各国均处于起步阶段,公开资料大都局限于对其进行笼统的应用展望。但可以确定,要实现航空集群的实际作战应用,必然存在大量亟待解决的重要科学问题,而构建一个符合未来航空集群作战应用需求的机载战术网络——航空集群机载战术网络,是航空集群发挥实际作战效能的关键。

现有 ATN 虽然在传输可靠性、端到端时延、传输速率等网络传输性能指标上,能够支撑现有航空作战模式下航空平台间一定程度的作战协同,但其本质上并非基于航空集群作战应用背景设计,面对未来航空集群作战应用需求依然存在许多问题^[1-5]:网络性能与特定网络技术标准、平台以及具体作战任务紧耦合,网络管理与配置过程复杂且僵化,使网络仅能满足有限任务背景下模式固定的信息交互需求,难以支撑航空集群各成员间的灵巧作战协同;在航空集群作战应用背景下,协同探测、协同跟踪、云攻击等新的作战方式的应用需要网络传输多元化信息内容并伴随着传输信息量的大幅提升,而现有 ATN 配置主要从网络传输性能角度考虑,与作战任务不具备灵活的耦合关系,导致网络中存在大量的冗余信息,网络配置结果往往不能很好地支撑任务所需高价值信息的高效传输;以各类数据链系统为代表的

网络设备大都采用封闭式设计,缺乏开放接口,且内部集成了大量复杂协议,技术标准多样,针对不同作战应用需求设计的网络设备难以实现互操作,使航空集群各成员间难以实现透明灵活的信息共享,并且造成网络服务能力扩展和升级的难度很大。

软件定义网络的出现为上述问题的解决提供了新的契机。SDN 使网络控制平面与数据平面分离,采用逻辑上集中的控制器基于开放的编程接口和全局网络视图对数据转发设备进行统一管理,简化了网络管理和配置操作,为网络的研究与发展带来了更为灵活开放的环境,有利于创新应用的部署以及网络架构的演进^[6-11]。SDN 范式在数据中心网络(DCN, data center network)上已得到了非常成功的应用,如 Google 部署了名为“B4”的软件定义网络用于连接其全球数据中心,实现了接近 100%的链路利用率,提升了网络配置效率,充分降低了网络配置与管理开销^[12]。将 SDN 范式应用在无线蜂窝网(WCN, wireless cellular network)^[13-16]、无线传感器网(WSN, wireless sensor network)^[17-19]、车载自组织网(VANET, vehicular ad hoc network)^[20-23]以及物联网(IoT, Internet of things)^[24,25]等新的网络领域的研究正在深入开展,理论与实验结果充分肯定了其优势。相较于地面网络,基于 SDN 构建机载网络还处于概念描述和初步探索阶段,但 Murugan 等^[26]和 Sampigethaya 等^[27]均指出 SDN 范式应用于机载网络能够带来众多优势,Gupta 等^[28]也指出将 SDN 范式应用于无人机机载网络会为未来无人机信息传输的问题提供全新途径。直观上来看,SDN 的灵活性、开放性、可编程性等优势正好可以弥补现有机载战术网络在航空集群作战应用背景下存在的弊端,具有较好的应用前景。

因此,为了满足未来航空集群作战应用对机载战术网络的需求,本文对航空集群机载战术网络形态和应具备的基本能力进行了阐述,进而以 SDN 范式为基础,提出了软件定义航空集群机载战术网络。SDATN-AS 是将 SDN 设计思想运用于航空集群机载战术网络构建的一次全新尝试,目的在于使机载战术网络能够从根本上较好地满足未来航空集群作战应用需求,并为机载战术网络的未来演进方向提供参考和借鉴。

2 SDN 与航空集群机载战术网络

2.1 SDN 介绍

SDN 是一种全新的网络范式，近年来，在工业界与学术界引起了广泛关注，得到了众多互联网厂商（如谷歌、思科等），以及标准化组织（如 ONF（Open Networking Foundation）、IETF（Internet Engineering Task Force）等）的大力支持。SDN 基本网络架构如图 1 所示^[29]，由 4 个平面构成，分别是应用平面、控制平面、数据平面和管理平面，以及 4 种接口，分别是北向接口、南向接口、东西向接口和管理接口。

数据平面由若干网络设备（路由器、交换机等）组成，这些网络设备主要承担以下 2 个功能。1) 收集网络拓扑、流量状态等网络状态信息，并将其发送给控制平面。2) 按照控制平面下发的网络配置策略对数据流进行相应处理；控制平面利用南向接口和北向接口桥接数据平面和应用平面，一方面将应用平面的请求映射到具体的网络设备上，另一方面为应用平面提供底层网络的抽象模型；应用平面包含了满足用户需求的各种网络应用，这些网络应用利用控制平面提供的可编程接口能够访问和控制数据平面的各种网络设备；管理平面则主要满足用户对网络的管理需求，如控制器的部署、网络设备的初始化配置以及网

络应用控制范围的定义等。

南向接口定义了控制平面与数据平面信息交互的基本方式；北向接口对底层网络视图和控制平面的控制功能进行抽象，使用户能够灵活开发所需网络应用；东西向接口用于实现不同控制器间的信息交互和功能协调；管理接口则负责支持管理平面对整个网络进行有效的网络管理。

一般来说，SDN 具备以下 4 个基本特征^[7,29,30]：

- 1) 控制平面与数据平面分离；
- 2) 依靠逻辑集中的控制器进行网络的配置；
- 3) 网络控制逻辑由硬件实现转变为由软件实现；
- 4) 具备标准化的编程接口。

2.2 ATNAS 概述

ATNAS 是在航空集群作战应用背景下支撑信息高效交互的机载战术网络。航空集群作战需要集群成员能够灵活生成满足作战任务需求的多样化作战能力。事实上，作战能力的生成主要是通过对平台搭载的计算资源、存储资源、感知资源（雷达、红外探测设备）、执行资源（空空导弹、电子干扰吊舱）等各类作战资源进行聚合来实现，因此，航空平台所搭载的各类作战资源是 ATNAS 的主要链接对象。如图 2 所示，ATNAS 向上与天基信息网络互联，向下与地面作战网络互联，由平台内部信息交互网络和平台间信息交互网络 2 个部分构成，分别对应实现平台所搭载作战资源在平台内部以及平台间的信息交互，前者是有线传输网络而后者

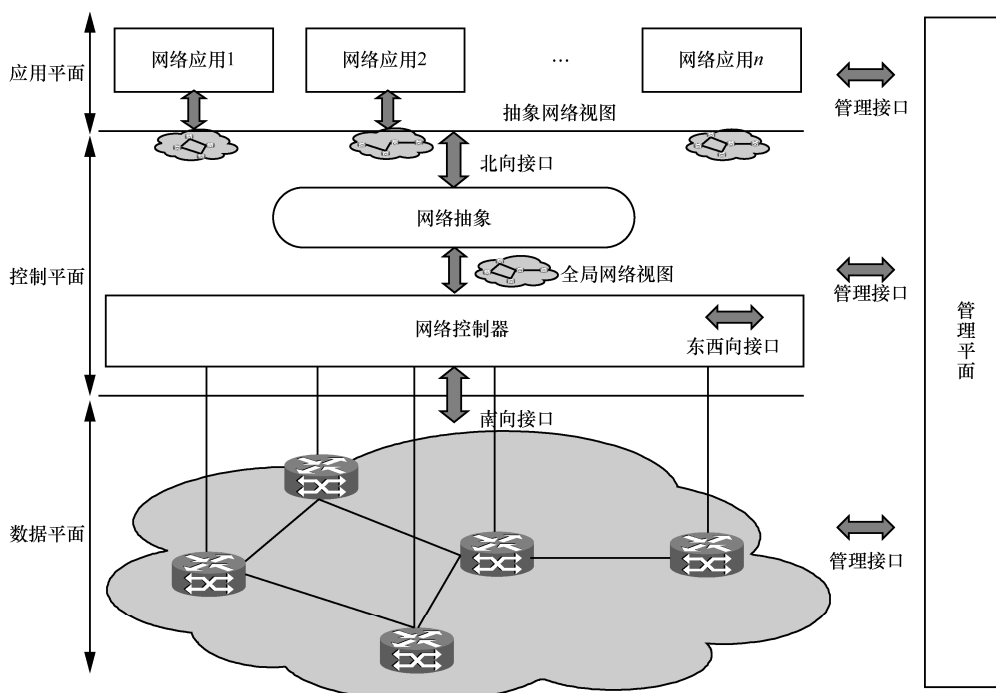


图 1 SDN 基本网络架构

是无线传输网络，且 ATNAS 以平台间信息交互网络即无线传输网络为主体。

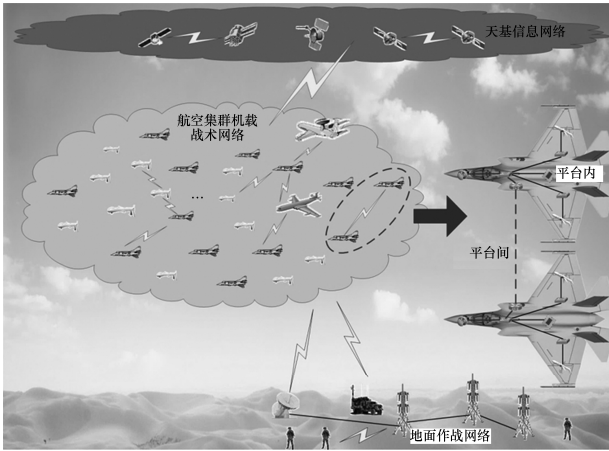


图 2 ATNAS 示意

ATNAS 与现有 ATN 均是服务于航空战术通信的网络，ATNAS 的基本特征在很多方面与现有 ATN 存在共同性，如大尺度的分布场景、较远的传输范围、不稳定的链路质量、高动态的网络拓扑、显著的异构性等。但与此同时，ATNAS 的网络规模相对更大（平台数量的增加以及链接对象的改变）、网络节点的类型更为多样（各作战资源作战能力类型、强弱不一）、网络所承载的信息内容也更为丰富，由于目前还未有真正实际应用的服务于航空集群作战的机载战术网络，故目前无法较好地对 ATNAS 的特征进行系统性总结。在此，为满足未来航空集群作战应用需求，本文给出了 ATNAS 应当具备的基本能力。

1) 提供灵活耦合任务的差异化网络服务。未来在航空集群作战应用背景下，作战任务快速动态变化，且集群在同一时刻可能同时执行多个作战任务，不同的作战任务往往对网络服务有着不同的需求，因此，要求 ATNAS 必须能够提供灵活耦合任务的差异化网络服务，即将“发现、识别、决策、打击、评估”的打击链形成过程与网络的配置过程协同起来，根据任务执行对象及其交互业务的特点，通过对网络进行合理配置，灵活构建承载不同高价值信息内容以及具备不同网络服务质量等级的战术子网，为不同任务的执行针对性提供网络服务。以图 3 为例，当任务 1 中 A 的视频数据流和任务 2 中 F 的火控数据流均通过 E 进行路由转发时，传输火控数据流所需的 QoS 和传输视频数据流的所需 QoS 明显存在差异，若无差别传输，将可能导

致 2 个数据流的 QoS 需求均无法得到满足，极大降低作战性能，因此，需要通过针对性分配信道资源等措施，为 2 个数据流的传输提供差异化的网络服务，而现有 ATN 基本不具备为不同作战任务灵活提供差异化网络服务的能力。

2) 异构网络技术间能够无缝互操作。随着未来战场环境的复杂化、不确定化，不同网络技术在不同平台和作战应用背景下往往各有优势，但同时又各有缺陷，如战术瞄准网络技术（TTNT, tactical targeting network technology）采用了全向通信模式，能够很好地满足大容量信息分发需求，但却牺牲了平台隐身性，多功能先进数据链（MADL, multi-function advanced data link）为保证信息交互过程的抗干扰和低截获采用了定向通信模式，但却使信息分发与获取变得更加困难。因此，执行不同任务的航空平台需要依据作战任务灵活选择所需的网络技术，这就使 ATNAS 具有明显的异构特征。现有 ATN 的网络技术与具体硬件严格绑定，航空平台上往往装备有技术实现方式不同的多种异构网络设备，而这些异构网络设备间难以实现互通互控，互操作能力较差，使信息共享仅限于同构网络设备之间。因此，ATNAS 需要具备无缝的网络技术互操作能力，以更好地支撑航空集群的全域战场信息共享。

3) 支持灵活高效的网络配置。ATNAS 较大的网络规模、作战能力类型多样且强弱不一的节点、网络明显的异构性特征等因素，使 ATNAS 在实现网络服务时需要考虑大量的网络配置对象和内容，同时，航空集群在执行作战任务过程中对网络服务也具有较强的多样性和动态性需求，因此，要求 ATNAS 必须支持灵活高效的网络配置。以图 3 为例，当考虑最短路径路由时，在任务 2 的协同建立之前，任务 1 中的节点 A 通过路径 $A \rightarrow E \rightarrow D$ 将视频流数据传到节点 D，而在任务 2 的协同建立后，由于火控数据流优先级高于视频数据流，E 将优先对火控数据流进行路由转发，这将导致任务 1 中的视频数据流在 E 中的排队时延明显增加，此时，选择路径 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$ 传输视频数据流可能更好，而完成这一网络优化过程至少需要对节点 A、B、C、E 的路由转发规则进行重新配置，由于现有 ATN 网络控制协议分布式集成于各网络设备中，网络协商过程复杂，各节点对网络状态信息的感知有限，难以针对网络状态的临时变化进行适应性调整，无法

较好地完成这一网络配置动作。

4) 新技术能够简单快速部署。随着技术的持续发展, 满足新的作战需求、拥有新的性能特征的网络技术将不断涌现。现有 ATN 技术的更新升级开销极大, 导致新技术部署缓慢, 无法很好地适应作战模式的快速演进。因此, 为适应作战任务需求的不断变化, 要求 ATNAS 能够简单地实现新技术的快速部署, 从而基于少量系统功能更新开销, 实现网络性能的持续提升。

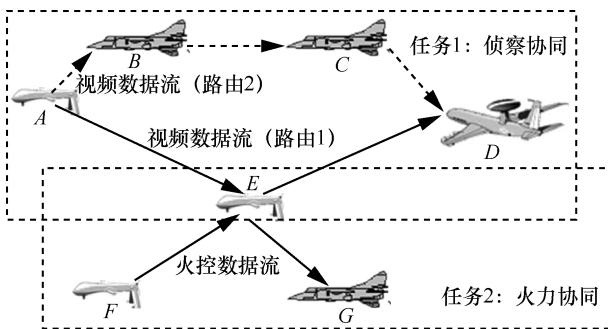


图 3 航空集群协同示例

2.3 基于 SDN 网络范式构建 ATNAS 的优势

为了满足持续增长且不断变化的航空战术通信需求, ATN 长期以来遵循着烟囱式的研究发展思路, 通过不断改进升级网络设备中的各种软硬件以及集成各种新的软硬件 (如通信协议的改进、传输接口的增加等), 来保证网络性能的持续提升^[1,5,31-39]。但这种打补丁的方式效率很低, 不仅使 ATN 的网络服务能力总是滞后于航空战术通信需求的发展, 也使网络变得愈加臃肿。在航空集群作战应用背景下, 参考 SDN 范式构建 ATNAS, 将为实现 ATNAS 应具备的基本能力提供根本上的技术支撑。

2.3.1 航空集群作战应用背景下现有 ATN 存在的技术瓶颈

现有 ATN 控制平面与数据平面在物理位置上是紧密耦合的, 网络控制策略由集成于各网络设备的控制平面在预先静态配置、分布式协商或独立局部网络状态感知的基础上生成, 这样的耦合在网络运行状态和环境相对稳定、用户对网络服务的需求相对单一和固定的情况下, 能够令网络拥有较为优异的性能。而对于航空集群作战应用, 网络运行状态和环境是动态变化的 (例如, 当不同作战区域面临不同强度的电子干扰时, 会造成网络传输链路可靠性的大幅波动), 集群执行的作战任务对网络服

务的需求也是动态和多样的, 控制平面与数据平面在物理位置上紧密耦合的部署方式在这样一种背景下会带来许多新的问题, 例如, 在集群执行任务过程中, 当由于战术意图、战场环境等产生变化需要对部分网络设备的参数、运行机制进行适应性改变时, 仅能对这些网络设备逐一进行配置, 而这在任务执行过程中是难以实现的 (需要进行复杂的协商和操作, 无法满足任务的时效性需求), 限制了网络与任务的快速、灵活耦合; 另一方面, 当新的网络技术需要部署时, 也需要对每一个平台的网络设备进行调整和升级, 开销大、周期长, 难以快速形成战斗力。

集成于现有 ATN 各网络设备的分布式网络控制协议在考虑网络控制开销等因素的情况下, 使任意网络设备对网络状态的感知能力必然受限, 各网络设备分布式生成的网络控制策略往往是局部最优的, 难以使网络性能达到最佳, 甚至会从整体上降低网络性能。为了避免分布式生成的网络控制策略对网络整体性能的不利影响, 不同网络设备间又需要进行多次协商, 但这样的协商过程不仅会增加网络控制开销, 而且也无法保证协商过程的快速收敛。同时, 这些分布式的网络控制协议使网络配置过程与任务规划过程难以进行有效的协调和关联, 需要各网络设备依据任务规划信息进行更为复杂和细粒度的协商, 进一步增加了网络控制开销和收敛时间, 不利于实现网络与任务的灵活耦合。

针对现有 ATN 异构网络技术间的互操作问题, IP 化、统一网络技术标准、增加额外的转换系统等均是当前采用和讨论较多的方式。但 IP 化的方式仅统一了数据的路由过程, 从消息格式上保证了数据的透明转发能力, 却难以兼顾复杂的信道环境以及网络链路层、物理层多样化的控制协议和传输技术; 在复杂多变的战场环境背景下, 开发能够满足所有作战应用需求的网络技术也并不现实; 利用额外的信息处理与传输系统对异构网络技术生成的信息进行统一处理与中继转发, 虽然能够从原理上解决 ATN 异构网络技术的互操作问题, 但这种方式却增加了额外系统开销, 并且需要固定网关节点进行波形转换, 在协调多类型异构网络技术间的互操作上灵活性存在不足, 因此不能从根本上解决问题。

2.3.2 SDN 为 ATNAS 带来的优势

SDN 对于数据平面与控制平面进行了较为彻

底的（支持数据与控制平面独立运行于不同的物理设备上）分离，使各网络设备不再依靠复杂控制协议对数据流进行处理，各网络设备成为简单的网络策略执行单元，依靠逻辑集中的控制器下发的网络控制策略对数据流进行处理，简化了网络策略的执行过程，让网络的配置与管理变得灵活简单。当需要对部分网络设备的运行机制进行适应性调整时，无需逐一对相关网络设备进行配置，用户通过逻辑集中的控制器即可统一完成配置操作，极大简化了网络配置操作流程，能够充分提升网络管控的灵活性；当需要部署新的网络技术时，也可通过逻辑集中的控制器实现新网络技术的统一快速部署，能够有效减少开销、缩减部署周期。

控制器是 SDN 的核心组成部分，SDN 利用逻辑集中的控制器对网络进行统一配置，协调各网络设备功能，服务于应用需求。控制器对底层网络基础设备及其互联关系进行抽象，收集网络状态信息，分发网络配置指令，并为网络应用开发者提供了统一灵活的编程接口。控制器承担了对网络状态的感知任务，相较于分布式的网络状态感知方式，SDN 主要依靠控制器对网络状态信息进行收集并基于控制器进行网络的统一配置，能够有效减少网络控制开销。控制器通过对网络状态的全局感知，能够形成细粒度的全局网络视图，使用户能够实现网络性能的全局优化，避免了各网络设备为实现用户所需网络服务而进行的复杂协商过程，在计算能力允许的情况下，网络性能能够快速收敛到满足用户需求的程度。同时，控制器能够灵活地部署于航空集群的任务发布端，如预警机、指通机等大型指控平台之上，有利于任务规划系统与控制器间的快速信息交互和彼此间统一协调的策略计算，从而很好地支持网络配置过程与任务规划过程的快速、灵活耦合。

从用户角度来看，SDN 对网络的数据平面进行了抽象化处理，较好地屏蔽了网络底层物理实现细节，为用户提供了开放统一的可编程接口，使网络灵活可编程。通过 SDN 提供的可编程接口，进一步结合软件定义无线电（SDR, software defined radio）、可编程 MAC 引擎等技术，使用户能够对各网络设备所采用的网络技术进行灵活的配置和操作，依据当前作战任务或战场环境的变化，在合理选择、配置不同网络技术的基础上，

促进 ATNAS 异构网络技术间的互操作，发挥不同网络技术在不同应用场景下的技术优势。例如，在 SDN 范式下，用户可为当前在战场前沿执行侦察任务的无人机平台配置定向通信技术，使其侦察信息在回传到后方平台的过程中具有较低的被截获和被干扰概率，同时令后方接收平台在利用定向通信技术接收到侦察信息后，再采用全向通信技术将侦察信息分发到其他平台，实现侦察信息的高效共享。

为进一步说明 SDN 范式在解决现有 ATN 异构网络技术互操作问题上的优势，本文利用 EXata 网络仿真软件进行了初步的仿真验证实验。SPMA (statistic priority-based multiple access) 和 TDMA (time division multiple access) 是在现有 ATN 中应用较为广泛的 2 种多址接入方式，SPMA 能够实现极低的端到端时延，但在网络负载较重的情况下，数据分组的碰撞会造成网络吞吐量的下降；TDMA 能够实现数据分组的可靠传输，但由于存在固定的发送等待时间，造成信息交互的实时性不强。因此，本文令控制器节点收集不同作战区域的网络负载情况（综合考虑各节点产生的流量大小及其与 2 跳范围内其他节点的干扰情况），控制器为处于负载较重区域内的节点固定分配时隙，令其采用 TDMA 进行信息交互，同时，令处于负载较轻区域的节点采用 SPMA（配置了 ACK 重传机制）进行信息交互，这种模式使同时穿越负载较轻区域和负载较重区域的数据流，在实现较高网络吞吐量的情况下，也极大提升了实时性，充分发挥了 TDMA 和 SPMA 各自的技术优势，实验结果如图 4 所示。

3 软件定义航空集群机载战术网络

基于 SDN 范式构建 ATNAS 既要遵循 SDN 范式的基本设计思想，又要充分考虑航空集群作战应用对 ATNAS 的能力需求以及 ATNAS 的网络特征，如差异化的网络服务需求、无线传输和有线传输的差异性、ATNAS 高动态的网络拓扑等。

为了给基于 SDN 范式构建 ATNAS 提供基本参考和指导，本文提出了软件定义航空集群机载战术网络。SDATN-AS 一方面包含了 SDN 的基本平面和接口类型，另一方面较一般 SDN 在内容上又有了新的补充和扩展。SDATN-AS 的总体架构如图 5 所示。

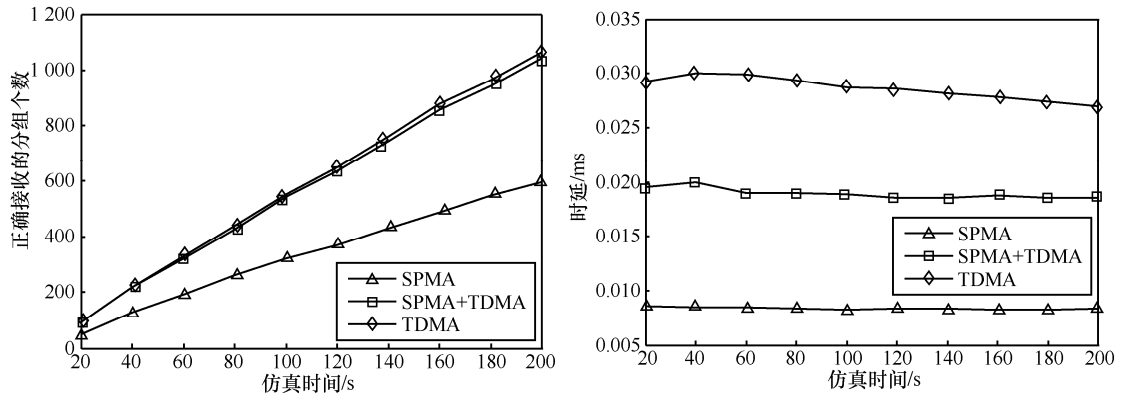


图 4 基于 SDN 的 SPMA/TDMA 混合传输仿真结果

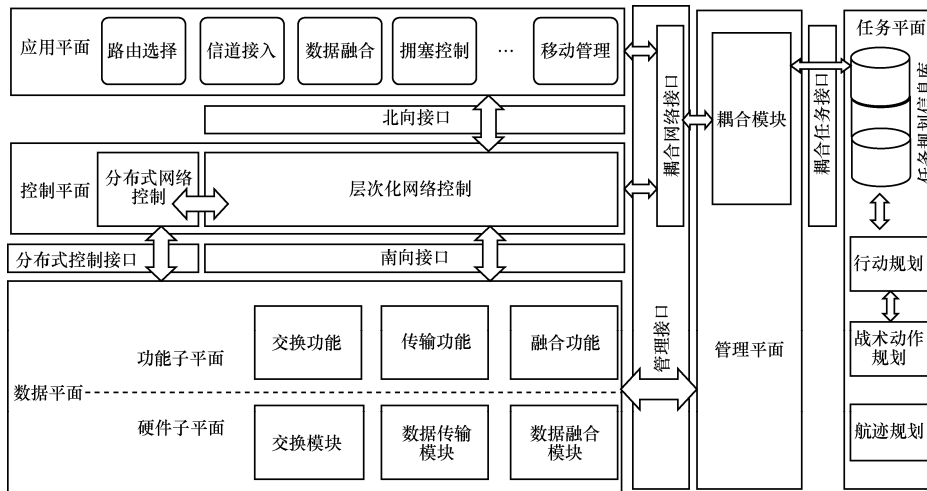


图 5 SDATN-AS 总体架构

3.1 数据平面

数据平面是 SDATN-AS 的基础平面，要满足 SDATN-AS 的软件定义要求，数据平面必须具备可编程性。SDATN-AS^[29]同样考虑将数据平面在南北向上分为 2 个子平面，分别是功能子平面和硬件子平面。功能子平面工作于硬件子平面之上，是指导和驱动硬件处理动作的各种底层控制逻辑的集合，这些控制逻辑包括流表、驱动程序等；硬件子平面则主要是硬件实体，包括 I/O 端口、存储器、交换芯片等，硬件子平面在功能子平面的指导和驱动下完成相应的数据处理动作。功能子平面的具体内容应用平面通过控制平面配置、数据平面的可编程性在功能子平面上得以体现。

综上，ATNAS 包括有线传输网络与无线传输网络，并且以无线传输网络为主体。在一般 SDN 中，对网络的配置通过定义流表实现，流表中存储了数据分组的匹配原则、对所匹配数据分组的执行动作（转发、丢弃等）以及用于统计流表匹配情况

的计数器。但对于以无线网络为主体的 ATNAS，其网络配置需要综合考虑频谱资源利用、通信范围、干扰、调制编码方式等数据链路层和物理层的相关因素。另一方面，ATNAS 所传输的信息内容直接由任务所决定，不同信息内容对应的网络 QoS 需求存在极大差异，通过对网络所传输信息内容进行有效管理，能够充分避免与任务无关的低价值信息占用信道资源，从而保证与任务关联性较强高价值信息的有效传输，例如，在进行多机协同跟踪任务时，滤除与所跟踪目标无关的信息，能够为跟踪所需的信息交互提供更多的信道资源，从而提升信息交互的实时性，保证跟踪精度。

基于以上考虑，本文在一般 SDN 数据平面的基础上，依据数据在实际航空作战过程中的处理流程，定义了 SDATN-AS 数据平面功能子平面的基本内容，分别是融合功能、交换功能和传输功能，对应于硬件子平面的融合模块、交换模块和传输模块。融合功能对航空集群各类作战资源所产生的数据按

需进行融合处理，这一过程直接关系到网络所传输数据量的大小以及集群各成员获取信息的信息价值^[40-42]。融合过程既可在数据传输前也可在数据传输过程中进行，通过为承载不同信息内容的数据流针对性配置高效的数据融合算法，或在网络配置过程中将数据融合功能与路由、MAC 等综合考虑，将能够有效提升网络性能。以图 6 为例，节点 A、B、C 分别有 3 个数据分组需要传输给节点 D，当不考虑数据融合（图 6 左）时，网络共需要传输 9 个数据分组，而当考虑数据融合（图 6 右）时，使节点 A 与 C 的数据分组在节点 B 先进行融合，再通过一个数据分组传输给节点 D，则网络一共需要传输 7 个数据分组，节省了信道资源。交换功能定义数据分组的路由和转发规则。传输功能则负责控制数据在物理信道上的传输，SDR 等技术的发展为控制平面直接配置数据平面传输功能提供了可能^[43-46]，部分文献将 SDR 与 SDN 作为可编程网络不同的组成部分^[47-48]，而本文将 SDN 与 SDR 分别看作是编程网络的实现架构和实现这种网络架构实际部署的一种具体技术手段，传输功能的具体内容涉及信道资源的配置、调制编码、信道的接入控制等。

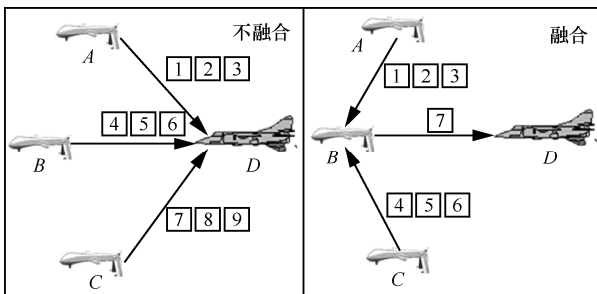


图 6 数据融合功能示例

由于 SDATN-AS 数据平面可编程内容的扩展，使网络配置与管理对象变得更加多元化，但这种概念上的扩展在提升网络可编程能力和网络配置灵活性的同时，必然需要对 SDN 数据平面的技术实现方式进一步的改进和完善才能实现实际应用。例如，对于数据融合功能，虽然也可以采用基于流表的<匹配, 动作>方式对数据分组先进行匹配，而后利用所匹配表项的指令集驱动相应动作，但数据融合功能更加关心信息的内容、属性、来源等特征，现有流表匹配域并不能反映出这些特征，需要对匹配域进行修改和完善，同时，对应的动作集中也缺乏驱动数据融合模块进行信息融合的动作描述，因此，也需要对动作集进行扩展和丰富。例如，对于

传输功能，当需要数据平面支持灵活配置 MAC 协议时，需要在传输模块底层驱动上设计专门的接口、指令集以及 MAC 引擎用于加载和执行用户定义的控制逻辑^[43-45]。因此，如何在工程上真正实现 SDATN-AS 数据平面所定义功能还需要展开进一步的研究与探索。

3.2 控制平面

SDATN-AS 控制平面由控制器组成，是连接底层网络设备与上层网络应用的桥梁。由于 SDATN-AS 对一般 SDN 数据平面的可编程内容进行了扩展，并且管理平面和控制平面同样存在交互（参考第 3.4 节），因此，在设计 SDATN-AS 控制器时，需要对现有 SDN 控制器的协议适配、事件机制、数据库、功能模块等众多要素进行补充和完善，才能实现其对 SDATN-AS 数据平面的有效控制。具体如何设计满足 SDATN-AS 网络控制需求的控制器不属于本文的讨论范围，因此，本文不对这方面的细节内容做深入探讨。

ATNAS 以平台间信息交互网络为主体，平台间信息交互网络高动态的网络拓扑使控制器与控制域内各平台的稳定互联变得十分困难；高对抗战场环境下控制器存在较高的失效风险；无线传输信道有限的信道资源以及控制器有限的计算、存储资源限制了控制器所支持的网络控制内容及粒度。基于以上考虑，SDATN-AS 采用了混合网络控制架构。

在描述 SDATN-AS 混合网络控制架构之前，首先给出 SDATN-AS 控制架构的重要设计基础——航空集群作战云架构。

航空集群作战云则是对上述概念的进一步扩展和深化，其基本思想是利用云计算技术将航空集群的计算、存储等基础作战资源和感知、武器、数据等战术作战资源虚拟化形成作战资源池，然后根据具体的任务需求，以信息为媒介，动态分配合适的作战资源供不同集群成员使用，完成航空集群作战资源面向任务的动态聚合，从而实现对集群作战资源的高效管理、实现集群战场态势的高效共享、实现集群成员间的高效协同。

本文从航空集群作战资源聚合需求角度出发，定义了航空集群作战云架构，该架构共分为 3 个层面，分别是平台云层面、编队云层面和集群云层面，3 个层面属于逐级包含的关系，即平台云 \subseteq 编队云 \subseteq 集群云。

1) 平台云。随着系统功能一体化的不断发展，

航空集群单一平台能够搭载多样化的作战资源。平台是任务的最小执行者，在一定任务需求范围内，某些情况下单一平台所搭载作战资源即可支撑作战任务的完成，这就要求执行该作战任务平台所搭载各作战资源能够进行高效聚合，使平台本身的作战效能达到最大。因此，本文定义航空集群任意平台所具备作战资源构成平台云层面，平台云层面是航空集群作战云架构的基础层面。

2) 编队云。受单一平台所能承载作战资源类型、数量限制，在多数情况下，单一平台所搭载作战资源无法支撑作战任务的高效完成，需进行作战资源的跨平台聚合，以满足任务需求。而作战资源聚合的时间、空间跨度将直接影响航空集群的作战效能，因此，本文定义了编队云层面。编队云层面由航空集群部分航空平台构成，一个航空集群存在多个编队云，不同编队云服务于不同的作战任务，具体哪些平台参与构成同一个编队云由这些平台所搭载作战资源对该编队云所承担作战任务的作战效能所决定。属于同一个编队云的作战资源在进行聚合时的时间、空间跨度较小，能够实现平台间面向任务的作战资源快速聚合，最大限度满足航空集群作战能力生成在时间、空间上的约束条件，编队云层面包含了平台云层面。

3) 集群云。由于编队云主要强调作战资源聚合效能，在时间、空间上的约束，从而使资源聚合方式可能并非最优，同时集群构型随着作战任务的变化也会发生改变，以上这些因素使编队云在服务于航

空集群作战任务需求时依然存在较大的局限性，进而定义了集群云层面。集群云层面涵盖航空集群所有作战资源，包含编队云和平台云层面，通过对集群云的作战资源进行调度和整合，可以面向作战任务最优化整个航空集群的作战资源聚合方式，最大化航空集群的整体作战效能。

SDATN-AS 混合网络控制架构包括分布式网络控制和层次化网络控制这 2 种模式，且以层次化网络控制模式为主体，分布式网络控制模式则是在层次化网络控制模式不可用网络控制效能较低时才发挥作用。下面分别对这 2 种网络控制模式和其相互关系进行详细说明。

如图 7 所示，对应航空集群作战云架构，SDATN-AS 混合网络控制架构定义了层次化网络控制模式的 3 个控制层面，分别是平台控制层面、编队控制层面和集群控制层面，3 个控制层面所对应的网络控制范围分别为单个平台、集群任意编队以及整个航空集群。平台控制层面使用户能够对链接平台云中各类作战资源的平台内部信息交互网络进行控制；编队控制层面使用户能够对链接编队云中各类作战资源的平台间信息交互网络进行控制以及按需对平台云的网络控制行为进行指导和约束；集群控制层面则没有编队概念限制，使用户能够对整个航空集群的平台间信息交互网络进行有效控制，同时能够按需对平台云和编队云的网络控制行为进行指导和约束。按照以上定义，3 个控制层面在控制优先级上满足集群控制层面 > 编队

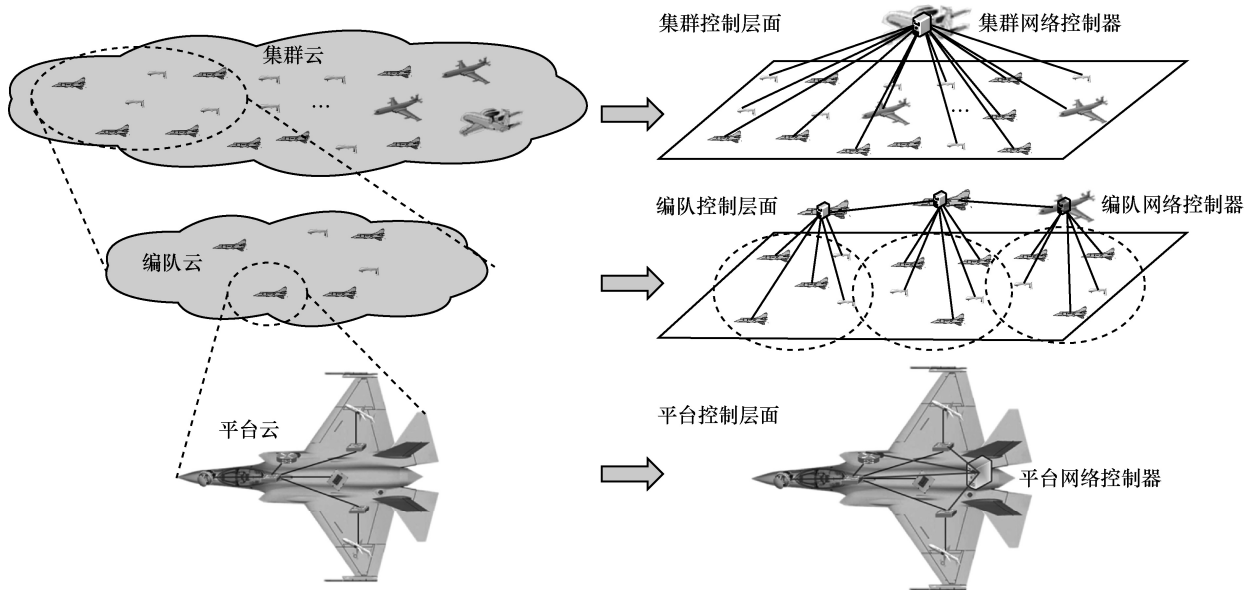


图 7 SDATN-AS 层次化网络控制架构

控制层面 > 平台控制层面，低优先级的网络控制行为必须在满足高优先级网络控制需求的前提下进行。

3 个控制层面分别对应于平台网络控制器 (PNC, platform network controller)、编队网络控制器 (GNC, group network controller) 和集群网络控制器 (SNC, swarm network controller), 3 种不同类型控制器在软件实现上相互独立。这些控制器一方面利用南向接口协议对数据平面进行集中控制和管理, 另一方面利用北向接口向上层应用开放多个层次的可编程能力, 使用户能够依据航空集群作战任务需求灵活地定制各种网络策略。由于任意平台均需要对自身平台内部信息交互网络进行控制, 因此, 航空集群任意平台均须搭载 PNC。不同的控制器部署方式会影响网络的控制效能, 在航空集群执行任务过程中, 集群构型会随着作战任务的改变而动态变化, 不同的 GNC 部署方式同样也会影响编队云的网络控制效能, 且由于参与任务执行的航空集群中的各编队处于战场前沿, GNC 对编队来说存在较高的单点失效风险。因此, 航空集群多数平台搭载 GNC 是一个较为合理的选择(但在一个编队中仅需一个 GNC 保持工作), 便于用户依据作战任务和集群构型对 GNC 进行灵活动态部署, 同时, 在一个集群编队中存在多个 GNC, 降低编队的 GNC 失效风险。SNC 具有最高的控制优先级, 需要从全域战场视角对整个 ATNAS 进行管控, 因此, SNC 应搭载于预警机、指通机或地面指挥所等生存能力、综合信息处理和感知能力较强的平台之上。

不同 GNC 之间需要利用控制器东西向接口按需进行视图信息共享和控制动作协调, 从而保证当 SNC 的控制链路中断或 SNC 失效时, 不同编队云的网络控制结果不会相互产生冲突。不同 SNC 之间也需要能够利用东西向接口进行视图信息共享和控制动作协调, 从而支持部署多个 SNC 以提升 ATNAS 网络的可扩展性。

SDATN-AS 层次化网络控制模式使高层级控制器仅需掌握低层级控制器经过抽象处理的视图信息, 或按需获取低层级控制器掌握的原始视图信息即可, 也可使低层级控制器在进行自身可完成的网络控制动作时不必再对高层级控制器进行冗余访问, 并且某特定控制层面控制器在进行网络控制过程中无需过多关注其他云层面的网络细节。层次

化网络控制模式的以上特点有利于减少网络控制信息对信道资源的占用, 同时, 也有利于减少控制器进行网络控制的复杂度, 节省控制器的计算和存储资源。但层次化网络控制模式无法较好适应 ATNAS 高动态的网络拓扑、复杂的信道环境以及充分应对控制器的失效风险; 逐级的网络控制流程也限制了网络管控的灵活性, 加大了进行网络控制的开销与时延。因此, SDATN-AS 混合网络控制架构中还定义了分布式网络控制模式。

在分布式网络控制模式下, 用户所定义的分布式网络控制逻辑利用专门接口(区别于南向接口)与数据平面进行交互。分布式网络控制模式主要针对以下 2 种情况发挥作用。

1) 当由于链路中断、平台毁伤等因素造成层次化网络控制模式不可用时, 需利用分布式网络控制模式保证网络服务的持续存在。在层次化网络控制模式不可用的情况下, 分布式网络控制模式使节点能够不依赖与控制器的信息交互, 通过协商的方式, 独立完成自身信息传输过程, 保证了在控制器失效或控制器的控制链路中断情况下, 网络依然能够较好地作为作战任务提供信息传输保障。例如, 在图 8(a)中, 当节点 A 需要将数据分组路由到节点 C 时, 若控制链路 l_1 中断, 控制器将无法将流表更新信息配置到节点 B , 导致网络无法满足节点 A 的数据分组路由需求, 此时层次化网络控制模式已变得不可用, 而令节点 B 采用分布式网络控制模式时, 如运行 AODV 路由协议, 当节点 B 收到节点 A 的数据分组时, 节点 B 通过与节点 C 交互路由请求 (RREQ) 与路由回应 (RREP) 分组, 能够自主建立到节点 C 的数据分组转发路径, 从而能够将节点 A 的数据分组成功路由到节点 C 。

2) 由于信道带宽、控制时延、控制器计算存储资源等因素限制, 使层次化网络控制模式无法实现高效的网络控制时, 需利用分布式网络控制模式提供更为灵活高效的网络控制能力。例如, 在图 8(b)中, 当节点 A 需要与节点 B 进行信息交互时, 由于彼此互为一跳邻居节点, 采用分布式路由协议建立数据分组转发路径从开销和时延上来看都是最佳的选择, 依赖处于 2 跳距离的控制器建立数据分组转发路径反而会降低网络控制效能。且在此情况下, 分布式网络控制模式并非一定独立于层次化网络控制模式工作, 而是可以借助层次化网络控制模式在信息获取、信息处理等方面的优势, 更好地提

升分布式网络控制模式的控制效能,例如,文献[49]提出利用控制器为控制域内各节点提供拓扑视图信息,辅助各节点更好地进行分布式路由计算,减少了控制开销,提升了数据分组的转发成功率。

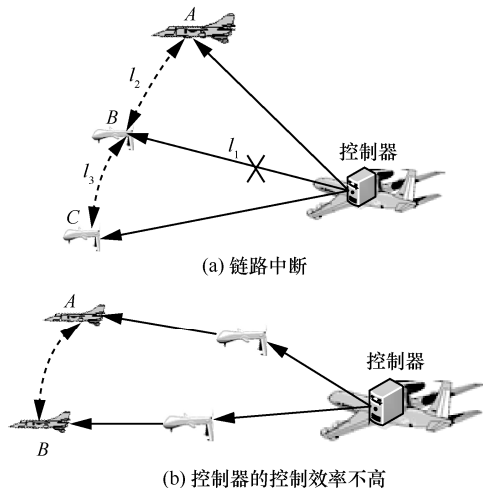


图 8 分布式网络控制模式

本文仅提出了 SDATN-AS 混合分层网络架构,并且举例说明了采用该架构进行 ATNAS 网络控制的优势,但如何真正实现该架构的实际部署与应用是需要进一步深入研究的问题。

3.3 应用平面

用户利用控制器提供的北向接口开发所需网络应用,这些网络应用构成了 SDATN-AS 的应用平面。应用平面实现了用户定义的高层次网络控制逻辑,并利用控制器将这些高层次网络控制逻辑转化为数据平面能够识别的底层网络控制逻辑,指导和驱动数据平面的数据处理行为。

在控制器开放接口的支持下,用户可以开发内容极为丰富的网络应用,包括路由、流量均衡、频谱管理、接入控制、网络虚拟化、QoS 保障、移动管理等,这些内容丰富的网络应用使 SDATN-AS 能够为航空集群作战任务的执行提供灵活多样的网络服务。当前 SDN 应用主要集中在流量工程、网络监控、网络安全等方面,主要面向民用需求。但在航空集群作战应用背景下,SDATN-AS 要求网络应用需面向航空集群作战应用需求专门开发(某些网络应用在功能上可能会与面向民用需求的网络应用存在交叠,如流量均衡、移动管理等),同时,由于 ATNAS 需要与作战任务进行灵活耦合,SDATN-AS 的网络应用在开发过程中还需要充分考虑任务信息的输入,例如,在开发路由应用时,

最佳路径的评判指标除考虑时延、可靠性等网络传输性能评价信息外,还应考虑最佳探测位置、最佳攻击时序等任务层面的评价信息,使应用平面所输出网络策略能够符合作战任务对网络服务的需求。

3.4 管理平面

在早期 SDN 架构中并未提及管理平面,但 SDN 的网络管理在近年来已逐渐受到标准化组织及学术界的重视。文献[29]将管理平面作为 SDN 架构的一个独立平面提出,分析总结了 SDN 的网络管理需求、必要性及挑战。与民用网络一样,机载战术网络的网络管理在保证网络高效、可靠运行方面同样发挥着举足轻重的作用,网络管理的很多技术细节与民用网络存在较大的相似性,因此,本文也将管理平面作为 SDATN-AS 的一个基础平面。

SDATN-AS 管理平面具备对 ATNAS 进行操作、管理和维护的基本功能。目前已确定,灵活耦合作战任务是未来航空集群机载战术网络的一项基础性特征,本文保守地将网络与任务的耦合过程看作是以任务需求为牵引的网络管理过程,故 SDATN-AS 考虑利用管理平面实现网络与任务的灵活耦合。

为了更好地阐明 SDATN-AS 如何实现网络与任务的灵活耦合,本文首先定义了任务平面。任务平面是不属于 SDATN-AS 的一个独立平面,由任务系统构成,负责航空集群的作战任务规划。根据文献[50]对飞行器任务规划的分类,任务平面包含 3 个主要的任务规划内容。1) 行动规划。行动规划的核心内容主要由任务分配及协同规划 2 个部分组成。其中,任务分配主要负责任务、目标、平台及武器间的优化配置;协同规划则是在任务分配的基础上确定各平台所执行的行动及其时序关系。2) 战术动作规划。战术动作规划是在行动规划的基础上,确定集群成员具体战术动作的实施方式,如传感器开机点的选择,武器投放参数的确定,电子干扰的位置、时机及参数设置等。战术动作规划一方面要满足集群成员及其所搭载的作战资源的物理特性要求,另一方面又要符合指挥员的战术意图,是一个战术与技术紧密结合的规划过程。3) 航线/航迹规划。航线规划与轨迹规划的则是考虑地形、气象等环境因素以及平台自身的飞行性能,为集群成员制订出从初始位置到目标位置的最优

飞行路径。

如图 5 所示,本文在管理平面中特别定义了耦合模块,耦合模块通过与 SDATN-AS 控制平面以及外部任务平面的交互实现网络与任务的灵活耦合,耦合模块与应用、控制平面以及任务平面交互的接口分别称为耦合网络接口和耦合任务接口。耦合模块主要具备以下 3 个基本功能: 1) 依据作战任务,选择合适的平面网络应用和参数输入,从而依靠所选择的网络应用和所输入参数制定出耦合任务的网络策略; 2) 协调不同网络应用的网络策略制订,避免不同网络应用制订的网络策略出现冲突; 3) 将网络状态信息反馈到任务平面,为航空集群的任务规划提供足够的通信约束条件,使任务规划结果所产生的网络配置需求不超出网络的服务能力范围。

为保证耦合模块工作过程的实时性和准确性,耦合模块的 3 个基本功能应主要交由智能体依据作战任务需求与网络状态自动实现。具备耦合模块的管理平面在实现网络与任务的耦合过程中,与 SDATN-AS 其他各平面的关系如图 9 所示。任务平面的任务系统利用耦合任务接口将任务规划信息发送到耦合模块,耦合模块依据任务规划信息,利用耦合网络接口调用合适的网络应用(如路由、流量均衡、移动管理等),并为所调用网络应用输入与网络策略生成相关的任务参数(如平台雷达开机次序、最佳探测位置等信息),同时协调各网络应用的策略制订过程,保证不产生相互冲突的网络配置策略。控制平面的网络控制器将网络状态信息利用耦合网络接口发送到耦合模块,耦合模块从这些网络状态信息中抽象出通信约束条件,并利用耦合任务接口将通信约束条件发送到任务平面,指导任务平面的任务规划。

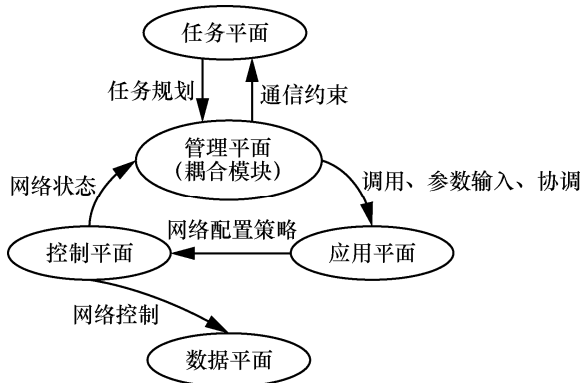


图 9 管理平面耦合模块与其他平面交互关系

由于目前 SDN 的网络管理的很多细节问题还未有阐明,且网络管理本身涉及资源配置、状态监视、软硬件协调、安全防护等大量内容,因此,本文仅对 SDATN-AS 管理平面如何实现网络与任务的灵活耦合这一重要问题进行了描述,没有对 SDATN-AS 管理平面的更多细节内容进行分析和阐述。ATNAS 毕竟与民用网络存在不同,SDN 范式下 ATNAS 的网络管理需求具体还有什么,如何实现对 ATNAS 高效的网络管理是需要进一步深入研究的内容。

4 应用案例

本节给出了航空集群作战应用背景下 SDATN-AS 的 2 个典型应用案例,目的在于更加直观地说明 SDATN-AS 网络的运行方式。针对每一个应用案例,本节首先对场景细节进行描述,而后说明 SDATN-AS 如何实现该应用场景所需网络服务。

案例 1 航空集群多基雷达协同反隐身

航空集群作战过程中,隐身与反隐身的对抗贯穿作战行动的始终。研究表明,反隐身可采用空间、频率、极化、波形等多种技术途径,依据隐身飞机雷达波侧向、前向散射大的空间分布特点,基于双/多基雷达空间分集思想,用航空集群任一平台雷达充当照射源,选择合适的其他平台雷达进行无源接收,再对接收平台接收到的目标回波数据进行融合,理论上能够形成对隐身飞机的有效探测与跟踪。案例 1 的场景如图 10 所示,隐身目标穿越区域 1 与区域 2,在穿越区域 1 时,平台 B 充当雷达照射源,平台 A、C 进行无源接收,3 个平台进行回波数据融合,实现对区域 1 中隐身目标的最佳探测与跟踪性能;在目标穿越区域 2 时,平台 E 充当雷达照射源,平台 D、F 进行无源接收,3 个平台

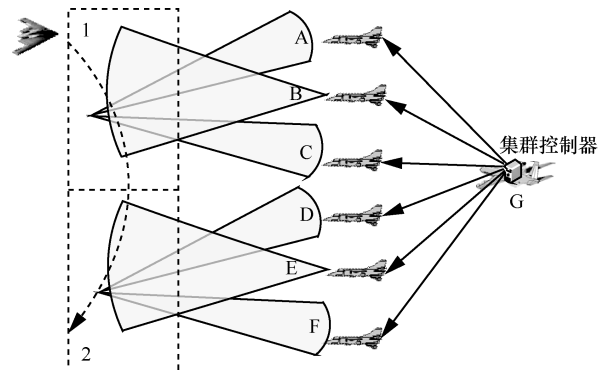


图 10 案例 1

进行回波数据融合,实现对区域 2 中隐身目标的最佳探测与跟踪性能。在进行多基雷达协同反隐身时,充当照射源的平台需将雷达工作方式、工作波形等参数传输给无源接收平台,同时,各平台间需交互彼此所接收到的回波数据,再利用数据融合实现对隐身目标飞行航迹的精确描述。

在 SDATN-AS 架构下,当隐身目标穿越区域 1 时,平台 G 的任务系统首先根据任务规划结果选择最佳照射平台(B)和无源接收平台(A与C),平台 G 的耦合模块调用路由、信道接入控制等网络应用,输入任务规划信息,协调各网络应用制订出无冲突的网络配置策略,平台 G 的控制器将网络配置策略下发到控制域所有平台(A、B、C、D、E、F),从而完成统一平台 A、B、C 传输模式、优先为平台 A、B、C 分配可用的信道资源、确定各平台信道接入次序、建立平台间信息交互路由等一系列网络配置动作;而当隐身目标进入区域 2 时,平台 G 依据当前执行探测与跟踪任务平台所上传的目标航迹信息,可迅速重新完成任务规划,采用上述相同的过程重新进行网络配置,保证网络为平台 D、E、F 的协同探测与跟踪提供高效的信息传输保障。在整个过程中,实现了网络与任务的灵活耦合,保证了网络始终为构成最佳探测与跟踪构型的平台提供最佳服务,在信道资源一定的前提下能够有效提升平台交互回波数据的数据量,降低信息交互时延,实现更为精确实时的隐身目标飞行航迹描述。

案例 2 航空集群云攻击

航空集群“云攻击”是基于航空集群作战云的一种打击方式,打破了作战平台感知资源与武器资源之间的硬链接,以松耦合方式构建“探测—跟踪—决策—打击—评估”的完整“云杀伤链”。各平台无需本平台传感器数据进行目标引导跟踪,也无需发射本平台武器即可完成目标攻击,从而实现对超视距或隐身目标的先敌发现、先敌攻击、先敌摧毁,同时,保证自身平台的生存性。案例 2 场景如图 11 所示,假设平台 A、B、C 属于同一个编队云(不包括平台 D、E、F),平台 C 搭载 GNC,平台 F 搭载 SNC,敌方目标沿虚线箭头方向朝右下方移动,平台 B 雷达处于开机状态对目标进行持续跟踪,其他平台雷达处于关机状态;在开始攻击时,平台 A 处于最佳攻击位置,平台 B 迅速将目标跟踪信息传输给平台 A,平台 A 发射和制导导弹对目标进行打击;随着目标位置的移动,平台 D 处于最佳打击

位置,则平台 B 将目标跟踪信息发送给平台 D,由平台 D 接力平台 A 对其发射的导弹进行制导,最终完成对目标的打击。

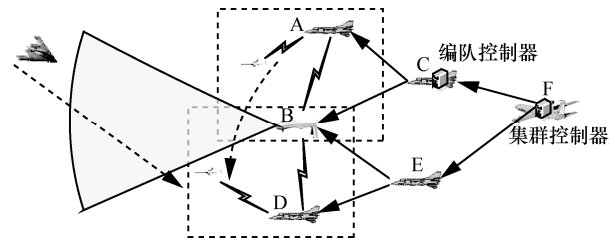


图 11 案例 2

在 SDATN-AS 架构下,平台 C 依据用户需求,通过任务系统完成任务规划,确定打击平台为 A,平台 C 的耦合模块调用合适的网络应用,并为各网络应用输入任务规划信息,制定合理的网络配置策略,通过 GNC 将网络配置策略发送到平台 A 与 B,为打击平台 A 与其所发射导弹之间,以及打击平台 A 与跟踪平台 B 之间建立具有差异化网络服务质量的信息传输链路,同时,将打击情况实时发送给平台 F。随着目标的移动,平台 D 成为最佳打击平台,掌握这一情况的平台 F 重新进行任务规划,确定新的打击平台为 D,平台 F 采用上述相同过程通过 SNC 将具有更高优先级的集群网络配置信息发送到平台 A、B、D,为打击平台 D 与平台 A 所发射导弹之间,以及打击平台 D 与跟踪平台 B 之间建立具有差异化网络服务质量的信息传输链路,实现平台 A 与平台 D 对导弹的接力制导,实现最佳打击效能。

5 未来研究方向及挑战

SDATN-AS 是基于 SDN 范式构建航空集群机载战术网络的一次全新尝试,本文仅从宏观上对 SDATN-AS 进行了介绍,但要实现 SDATN-AS 的实际应用与部署,还有许多亟待解决的具体科学问题,本节对 SDATN-AS 的未来研究方向及挑战进行总结。

1) SDATN-AS 体系架构的丰富与完善

网络体系架构的设计是一个长期、系统性的工作,虽然本文给出了 SDATN-AS 的基本设计框架,对 SDATN-AS 重要组成内容及相互关系进行了介绍与分析,但对 SDATN-AS 网络架构中涉及的更多细节问题并未做更为深入的探讨,例如,具体采用何种技术实现数据平面所定义的可编程内容、控制

平面多种网络控制模式以及不同层级网络控制如何协调、管理平面较民用 SDN 除增加耦合模块外还要新增加或删除哪些内容等，这些细节问题均需要在深入分析未来航空集群作战应用需求的基础上，经过不断地探讨、研究与实验才能最终确定。对 SDATN-AS 体系架构的丰富与完善是指导未来 SDATN-AS 走向实际应用的重要前提。

2) SDATN-AS 控制器及接口设计

控制器及各接口均是 SDN 的核心组成部分，由于 ATNAS 的特殊性，SDATN-AS 的网络控制在可靠性、生存性、控制时延、控制开销、机载计算存储资源的占用等方面与民用 SDN 的网络控制必然存在差异，因此，如何设计能够满足 SDATN-AS 网络控制需求的高性能控制器以及可靠、稳定和高效的相关接口是需要深入探讨与研究的问题。

3) SDATN-AS 的网络管理研究

机载战术网络管理通常涵盖网络资源规划、配置管理、故障诊断与恢复、性能检测和分析优化等功能，它是发挥机载战术网络基本效能、提高资源利用效率的根本途径。目前，即使是在现有 ATN 技术体制下，该领域也还处于研究与探索阶段，而对于 SDN 的网络管理，很多细节的内容还没有被说明和完善。因此，对于 SDATN-AS 的管理平面如何实现高效的网络管理还需要进行大量的研究工作。

4) 现有 ATN 技术体制与 SDATN-AS 共存问题研究

到目前为止，在现有 ATN 技术体制下已经进行较为长期的空中作战力量信息化建设，即使 SDATN-AS 具有远超现有 ATN 技术体制的性能优势，也无法短期内完成对现有 ATN 软硬件设备的替换。因此，现有 ATN 技术体制与 SDATN-AS 是逐步转变、长期共存的关系。而现有 ATN 设备运行过程对外封闭，与硬件严格绑定，不支持灵活配置，使其难以与支持 SDN 的设备实现兼容。需要建立相应的网络兼容体系与机制，实现 2 种不同网络技术体制在信息封装格式、网络传输策略等方面的灵活切换。

5) SDATN-AS 性能评估技术研究

由于 ATN 拓扑的高动态性、信道环境的复杂性等因素，对其网络性能进行精确评估一直以来都存在巨大的挑战。现有 ATN 的实验室仿真方法一般过于简单，无法反映航空无线传输信道和硬件设备对网络性能的影响，实验室固定机载网络硬件设

备无法反映网络的动态特征，外场实飞测试往往会精简网络规模与网络结构，且成本极高。相较于以上仿真思路，半实物仿真技术是在软件仿真的基础上将仿真系统中一部分模块用外部物理模型或实际系统替代，仿真结果较纯软件仿真可信度高，较硬件仿真和现场测试灵活性强，是实现未来 SDATN-AS 性能评估的重要途径。参照 SDATN-AS 架构，综合 SDATN-AS 的仿真需求，研究 SDATN-AS 的半实物网络性能仿真技术，为 SDATN-AS 后续技术的研究与开发提供可靠、可信和扩展的仿真实验平台，同样是未来重要的研究方向。

6 结束语

航空集群作为一种全新的航空作战力量体系必然会引发未来空中作战力量运用方式的巨大变革。本文对航空集群机载战术网络进行了介绍，分析了未来航空集群作战对机载战术网络的基本能力需求，总结了基于 SDN 范式构建航空集群机载战术网络的优势，提出了软件定义航空集群机载战术网络 (SDATN-AS)。依据数据在航空作战过程中的实际处理流程，SDATN-AS 数据平面区分了数据融合、数据交换和数据传输三大基本功能；为适应 ATNAS 特殊的网络控制环境，SDATN-AS 控制平面采用了混合网络控制架构，以基于航空集群作战云架构的层次化控制模式为主体，兼具分布式网络控制模式；SDATN-AS 要求应用平面的网络应用需面向航空集群作战对网络服务的需求开发，同时考虑任务规划信息的输入；为实现网络与任务的灵活耦合，在管理平面增加了耦合模块和相应接口；通过结合航空集群 2 个典型的作战应用案例，进一步说明了 SDATN-AS 架构下网络的基本运行方式；最后对 SDATN-AS 未来研究方向及挑战进行了总结。本文对未来航空集群作战应用背景下的机载战术网络形态进行了探索，对 SDN 范式应用于机载战术网络构建的前景进行了探讨，为未来机载战术网络的演进方向提供了参考和借鉴。

参考文献：

- [1] CHENG B N, BLOCK F J, HAMILTON B R, et al. Design considerations for next-generation airborne tactical networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 138-145.
- [2] AMIN R, RIPPLINGER D, MEHTA D, et al. Design considerations in applying disruption tolerant networking to tactical edge networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(10): 32-38.

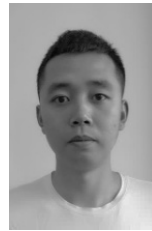
- [3] CHENG B N, CHARLAND R, CHRISTENSEN P, et al. Evaluation of a multihop airborne IP backbone with heterogeneous radio technologies[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2014, 13(2): 299-310.
- [4] KWAK, JOON K, SAGDUYU, et al. Airborne network evaluation: challenges and high fidelity emulation solution[J]. *Communications Magazine IEEE*, 2014, 52(10): 30-36.
- [5] 梁一鑫, 程光, 郭晓军, 等. 机载网络体系结构及其协议栈研究进展[J]. *软件学报*, 2016, 27(1): 96-111.
LIANG Y X, CHENG G, GUO X J, et al. Research progress on architecture and protocol stack of the airborne network[J]. *Journal of Software*, 2016, 27(1): 96-111.
- [6] 黄韬, 刘江, 魏亮, 等. 软件定义网络核心原理与应用实践(第二版)[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016.
HUANG T, LIU J, WEI L, et al. SDN core principles and application practice(2nd Edition)[M]. Beijing: POSTS & TELECOM Press, 2016.
- [7] KREUTZ D, RAMOS F M V, ESTEVES V P, et al. Software-defined networking: a comprehensive survey[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2014, 103(1): 10-13.
- [8] XIA W, WEN Y, FOH C H, et al. A survey on software-defined networking[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(1): 27-51.
- [9] MENDIOLA A, ASTORGA J, JACOB E, et al. A survey on the contributions of software-defined networking to traffic engineering[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(2): 918-953.
- [10] 刘韵洁, 黄韬, 张娇, 等. 服务定制网络[J]. *通信学报*, 2014, 35(12): 1-9.
LIU Y J, HUANG T, ZHANG J, et al. Service customized networking[J]. *Journal on Communications*, 2014, 35(12): 1-9.
- [11] HAQUE I T, ABU-GHAZALEH N. Wireless software defined networking: a survey and taxonomy[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(4): 2713-2737.
- [12] JAIN S, KUMAR A, MANDAL S, et al. B4: experience with a globally-deployed software defined WAN[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2013, 43(4): 3-14.
- [13] BERNARDOS C J, DE L O A, SERRANO P, et al. An architecture for software defined wireless networking[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2014, 21(3): 52-61.
- [14] CHEN T, MATINMIKKO M, CHEN X, et al. Software defined mobile networks: concept, survey, and research directions[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(11): 126-133.
- [15] TALEB T, KSENTINI A, JANTTI R. "Anything as a service" for 5G mobile systems[J]. *IEEE Network*, 2016, 30(6): 84-91.
- [16] MOHAMMADKHAAN A, RAMAKRISHNAN K K, RAJAN A S, et al. Considerations for re-designing the cellular infrastructure exploiting software-based networks[C]//2016 IEEE 24th International Conference on Network Protocols (ICNP). 2016: 1-6.
- [17] GALLUCCIO L, MILARDO S, MORABITO G, et al. SDN-WISE: design, prototyping and experimentation of a stateful SDN solution for wireless sensor networks[C]//2015 IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM). 2015: 513-521.
- [18] GALLUCCIO L, MILARDO S, MORABITO G, et al. Reprogramming wireless sensor networks by using SDN-WISE: a hands-on demo[C]//2015 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). 2015: 19-20.
- [19] KOBO H I, ABU-MAHFOUZ A M, HANCKE G P. A survey on software-defined wireless sensor networks: challenges and design requirements[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 1872-1899.
- [20] KU I, LU Y, GERLA M, et al. Towards software-defined VANET: architecture and services[C]//2014 13th Annual Mediterranean Ad hoc Networking Workshop (MED-HOC-NET). 2014: 103-110.
- [21] LIU K, NG J K Y, LEE V C S, et al. Cooperative data scheduling in hybrid vehicular ad hoc networks: VANET as a software defined network[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2016, 24(3): 1759-1773.
- [22] SALAHUDDIN M A, AL-FUQAHA A, GUIZANI M. Software-defined networking for RSU clouds in support of the Internet of vehicles[J]. *Internet of Things Journal*, 2015, 2(2): 133-144.
- [23] HE Z, CAO J, LIU X. SDVN: enabling rapid network innovation for heterogeneous vehicular communication[J]. *IEEE Network*, 2016, 30(4): 10-15.
- [24] BIZANIS N, KUIPERS F A. SDN and virtualization solutions for the Internet of things: a survey[J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 5591-5606.
- [25] SUN X, ANSARI N. EDGEIOT: mobile edge computing for the Internet of things[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, 54(12): 22-29.
- [26] MURUGAN T K A. Software defined networking for aeronautical communications[C]//IEEE/AIAA 32nd Digital Avionics Systems Conference. 2013: 1-20.
- [27] SAMPIGETHAYA K. Software-defined networking in aviation: opportunities and challenges[C]//Navigation, and Surveillance Conference (ICNS) Integrated Communication, 2015. 2015: 1-21.
- [28] GUPTA L, JAIN R, VASZKUN G. Survey of important issues in UAV communication networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(2): 1123-1152.
- [29] WICKBOLDT J A, DE J W, ISOLANI P H, et al. Software-defined networking: management requirements and challenges[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(1): 278-285.
- [30] NOBRE J, ROSARIO D, BOTH C, et al. Toward software-defined battlefield networking[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, 54(10): 152-157.
- [31] CHENG B N, MOORE S. A comparison of MANET routing protocols on airborne tactical networks[C]//Military Communications Conference, MILCOM 2012. 2012: 1-6.
- [32] ISHFAQ M, WAJAHAT M H, KIM H S. Reducing routing overhead of AODV protocol in multi-hop tactical airborne networks[C]//2015 15th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). 2015: 1751-1756.
- [33] MOORE S, AMIN R, RIPPLINGER D, et al. Performance evaluation of a disruption tolerant network proxy for tactical edge networks[C]//Military Communications Conference. 2016: 964-969.
- [34] 郑博, 张衡阳, 王宝良, 等. 航空自组网负载均衡地理路由策略[J]. *通信学报*, 2016, 37(12): 67-76.
ZHENG B, ZHANG H Y, WANG B L, et al. Load balancing geographic routing strategy for aeronautical ad hoc networks[J]. *Journal on Communications*, 2016, 37(12): 67-76.
- [35] XIE J, WAN Y, KIM J H, et al. A survey and analysis of mobility models for airborne networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014, 16(3): 1221-1238.
- [36] RIETH D, HELLER C, BLASCHKE D, et al. On the practicability of airborne MIMO communication[C]//2015 IEEE/AIAA 34th Digital Avionics Systems Conference (DASC). 2015: 2C1-1-2C1-10.

- [37] WANG J, SHAKE T, DEUTSCH P, et al. Topology management algorithms for large-scale aerial high capacity directional networks[C]//Military Communications Conference. 2016: 343-348.
- [38] HUANG Z, CORRIGAN D, NARAYANAN S, et al. Distributed and dynamic spectrum management in airborne networks[C]//MILCOM 2015 Military Communications Conference. 2015: 786-791.
- [39] HARRIS B W. Fiber optics for flight control systems[D]. Dayton: University of Dayton, 2014.
- [40] FASOLO E, ROSSI M, WIDMER J, et al. In-network aggregation techniques for wireless sensor networks: a survey[J]. IEEE Wireless Communications, 2007, 14(2): 70-87.
- [41] DIETZEL S, PETIT J, KARGL F, et al. In-network aggregation for vehicular ad hoc networks[J]. IEEE Communications Surveys & tutorials, 2014, 16(4): 1909-1932.
- [42] DIETZEL S, GÜRTLER J, KARGL F. A resilient in-network aggregation mechanism for VANETs based on dissemination redundancy[J]. Ad Hoc Networks, 2016, 37: 101-109.
- [43] BIANCHI G, GALLO P, GARLISI D, et al. MAClets: active MAC protocols over hard-coded devices[C]//The 8th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies. 2012: 229-240.
- [44] DE MIL P, JOORIS B, TYTGAT L, et al. snapMac: a generic MAC/PHY architecture enabling flexible MAC design[J]. Ad Hoc Networks, 2014, 17(3): 37-59.
- [45] GALLO P, KOSEK-SZOTT K, SZOTT S, et al. SDN@home: a method for controlling future wireless home networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(5): 123-131.
- [46] ZAMBRANO J, ZHANG E, YESTE-OJEDA O, et al. Development and implementation of new architecture for robust satellite data unit with software defined radio for airborne network[C]// 2016 IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference (DASC). 2016: 1-10.
- [47] MACEDO D F, GUEDES D, VIEIRA L F M, et al. Programmable networks from software-defined radio to software-defined networking[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(2): 1102-1125.
- [48] SUN S, KADOCH M, GONG L, et al. Integrating network function virtualization with SDR and SDN for 4G/5G networks[J]. IEEE Network, 2015, 29(3): 54-59.
- [49] ABOLHASAN M, LIPMAN J, NI W, et al. Software-defined wireless networking: centralized, distributed, or hybrid?[J]. IEEE Network, 2015, 29(4): 32-38.
- [50] 沈林成, 陈璟, 王楠. 飞行器任务规划技术综述[J]. 航空学报, 2014, 35(3): 593-606.
- SHEN L C, CHEN J, WANG N. Overview of air vehicle mission planning techniques[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(3): 593-606.

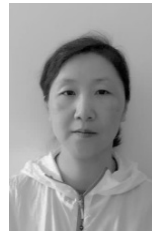
作者简介:



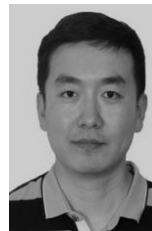
赵尚弘 (1964-), 男, 甘肃临洮人, 空军工程大学教授、博士生导师, 主要研究方向为空天信息网络、空间激光信息技术。



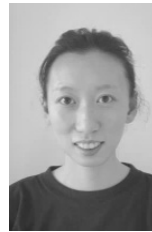
陈柯帆 (1990-), 男, 四川南充人, 空军工程大学博士生, 主要研究方向为空天信息网络、软件定义网络。



吕娜 (1970-), 女, 陕西西安人, 空军工程大学教授、博士生导师, 主要研究方向为航空数据链。



王翔 (1984-), 男, 甘肃静宁人, 博士, 空军工程大学讲师, 主要研究方向为空天信息网络、软件定义网络。



赵静 (1988-), 女, 陕西西安人, 空军工程大学博士生, 主要研究方向为软件定义网络、航空通信技术。