

基于SDN/NFV的航空信息网络架构

宋鑫康, 王翔, 付皓通, 赵尚弘

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077)

摘要: 航空信息网络作为集群作战效能涌现的关键支撑, 其设计架构将影响航空领域作战模式。基于航空集群未来作战需求, 介绍传统航空信息网络存在的不足, 分析SDN/NFV的技术特点, 在此基础上将SDN/NFV技术与航空信息网络相结合, 提出基于SDN/NFV的航空信息网络架构, 并简要阐述其组成部分; 总结基于SDN/NFV的航空信息网络架构的未来研究方向和挑战。对建立航空信息网络高效信息交互和资源的细粒度聚合能力进行探索, 为未来航空信息网络的发展提供参考。

关键词: 软件定义网络; 网络功能虚拟化; 航空集群; 网络服务

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2022013

Aviation Information Network Architecture Based on SDN/NFV

SONG Xinkang, WANG Xiang, FU Haotong, ZHAO Shanghong

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

Abstract: As the key support for the emergence of cluster combat effectiveness, the design architecture of aviation information network will influence the combat mode in the aviation field. Based on the future operational requirements of aviation cluster, the deficiency of traditional aviation information network was introduced and the technical characteristics of SDN/NFV was analyzed. On this basis, combined SDN/NFV technology and aviation information network, an aviation information network architecture based on SDN/NFV was proposed, and its components were briefly described. The future research directions and challenges of aviation information network architecture based on SDN/NFV were summarized. It also explored the ability of establishing efficient information exchange and fine-grained aggregation of resources in aviation information network, which provided reference for the development of aviation information network in the future.

Keywords: software defined network, network function virtualization, aviation cluster, network services

0 引言

航空领域作为夺取体系对抗优势的关键所在, 其在全域战场中的重要性日益凸显。随着作战思想的发展以及武器装备的更新, 未来航空作战将面临战场环境复杂、任务需求多样和体系对抗激烈等挑战。为实现航空集群作战能力涌现^[1], 亟需打破各航空平台间信息交互壁垒, 实践多平台协同的集群作战思想。集群作战强调以交感网络为支撑, 建立平台间高效信息交互能力, 基于高适应性空间组网技术实现各类作战资源的动态重组, 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)等进行聚合, 从而实现平台作战能力的优势互补, 突破单一航空平台作战效能瓶颈^[2-4]。航空集群示意图1所示, 作为集群作战效能充分发挥的重要保障, 航空信息网络通过短波、超短波、激光等无线通信链路链接各层次、各类型航空平台, 以此建立协同集群实现多平台间高效的信息共享。由于航空平台的机动性及战场环境的复杂性, 航空信息网络呈现覆盖范围广阔、网络拓扑动态、承载资源受限、任务需求多样的特点。

现有航空信息网络可保障当前作战模式下有限平台

收稿日期: 2021-10-30; **修回日期:** 2021-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.91638101); 陕西省自然科学基金资助项目(No. 2020JQ-483)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No.91638101), The Shanxi Natural Science Foundation of China(No. 2020JQ-483)

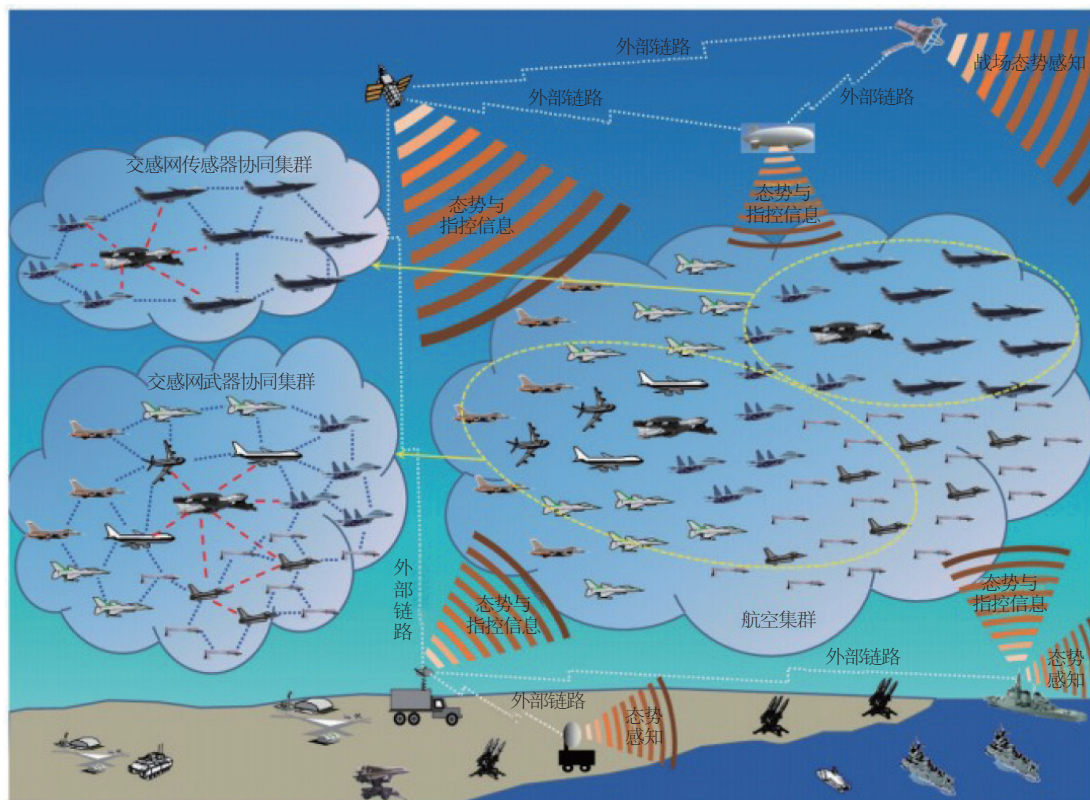


图1 地面信息港基本架构

间的作战协同，但其本质仍为依托作战能力强而全的航空平台发挥作战效能，存在资源配置固定、行动模式单一和任务预先规划的弊端。面向未来多样化作战任务需求存在如下问题。

(1) “烟囱式”航空信息网络架构导致信息流传输固化，作战过程中信息传输基本按照指挥关系、作战层级垂直流转，致使航空领域情报级探测数据共享速度慢。异构平台协同传输通道的缺失导致信息跨平台共享能力以及作战灵活性较弱，无法实现真正意义上的网络化、集群化作战，使得各平台承载资源的作用发挥相对独立，航空集群资源整体重构性较低。

(2) “封闭式”数据链系统使得网络灵活配置能力弱化，各系统的定制化设计使其内部集成了大量技术标准多样的复杂协议，致使各网络设备难以突破交互壁垒，实现互联互通互操作，限制了航空集群各成员间信息共享能力；各系统预先配置的控制策略使得作战无法适应复杂多变的战场环境，降低了航空集群的稳健性，同时单一固化的控制策略无法提供面向任务的差异化服务。各系统的独立式设计使得平台内部各功能模块高度硬耦合，平台任一模块受损可能导致平台整体功能的丧失。

(3) “补丁式”改善方式难以实现航空信息网络的

根本性变革，目前主要通过IP化、统一网络技术标准、增加额外转换系统等方式提升航空信息网络性能，虽然可以发挥一定效果但仍存在无法兼顾复杂信道环境以及多样化的控制协议和传输技术、增加了额外系统开销等问题，因此“打补丁”将不可避免地导致网络更加笨重和僵化，不能从根本上解决航空信息网络现存问题。

国内外机构开展了关于网络架构的相关研究以有效解决现存问题，但均处于探索与验证阶段。美国于2014年提出了层云远景概念项目，该项目聚焦于在全域全平台为导弹系统的指挥控制和任务控制提供一种创新方法，基于建立的资源数据池实现对己方作战资源和敌方来袭目标信息的管理，从而最大化发挥可用武器的作战效能。美国国防部高级研究计划局（DARPA）发布的分布式作战管理项目与层云项目相似，致力于开发实现高效作战管理的控制算法和决策辅助软件以及提高可操作性的先进驾驶舱人机交互技术，建立适应空空、空地作战任务需求的综合分布式管理能力。国内部分学者也开展了相关研究，参考文献[5]以多飞行器协同作战中关键交互技术为研究对象，以协同任务为背景提出设备级多机航空电子网络架构；参考文献[6]基于日益复杂的航空任务需求，应用云计算资源共享池思想提出了一种跨系

统平台高度综合的航空电子云系统,该系统具有跨系统平台的信息共享和协同处理能力。

软件定义网络(Software Defined Network, SDN)和网络功能虚拟化(Network Function Virtualization, NFV)技术的出现将为航空信息网络提供全新的发展思路。SDN技术将网络控制平面与数据平面解耦,控制器利用开放的编程接口和全局网络视图实现对数据转发设备的统一管理,可简化网络管理和配置操作,有利于创新应用的部署以及网络架构的演进^[7-11]。NFV技术^[12-13]可实现硬件和软件的分离,能够将大量网络设备合并到高容量的服务器之中,将给定的服务分解为多个基于软件实现并运行于通用服务器之上的虚拟网络功能,具有灵活的网络功能部署和拓展能力。因此,本文针对传统航空信息网络存在的问题,结合SDN及NFV技术特点,提出了基于SDN/NFV的航空信息网络架构,对其组成部分及运行机制进行介绍,同时简要概括其未来研究方向及挑战,旨在提升航空信息网络性能,满足航空领域未来发展需求,为航空信息网络的演进方向提供参考。

1 SDN/NFV技术概述

1.1 SDN技术概述

美国斯坦福大学Clean Slate研究组于2006年提出构建一种全新网络架构模型。该架构基于控制平面实现对数据平面转发状态的管理,即实现控制平面与数据平面的分离,成为SDN技术的雏形^[14]。2009年,MCKEOWN^[15]正式提出了SDN的概念。SDN具有灵活重构网络功能的优势。其基本架构如图2所示,图2(a)和图2(b)分

别对SDN进行形式化和概念性描述,主要结构包括应用层、控制层和数据层以及连接各平面的南、北向接口。

数据层由底层转发设备组成,具有收集和上报网络状态信息、接收控制层控制信息以及数据流的处理与转发功能。控制层负责对数据层的网络资源进行抽象、协议计算以及策略下发,同时控制层作为沟通应用层与数据层的中枢环节,通过南向接口向下统一管理数据层中的网络设备,通过北向接口向上为应用层提供抽象应用。应用层包含满足用户需求的各种网络服务,基于北向接口经控制层下达网络操作指令,调控数据层的各种网络资源以提供所需的网络服务,具有定制网络服务、业务编排部署等功能。南向接口建立了控制层与数据层间信息交互渠道,北向接口对底层网络设备和控制层操作进行抽象处理,可使用户便捷化选择网络服务。

1.2 NFV技术概述

传统网络中运维人员按照用户需求,部署相关物理设备来提供所需服务,而服务组件的部署需要遵循严格的逻辑顺序,使得网络拓扑和设备部署位置受到功能顺序的约束,致使传统网络服务更新周期漫长、敏捷性较弱和对硬件依附严重。同时,为应对流量的爆发式增长以及需求的多样性增加,服务提供商和技术人员分别需要进行新的物理设备的部署和维护,导致网络服务成本显著提高^[16]。

NFV技术的发展为服务提供商构建动态敏捷和服务感知的网络提供了解决思路。NFV旨在实现物理设备与可运行服务功能的分离,将一项服务分解为一系列以软

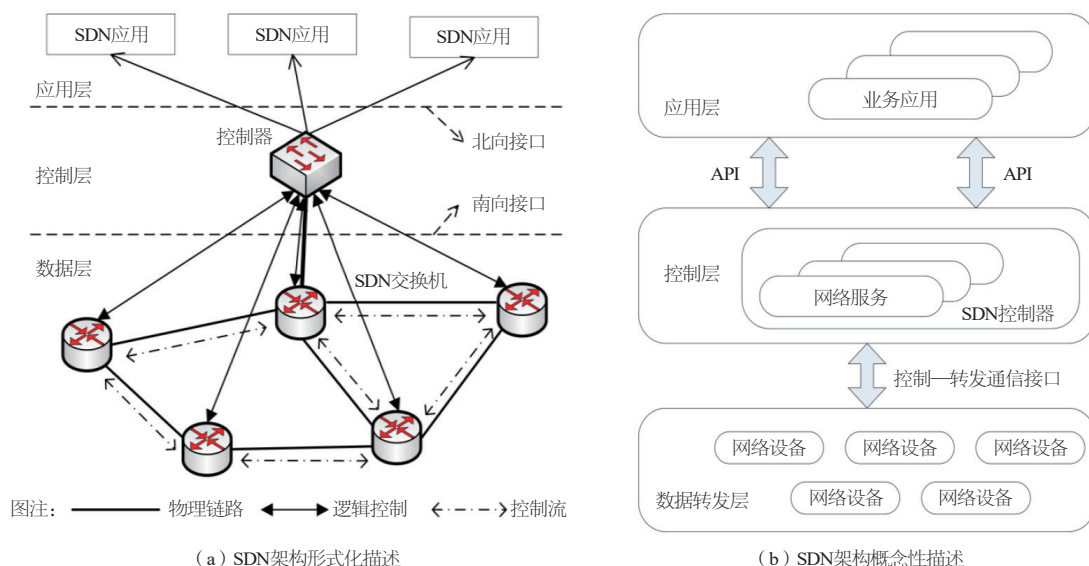


图2 SDN基本架构

件形式运行在通用服务器上的虚拟网络功能，从而提高服务功能部署的灵活性。虚拟网络功能可以在不同的网络位置重新部署和启动，而无须购买和安装新的硬件。与现有的网络相比，NFV技术可实现软件与硬件解耦，允许硬件和软件的开发和运维相分离，有助于分别对其进行研究。网络功能部署的灵活性有助于重新分配和共享基础设施资源。此外，NFV技术可通过动态扩展虚拟网络功能满足多样化服务需求。

1.3 应用SDN/NFV技术的优势

SDN技术具有实现数据平面和控制平面分离的优势，依靠逻辑集中的控制器可获得航空信息网络的全局网络视图，可有效适应航空信息网络覆盖范围广、拓扑动态变化和任务需求多样的特点。数据平面和控制平面的解耦使得航空平台设备免于配置复杂协议，打破信息流的固化传输模式；控制器的全局感知能力可实现根据网络状态调整控制策略，克服预先配置的控制策略无法应对战场环境变化的弊端。控制器的部署有助于指挥人员立足全局完成作战的决策筹划，从而充分发挥作战效能。

受体积和质量限制，航空平台所承载的设备有限，传统依托物理设备提供所需服务的方式对集群效能的提升形成制约。NFV技术与航空信息网络的结合可实现资源的细粒度管理，基于通用服务器以软件提供所需服务的方式可动态调整服务功能实例以满足不同作战任务需求，实现有限承载条件下资源的高效利用。同时，NFV技术将有助于提高作战的稳健性，一旦某平台受损，可通过迁移方式保证所需服务的正常运行。

2 基于SDN/NFV的航空信息网络架构

借鉴SDN/NFV的技术特点以及集群协同、资源重构的作战理念，可构建基于SDN/NFV的航空信息网

络架构，按照侦查、判断、决策、执行（Observation Orientation Decision Action, OODA）循环构建航空集群资源池，实现对航空集群各类资源的统一管控。根据各任务的服务功能需求灵活调用所需资源，形成富有弹性的作战服务链，在承载资源有限的条件下充分发挥航空集群作战效能。

2.1 网络架构

根据实际作战需求，将基于SDN/NFV的航空信息网络架构划分为装备层、控制层、管理层和服务层，如图3所示。

装备层主要包括高速飞行且机动性强的战斗机、无人机以及飞行位置和特性相对稳定的侦察机及预警机等。航空平台作为服务资源的有效载体，基于NFV技术的航空信息网络可改变现有航空平台承载专用硬件设备的现状；基于通用服务器实现各类服务功能，从而提高航空平台资源利用率和航空信息网络面向任务的差异化服务能力。

部署控制器于指挥与控制平台构建航空信息网络控制层，通过各航空平台安装的虚拟化管理程序将各类航空平台承载资源进行聚合重构，形成各类作战资源池，包括计算资源、存储资源、网络资源、传感器资源和武器资源等，可打破平台作为最小作战单元的局限。同时部署逻辑集中的控制器，赋予了航空信息网络全局资源感知能力，可实现现有资源的实时监控和新增资源的随遇接入。

管理层作为网络架构的核心组成部分，完成对平台各类资源的调度以及服务需求的管理。例如服务接入和管理完成将复杂服务分解为一系列服务要素，再对各服务要素进行解析；NFV编排完成对软件资源的管理和编排，并对服务的生命周期进行管理；虚拟网络功能（Virtual Network Function, VNF）管理主要实现VNF的

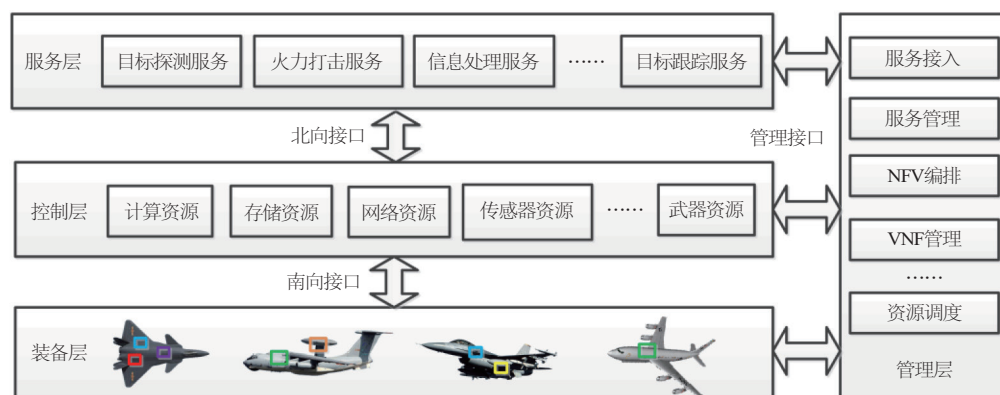


图3 基于SDN/NFV的航空信息网络架构

生命周期管理,包括VNF的启动上线、更新、状态监控以及动态扩缩容等工作。管理层可结合控制层所提供的资源状态信息对航空平台进行统一管理,协调各网络设备资源,服务于任务需求。统一管理的方式可实现对航空集群资源的细粒度管理,达到对网络性能和资源利用率的联合优化,简化了各平台设备为满足作战服务需求而进行的复杂协商过程。

服务层为指挥人员提供作战所需的各类服务,其中服务由管理层基于底层网络提供的各类作战资源,进行实时、高速资源管控调度获得。基于SDN/NFV的航空信息网络架构隐藏了底层航空设备的实现细节,对其进行抽象化处理,为指挥人员提供了满足任务所需的各类服务接口,使作战部署便捷化。此外,指挥人员通过可编程接口定制服务类型,基于定制服务的特点和相关参数,管理层可匹配相应资源,从而适应作战任务多样化的趋势。

基于SDN/NFV的航空信息网络架构具有智能化、集群化的优势,应用NFV技术实现了服务功能与硬件的分离,使服务功能的部署位置更加灵活,避免了传统航空信息网络平台与功能紧耦合的弊端,增强了航空集群的抗毁能力。同时基于SDN/NFV的航空信息网络架构,通过集群内各平台资源的按需、智能组合与拆解来提供满足任务需求的服务,可实现战场资源自由管控、任务规划灵活按需服务。通过管理层对资源的统一调度,可打破不同系统的信息交互壁垒,实现战场信息的快速共享,充分发挥航空集群作战效能。

2.2 航空信息网络应用 SDN/NFV 技术的分析

传统航空信息网络追求基于作战能力强而全的航空平台发挥作战效能,基于SDN/NFV的航空信息网络则追求智能驱动、资源重构、集群作战的优势;基于多平台实现信息的快速获取共享、高效处理决策、迅速响应部署,缩短OODA流程的循环周期,充分发挥航空集群作战效能,夺取航空领域作战的体系对抗优势。

结合航空集群作战特点,基于SDN/NFV的航空信息网络采用“云一端”架构,包括“管理云端”“控制客户端”两部分。“控制客户端”部署于相对稳定的航空平台上,完成对邻近平台承载作战资源的状态监控,执行对平台资源的分割、聚合。但集中管控的控制器存在单点故障的隐患,因此通过引入多控制器来提高控制平面的可靠性,同时将控制器划分为“平台级”和“编队级”。“平台级”负责实现对局部区域内资源状态信息的监控,“编队级”负责对“平台级”控制器的监测和维护状态信息的一致。一旦某控制器发生故障,则其

负责区域由同级别控制器分摊管理。“管理云端”不再依托某航空平台而存在,而是航空集群各类资源汇总形成的云平台,各“控制客户端”需不断上报所属平台的资源状态以及平台获取的作战情报以供“管理云”进行统一调度;同时根据各服务对资源的需求情况,“管理云”下达指令至航空平台调用平台资源。

在实际作战过程中,为提高关键节点的生存能力,通常构建有人/无人协同的航空集群,结合无人机机动性强、承载能力有限的特点将大量低成本、高机动的无人机部署在集群前沿,发挥其探测优势;将飞行位置相对稳定的航空平台置于集群内部,在提高其抗毁能力的同时充分发挥其资源感知能力。同时,航空集群内部建立链路智能切换机制,以灵活柔性、按需时变的交互机制实现信息的快速共享,各平台数据不断上传并计算融合,形成全局态势信息,便于指挥人员进行决策部署,从而赢得战场感知优势。

网络运行机制如图4所示。以火力打击任务为例对作战流程进行说明,当无人机探测发现敌方目标后上报目标相关信息,指挥人员按照火力打击任务需求调用相关服务,服务层将服务请求下发至“管理云”。管理层接收请求后结合“控制客户端”反馈资源状态,计算各服务功能最佳部署位置,完成武器选择、目标分配等一系列筹划,并由最优平台发射对敌导弹。管理层在攻击完成后结合无人机所得情报对打击效果和战场态势进行再次评估并反馈给指挥人员以便进行二次决策筹划。

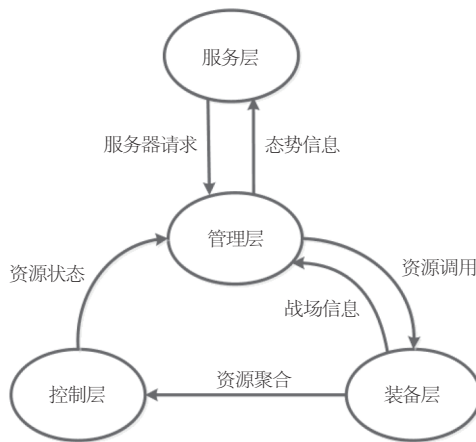


图4 网络运行机制

基于SDN/NFV的航空信息网络的要害松耦合程度达到新高度,不再囿于各平台限制,而是对整个航空集群的作战功能要素进行动态优化组合,实现基于任意传感器的数据,从任意航空平台发射武器,形成自由重构、

稳健赋能的分布式作战服务链。

3 未来研究方向及挑战

基于SDN/NFV的航空信息网络架构是提升航空信息网络性能以应对未来挑战的一次尝试。本文对基于SDN/NFV的航空信息网络架构进行了简要介绍,但要实现航空信息网络架构的实际应用与部署,仍有许多亟待解决的具体问题。本节对基于SDN/NFV的航空信息网络的未来研究方向及挑战进行总结。

(1) 网络架构的丰富与完善

本文给出了基于SDN/NFV的航空信息网络设计框架,对网络架构的组成部分及相互关系进行了介绍与分析,但对基于SDN/NFV网络架构中涉及的更多细节问题未做更为深入的探讨。例如,在复杂体系中如何实现航空平台智能协作能力的涌现,有人机与无人机互联互通、互操作的标准化接口,协议和服务设计问题以及复杂战场环境下态势信息的分析处理等^[17],以上具体问题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。

(2) 态势感知技术的发展

航空集群作战效能的发挥以战场态势正确可靠的感知为重要前提,有人机/无人机协同作战模式扩大了作战覆盖范围,网络拓扑和平台位置不确定性进一步增强,使得战场态势呈现复杂化、复合化、隐蔽化的特点^[17-20],极大增加了对战场态势的感知难度。因此多平台分布式协同探测,多源信息的融合处理以及敌方目标的识别、跟踪等一系列增强战场态势感知能力的技术成为未来发展亟待解决的问题。

(3) 网络管理技术的研究

基于SDN/NFV的航空信息网络架构中管理层功能涵盖网络资源调度、资源服务匹配、态势信息处理、性能检测和分析优化等,是发挥航空信息网络基本效能、提高资源利用效率的关键。目前,基于SDN/NFV的航空信息网络中管理层功能的实现仍有很多内容未完善,如作战计划的科学规划、态势信息的高效处理等问题。因此,对于管理层如何实现高效的网络管理还需要进行大量的研究工作。

(4) 资源—服务匹配机制研究

航空集群作战能力的涌现关键在于打破航空平台限制,通过松耦合方式实现跨域组合、细粒度的资源动态聚合,服务功能与资源的匹配关系将直接决定作战效能能否充分发挥,然而航空集群各类作战资源功能、属性异构性显著,且不同资源之间关联性不同。同时资源的聚合不仅与服务需求紧密耦合,还受到战场态势、作战

意图和平台功能属性等因素约束。因此,如何精确描述服务需求以及各种约束条件,深度挖掘航空集群服务与资源聚合的显性和隐性关系,建立服务与资源精确匹配机制是未来重要的研究方向。

(5) 航空信息网络可靠性研究

基于SDN/NFV的航空信息网络可靠性研究包括数据平面可靠性和控制平面可靠性两方面。数据平面可靠性问题包括链路和节点的故障,SDN的集中式管控方式提供了全局视图,便于故障的定位及影响范围的确定,进而通告相关平台。但如何降低控制器与平台间额外的通信开销问题亟待解决,同时为避免链路备份产生的额外资源占用,需要对低时延的网络修复机制进行研究。控制平面可靠性问题包括控制器的可靠部署和故障恢复问题,即如何部署控制器以实现网络传输可靠性最大化以及各控制器的备份问题。

参考文献：

- [1] 梁晓龙, 何吕龙, 张佳强, 等. 航空集群构型控制及其演化方法[J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(3): 277-287.
LIANG X L, HE L L, ZHANG J Q, et al. Configuration control and evolutionary mechanism of aircraft swarm[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2019, 49(3): 277-287.
- [2] 赵尚弘, 陈柯帆, 吕娜, 等. 软件定义航空集群机载战术网络[J]. 通信学报, 2017, 38(8): 140-155.
ZHAO S H, CHEN K F, LYU N, et al. Software defined airborne tactical network for aeronautic swarm[J]. Journal on Communications, 2017, 38(8): 140-155.
- [3] 邱华鑫, 段海滨. 从鸟群集群飞行到无人机自主集群编队[J]. 工程科学学报, 2017, 39(3): 317-322.
QIU H X, DUAN H B. From collective flight in bird flocks to unmanned aerial vehicle autonomous swarm formation[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(3): 317-322.
- [4] CHEN K F, LYU N, ZHAO S H, et al. A scheme for improving the communications efficiency between the control plane and data plane of the SDN-enabled airborne tactical network[J]. IEEE Access, 2018, 6: 37286-37301.
- [5] 蒲小勃, 李燕, 徐杨, 等. 多机航空电子网络架构与评价方法的研究[J]. 电光与控制, 2015, 22(1): 1-5.
PU X B, LI Y, XU Y, et al. Research on architecture and evaluation of multi-aircraft avionics network[J]. Electronics Optics & Control, 2015, 22(1): 1-5.
- [6] 鲁俊, 何锋, 熊华钢. 航空电子云系统架构与网络[J]. 航空电子技术, 2017, 48(3): 1-9.

- LU J, HE F, XIONG H G. System and network architecture of avionics cloud[J]. Avionics Technology, 2017, 48(3): 1-9.
- [7] 李珂昕. 基于SDN的天地一体化动态拓扑仿真研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.
- LI K X. Research on simulation of space-ground integrated dynamic network based on sdn[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [8] SAMPIGETHAYA K. Software-defined networking in aviation: opportunities and challenges[C]//Proceedings of 2015 Integrated Communication, Navigation and Surveillance Conference (ICNS). Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-21.
- [9] UR RAHMAN S, KIM G H, CHO Y Z, et al. Deployment of an SDN-based UAV network: controller placement and tradeoff between control overhead and delay[C]//Proceedings of 2017 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1290-1292.
- [10] 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.
- [11] 周家欣, 吕娜, 陈柯帆. 软件定义多平台航空电子网络架构[J]. 计算机工程, 2019, 45(4): 41-48, 55.
- ZHOU J X, LYU N, CHEN K F. Architecture of software defined avionics network for multi-platform[J]. Computer Engineering, 2019, 45(4): 41-48, 55.
- [12] 赵瑾. 天地一体化网络虚拟化资源管理技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- ZHAO J. Research on virtualized resource management technology of space-ground integrated network[D]. Xi'an: Xidian University, 2020.
- [13] 苟建国, 吕高峰, 孙志刚, 等. 网络功能虚拟化技术综述[J]. 计算机工程与科学, 2019, 41(2): 260-267.
- GOU J G, LYU G F, SUN Z G, et al. Review on network function virtualization technology[J]. Computer Engineering & Science, 2019, 41(2): 260-267.
- [14] 闵士权. 我国智能天基综合信息网构想[C]//2018软件定义卫星高峰论坛会议摘要集. 北京: [出版社不详], 2018.
- MIN S Q. The concept of China's intelligent space-based integrated information network [C]// 2018 software-defined satellite summit forum conference summary set. Beijing: [s.n.], 2018.
- [15] MCKEOWN N. Software-Defined networking. In: Proc. of the INFOCOM Key Note[EB]. 2009.
- [16] WU J, ZHANG Z F, HONG Y, et al. Cloud radio access network (C-RAN): a primer[J]. IEEE Network, 2015, 29(1): 35-41.
- [17] 贾高伟, 侯中喜. 美军有/无人机协同作战研究现状与分析[J]. 国防科技, 2017, 38(6): 57-59.
- JIA G W, HOU Z X. The analysis and current situation about the United States military manned/unmanned aerial vehicle[J]. National Defense Science & Technology, 2017, 38(6): 57-59.
- [18] 张旭东, 吴利荣, 肖和业, 等. 由美军作战概念出发的有人机/无人机智能协同作战解析[J]. 无人系统技术, 2020, 3(4): 91-96.
- ZHANG X D, WU L R, XIAO H Y, et al. Analysis on concept of intelligent cooperative combat of manned/unmanned aerial vehicle evolving from the combat concept of American[J]. Unmanned Systems Technology, 2020, 3(4): 91-96.
- [19] ZHAO Y Y, WANG X K, WANG C, et al. Systemic design of distributed multi-UAV cooperative decision-making for multi-target tracking[J]. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 2019, 33(1): 132-158.
- [20] XU J, GUO Q, LI Z X. Dynamic selection method for cooperative decision-making center of multi-UAV system based on cloud trust model[C]//Proceedings of 2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 922-926.

[作者简介]



宋鑫康 (1997-), 男, 空军工程大学信息与导航学院硕士生, 主要研究方向为航空信息网络、网络虚拟化。



王翔 (1984-), 男, 博士, 空军工程大学信息与导航学院讲师, 主要研究方向为空天信息网络、网络虚拟化。



付皓通 (1998-), 男, 空军工程大学信息与导航学院硕士生, 主要研究方向为航空信息网络、资源分配。



赵尚弘 (1964-), 男, 博士, 空军工程大学信息与导航学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为激光原理、天地一体化信息网络、微波光子、量子密钥分发和光电混合交换。