

面向新型电力系统的天空地一体化网络架构设计

左浩然^{1,2}, 孟建³, 周飞飞^{1,2}, 朱云飞^{1,2}, 姜沁汝^{1,2}, 梁伟^{1,2}, 蔡焱森^{1,2}

(1. 国网电力科学研究院有限公司, 江苏 南京 211106;

2. 南京南瑞信息通信科技有限公司, 江苏 南京 211106;

3. 国网山东省电力公司, 山东 济南 250001)

摘要: 随着新型电力系统源网荷储高效互动需求和控制类业务急剧增加, 传统电力通信网逐渐难以满足新型电力系统业务需求, 为此, 提出一个综合天基、空基和地基通信资源的电力天空地一体化网络架构。在此基础上, 基于强化学习设计了智能资源调度与编排算法, 以实现全时全域无缝覆盖。仿真实验结果表明, 该架构和算法能够显著提高资源利用率、降低业务调度时延, 并提升网络的吞吐量和可靠性, 从而有效应对电力通信网络的需求。

关键词: 新型电力系统; 天空地一体化网络; 强化学习

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025032

Design of Space-Air-Ground Integrated Network Architecture for New Power System

ZUO Haoran^{1,2}, MENG Jian³, ZHOU Feifei^{1,2}, ZHU Yunfei^{1,2}, JIANG Qinru^{1,2}, LIANG Wei^{1,2}, CAI Yaosen^{1,2}

1. State Grid Electric Power Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211106, China

2. Nanjing NARI Information and Communication Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China

3. Shandong Province Electric Power Company, Jinan 250001, China

Abstract: With the rapid increase in the demand for efficient interaction between source, grid, load, and storage in the new power system, as well as control related services, traditional power communication networks are gradually unable to meet the business needs of the new power system. Therefore, this paper proposes a power space-air-ground integrated network architecture that integrates space-based, space-based, and ground-based communication resources. On this basis, an intelligent resource scheduling and orchestration algorithm was designed based on reinforcement learning to achieve seamless coverage of all time and all domain. Simulation experiments show that this architecture and algorithm can significantly improve resource utilization, reduce business scheduling delays, and enhance network throughput and reliability, thereby effectively addressing the needs of power communication networks.

Keywords: new power system, space-air-ground integrated network, reinforcement learning

0 引言

在全球能源结构转型以及“双碳”目标提出的背景下, 新型电力系统作为实现该目标的关键基础设施, 正经历着前所未有的挑战与机遇。电力系统的通信网络, 作为连接电力系统各个环节的“神经网络”, 其性能和可

靠性对电力系统的稳定运行以及能源的有效分配起着至关重要的作用^[1-2]。随着新型电力系统对源网荷储高效互动的需求不断增加, 以及控制类业务的急剧增长^[3], 电力通信系统在覆盖范围、应急通信、传输可靠性等方面面临着更高的要求。然而, 以光纤通信技术为主的传统电力通信网, 正逐渐难以满足新型电力系统日益增长的

收稿日期: 2015-01-03; 修回日期: 2025-04-30

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目 (5700-202455369A-3-1-DG)

Foundation Item: State Grid Corporation of China Headquarters Science and Technology Project (5700-202455369A-3-1-DG)

业务需求^[4-5]。与此同时,卫星通信凭借其覆盖范围广、网络搭建快速灵活、不受地域限制等优势,逐渐成为新型电力系统的重要补充手段^[6]。

为满足全域灵活智能的通信覆盖需求,电力通信逐步向天空地一体化网络(space-air-ground integrated network, SAGIN)演进。天空地一体化网络是一种旨在实现全时空、全领域覆盖的通信网络架构。它通过深度整合卫星网络、空中网络和地面网络,打破了各个网络系统之间的界限,实现了互操作性、资源共享和服务一体化。天空地一体化网络,旨在构建全域覆盖、泛在智能、灵活可靠的新型通信网络架构。天空地一体化网络突破一体化体制的边界限制,深度融合天基、空基、地基等网络,是未来信息基础设施的重要组成部分。通过综合利用空、天、地多维信息资源,结合人工智能、大数据、智能制造等先进技术,天空地一体化网络为业务广域覆盖、应急救援、分布式资源调控等众多的应用场景提供强大支撑。然而,天空地一体化网络虽然具有跨域跨介质、节点种类繁多、网络拓扑动态等特点,但是面临一体化网络体系差异大、通信环境复杂不确定、多维资源稀疏高动态、海量业务需求多样化等难题。在资源受限、环境复杂、需求各异的约束下,实现多维一体化资源的统一管理存在巨大挑战。

如图1所示,天空地一体化网络的天基部分由各类卫星系统组成,构建了天基骨干网与天基接入网,具备全球覆盖、泛在连接、宽带接入等功能;地基部分主要由地面互联网和移动通信网构成,主要为业务密集区域提供网络服务;空基部分由高空通信平台、无人机自组网络等构成,可实现覆盖增强、边缘服务使能以及灵活的网络重构。凭借多维度网络的深度整合,天空地一体化网络能够轻松应对各种不同的网络服务需求,达成“网络一体化、功能服务化、应用定制化”的目标。

近年来,国内外学者对天空地一体化网络进行了广泛的研究。文献[7]提出了天空地一体化网络的概念,强调了其在全域覆盖和泛在智能方面的优势,但未深入探讨其在新型电力系统中的具体应用。文献[8]研究了天空地一体化网络在应急通信中的应用,展示了其在应对自然灾害等紧急情况时的高效性,但缺乏对电力系统特定需求的考虑。文献[9]探讨了天空地一体化网络的资源管理问题,提出了一种基于多维资源优化的解决方案,但未涉及强化学习在资源调度中的应用。文献[10]提出了基于人工智能的天空地一体化网络架构,但主要关注于数据融合和智能处理,对电力系统的通信需求和业务特性考虑不足。

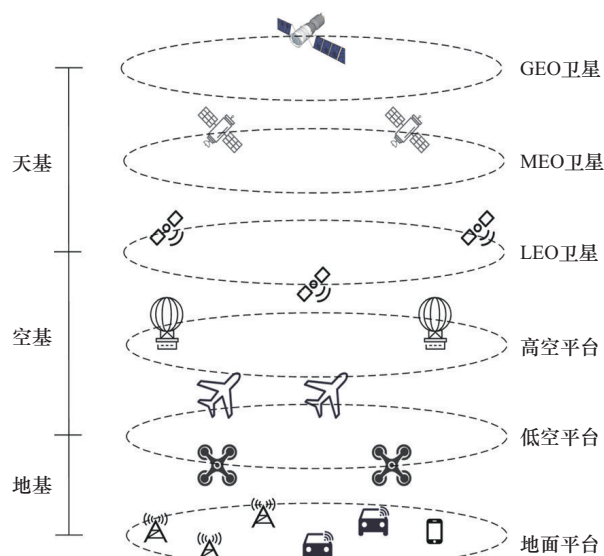


图1 天空地一体化网络架构

尽管已有研究在天空地一体化网络的理论和技术方面取得了重要进展,但现有成果在新型电力系统的特定需求下仍存在不足。例如,文献[11]提出了天空地一体化网络在电力系统中的应用框架,但未充分考虑电力系统的实时性和可靠性要求。文献[12]研究了天空地一体化网络的融合技术,但缺乏对电力业务场景的深入分析。文献[13]探讨了天空地一体化网络的抗干扰技术,但未涉及电力系统的复杂业务需求和动态环境适应性。

文献[14]提出了一种基于软件定义网络的天空地一体化网络架构,强调了其在资源灵活配置方面的优势,但未考虑电力系统中对低时延和高可靠性的严格要求。文献[15]研究了天空地一体化网络在智能电网中的应用,提出了一种多层网络融合方案,但在资源调度的智能化方面仍有待提高。文献[16]探讨了天空地一体化网络在分布式能源管理中的应用,提出了一种基于大数据的优化方法,但未涉及强化学习在动态资源分配中的应用。文献[17]提出了一种基于机器学习的天空地一体化网络资源管理方法,但在电力系统的具体应用中缺乏详细的实验验证。

针对以上问题,为了提高天空地一体化网络的高效融合,本文分析当前天空地一体化网络的发展现状和新型电力系统对天空地一体化网络的特殊需求,提出了综合天基、空基和地基通信资源的电力天空地一体化网络架构,基于强化学习设计智能资源调度与编排算法,实现全时全域无缝覆盖,最后通过仿真实验验证所提出的网络架构和算法的有效性。

1 天空地一体化网络在新型电力系统中的需求分析

新型电力系统正朝着“源网荷储”全面协同、数据驱动AI决策、电力物联网全局感知主动防御、电力电子与现代通信相结合的敏捷响应方向演变。这些趋势对电力通信网络提出了更高的要求,尤其是在覆盖范围、传输可靠性、应急通信和资源管理等方面。下面选取几个电力典型业务场景进行需求分析。

1.1 分布式能源调控

分布式能源调控系统的通信架构涵盖了传感层、接入层、骨干层以及调控中心。传感层设备的分布广泛且分散,其数据传输依赖于高可靠性和低时延的通信链路,以确保数据能够实时、准确地上传至调控中心。然而,分布式能源设备的布局广泛,尤其在偏远地区,传统通信网络的覆盖能力有限,难以实现全区域的有效覆盖。此外,分布式能源调控系统对数据传输的实时性和准确性要求极高,而传统通信网络在复杂环境下容易受到信号干扰,导致数据丢失或传输时延,从而影响调控系统的稳定性和可靠性。因此,如何优化通信网络架构以满足分布式能源调控系统的需求,已成为当前亟待解决的关键问题。

1.2 输电线路在线监测及无人机巡检

随着电力系统规模的不断扩大,输电线路的巡检工作面临着诸多挑战。传统的人工巡检方式不仅效率低下,而且作业人员面临着诸多安全风险。近年来,无人机技术的迅猛发展为输电线路巡检提供了新的解决方案。无人机凭借其灵活性高、覆盖范围广等优势,能够有效降低电力作业人员的工作强度,显著提高巡检效率。然而,输电线路的分布范围广泛,无人机在执行巡检任务时需要在广阔的区域内移动,这对通信网络的覆盖能力提出了严峻考验。传统通信网络在广域覆盖方面存在明显不足,难以满足无人机巡检的连续性要求。此外,无人机在巡检过程中需要实时传输高清图像和视频数据,这不仅对通信网络的带宽提出了极高要求,还对网络的时延性能提出了严格限制。与此同时,无人机在飞行过程中的位置不断变化,通信链路必须具备高动态适应性,以确保数据传输的稳定性和可靠性。因此,如何构建一种能够满足无人机输电线路巡检需求的电力天空地一体化通信网络,已成为亟待解决的关键问题。

1.3 变电设备状态感知

变电设备的运行状态感知是保障电网安全稳定运行

的关键环节。然而,传统通信网络在变电设备状态感知方面存在诸多瓶颈。变电设备状态感知涉及多种传感器和监测设备,这些设备产生的数据来源多样且格式各异,需要进行有效的融合处理。然而,传统网络在数据融合方面存在效率低下、兼容性差等问题,难以满足变电设备状态感知的需求。此外,变电设备状态感知对数据传输的可靠性和实时性要求极高,传统网络在复杂电磁环境和恶劣天气条件下容易出现数据丢失的情况和产生传输时延,从而影响电网的实时监控和故障预警。与此同时,变电设备状态感知需要大量的计算和存储资源支持,传统网络架构缺乏灵活性,难以实现资源的动态分配和高效管理。因此,亟须构建电力天空地一体化通信网络架构,以提升变电设备状态感知的效率和可靠性,为电网的安全运行提供有力支撑。

1.4 智能分布式配电自动化

配电自动化系统的高效运行高度依赖于高可靠性和低时延的通信网络,以保障数据传输的实时性与控制操作的精准性。然而,传统通信网络在智能分布式配电自动化领域存在显著不足。配电自动化系统需实时传输遥测、遥信数据以及控制命令,对通信网络的低时延要求极高,而传统网络在实时性方面表现欠佳,难以满足系统需求。此外,配电自动化系统涵盖大量终端设备与多种业务类型,对通信网络的资源分配和管理能力提出了更高要求。传统网络架构相对固定,难以实现资源的灵活调配与高效管理。在面对自然灾害等紧急情况时,传统通信网络的抗灾能力较弱,容易瘫痪,无法为配电自动化系统提供可靠的应急通信支持,从而影响电网的应急响应与快速恢复能力。因此,亟须探索与构建电力天空地一体化通信网络架构,以提升配电自动化系统的通信保障能力,增强电网的智能化与韧性。

1.5 配网保护

配网保护系统的高效运行高度依赖于高可靠性和低时延的通信网络,以确保故障检测的及时性和保护动作的准确性。配网保护系统对数据传输的可靠性和实时性有着极为严格的要求,任何数据的丢失都可能导致保护动作的误判,进而影响电网的安全稳定运行。然而,传统通信网络在复杂环境下容易出现数据丢失的情况和产生传输时延,难以满足配网保护系统对数据传输的高要求。此外,配网保护系统涉及大量的终端设备和多种业务类型,对通信网络的资源分配和管理能力提出了更高的要求。因此,亟须探索一种电力天空地一体化通信网络架构,以满足配网保护系统对数据传输可靠性和实时

性的严格要求，同时实现资源的灵活分配和高效管理，为配网保护系统的稳定运行提供有力支撑。。

典型电力业务与通信指标映射关系见表1。

针对以上业务场景的通信需求，天空地一体化网络基于天基、空基和地基通信资源，实现对电力场景设备的全域覆盖，确保无缝数据传输。利用卫星通信的广覆盖和高可靠特性，结合地面通信，为天空地一体化网络提供稳定的传输链路。引入网络状态感知和智能调度算法，实现通信资源的动态分配和优化，满足不同电力业务场景的通信需求。

2 面向新型电力系统的天空地一体化网络架构与智能算法设计

在新型电力系统的发展背景下，构建一个高效、灵活且可靠的通信网络架构至关重要。下面将详细介绍面向新型电力系统的天空地一体化网络架构设计以及智能资源调度与编排算法设计。通过整合地面通信基础设施、空中平台以及卫星网络，实现新型电力系统全时全域无缝覆盖。同时，提出一种基于强化学习的智能资源调度

与编排算法，实现网络资源分配的优化，提升网络性能和服务质量。

2.1 天空地一体化网络架构设计

基于新型电力系统的发展需求，本文提出了基于新型电力系统的天空地一体化网络架构，架构通过整合地面通信基础设施、空中平台以及卫星网络，实现新型电力系统全时全域无缝覆盖。

如图2所示，基于新型电力系统的天空地一体化网络架构包括端侧、本地通信网、异构网络融合网关、远端通信网、电力天空地一体化网络管控平台。其中，终端指源网荷储终端，本地通信网包括自组网、HPLC、无线物联网等通信方式。异构网络融合网关包括通信模块、网络状态感知模块和安全模块，支持多种本地和远程通信方式，通过网络信息多维感知可实现电力业务服务质量映射、异构网络转存算资源编排等功能，适配多种业务的差异化通信需求。远端通信网包括4G/5G无线公网、无线专网、光纤网络，以及高中低轨卫星等通信方式。电力天空地一体化网络管控平台可实现电力异构网络的集中管控、智能运维和部分数据处理功能。

表 1 典型电力业务与通信指标映射关系

业务类型	时延	隔离性	可靠性
分布式能源调控	秒级	要求和其他经营管理区业务物理隔离	99.999%
输电线路在线监测及无人机巡检	毫秒级	要求与其他大区业务物理隔离	99.99%
变电设备状态感知	毫秒级	要求与其他大区业务物理隔离	99.99%
智能分布式配电自动化	毫秒级	要求和其他 III/IV 管理大区业务物理隔离	99.999%
配网保护	毫秒级	要求和其他经营管理区业务物理隔离	99.999%

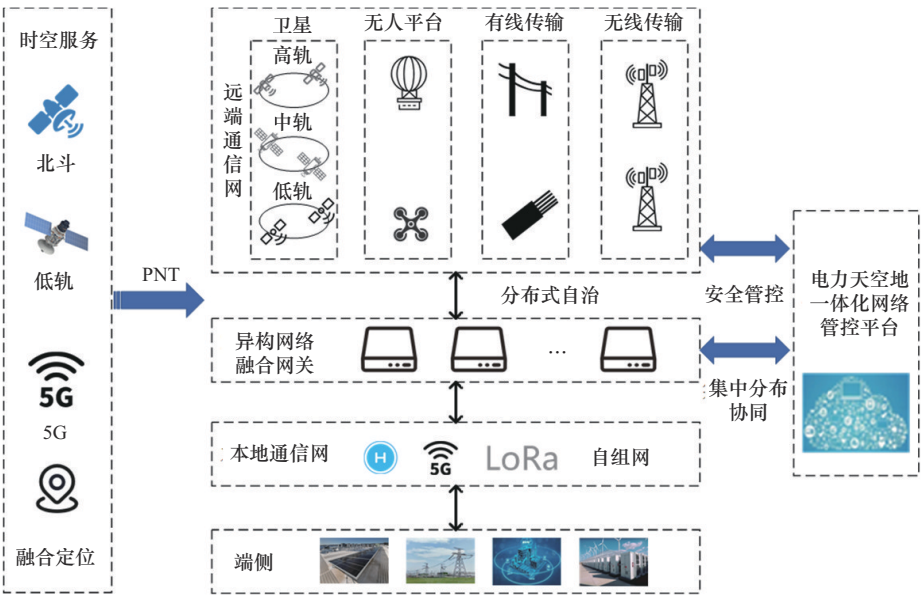


图2 天空地一体化网络架构框图

在设计电力异构融合网络架构时，面临着网络的复杂性增加、用户数据量激增、业务时空分布的广泛差异以及 QoS 需求的多样性等挑战。这些因素导致网络管控变得愈加复杂。为了应对这些挑战，可以充分发挥人工智能的作用，并融合通信、感知、计算功能，充分利用通感算互惠增强，以提升未来电力通信网络的管控能力。

为此，在体系架构物理组成设计的基础上，拟进一步探索逻辑通感算融合的电力异构网络逻辑分层模型，初步设计的逻辑分层模型如图 3 所示。电力异构网络逻辑分层模型主要包括资源层、感知层、连接层、功能层和应用层。其中，资源层包括通信资源、计算资源和存储资源以及对这些资源的池化、表征和编排等；感知层可实现对电磁环境、物理环境、业务需求和网络状态的感知；连接层涉及无感转发、组网连接、接入管控和安全转发等；功能层由控制面、用户面、数据面、智能面和安全面等组成；应用层涵盖输电线路状态监测、无人机巡检、应急通信和分布式资源调控等。在这 5 层中，资源层是基础，感知层是抓手，连接层是辅助，功能层是核心，应用层是应用。感知层、连接层、功能层相互作用可构成一个有机的整体，用于有效支撑电力天空地异构网络的全时全域覆盖、确定性承载和智能安全管控。

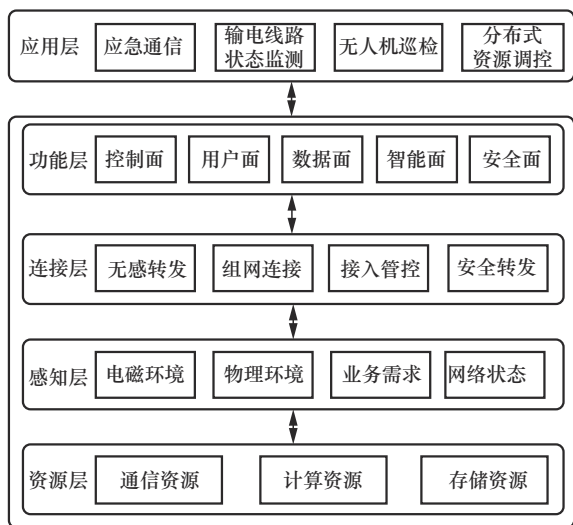


图 3 电力异构网络逻辑分层模型框图

2.2 电力天空地一体化网络安全通信机制研究

针对电力业务在天空地一体化网络中可能面临的指令篡改、数据完整性破坏等安全威胁，引入量子动态防护体系。该体系基于相位编码量子密钥分发技术，采用 1 310 nm 波长激光器实现与电力光纤通信的频谱兼容，通过真空态补偿机制抑制量子信道噪声，结合 LDPC 纠错

协议与多项式哈希函数构建量子密钥生成层，保证密钥误码率稳定在 1.2% 以下，相较传统 1 550 nm 的卫星通信方案，可以提升 20% 以上的信道适应性。

在密钥应用层设计动态加密机制，依据电力业务安全等级实施差异化防护：调度涉控指令采用量子密钥与 SM9 算法的双重加密，数据采集与监视控制系统 (SCADA) 执行量子密钥动态封装，智能电表等海量终端部署轻量级中文词法分析 (LAC) 算法，形成“核心-边缘”协同的加密拓扑结构。提出电力负荷感知的密钥更新算法，建立动态时间窗口模型：

$$T_{\text{update}} = \max \left(\alpha \cdot \frac{L_{\text{key}}}{R_{\text{key}}}, T_{\text{cycle}} - \Delta t \right) \quad (1)$$

其中，根据电网实际运行状态，设置电力负荷波动因子 $\alpha \in [0.8, 1.2]$ ，同步周期补偿量 $\Delta t = 15 \text{ s}$ ，与电力系统广域测量时钟严格对齐。 L_{key} 表示系统中存储的可用密钥数量， R_{key} 表示系统生成新密钥的速度， T_{cycle} 表示电力系统的同步周期。

2.3 智能资源调度与编排算法设计

在天空地一体化网络架构中，资源的有效调度与编排对于提升网络性能、满足新型电力系统多样化的业务需求至关重要。为了实现这一目标，本文提出了一种融合强化学习与深度强化学习^[18-22]的智能资源调度与编排算法，该算法综合考虑了资源分配、业务流路径选择以及服务质量保障等多方面因素，旨在提高网络的整体性能和资源利用率。

2.3.1 状态空间、动作空间及状态转移函数

为了实现天空地一体化网络架构中的资源高效调度与编排，首先定义状态空间和动作空间，并设计了相应的奖励函数，以引导算法的学习过程。

在所提出的算法框架中，状态空间 S 涵盖了网络中各节点的资源状态，包括通信带宽 B 、计算能力 C 、存储空间 M 、网络拓扑结构 T 和链路状态 L 等多个维度。同时，还涵盖了业务需求信息，如业务类型 T_b 、数据量 D 以及 QoS 要求 Q 等。状态空间 S 变量定义及取值范围见表 2。

表 2 状态空间 S 变量定义及取值范围

变量	变量定义	取值范围
通信带宽 B	当前网络节点的可用带宽	[1 Mbit/s, 1 000 Mbit/s]
计算能力 C	当前网络节点的计算能力	[1 GHz, 10 GHz]
存储空间 M	当前网络节点的存储空间	[1 GB, 1 000 GB]
网络拓扑结构 T	当前网络的拓扑结构	$\{0, 1\}^{N \times N}$
链路状态 L	当前网络链路的状态	[0, 1] (0 表示不可用, 1 表示可用)
业务类型 T_b	当前业务类型	$\{T_{b1}, T_{b2}, \dots, T_{bk}\}$
数据量 D	当前业务数据量	[1 kB, 1 GB]
QoS 要求 Q	当前业务 QoS 要求	[1 ms, 100 ms]

动作空间 A 则主要涉及两方面的决策：一是资源分配决策，具体包括为特定业务分配相应的带宽 B_a 、计算资源 C_a 和存储资源 M_a ；二是业务流路径选择决策，即业务流的路径选择 P 。动作空间 A 变量定义及取值范围见表3。

表3 动作空间 A 变量定义及取值范围

变量	变量定义	取值范围
带宽分配 B_a	为特定业务分配的带宽	[1 Mbit/s, 1 000 Mbit/s]
计算资源 C_a	为特定业务分配的计算资源	[1 GHz, 10 GHz]
存储资源 M_a	为特定业务分配的存储资源	[1 GB, 1 000 GB]
路径选择 P	业务流通过的路径	$\{P_1, P_2, \dots, P_n\}$

状态转移函数 $T(s, a, s')$ 表示在当前状态 s 下，执行动作 a 后转移到新状态 s' 的概率。具体而言，状态转移函数可以表示为：

$$T(s, a, s') = P(s' | s, a) \quad (2)$$

2.3.2 基于粒子群优化算法的奖励函数

为了使算法能够综合考虑多个关键性能指标，本文设计了一个复合型的奖励函数 $R(s, a)$ 。该奖励函数融合了资源利用率、业务调度时延、网络吞吐量以及网络可靠性等指标。定义策略 π 是智能体在给定状态 s 下选择动作 a 的概率分布。具体来说， $\pi(a|s)$ 表示在状态 s 下选择动作 a 的概率。策略 π 的目标是最大化累积奖励，即在长期运行中获得最大的奖励总和。具体而言，奖励函数 $R(s, a)$ 表达式如下：

$$R(s, a) = w_1 \eta + w_2 \frac{1}{\tau_r} + w_3 \theta + w_4 R_e \quad (3)$$

其中， w_1, w_2, w_3, w_4 为权重系数，用于调节不同性能指标在奖励函数中的相对重要性。 $\eta \in [0, 1]$ 表示资源利用率， $\tau_r \in [0, 1\ 000]$ 表示业务调度时延， $\theta \in [0, 1\ 000]$ 表示网络吞吐量， $R_e \in [0, 1]$ 表示网络可靠性。

本文基于粒子群优化算法设计了一个优化迭代算法，用于确定奖励函数的权重系数 w_1, w_2, w_3, w_4 ，具体步骤如下。

1. 初始化粒子群，随机生成 N 组权重系数 (w_1, w_2, w_3, w_4)， N 取值 100。

2. 计算每个粒子的适应度值 $F(w_1, w_2, w_3, w_4)$ ，适应度函数可以表示为：

$$F(w_1, w_2, w_3, w_4) = w_1 \cdot \eta + w_2 \cdot (-\tau_r) + w_3 \cdot \theta + w_4 \cdot R_e \quad (4)$$

3. 初始化个体最优位置 p_i 和全局最优位置 p_g 。

4. 每个粒子根据个体经验和群体经验更新自身的位置和速度，具体更新公式如下：

$$\begin{cases} v_i(t+1) = v_i(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_i - x_i(t)) + c_2 \cdot r_2 \cdot (p_g - x_i(t)) \\ x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \end{cases} \quad (5)$$

其中， $v_i(t)$ 和 $x_i(t)$ 分别表示粒子 i 在第 t 次迭代中的速度和位置； w 是惯性权重，设置为 0.7； c_1 和 c_2 是学习因子，设置为 2； r_1 和 r_2 是随机数，范围为 $[0, 1]$ 。

5. 计算每个粒子的适应度值 $F(w_1, w_2, w_3, w_4)$ ，并更新个体最优位置和全局最优位置。

6. 重复步骤4到步骤5，直到达到终止条件。

7. 输出最优权重系数 w_1, w_2, w_3, w_4 。

根据上述算法，采用 MATLAB 作为软件平台，进行仿真测试，得到最优权重参数： $w_1=0.421, w_2=0.299, w_3=0.188, w_4=0.092$ 。

2.3.3 基于DDPG的智能资源调度与编排算法

本文基于深度确定性策略梯度 (deep deterministic policy gradient, DDPG) 的智能资源调度与编排算法，旨在通过强化学习方法优化天空地一体化网络中的资源分配和业务流路径选择。该算法结合了 Q -learning 和策略梯度方法的优点，能够有效处理连续动作空间的问题，适用于复杂的网络资源调度场景。

算法的实现过程如下：首先，初始化网络状态 s ，策略网络 μ 和 Q 值网络 Q ，以及它们的目标网络 μ^- 和 Q^- 。同时，初始化经验回放缓存 D 和探索噪声 N 。在每个训练步骤 t 中，智能体通过网络状态感知模块获取当前网络状态 s ，并从策略网络 μ 中选择动作 $a = \mu(s) + N$ ，其中 N 是探索噪声，用于增加探索性。执行动作 a 后，环境根据当前状态 s 和动作 a 产生新的状态 s' 和奖励 $R(s, a)$ 。随后，将经验 $(s, a, R(s, a), s')$ 存储到经验回放缓存 D 中。

为了更新网络参数，从经验回放缓存 D 中随机采样一批经验 $\{(s_i, a_i, R_i, s'_i)\}$ ，计算目标值：

$$y_i = R_i + \gamma Q^-(s'_i, \mu^-(s')) \quad (6)$$

其中， γ 是折扣因子，通过最小化以下损失函数来更新 Q 值网络 Q ：

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - Q(s_i, a_i))^2 \quad (7)$$

同时，使用策略梯度更新策略网络 μ ：

$$\nabla_{\theta^{\mu}} J \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\nabla_a Q(s_i, a)|_{a=\mu(s_i)} \cdot \nabla_{\theta^{\mu}} \mu(s_i)) \quad (8)$$

其中, N 表示样本个数, 为了保持目标网络的稳定性, 使用软更新目标网络:

$$\begin{cases} \theta^- \leftarrow \tau\theta + (1 - \tau)\theta^- \\ \phi^- \leftarrow \tau\phi + (1 - \tau)\phi^- \end{cases} \quad (9)$$

其中, τ 是软更新率, 用于平滑目标网络的更新过程。最后, 将状态 s 更新为 s' , 并重复上述过程, 直到达到预设的迭代次数 T 或适应度值收敛。

为了验证基于 DDPG 的智能资源调度与编排算法的有效性, 本文在仿真实验中进行了对比分析。实验环境和参数设置如下。硬件平台: NVIDIA Jetson AGX Orin, 32 GB LPDDR5。软件平台: MATLAB R2020a。算法参数: 学习率 $\alpha=0.001$, 折扣因子 $\gamma=0.99$, 软更新率 $\tau=0.001$, 探索噪声 $N \sim N(0, 0.1)$, 经验回放缓存大小 $D=10\ 000$, 批量大小 $N=64$, 迭代次数 $T=1\ 000$ 。DDPG 奖励值收敛曲线如图 4 所示。

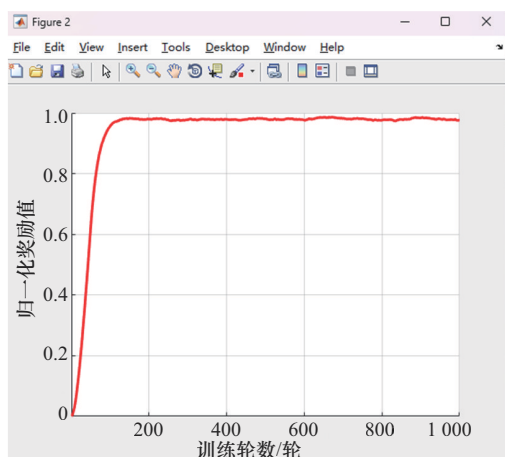


图 4 DDPG 奖励值收敛曲线

通过上述过程, DDPG 算法能够有效地学习到最优的资源调度策略, 从而在复杂的天空地一体化网络环境中实现高效的资源分配和业务流路径选择。

3 仿真实验验证

为了验证所提出的基于新型电力系统的天空地一体化网络架构以及智能资源调度与编排算法的有效性, 本文采用仿真工具进行实验验证。仿真平台选择 STK, 用于模拟卫星网络和地面通信网络的性能^[23-24]。

在 STK 中, 构建了包含高中低轨卫星的天基网络模型, 模拟卫星的轨道参数、覆盖范围和通信链路性能。搭建地面通信网络模型, 包括光纤网络、无线专网和 4G/

5G 无线公网等, 模拟不同通信方式的传输特性。将两者通过异构网络融合网关进行连接, 构建完整的天空地一体化网络仿真环境。

选取分布式能源调控、输电线路在线监测及无人机巡检、变电设备状态感知、智能分布式配电自动化和配网保护等典型业务场景, 分别设置不同的业务流量、QoS 要求和资源需求。通过仿真模拟这些业务在天空地一体化网络中的传输和调度过程, 评估网络性能指标。设置学习率 $\alpha=0.1$, 折扣因子 $\gamma=0.99$, 探索率 $\epsilon=0.1$, 目标网络更新率 $\tau=0.001$ 。

3.1 资源利用率

资源利用率 η 指电力通信网络中已分配资源与总资源的比例, 计算公式如下:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^N \text{已分配资源}_i}{\sum_{i=1}^N \text{总资源}_i} \quad (10)$$

其中, N 表示网络中的节点数量, 已分配资源 i 表示第 i 个节点已分配的资源, 总资源 i 表示第 i 个节点的总资源。

图 5 展示了在不同业务场景下, 采用基于强化学习的智能资源调度与编排算法和传统资源分配方法的资源利用率对比。

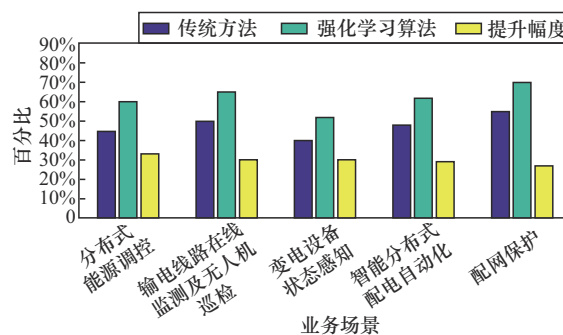


图 5 业务资源利用率对比

从图 5 可以看出, 采用强化学习算法后, 各业务场景下资源利用率均显著提高, 平均提升了 28.57%。

3.2 业务调度时延

业务调度时延 τ_r 表示从电力业务请求到业务完成的时延, 计算公式如下:

$$\tau_r = \frac{\sum_{i=1}^N \text{业务}_i \text{时延}}{N} \quad (11)$$

其中, N 表示业务的数量, 业务 i 时延表示第 i 个业务的时延。

图 6 展示了在不同业务场景下, 采用基于强化学习的智能调度算法与传统调度方法的业务调度时延对比。

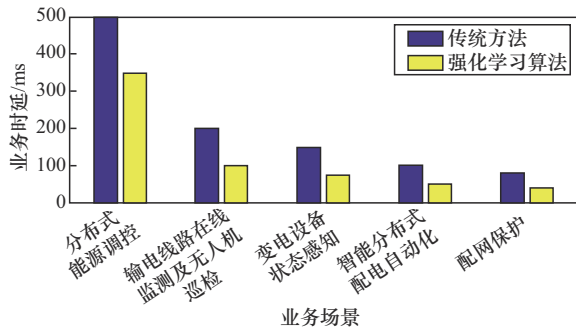


图6 业务调度时延对比

从图6可以看出,采用强化学习算法后,各业务场景下调度时延均显著下降,平均降低了47.83%。

3.3 网络吞吐量

网络吞吐量 θ 表示单位时间内电力通信网络传输的数据量,计算公式如下:

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^N \text{业务}i\text{数据量}}{\sum_{i=1}^N \text{业务}i\text{传输时间}} \quad (12)$$

其中, N 表示业务的数量,业务 i 数据量表示第 i 个业务的数据量,业务 i 传输时间表示第 i 个业务的传输时间。

图7展示了在不同业务场景下,采用基于强化学习的智能调度算法与传统调度方法的业务网络吞吐量对比。

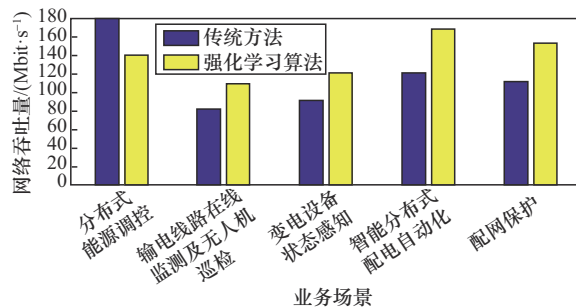


图7 业务网络吞吐量对比

从图7可以看出,采用强化学习算法后,除了分布式能源调控,业务场景下网络吞吐量均显著提升,平均提升了37.65%。

4 结束语

本文深入探讨了基于新型电力系统的天空地一体化网络架构的关键要素、设计原则。通过整合地基、天基和空基的通信资源,提出了一个全时全域无缝覆盖的网络架构,旨在实现电力系统的全面监控、高效管理和智

能调度。这一架构不仅能够应对电力通信网络的异构性、大数据量、业务时空分布差异以及QoS需求的多样性,还能够适应网络资源和状态的时变特性,从而提高网络的管控能力和服务水平。架构中强调了人工智能在网络管控中的核心作用,并探讨了通感算一体化网络架构如何通过深度融合通信、感知、计算功能,实现智能信息流的优化。这一架构的实施,将为新型电力系统提供一个强大、灵活且安全的通信基础,支持其在全球能源转型中发挥关键作用。

未来天空地一体化网络架构将继续演进,以适应不断变化的电力系统需求和通信技术的发展。随着5G、6G以及更先进通信技术的应用,期待这一架构能够实现更广泛的覆盖、更高的数据传输速率和更低的时延,进一步推动电力系统的智能化和绿色化发展。同时,网络安全和数据保护仍将是必须重点关注的领域,以确保电力系统的稳定运行和信息资产的安全。

参考文献

- [1] 袁家海,彭可欣,张浩楠,等.电力系统气候适应性的探索、挑战与展望[J].气候变化研究进展,2025,21(2): 256-272.
YUAN J H, PENG K X, ZHANG H N, et al. Exploration, challenge and prospect of climate adaptability of power system[J]. Progress in Climate Change Research, 2025, 21(2): 256-272.
- [2] 袁铁江,张文达.新型电力系统源-储-荷协同规划研究综述[J].中国电机工程学报,2024.
YUAN T J, ZHANG W D. Summary of the research on source-storage-load collaborative planning of new power system[J]. Journal of China Electrical Engineering, 2024.
- [3] 山博轩,杨郁.新型电力系统通信技术应用及研究综述[J].智能电网,2023(6): 93-101.
SHAN B X, YANG Y. Overview of application and research of new power system communication technology[J]. Smart Grid, 2023 (6): 93-101.
- [4] 周继国.光纤通信技术在电力系统自动化调度中的应用[J].通信电源技术,2024,41(15): 64-66.
ZHOU J G. Application of optical fiber communication technology in power system automation dispatching[J]. Telecom Power Technology, 2024, 41(15): 64-66.
- [5] 杨传勇.基于电力通信的光纤通信技术应用分析[J].无线互联科技,2020,17(12): 1-2.
YANG C Y. Application analysis of optical fiber communication technology based on power communication[J]. Wireless Internet Technology, 2020, 17(12): 1-2.
- [6] 周全,周柯,金庆忍,等.卫星互联网赋能新型电力系统创新应用[J].电力系统自动化,2024,48(6): 42-61.

- ZHOU Q, ZHOU K, JIN Q R, et al. Novel applications of satellite Internet enabling new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(6): 42-61.
- [7] 沈学民, 承楠, 周海波, 等. 空天地一体化网络技术: 探索与展望[J]. 物联网学报, 2020(3): 3-19.
- SHEN X M, CHENG N, ZHOU H B, et al. Space-air-ground integrated networks: review and prospect[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020(3): 3-19.
- [8] 王臻, 刘东, 徐重西, 等. 新型电力系统多源异构数据融合技术研究现状及展望[J]. 中国电力, 2023, 56(4): 1-15.
- WANG Z, LIU D, XU C Y, et al. Status quo and prospect of multi-source heterogeneous data fusion technology for new power system[J]. Electric Power, 2023, 56(4): 1-15.
- [9] 李新, 李曦, 彭雄根. 天地一体化网络应用及组网方案研究[J]. 电信快报, 2024(3): 1-4.
- LI X, LI X, PENG X G. Research on the application and networking solutions of the integrated network of heaven and earth[J]. Telecommunications Information, 2024(3): 1-4.
- [10] 周颖, 施倩, 李瑞瑜, 等. 天地一体化网络发展及关键技术概述[J]. 空间电子技术, 2025, 22(1): 28-39.
- ZHOU Y, SHI Q, LI R Y, et al. The overview of development and key technologies of the space-ground integrated network[J]. Space Electronic Technology, 2025, 22(1): 28-39.
- [11] 范珂欣, 安丽荣, 张钦宇. 业务驱动的空天地海一体化网络技术研究[J]. 电信科学, 2024, 40(6): 25-37.
- FAN K X, AN L R, ZHANG Q Y. Research on service-driven network technologies for space-air-ground-sea integration[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(6): 25-37.
- [12] 孙凡清, 肖贝利. 空天地海一体化网络在雨林场景的应用研究[J]. 广东通信技术, 2024, 44(5): 65-69.
- SUN F Q, XIAO B L. Research on the application of air-space-sea integrated network in rainforest scene[J]. Guangdong Communication Technology, 2024, 44(5): 65-69.
- [13] 张雪菲, 何瑞懋, 夏宇, 等. 面向空天地一体化网络的抗干扰技术研究[J]. 移动通信, 2024, 48(9): 88-93.
- ZHANG X F, HE R M, XIA Y, et al. Anti-jamming techniques for space-air-ground integrated networks[J]. Mobile Communications, 2024, 48(9): 88-93.
- [14] 吴健, 贾敏, 郭庆. 基于软件定义网络的天空地一体化网络架构[J]. 电信科学, 2024, 40(7): 45-56.
- WU J, JIA M, GUO Q. Space-ground integrated network architecture based on software-defined network[J]. Telecommunication Science, 2024, 40(7): 45-56.
- [15] 刘雪芳, 毛伟灏, 杨清海. 天空地一体化网络在智能电网中的应用研究[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(8): 56-67.
- LIU X F, MAO W H, YANG Q H. Research on the application of sky-ground integrated network in smart grid[J]. Power System Automation, 2024, 48(8): 56-67.
- [16] 陈明, 张伟, 李强. 天空地一体化网络在分布式能源管理中的应用[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(10): 78-89.
- CHEN M, ZHANG W, LI Q. Application of sky-ground integrated network in distributed energy management[J]. Electric Power System Automation, 2024, 48(10): 78-89.
- [17] 王晓明, 李晓光, 张伟. 基于机器学习的天空地一体化网络资源管理方法[J]. 通信学报, 2024, 45(9): 123-134.
- WANG X M, LI X G, ZHANG W. A method of space-earth integrated network resource management based on machine learning[J]. Journal of Communication, 2024, 45(9): 123-134.
- [18] 武艳, 潘广川, 姚明伟, 等. 基于深度强化学习的空天地一体化网络信息物理系统垂直切换策略[J]. 通信学报, 2024, 45(8): 180-191.
- WU Y, PAN G C, YAO M W, et al. Vertical handover policy for cyber-physical systems aided by SAGIN based on deep reinforcement learning[J]. Journal on Communications, 2024, 45(8): 180-191.
- [19] 吴健, 贾敏, 郭庆. 基于移动边缘计算的空天地一体化网络架构[J]. 天地一体化信息网络, 2024, 5(1): 24-31.
- WU J, JIA M, GUO Q. Space-air-ground integrated network architecture based on mobile edge computing[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2024, 5(1): 24-31.
- [20] 刘雪芳, 毛伟灏, 杨清海. 基于深度强化学习的空天地一体化网络资源分配算法[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(7): 2831-2841.
- LIU X F, MAO W H, YANG Q H. A resource allocation algorithm for space-air-ground integrated network based on deep reinforcement learning[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2024, 46(7): 2831-2841.
- [21] MNIH V, KAVUKCUOGLU K, SILVER D, et al. Human-level control through deep reinforcement learning[J]. Nature, 2015, 518(7540): 529-533.
- [22] WANG R, CHEN X, ZHANG J. Deep reinforcement learning for dynamic resource allocation in heterogeneous wireless networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(10): 6701-6714.
- [23] ZHANG Y, ZHOU S. A survey on reinforcement learning for wireless networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(4): 3207-3230.
- [24] LIANG Y, PEI Q. Reinforcement learning-based resource scheduling for 5G and beyond[J]. IEEE Communications Magazine, 2021, 59(9): 88-98.

[作者简介]



左浩然 (1995-), 男, 助理工程师, 主要研究方向为低轨卫星通信、无线通信等。



孟建（1986-），男，高级工程师，主要研究方向为电力系统通信、5G电力应用。



姜沁汝（2000-），女，助理工程师，主要研究方向为时间敏感网络、低轨卫星通信等。



周飞飞（1986-），男，高级工程师，主要研究方向为新型电力通信系统、时间敏感网络、柔性以太网技术等。



梁伟（1990-），女，工程师，主要研究方向为电力通信技术、网络安全防护技术等。



朱云飞（1997-），男，助理工程师，主要研究方向为时间敏感网络、算力网络、确定性网络等。



蔡垚森（1996-），男，软件研发工程师，主要研究方向为低轨卫星通信、确定性网络等。