基于SDN的UAV辅助通感一体化电网应急通信恢复方法

胡景禹，陈勇
（电子科技大学自动化工程学院，四川 成都 611731）

摘要：极端灾害导致电力设施受损与通信中断，调度中心难以及时获取关键运行信息，影响灾后决策。针对灾后部分地面基站及其原有回传链路受损场景，无人机（UAV）可构建多跳集成接入与回传（IAB）链路恢复电力通信业务连通性。为进一步提升态势获取效率与频谱复用，本文提出一种软件定义网络（SDN）控制的UAV辅助通感一体化（ISAC）电网应急通信恢复方法。构建由可用地面基站、控制中心与UAV组成的空地多跳网络模型，将接入覆盖、感知精度、导频资源、切片路由与带宽保留纳入统一优化框架。针对问题复杂度高及网络状态不确定性强等特点，提出基于代理值函数的多时间尺度滚动优化方法（SVF-MTRO）。在秒级周期内选取UAV部署与感知任务分配，百毫秒级周期内根据实时链路状态更新路由与切片带宽保留，并在无线帧按瞬时资源块容量执行通感调度与业务转发。IEEE-39节点系统仿真验证表明，所提方法能够有效保障关键电力通信业务切片的时延性能和业务恢复率，并提高应急通信网络的数据交付能力。

关键词：通感一体化；电网应急通信；多跳组网；软件定义网络；多时间尺度优化
中图分类号：TN915

SDN-Based UAV-Assisted Integrated Sensing and Communication Method for Power Grid Emergency Communication Recovery

HU Jingyu, CHEN Yong
School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China

Abstract: Extreme disasters cause severe damage to power facilities and communication disruptions, hindering dispatch centers from obtaining critical operational information and impairing post-disaster decision-making. To address scenarios where terrestrial base stations (BSs) and backhaul links are partially damaged, unmanned aerial vehicles (UAVs) can establish multi-hop integrated access and backhaul (IAB) links to restore power communication connectivity. To further enhance situational awareness and spectrum reuse, this paper proposes a software-defined networking (SDN)-controlled, UAV-assisted integrated sensing and communication (ISAC) method for power grid emergency communication recovery. An air-ground multi-hop network model comprising available terrestrial BSs, control centers, and UAVs is developed, unifying access coverage, sensing accuracy, pilot resources, slice routing, and bandwidth reservation into a single optimization framework. To tackle the high problem complexity and network state uncertainty, a surrogate value function-based multi-timescale rolling optimization (SVF-MTRO) approach is proposed. Specifically, UAV deployment and sensing tasks are determined at a second-level timescale; routing and slice bandwidth reservations are updated based on real-time link states at a hundred-millisecond timescale; and ISAC scheduling alongside traffic forwarding is executed per radio frame based on instantaneous resource block capacities. Simulations on an IEEE 39-bus system demonstrate that the pro-

收稿日期：XXXX–XX–XX；修回日期：XXXX–XX–XX
通信作者：陈勇，ychencd@uestc.edu.cn
基金项目：国家自然科学基金资助项目（No. 61973331, No. 61973257）；国家重点研发计划项目（No. 2022YFE0120700）
Foundation Items：The National Natural Science Foundation of China (No. 61973331, No. 61973257), The National Key Research and Development Plan Programs of China (No. 2022YFE0120700)

posed method effectively guarantees the latency performance and service recovery rate of critical power communication slices, while significantly enhancing the data delivery capability of the emergency communication network.

Key words: integrated sensing and communication, power grid emergency communication, multi-hop networking, software-defined networking, multi-timescale optimization

0 引言

近年来，极端气候与自然灾害给电力系统与通信基础设施带来严重冲击。在灾后应急恢复过程中，电网调度中心需要尽快获取母线电压、发电机运行等关键系统状态，以支撑故障定位、负荷切除和网络重构等恢复决策。然而，地面通信设施损毁或故障后，会导致监督控制与数据采集（Supervisory Control and Data Acquisition，SCADA）以及广域测量系统（Wide Area Measurement System，WAMS）等系统采集的关键电力通信业务无法可靠回传[1]。5G-A 的网络切片为电力通信业务提供了分级保障的手段[2]，IAB 使接入与回传能够共享无线基础设施，降低对有线回传的依赖[3]。低空 UAV 结合 IAB 功能，能在短时内构建临时多跳回传链路，为灾后电力通信业务提供快速可部署的应急通信网络[4-5]。UAV 还可承担灾区环境探测与设施监测任务，在有限频谱和功率资源下实现 ISAC，提升态势获取效率并辅助恢复决策[6]。因此，面向灾后电网的 UAV 应急通信研究，不仅需要恢复通信业务连通性，还需要兼顾关键业务的确定性传输。

与一般公众应急通信业务相比，承载电网运行状态、监测数据和控制信息的电力通信业务对安全性、实时性和确定性具有更高要求，因而面临更严格的系统约束。灾后网络往往呈现拓扑碎片化与链路可用性间歇变化的特征，回传链路容量随节点损毁状态、空中平台几何位置与信道条件而时变[7-8]，多跳转发还会叠加传输与处理时延并放大拥塞效应[9]。若缺少分级隔离和资源预留机制，不同业务将在同一传输通道和缓冲队列中竞争，关键状态量在拥塞或链路退化时容易出现超时与丢失，进而影响恢复决策的可靠性。现有关于电力通信网络中云化承载与 5G 承载的研究通常通过切片隔离、优先级队列等方法来提升关键业务的可用性与时延性能[10]，但网络拓扑和接入关系在调度前已给定，未涉及灾损导致的节点及回传链路失效，灾后应急网络不仅需要在不同业务之间分配资源，还需要首先恢复接入与回传连通性，在链路容量时变和路径动态重构条件下，维持关键电力通信业务的端到端性能保障。

1 相关工作

1.1 现有工作

灾后应急通信研究广泛引入 UAV 作为临时基站或中继节点，围绕 UAV 部署位置、覆盖范围、轨迹规划、能量约束等问题提出了大量优化方法[11-13]。文献[14]研究了 UAV 使能多阶段 ISAC 系统中的联合部署与波束成形问题，并采用块坐标下降方法求解相应的非线性优化模型。文献[15]针对配电网功率波动和网络拥塞提出 UAV 辅助的两阶段应急通信重构方法，同时优化飞行轨迹与部署位置。文献[16]研究了一种海上 UAV 应急通信框架，基于逐次凸近似（Successive Convex Approximation，SCA）联合优化无人机轨迹、子载波和功率分配，实现可权衡的通信感知服务质量（Quality-of-Service，QoS）。文献[17]结合 IAB 多跳中继机制，通过感知模糊聚类和 Q 学习方法提高 UAV 网络的接入范围、回传能力和拓扑稳定性。然而，这些工作对业务流量处理多采用同质化假设，更适合评估灾后网络的连通恢复能力或平均承载性能。但对于电网应急场景，网络恢复只是基础条件，若未对不同业务类型区分承载与优先级保障，即使总体吞吐量较高，也可能出现关键遥测业务被大流量低优先级监测业务挤占的情况，难以满足电力通信业务在资源受限条件下对确定性传输的要求。

灾后恢复不仅需要通信承载能力，还需要快速识别故障态势与链路可达性以支撑电力调度中心进行恢复路径与控制动作选择[18]。ISAC 通过在同一无线资源框架下协同完成数据传输与环境感知，为灾后场景中的频谱复用和态势获取提供了新的技术路径。现有 ISAC 研究多聚焦于波形结构、导频功率与估计性能界等物理层问题。文献[19]从导频功率分配和测距精度约束出发研究通感资源配置。文献[20]提出 UAV-ISAC 协作收发机波束成形方法，在通信需求与功率约束下，实现感知性能提升与干扰杂波抑制。另有工作则采用联合优化波束、预编

码或飞行轨迹的方式，提升通信与感知的综合性能[21-22]。文献[23]研究了单架多天线UAV-ISAC系统，并通过交替优化和SCA求解UAV放置与波束成形耦合问题。文献[24]聚焦UAV-ISAC安全通信问题，利用波束成形技术同时实现感知与窃听者干扰，并设计了一种三层迭代优化框架解决波束成形、用户调度以及轨迹优化的联合问题。上述研究为ISAC系统设计提供了重要理论基础，但大多关注单链路、单节点或物理层参数优化。对于灾后电网场景，受损设施、业务源节点与幸存回传节点通常分散分布，感知结果与业务数据往往需要经由多架UAV和幸存基站构成的多跳链路传输至调度中心。因此，单节点层面的通感优化难以反映其对多跳链路有效容量、端到端路径选择以及关键业务保障的影响。同时，现有工作通常将导频开销视为固定条件，对通感配置如何改变多跳组网链路可用容量，影响关键业务性能的研究仍不充分。

在网络控制与资源编排方面，SDN通过控制转发分离与集中式全局视图，为灾后碎片化拓扑下的快速重构、按需路由与差异化保障提供了技术基础。现有SDN研究围绕全网状态感知、流表下发、业务分级和网络虚拟化展开，可在一定程度上实现切片隔离、带宽保障与故障绕行[25-26]。也有研究面向电力系统SCADA/WAMS承载网络，从控制平面部署、快速失效恢复和形式化建模等角度提升网络可管可控能力[27]。然而，将这些机制应用于灾后UAV辅助的ISAC应急通信网络仍存在不足。其一，许多工作假设控制平面连通性稳定，仅以静态链路容量实现路由与策略下发，难以应对灾后链路可用性与容量时变问题。其二，SDN主要在流量与队列层面进行调度，对无线侧时频资源与导频占用竞争的考虑不足，尚未将感知资源开销对链路容量和业务保障的影响纳入建模。其三，与文献[10]类似采用强化学习调度策略的研究，其在线性能依赖训练状态对实际运行条件的覆盖，当灾损引起拓扑与可行资源变化时，训练策略可能面临状态分布偏移。

1.2　本文工作

现有UAV应急通信研究多侧重覆盖连通与吞吐量优化，对业务差异化承载考虑不足。现有ISAC研究多聚焦单节点物理层性能，导致在多跳应急组网中的应用有限。此外，灾后电网应急通信中存在拓扑碎片化、通感资源受限以及关键业务时延难以保障的挑战。为此，本文提出一种SDN控制下的UAV辅助通感一体化应急通信恢复框架。主要创新与贡献如下：

（1）构建面向电网应急通信的空地多跳组网与通感资源关联模型，针对灾后业务源节点、受损设施与幸存回传点分散分布的特点，区分接入覆盖与感知监测需求，建立UAV接入、空中中继与幸存基站协同的多跳拓扑，并在该拓扑上描述感知任务与多跳回传承载能力之间的关系，为通感资源调度与业务保障提供统一的网络模型。

（2）针对灾后节点拓扑高度动态变化的特点，设计基于SDN的应急组网与资源调度机制，提出基于代理值函数的多时间尺度滚动优化方法SVF-MTRO，利用SDN集中式视图实施多尺度周期分离的调度策略。在秒级部署周期内优化UAV悬停部署，在百毫秒级控制周期内更新逻辑组网、多跳路由以维持全网连通，在帧级调度窗口内执行导频资源分配与切片流量分发。该机制根据实时观测持续修正调度决策，动态适应灾损网络变化。

（3）提出面向电力通信业务保障的通感资源与切片调度联合优化方法，基于克拉美-罗下界对应的距离估计均方根误差（RMSE）表征感知精度。针对通感资源共享与电力通信业务切片保障间的冲突，通过联合优化通感资源分配、切片分级调度与链路带宽保留，协调感知精度与通信承载之间的动态权衡，确保高优先级业务的交付性能。

2　系统模型

2.1　系统架构与集合符号定义

本文关注灾后地面通信设施受损初期的短时应急通信恢复场景，研究在给定应急UAV资源条件下，通过SDN控制实现灾后多跳组网、通感资源调度和关键电力业务的通信保障。在该阶段，UAV的作用是在地面设施抢修前快速提供临时接入、感知监测和多跳回传能力，帮助调度中心恢复关键信息获取能力，而非长期替代地面通信网络承担稳定承载。

如图1所示，控制中心负责承载电力通信业务应用并运行SDN控制器，以实现全网状态感知与资源编排。基站节点具备IAB功能，用于承载电力终端的数据接入与回传转发。无人机节点可在灾后

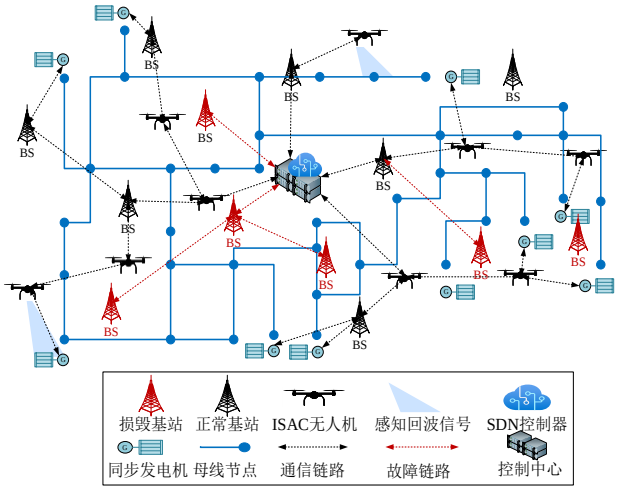


图1　基于SDN的UAV辅助通感一体化电网应急通信系统

快速部署形成空中回传链路，实现连通恢复。图 $\mathcal{G}=<\mathcal{V},\mathcal{E}>$ 表示通信拓扑。节点集合 $\mathcal{V}$ 包括控制中心节点 c、地面基站节点集合 $\mathcal{V}_g$、UAV 节点集合 $\mathcal{U}$ 以及电力通信业务源节点集合 $\mathcal{S}$。集合 $\mathcal{E}$ 表示灾后节点间可建立的无线链路，由幸存地面链路 $\mathcal{E}^{surv}$ 和 UAV 新建链路 $\mathcal{E}^{uav}$ 共同构成，即 $\mathcal{E}=\mathcal{E}^{surv}\cup\mathcal{E}^{uav}$。幸存可用基站，是指灾后仍具备市电或备用电源，且无线收发功能正常的基站。失电且无备用供电、设备损毁的基站统一视为损毁节点，不进入后续组网与调度。对任意链路 $e\in\mathcal{E}$，使用有序对 $<a,b>$ 表示节点 a 指向 b 的链路。

灾后条件下，地面节点可能因设备损毁或供电中断而失效，定义地面基站节点可用性 $s_v[n]\in\{0,1\}$，$s_v[n]=0$ 表示该节点在帧 n 因失电、设备损毁而不可用。定义基站间链路可用性 $s_{ab}[n]\in\{0,1\}$，当且仅当 $s_a[n]=1$，$s_b[n]=1$ 且链路满足物理可达条件时取 $s_{ab}[n]=1$。节点可用性只描述基站自身工作状态，不代表其原有地面回传路径完整，回传链路是否可用由链路可用性描述。

对于灾后需要应急通信向控制中心回传信息的关键电力节点，定义 $\mathcal{S}_a$ 表示附近通信设施均损毁、必须调度 UAV 提供接入覆盖的节点集合；$\mathcal{S}_s$ 表示需要 UAV 提供感知监测功能的节点。$\mathcal{S}_a$ 与 $\mathcal{S}_s$ 存在交集。

设计多时间尺度的滚动时域优化机制，SDN 控制器在部署周期 T_{dep} 内计算 UAV 悬停部署位置以及接入感知任务分配，部署周期索引为 $\ell\in\mathcal{L}$。在控制周期 T_{ctrl} 内更新当前已部署 UAV 与幸存地面节点之间的逻辑组网、多跳路由与带宽保留，控制周期索引为 $m\in\mathcal{M}$。同时，控制器在各网络控制周期起始获取链路和业务状态，包括灾后幸存节点 $\mathcal{V}^{surv}$ 与链路 $\mathcal{E}^{surv}$ 状态。5G NR 无线帧索引为 $n\in\mathcal{N}$，帧长为 T_f，用于通感资源和切片流量调度。部署周期包含的控制周期数为 $N_{dep}=T_{dep}/T_{ctrl}$，控制周期包含的帧数为 $N_c=T_{ctrl}/T_f$，第 ℓ 个 UAV 部署周期包含的 SDN 控制周期集合为 $\mathcal{M}_\ell=\{(\ell-1)N_{dep}+1,\cdots,\ell N_{dep}\}$，第 m 个控制周期包含的无线帧集合为 $\mathcal{N}_m=\{(m-1)N_c+1,\cdots,mN_c\}$。为简化记号，若 $m\in\mathcal{M}_\ell$，记该控制周期所属部署周期为 $\ell(m)=\ell$；若 $n\in\mathcal{N}_m$，记该帧所属部署周期为 $\ell(n)=\ell(m)$。对任意地面节点 $v\in\{c\}\cup\mathcal{V}_g\cup\mathcal{S}$，其节点位置表示为 $\mathrm{p}_v=[x_v,y_v,h_v]^T$；对任意 UAV 节点 $u\in\mathcal{U}$，其在部署周期 ℓ 内的悬停位置为 $\mathrm{p}_u[\ell]=[x_u[\ell],y_u[\ell],H]^T$，在同一部署周期内，UAV 悬停位置和激活状态保持不变。假设 UAV 和地面基站节点高度固定。

定义变量 $z_u[\ell]\in\{0,1\}$，表示 UAV u 在部署周期 ℓ 内是否激活。每个部署周期内激活 UAV 数量不超过应急 UAV 库存数量，且 UAV 悬停位置需满足部署区域约束：

$$\sum_{u\in\mathcal{U}}z_u[\ell]\le N_{\max},\mathrm{p}_u[\ell]\in\mathcal{P}_u,\forall u\in\mathcal{U}\tag{1}$$

对于需要 UAV 提供接入覆盖的电力节点集合 $\mathcal{S}_a$，$a^a_{u,v}[\ell]\in\{0,1\}$ 表示 UAV u 是否在部署周期 ℓ 内为节点 $v\in\mathcal{S}_a$ 提供接入覆盖。接入覆盖约束为：

$$\begin{cases}a^a_{u,v}[\ell]\le z_u[\ell]\\ \left\|\mathrm{p}_u[\ell]-\mathrm{p}_v\right\|_2\le R_{\mathrm{acc}}+M_a\left(1-a^a_{u,v}[\ell]\right),v\in\mathcal{S}_a\\ \sum_{u\in\mathcal{U}}a^a_{u,v}[\ell]\ge 1,\forall v\in\mathcal{S}_a\end{cases}\tag{2}$$

其中，R_{acc} 为 UAV 接入覆盖半径，M_a 为足够大的松弛常数。同理，对于需感知监测的目标集合 $\mathcal{S}_s$，$a^s_{u,q}[\ell]\in\{0,1\}$ 表示 UAV u 是否在部署周期 ℓ 内为节点 $q\in\mathcal{S}_s$ 执行感知任务，则有：

$$\begin{aligned}&\sum_{u\in\mathcal{U}}a^s_{u,q}[\ell]\ge 1,\forall q\in\mathcal{S}_s\\ &a^s_{u,q}[\ell]\le z_u[\ell],\forall q\in\mathcal{S}_s\end{aligned}\tag{3}$$

2.2　通信感知与资源模型

链路 $<a,b>$ 在帧 n 的几何距离为 $d_{ab}[n]=\left\|\mathrm{p}_a[\ell(n)]-\mathrm{p}_b[\ell(n)]\right\|_2$。链路 $<a,b>$ 的等效信道

增益采用大尺度损耗与小尺度衰落的乘积模型，定义其大尺度路径$PL_{ab}[n]$损耗为：

$$PL_{ab}[n]=20\log_{10}\left(\frac{4\pi f_c d_{ab}[n]}{c}\right)+L_s+X_{ab}[n] \tag{4}$$

其中f_c为载波频率，c为光速，L_s为系统损耗，$X_{ab}[n]$为阴影衰落项。小尺度衰落用复数随机变量$h_{ab}[n]$表示，其幅度平方$|h_{ab}[n]|^2$描述快衰落增益。设节点a的发射功率为$P_{t,a}$，发送与接收天线增益分别为常数G_t和G_r。链路$<a,b>$在帧n的接收功率为：

$$P_{r,ab}[n]=P_{t,a}G_tG_r|h_{ab}[n]|^2\cdot 10^{-PL_{ab}[n]/10} \tag{5}$$

帧n在时间维度上划分为N_{slot}个时隙。系统带宽B_s在每个时隙内划分为N_{PRB}个物理资源块（PRB）。每个PRB包含12个连续子载波，其带宽为$B_r=12\Delta f$。本文将PRB作为基本时频调度单元。

UAV作为多跳中继节点并行接收和发送，采用子带全双工（SBFD）方式。UAV配置相互隔离的发送、通信接收和感知接收射频支路，系统可调度PRB被划分为两个非重叠的子带$\mathcal{R}=\mathcal{R}_A\cup\mathcal{R}_B,\mathcal{R}_A\cap\mathcal{R}_B=\varnothing$，两子带之间的保护PRB不参与业务调度，令$\kappa_v[m]$表示节点$v$在当前IAB转发拓扑到控制中心的跳数奇偶性划分的A、B两类节点类型，A类节点在$\mathcal{R}_A$上发送，在$\mathcal{R}_B$上接收，B类节点的收发子带相反。因此，相邻节点的收发配置相反，同一端到端业务在多跳转发过程中交替使用两个子带分配PRB。

考虑保护带与开销系数η，可用PRB数近似为$N_{\text{PRB}}=\lfloor\eta B_s/B_r\rfloor$，$\mathcal{R}$的大小可表示为$|\mathcal{R}|=N_{\text{PRB}}$。定义链路在资源块$r\in\mathcal{R}$上的噪声功率为$N_0B_r$，则$r$上的信干噪比（SINR）为：

$$\gamma_{ab}[n,r]=\frac{P_{\text{r},ab}[n]}{N_0B_r+I_{ab}[n,r]} \tag{6}$$

其中，$I_{ab}[n,r]$表示接收节点b经过子带隔离和干扰消除后的集总残余干扰功率。主要包括跨子带残余自干扰、邻道泄漏以及系统外部同频干扰。本文假设处理后的集总残余干扰低于接收机噪声底，将其近似忽略，保留$I_{ab}[n,r]$以描述一般场景。

链路在r上的可达速率由香农公式表示$C_{ab}[n,r]=B_r\log_2\{1+\gamma_{ab}[n,r]\}$，则$r$可承载比特数为$T_rC_{ab}[n,r]$。对任意承担感知任务的UAV节点$u\in\mathcal{U}$，令$\pi_{u,r}[n]$为二进制调度变量，表示$u$在帧$n$占用导频资源块$r$发送导频序列，则接收端观测到的回波表示为：

$$y_u^s[t]=\sum_{q\in\mathcal{K}_s}\alpha_{u,q}\,x_u[t-\tau_{u,q}]\,e^{j2\pi v_{u,q}t}+w_u[t] \tag{7}$$

其中$\alpha_{u,q}$为回波复增益，$\tau_{u,q}$为传播时延，$v_{u,q}$为多普勒频移，$w_u[t]$为噪声。UAV u在帧n占用的导频资源块总数$N_{p,u}[n]=\sum_{r\in\mathcal{R}}\pi_{u,r}[n]$，则对应导频带宽为$B_{p,u}[n]=N_{p,u}[n]B_r$，导频信号的有效均方带宽可近似表示为$\beta_u[n]\approx B_{p,u}[n]/\sqrt{12}$。

感知导频从对应UAV的发送子带中分配。设UAV在单个时频资源块上的发射功率等效为常数，感知接收端的干扰处理方式与式(6)相同。

基于雷达方程与相干积累原理，目标q处的回波感知信噪比记为$\text{SNR}_{u,q}^{\text{s}}[n]$随导频带宽调度量线性扩展，可表示为：

$$\begin{aligned}\text{SNR}_{u,q}^{\text{s}}[n]&=\frac{B_{p,u}[n]}{B_r}\gamma_{u,q}^{\text{p}}[n]\\ \gamma_{u,q}^{\text{p}}[n]&=\frac{P_t^uG_tG_r\lambda^2\sigma_q^{RCS}}{(4\pi)^3d_{u,q}^4[n]N_0B_r}\end{aligned} \tag{8}$$

其中，$\gamma_{u,q}^{\text{p}}[n]$表示受物理信道约束的单资源块等效回波信噪比参量，$\lambda$为载波波长，$\sigma_q^{RCS}$为目标的雷达截面积。基于克拉美-罗下界，目标感知的距离估计标准差$\sigma_{r,u,q}[n]$的理论下界可表示为：

$$\sigma_{r,u,q}[n]\geqslant\frac{c}{4\pi\beta_u[n]\sqrt{\text{SNR}_{u,q}^{\text{s}}[n]}} \tag{9}$$

感知误差与UAV悬停位置、目标距离以及导频资源占用有关。对于被分配给UAV u执行感知监测的目标q，其距离估计标准差和资源块占用需满足如下约束：

$$\begin{aligned}&\sigma_{r,u,q}[n]\leqslant\sigma_q^{\max}+M_s\left(1-a_{u,q}^s[\ell(n)]\right),q\in\mathcal{S}_s\\&\pi_{u,r}[n]\leqslant z_u[\ell(n)]\end{aligned} \tag{10}$$

其中，$\sigma_q^{\max}$为目标q允许的最大感知误差上限，M_s为足够大的松弛常数。第一行表示承担感知任务的UAV需满足目标感知精度门限，第二行表示导频资源块只能由当前部署周期内激活的UAV使用。

2.3　切片与路由模型

定义切片集合$\mathcal{K}=\{\text{Bus,Gen,Pic}\}$，其中Bus表示母线状态数据切片，Gen表示发电机状态数据切片，Pic表示图像视频监测数据切片，优先级依次降低。令帧n的到达比特数为$A_{i,k}[n]$，对任意业务

源节点 $i \in \mathcal{S}$ 与切片 k，在链路 $<a,b>$ 上定义转发流量为 $f_{i,k,ab}[n]$，单位为比特每帧。则有流守恒约束：

$$\sum_{b \in \mathcal{V}} f_{i,k,vb}[n] - \sum_{a \in \mathcal{V}} f_{i,k,av}[n] = \begin{cases} A_{i,k}[n] \\ -A_{i,k}[n] \\ 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\forall i \in \mathcal{S}, k \in \mathcal{K}, v \in \mathcal{V}$$

上式分别描述了业务源节点、控制中心及中继节点的流守恒关系。

引入二进制调度变量 $x_{k,ab}[n,r] \in \{0,1\}$，表示帧 n 的资源块 r 被分配给链路 $<a,b>$ 用于承载切片 k 的数据。为避免资源冲突，同一资源块在一帧内必须满足互斥约束，只能用于导频或被单一链路用于数据传输：

$$\sum_{u \in \mathcal{U}} \pi_{u,r}[n] + \sum_{<a,b> \in \mathcal{E}} \sum_{k \in \mathcal{K}} x_{k,ab}[n,r] \leqslant 1$$
$$x_{k,ab}[n,r] \leqslant \delta_{ab,r}[m], \pi_{u,r}[n] \leqslant \delta^{s}_{u,r}[m] \quad (12)$$

上式对系统内 PRB 实施全网互斥分配，系统内不存在同频干扰。$\delta_{ab,r}[m]$ 和 $\delta^{s}_{u,r}[m]$ 为子带可用性参数，由转发拓扑和子带配置预先确定，分别表示通信链路只能从发送节点的发送子带和接收节点的接收子带交集中选择 PRB，感知导频只能从相应 UAV 的发送子带中选择 PRB。

二进制路由变量 $\rho_{i,k,ab}[m] \in \{0,1\}$ 表示源节点 i 的切片 k 业务是否经过链路 $<a,b>$ 进行转发。引入足够大的流量上界常数 M_f，控制周期级路由变量与帧级流量之间满足：

$$0 \leqslant f_{i,k,ab}[n] \leqslant M_f \rho_{i,k,ab}[m], <a,b> \in \mathcal{E} \quad (13)$$

为描述不同切片在多跳链路上的资源保障，链路级保留带宽变量 $R_{k,ab}[m]$ 表示切片 k 在链路 $<a,b>$ 上预留的传输速率，帧 n 内链路 $<a,b>$ 为切片 k 承载的总业务量不能超过分配给该链路和切片的资源块容量：

$$\sum_{i \in \mathcal{S}} f_{i,k,ab}[n] \leqslant \sum_{r \in \mathcal{R}} x_{k,ab}[n,r] T_r C_{ab}[n,r] \quad (14)$$

链路为各切片预留的容量应不低于相应切片的实际流量需求，链路须分配最小系统预留带宽且链路的总保留业务量不得超过由帧级资源分配形成的平均链路服务速率，则有：

$$\sum_{i \in \mathcal{S}} f_{i,k,ab}[n] \leqslant R_{k,ab}[m] T_f$$
$$R_{k,ab}[m] \geqslant R_{\min} \sum_{i \in \mathcal{S}} \rho_{i,k,ab}[m]$$
$$\sum_{k \in \mathcal{K}} R_{k,ab}[m] \leqslant \frac{1}{T_{\text{ctrl}}} \sum_{n \in \mathcal{N}_m} \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{k \in \mathcal{K}} x_{k,ab}[n,r] T_r C_{ab}[n,r] \quad (15)$$

引入单跳辅助变量 $d_{i,k,ab}[m] \geqslant 0$，构建如下大 M 松弛端到端时延约束：

$$d_{i,k,ab}[m] \geqslant \frac{L_k}{R_{k,ab}[m] + \varepsilon_0} + t_{\text{proc}} - M_d\left(1 - \rho_{i,k,ab}[m]\right)$$
$$D^{\text{E2E}}_{i,k}[m] = \sum_{<a,b> \in \mathcal{E}} d_{i,k,ab}[m] \quad (16)$$

其中，$\varepsilon_0 > 0$ 为很小的常数，L_k 为切片 k 的数据包长度，t_{proc} 为单跳处理时延，M_d 为足够大的松弛常数。$D^{\text{E2E}}_{i,k}[m]$ 为源节点 i 的切片 k 到达控制中心的端到端时延。对于高优先级电力通信业务，其端到端时延满足最大允许时延约束：

$$D^{\text{E2E}}_{i,k}[m] \leqslant D^{\max}_{k}, k \in \mathcal{K}_{high} \quad (17)$$

其中，$\mathcal{K}_{high} \subseteq \mathcal{K}$ 表示需要严格时延保障的高优先级切片集合，如母线和发电机状态。

对于幸存地面链路 $<a,b> \in \mathcal{E}^{surv}$，资源分配、流量转发和路由选择需受链路可用性约束。定义控制周期级链路可用性为 $\bar{s}_{ab}[m] = \min_{n \in \mathcal{N}_m} s_{ab}[n]$，则地面链路满足：

$$\begin{cases} x_{k,ab}[n,r] \leqslant s_{ab}[n], f_{i,k,ab}[n] \leqslant M_f s_{ab}[n] \\ \rho_{i,k,ab}[m] \leqslant \bar{s}_{ab}[m], \forall <a,b> \in \mathcal{E}^{surv} \end{cases} \quad (18)$$

对于空中 UAV 链路 $<a,b> \in \mathcal{E}^{uav}$，该链路调度需受 UAV 激活状态约束：

$$\begin{cases} x_{k,ab}[n,r] \leqslant z_u[\ell(n)], f_{i,k,ab}[n] \leqslant M_f z_u[\ell(n)] \\ \rho_{i,k,ab}[m] \leqslant z_u[\ell(m)], \forall u \in \{a,b\} \cap \mathcal{U} \end{cases} \quad (19)$$

部署、关联、路由和资源块调度变量满足二进制约束，以及连续变量满足非负约束：

$$z_u, a^{a}_{u,v}, a^{s}_{u,q}, \rho_{i,k,ab}, \pi_{u,r}, x_{k,ab} \in \{0,1\}$$
$$f_{i,k,ab} \geqslant 0, R_{k,ab} \geqslant 0, d_{i,k,ab} \geqslant 0 \quad (20)$$

3 面向应急通信的联合资源分配与 ISAC 调度优化

3.1 联合优化问题构建

在灾后短时应急通信恢复阶段，可依赖仍幸

存、正常供电的地面基站，同时引入UAV空中节点实现灵活组网，快速恢复电网可观测性，保证电力通信业务源到控制中心的可靠回传能力，并利用UAV通感一体化功能对故障受损区域进行主动监测。因此，系统的优化目标是在有限的通感资源下，实现业务传输时效性与应急资源消耗之间的平衡。对于第ℓ个部署周期，定义系统优化目标为该部署周期内各控制周期的加权端到端时延成本与UAV激活资源成本之和：

$$J[\ell]=\frac{1}{|\mathcal{M}_\ell|}\sum_{m\in\mathcal{M}_\ell}\sum_{i\in\mathcal{S}}\sum_{k\in\mathcal{K}}\omega_k D_{i,k}^{\mathrm{E2E}}[m]+\lambda\sum_{u\in\mathcal{U}}z_u[\ell] \tag{21}$$

其中，第一项为加权时延成本，ω_k为切片k的优先级权重。第二项表示当前部署周期内UAV启用数量惩罚项。需要说明的是，本文方法聚焦于灾后短时通信恢复，未将UAV能耗纳入目标。从电力系统运行风险角度衡量，能耗与通信质量的权衡，可能增加保护控制指令延迟或丢失的风险，造成的连锁故障风险及经济损失通常高于单次任务中的能耗开销。

系统决策变量集可表示为$\Psi=\{y_\ell,r_m,s_n\}$，$\mathrm{y}_\ell=\{\mathrm{p}_u[\ell],z_u[\ell],a_{u,v}^a[\ell],a_{u,v}^s[\ell]\}$为慢时标秒级部署变量，$r_m=\{\rho_{i,k,ab}[m],R_{k,ab}[m],d_{i,k,ab}[m]\}$为中时标网络控制变量，$s_n=\{\pi_{u,r}[n],x_{k,ab}[n,r],f_{i,k,ab}[n]\}$为快时标帧级通感资源调度变量。灾后UAV辅助通感一体化应急通信恢复问题可建模为：

$$\min_{\{\mathrm{y}_\ell,r_m,s_n\}}\sum_{\ell\in\mathcal{L}}J[\ell]$$
$$\text{s.t.}\begin{cases}C1{:}(11);\ C2{:}(13);\ C3{:}(1),(2)\\ C4{:}(3),(10);\ C5{:}(12);\ C6{:}(14),(15)\\ C7{:}(16),(17);\ C8{:}(18),(19);\ C9{:}(20)\end{cases} \tag{22}$$

其中，C1为流守恒约束；C2为路由与流量关联约束，将路由变量与转发流量绑定，当某链路未被业务路径选中时，该业务在对应控制周期内不能通过该链路转发；C3为UAV数量、部署区域与接入覆盖约束，限制UAV库存规模，并保证需接入服务的电力节点由UAV在接入半径内覆盖；C4为感知任务关联与感知精度约束，通过导频资源分配满足距离估计误差门限；C5为通感资源块互斥约束；C6为链路容量与切片带宽保留约束，用于保证业务转发量不超过资源块分配产生的链路容量，同时为高优先级切片提供带宽保障；C7为端到端时延保障约束，对承载高优先级电力状态数据的通信业务切片施加最大允许时延约束；C8为链路可用性与逻辑门控约束；C9为变量取值约束，规定二进制变量和连续变量的取值范围。

3.2　优化问题求解

式(22)的联合优化问题包含不同时间尺度的UAV悬停部署、多跳路由与链路带宽保留以及通感资源块调度等多类耦合变量，属于多时间尺度混合整数非线性规划问题。直接联合求解计算复杂度高，难以满足灾后应急通信的实时性要求。同时，灾后网络状态和业务到达具有较强不确定性。因此，本文提出一种基于代理值函数的多时间尺度滚动优化方法SVF-MTRO。部署周期起始利用代理值函数评价UAV部署方案对后续路由和资源调度的影响。每个控制周期确定部署结果后，根据实时链路和业务状态优化多跳路径与保留带宽。每帧在给定部署、路由和带宽保留下，根据本帧资源块容量执行通感资源分配和流量转发。

给定部署变量y_ℓ，其控制周期级和帧级调度代价为$\Phi_\ell(y_\ell)=\min\limits_{\{r_m,s_n\}}\dfrac{1}{|\mathcal{M}_\ell|}\sum\limits_{m\in\mathcal{M}_\ell}\sum\limits_{i\in\mathcal{S}}\sum\limits_{k\in\mathcal{K}}\omega_k D_{i,k}^{\mathrm{E2E}}[m]$，由于$\Phi_\ell(y_\ell)$依赖未来控制周期和无线帧中的链路状态与业务到达，无法在部署周期起始精确计算。利用代理值函数$\hat{\Phi}_\ell(y_\ell)$近似下层滚动调度代价，并通过后续控制周期级和帧级实时优化不断修正代理评估偏差。

3.2.1　部署周期尺度问题

在部署周期起始，SDN控制器除按照控制周期采集幸存链路状态以及近期业务和信道观测结果外，还需获取当前$\mathcal{S}_a$、$\mathcal{S}_s$集合。定义幸存回传锚点集合为：

$$\mathcal{B}_\ell=\{c\}\cup\left\{b\in\mathcal{V}_g,\mathcal{P}_{b,c}^{surv}(\ell)\neq\varnothing\right\} \tag{23}$$

其中，$\mathcal{P}_{b,c}^{surv}(\ell)\neq\varnothing$表示幸存基站$b$仍存在由幸存地面链路构成的控制中心回传路径集合。对于自身供电和功能正常、但原有地面回传路径已经中断的基站，不属于上式的回传锚点，但仍可作为电力节点接入点或UAV回传树中的地面中继转发节点，并通过UAV链路连接至$\mathcal{B}_\ell$。

将部署区域离散为网格点集合：

$$\mathcal{G}_\Delta=\left\{[x,y,H]^T\in\mathcal{P}_u{:}x=p\Delta,y=q\Delta,p,q\in\mathbb{Z}\right\} \tag{24}$$

其中，Δ为网格间隔。对于任意候选点$g \in \mathcal{G}_\Delta$和感知目标$q \in \mathcal{S}_s$，令$N_{\mathrm{p},q}^{\pi}$表示UAV悬停于p时，使$\sigma_{r,\mathrm{p},q} \leqslant \sigma_q^{\max}$成立所需的最小导频资源块数。接入/感知服务UAV的候选悬停点集合定义为$\mathcal{C}_\ell = \left\{ \mathrm{g} \in \mathcal{G}_\Delta : \exists v \in \mathcal{S}_a, \| \mathrm{g} - \mathrm{p}_v \|_2 \leqslant R_{acc} | \exists q \in \mathcal{S}_s, N_{\mathrm{g},q}^{\pi} \leqslant N_{\pi}^{\max} \right\}$。

对于任一候选悬停点集合$\mathcal{C} \subseteq \mathcal{C}_\ell$，若满足下式则认为该悬停点可满足接入覆盖和感知任务需求：

$$\begin{aligned} &\sum_{\mathrm{g} \in \mathcal{C}} 1\left\{ \| \mathrm{g} - \mathrm{p}_v \|_2 \leqslant R_{acc} \right\} \geqslant 1, \forall v \in \mathcal{S}_a \\ &\sum_{\mathrm{g} \in \mathcal{C}} 1\left\{ N_{\mathrm{g},q}^{\pi} \leqslant N_{\pi}^{\max} \right\} \geqslant 1, \forall q \in \mathcal{S}_s \end{aligned} \tag{25}$$

然后补齐中继回传链路，在网格点集合$\mathcal{G}_\Delta$、回传根节点集合$\mathcal{B}_\ell$和候选悬停点集合$\mathcal{C}$上构造候选回传图。若两个候选节点间距不超过可靠回传距离，则可建立回传链路。当前已接入控制中心的节点集合为$\mathcal{T}$，对每个$\mathrm{g} \in \mathcal{C}$，选择其到当前已连接集合$\mathcal{T}$的最小中继路径：

$$P^{\star}(\mathrm{g}) = \arg\min_{P: \mathrm{g} \to \mathcal{T}} \sum_{\mathrm{v} \in P \setminus \mathcal{T}} 1\{ \mathrm{v} \in \mathcal{G}_\Delta \} \tag{26}$$

并更新$\mathcal{T} \leftarrow \mathcal{T} \cup P^{\star}(\mathrm{g})$，上式目标是最小化新增UAV节点数。对$\mathcal{C}$中候选点按其到$\mathcal{B}_\ell$的最短回传距离从大到小排序，并依次执行式(26)的回传路径补全。由集合$\mathcal{C}$及其补全的回传树得到一个候选部署方案y_ℓ，若该方案满足UAV数量约束，则将其加入有效候选部署集合$\mathcal{Y}_\ell$。得到的回传树同时用于节点分类，控制中心作为根节点，跳数为0，其余节点按照到控制中心的跳数奇偶性划分类型。

令$A_{i,k}^{r}[\ell]$表示源节点i的切片k的业务到达速率，$C_{ab}^{r}(y_\ell)$表示候选部署方案y_ℓ下链路$<a,b>$的容量估计，二者由近期观测均值和波动幅度给出：

$$\begin{aligned} A_{i,k}^{r}[\ell] &= \bar{A}_{i,k}[\ell] + \kappa_A \sigma_{i,k}^{A}[\ell] \\ C_{ab}^{r}(y_\ell) &= \left[\bar{C}_{ab}(y_\ell) - \kappa_C \sigma_{ab}^{C}[\ell] \right]^{+} \end{aligned} \tag{27}$$

其中，$\bar{A}_{i,k}[\ell]$和$\bar{C}_{ab}(y_\ell)$分别为近期业务到达速率均值和链路容量估计，$\sigma_{i,k}^{A}[\ell]$和$\sigma_{ab}^{C}[\ell]$分别表示对应波动幅度，κ_A和κ_C为裕度系数，$[x]^{+} = \max\{x, 0\}$。

对于候选部署y_ℓ，其导频资源占用比例估计为$\theta(y_\ell) = \min\{1, (\sum_{q \in \mathcal{S}_s} N_{g_s(q),q}^{\pi}) / |\mathcal{R}|\}$。考虑导频占用后，链路平均数据服务速率估计为$C_{ab}^{d}(y_\ell) = \left(1 - \theta(y_\ell)\right) C_{ab}^{r}(y_\ell)$。链路$<a,b>$对切片$k$的代理单跳时延代价定义为：

$$w_{k,ab}(y_\ell) = \frac{L_k}{C_{ab}^{d}(y_\ell) + \varepsilon_0} + t_{proc} \tag{28}$$

对于业务(i,k)，通过计算候选拓扑上的最短路径$\hat{P}_{i,k}(y_\ell)$得到其代理端到端时延$\hat{D}_{i,k}(y_\ell) = \min_{P \in \mathrm{P}_{i,c}(y_\ell)} \sum_{<a,b> \in P} w_{k,ab}(y_\ell)$。$\mathcal{P}_{i,c}(y_\ell)$表示候选部署$y_\ell$下源节点$i$到控制中心$c$的可行路径集合。链路代理负载定义为：

$$\Lambda_{ab}(y_\ell) = \sum_{i \in \mathcal{S}} \sum_{k \in \mathcal{K}} A_{i,k}^{r}[\ell] 1\left\{ <a,b> \in \hat{P}_{i,k}(y_\ell) \right\} \tag{29}$$

则部署周期问题的代理值函数可定义为：

$$\begin{aligned} \hat{\Phi}_\ell(y_\ell) = &\sum_{i \in \mathcal{S}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \omega_k \hat{D}_{i,k}(y_\ell) \\ &+ \xi \sum_{<a,b> \in \mathcal{E}} \left[\Lambda_{ab}(y_\ell) - C_{ab}^{d}(y_\ell) \right]^{+} \end{aligned} \tag{30}$$

其中，ξ为惩罚系数。部署周期优化子问题为：

$$\begin{aligned} &\mathrm{P_d}(\ell): \min_{y_\ell} \lambda \sum_{u \in \mathcal{U}} z_u[\ell] + \hat{\Phi}_\ell(y_\ell) \\ &\text{s.t.} y_\ell \in \mathcal{Y}_\ell, (1), (2), (3), (20) \end{aligned} \tag{31}$$

求解上式得到$\hat{y}_\ell = \{ \hat{\mathrm{p}}_u[\ell], \hat{z}_u[\ell], \hat{a}_{u,v}^{a}[\ell], \hat{a}_{u,q}^{s}[\ell] \}$，作为部署周期决策。

3.2.2 控制周期尺度问题

给定部署周期决策$\hat{y}_\ell$，在每个控制周期$m \in \mathcal{M}_\ell$起始，SDN控制器获取当前链路状态、信道状态和业务状态，并构造活动链路集合$\mathcal{E}_m$。链路$<a,b>$被纳入$\mathcal{E}_m$当且仅当其满足式(18)-(19)中的地面链路可用性或UAV链路门控条件。SDN控制器进一步依据当前回传树计算节点跳数及A/B类别，并为各有向链路生成子带可用性参数。后续帧级资源分配仅在满足发送节点发送子带与接收节点接收子带匹配的PRB上进行。

控制接口报文采用高优先级转发及逐跳确认重传。SBFD的互补收发配置使中继节点能够在不同子带并行收发，减少控制报文的多跳转发等待。仅当状态上报、优化求解、配置下发及确认在T_{ctrl}内完成时，新配置才在后续无线帧生效，否则节点继续执行最近一次有效配置。

对于链路$<a,b>$，SDN控制器仅能获得当前及历史链路观测，约束（15）的处理可结合近期已完成控制周期的数据服务率样本得到的均值和波动幅度，构造链路平均容量的保守估计$\hat{C}_{ab}[m]$，估

计方式同（27）。对于新进入活动链路集合、尚无完整历史样本的链路，采用当前SINR和可用于数据传输的资源块比例初始化该容量估计。

根据保守估计和已分配链路负载$U_{ab}[m]$优化多跳路由，定义链路权重为：

$$w_{k,ab}[m]=\frac{L_k}{\hat{C}_{ab}[m]+\varepsilon_0}+t_{proc}+\zeta\frac{U_{ab}[m]}{\hat{C}_{ab}[m]+\varepsilon_0} \tag{32}$$

其中，ζ为负载惩罚系数。对每个业务(i,k)，控制周期路由子问题为：

$$\begin{aligned}&P_r^{i,k}(m):\min_{\{\rho_{i,k,ab}\}}\sum_{<a,b>\in\mathcal{E}_m}w_{k,ab}[m]\rho_{i,k,ab}[m]\\&\text{s.t.}\sum_{<v,b>}\rho_{i,k,vb}[m]-\sum_{<a,v>}\rho_{i,k,av}[m]=\begin{cases}1 & v=i\\-1 & v=c\\0 & \text{其他}\end{cases}\\&\rho_{i,k,ab}[m]\leqslant\chi_{ab}[m],\forall<a,b>\in\mathcal{E}_m\end{aligned} \tag{33}$$

其中，$\chi_{ab}[m]\in\{0,1\}$表示链路$<a,b>$在控制周期m是否可用。上式为固定活动图上的最短路径问题。按照切片优先级从高到低执行Dijkstra算法，得到路由变量$\rho_{i,k,ab}[m]$。则控制周期带宽保留子问题为：

$$\begin{aligned}&\mathrm{P_b}(m):\min_{\{R_{k,ab},d_{i,k,ab}\}}\sum_{i\in\mathcal{S}}\sum_{k\in\mathcal{K}}\omega_k D_{i,k}^{\mathrm{E2E}}[m]\\&\text{s.t.}d_{i,k,ab}[m]\geqslant\frac{L_k}{R_{k,ab}[m]+\varepsilon_0}+t_{proc}\\&\qquad-M_d\left(1-\rho_{i,k,ab}[m]\right)\\&D_{i,k}^{\mathrm{E2E}}[m]=\sum_{<a,b>\in\mathcal{E}_m}d_{i,k,ab}[m]\leqslant D_k^{\max},k\in\mathcal{K}_{high}\\&R_{k,ab}[m]\geqslant R_{\min}\rho_{i,k,ab}[m],\forall k,<a,b>\in\mathcal{E}_m\\&\sum_{k\in\mathcal{K}}R_{k,ab}[m]\leqslant\hat{C}_{ab}[m],\forall<a,b>\in\mathcal{E}_m\end{aligned} \tag{34}$$

当控制通道短时中断时，节点保持最近一次有效配置，通过预安装的备用路径执行本地快速失效转移。若中断持续且备用路径不可用，优先保障Bus和Gen切片，暂停或限速Pic业务，并缓存未交付数据。

3.2.3　帧尺度问题

在每个无线帧$n\in\mathcal{N}_m$，帧级调度在部署决策、路由变量和带宽保留结果固定的条件下执行。UAV u在帧n内满足感知任务所需的最小导频资源块数：

$$N_u^{\pi}[n]=\sum_{q\in\mathcal{S}_s}\hat{a}_{u,q}^{s}[\ell(n)]N_{u,q}^{\pi}[n] \tag{35}$$

其中，$N_{u,q}^{\pi}[n]$为使$\sigma_{r,u,q}[n]\leqslant\sigma_q^{\max}$成立所需的最小导频资源块数。为降低导频占用对通信传输的影响，定义资源块r的通信机会损失为：

$$\chi_r[n]=\max_{\substack{<a,b>\in\mathcal{E}_m,k\in\mathcal{K}\\ \delta_{ab,r}[m]=1}}\omega_k T_r C_{ab}[n,r] \tag{36}$$

在满足各激活UAV最小导频资源需求和资源互斥约束的条件下，优先预留通信机会损失较小的PRB。导频预留子问题可表示为：

$$\begin{aligned}&\mathrm{P}_\pi(n):\min_{\{\pi_{u,r}\}}\sum_{u\in\mathcal{U}}\sum_{r\in\mathcal{R}}\chi_r[n]\pi_{u,r}[n]\\&\text{s.t.}\sum_{r\in\mathcal{R}}\pi_{u,r}[n]\geqslant N_u^{\pi}[n],\pi_{u,r}[n]\leqslant\delta_{u,r}^{s}[m]\\&\sum_{u\in\mathcal{U}}\pi_{u,r}[n]\leqslant 1,\pi_{u,r}[n]\leqslant\hat{z}_u[\ell(n)]\end{aligned} \tag{37}$$

按照$\chi_r[n]$从小到大选择导频资源块，直到满足所有激活UAV的导频需求。剩余可用于通信的数据资源块集合为$\mathcal{R}_n^d=\{r\in\mathcal{R}:\sum_{u\in\mathcal{U}}\pi_{u,r}[n]=0\}$，为执行通信资源块分配，定义链路$<a,b>$上切片$k$在帧$n$的带宽缺口为$\Delta_{k,ab}[n]=[\hat{R}_{k,ab}[m]T_f-B_{k,ab}[n]]^+$。则通信资源块分配子问题为：

$$\begin{aligned}&\max_{\{x_{k,ab}\}}\sum_{r\in\mathcal{R}_n^d}\sum_{<a,b>\in\mathcal{E}_m}\sum_{k\in\mathcal{K}}\omega_k\Delta_{k,ab}[n]T_rC_{ab}[n,r]x_{k,ab}[n,r]\\&\text{s.t.}\sum_{<a,b>\in\mathcal{E}_m}\sum_{k\in\mathcal{K}}x_{k,ab}[n,r]\leqslant 1,\forall r\in\mathcal{R}_n^d\\&x_{k,ab}[n,r]\leqslant\sum_{i\in\mathcal{S}}\bar{\rho}_{i,k,ab}[m],x_{k,ab}[n,r]\leqslant\delta_{ab,r}[m]\end{aligned} \tag{38}$$

令$G_{i,k}[n]$表示源节点i的切片k在帧n内实际交付到控制中心的业务量，且$0\leqslant G_{i,k}[n]\leqslant A_{i,k}[n]$。帧级流量转发子问题为：

$$\begin{aligned}&\mathrm{P}_f(n):\max_{\{f_{i,k,ab},G_{i,k}\}}\sum_{i\in\mathcal{S}}\sum_{k\in\mathcal{K}}\omega_k G_{i,k}[n]\\&\text{s.t.}\sum_{<v,b>\in\mathcal{E}_m}f_{i,k,vb}[n]-\sum_{<a,v>\in\mathcal{E}_m}f_{i,k,av}[n]=\begin{cases}G_{i,k}[n]\\-G_{i,k}[n]\\0\end{cases}\\&0\leqslant G_{i,k}[n]\leqslant A_{i,k}[n],0\leqslant f_{i,k,ab}[n]\leqslant M_f\hat{\rho}_{i,k,ab}[m]\\&\sum_{i\in\mathcal{S}}f_{i,k,ab}[n]\leqslant\sum_{r\in\mathcal{R}}x_{k,ab}[n,r]T_rC_{ab}[n,r]\\&\sum_{i\in\mathcal{S}}f_{i,k,ab}[n]\leqslant\hat{R}_{k,ab}[m]T_f\end{aligned} \tag{39}$$

若本帧资源不足以承载全部业务，则按照切片权重ω_k优先转发高优先级状态类业务，未完成转发的业务计入当前帧未交付量。

3.2.4 复杂度分析

本文算法流程为部署周期内 SDN 控制器生成候选部署集合，计算代理值函数并求解式(31)。控制周期获取当前链路、信道和业务状态，求解(33)-(34)。帧级尺度内求解(37)-(39)。最后输出 UAV 部署方案、路由与带宽保留、通感资源调度结果。

部署周期候选生成由候选回传图和中继链路补全组成。设 $\mathcal{V}_\ell^{\mathrm{c}}$ 和 $\mathcal{E}_\ell^{\mathrm{c}}$ 分别表示候选回传图的节点集合和链路集合，其复杂度为 $O\left(|\mathcal{C}_\ell||\mathcal{E}_\ell^{\mathrm{c}}|\log|\mathcal{V}_\ell^{\mathrm{c}}|\right)$。有效候选部署方案数量为 $|\mathcal{Y}_\ell|$，则部署周期代理评估主要包括导频需求计算和多业务最短路径搜索，复杂度近似为 $O\left(|\mathcal{Y}_\ell||\mathcal{S}||\mathcal{K}||\mathcal{E}|\log|\mathcal{V}|\right)$。控制周期级路由对每个业务执行一次 Dijkstra 最短路径搜索，复杂度为 $O\left(|\mathcal{S}||\mathcal{K}||\mathcal{E}_m|\log|\mathcal{V}|\right)$，在路由固定后，式(34)为凸优化问题，其变量规模主要由 $|\mathcal{E}_m||\mathcal{K}|$ 决定。帧级导频预留通过对资源块机会损失排序实现，复杂度为 $O\left(|\mathcal{R}|\log|\mathcal{R}|\right)$。通信资源分配采用逐块最大权重准则，复杂度为 $O\left(|\mathcal{R}||\mathcal{E}_m||\mathcal{K}|\right)$。因此，式(22)中的联合优化问题被实现为三个在线滚动优化过程。部署周期决策由当前观测和近期统计基准确定，后续控制周期和无线帧按照实际到达状态更新对应变量，从而降低灾后网络状态不确定性对求解过程的影响。

此外，SVF-MTRO 的滚动机制也可处理 UAV 因低电量、故障或外部环境影响而退出服务的情形。当某架 UAV 无法继续承担任务时，其相关空中链路在后续控制周期中不再进入活动链路集合。SDN 控制器据此重新计算路由和切片带宽保留。若 UAV 退出导致接入覆盖或感知任务无法满足，则在下一部署周期重新调度部署位置。因此，本文将 UAV 续航引起的在线退出视为节点与链路可用性变化，并通过多时间尺度滚动优化进行重构。

4 仿真结果与分析

本节对所提方法的有效性进行仿真验证，考虑 $5km \times 5km$ 区域场景，采用 IEEE 39 节点系统构建电力通信业务源与关键设施分布，灾后损毁通过节点与链路可用性时变过程随机生成，SDN 控制器在每个控制周期起始获取全局状态。在一个部署周期内 UAV 悬停位置保持不变，设置 UAV 悬停高度统一。业务侧划分三类切片并设置不同最大允许时延。定义感知达标为待感知目标在某帧的距离估计 RMSE 不超过对应门限，感知达标率为统计窗口内达标样本数占全部待感知目标的比例，参数配置见表 1。

图 2 展示了灾后 UAV 组网结果，设置 8 个基站和 10 个电力节点随机受损。图中表明幸存可用基站仍具备供电和无线接入功能，但因相邻回传节点和原有地面链路损毁而失去回传路径。附近电力节点可继续接入这些基站，SDN 控制器进一步利用 UAV 构建空地和空空多跳链路，如 U10 和 U11，补齐幸存可用基站与控制中心之间的回传段。UAV 满足了各电力节点灾后服务需求，将分散的电力通信业务源有效汇聚并回传至控制中心。该图验证了在 SDN 全局视图下进行统一编排能够同时兼顾覆盖恢复与回传连通，提升灾后网络的整体可用性与重构效率。

图 3 为新增灾损和业务拥塞事件下的性能响应和帧级资源调度对比结果。文献[23]采用交替迭代算法在每个控制周期起始求解三类时间尺度联合优化问题。当新增灾损时，本文方法根据当前活动链路集合实时更新路由和带宽保留，关键切片快速完成资源重分配，无需重新联合优化 UAV 部署变量。文献[23]方法由于需要在耦合变量之间进行交替迭代，无法在一个周期内收敛，其路由和资源调整存在滞后，响应性能不佳。业务拥塞发生后，本文方

表 1 仿真参数设置

参数	数值	参数	数值
切片业务数据包大小	400 B/ 400 B/ 250 kB	切片业务时延约束	15 ms/ 30 ms/ 200 ms
基站发射功率	43 dBm	UAV 发射功率	37 dBm
UAV 悬停高度	30 m	感知达标 RMSE 门限	100 m
载波频率	3.5 GHz	路损指数	2.3
无线帧长	10 ms	部署周期	20 s
噪声功率谱密度	-174 dBm/Hz	SDN 控制周期	100 ms

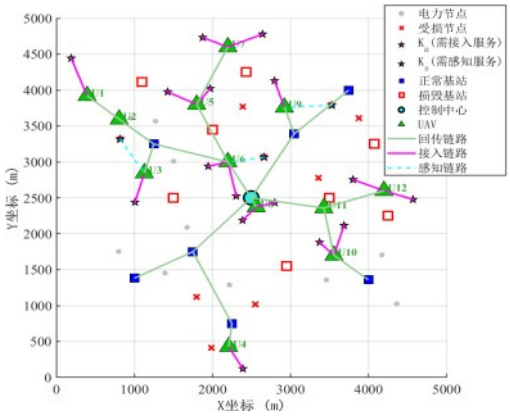


图2　灾后UAV组网结果

法通过切片分级和带宽保留机制优先保障高优先级业务。从帧级资源分配结果看，本文方法在链路损毁和业务拥塞后实时动态调整资源占用，体现出对高优先级电力通信业务的主动保护，表明所提滚动优化方法在应对灾后网络状况不确定动态变化时具有良好的适应性和实时响应能力。

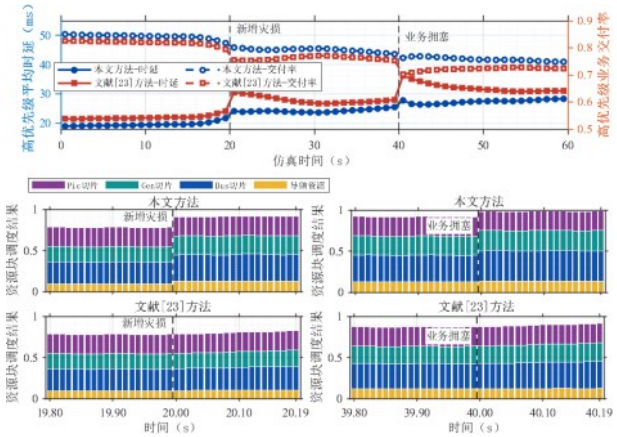


图3　新增灾损与业务突发拥塞调度性能对比

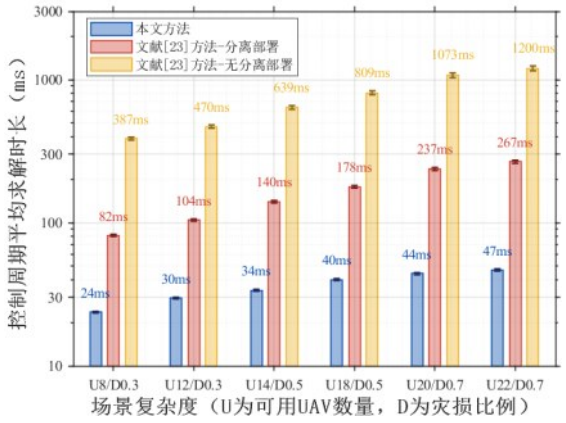


图4　控制周期平均求解时长

图4比较了不同场景复杂度下本文方法与文献[23]方法的平均求解时长。为区分文献[23]方法在不同时间尺度设置下的计算开销，分离部署表示UAV部署结果固定，控制周期内仅优化组网和资源变量；无分离部署表示在同一控制更新中联合优化三类时间尺度全部变量。随着复杂度增加，本文方法的平均求解时长均保持在50 ms内，保留了一定的控制指令下发时间裕度。分离部署和无分离部署求解时间可分别达到数百毫秒至秒级，变量维度增加后交替迭代收敛时间显著增长。该结果验证了本文多时间尺度分解的有效性，从而满足灾后应急通信的实时闭环控制要求。

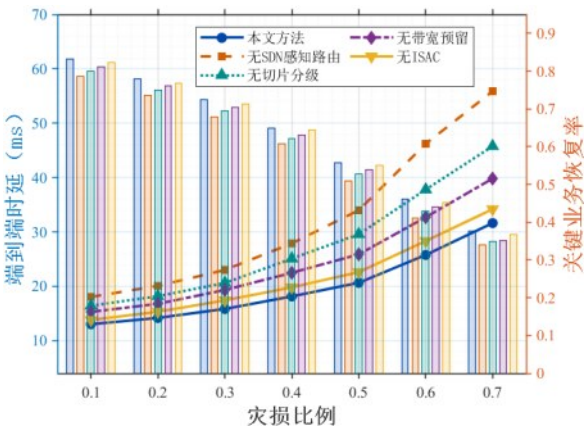


图5　端到端时延和业务恢复率随灾损比例敏感消融对比结果

图5给出了不同灾损比例下关键切片时延和业务恢复率的消融结果。灾损比例从0.1增加到0.7时，地面可用节点和链路数量减少，所有方法的端到端时延均随灾损比例增加而上升，业务恢复率下降。本文方法在0.7的高灾损比时实现了32.3 ms的平均端到端时延与0.38的恢复率。而无SDN方法时延约为56.7 ms，恢复率降低至0.33。该结果表明，SDN感知路由对复杂灾损场景下的路径选择具有主要影响，切片分级和带宽预留能够进一步限制高优先级业务的排队和竞争时延。

图6给出了可用UAV数量变化下的关键切片时延和业务恢复率敏感消融结果。随着可用UAV数量增加，受损电力节点更容易获得接入覆盖，多跳路径可选择性增强，关键切片时延整体下降，业务恢复率上升。但UAV数量增加带来的性能收益存在边际递减。当数量较少时，系统主要受覆盖缺口和回传链路不足限制，增加UAV可以改善接入和中继能力。当可用数量较多时，主要瓶颈转移到资

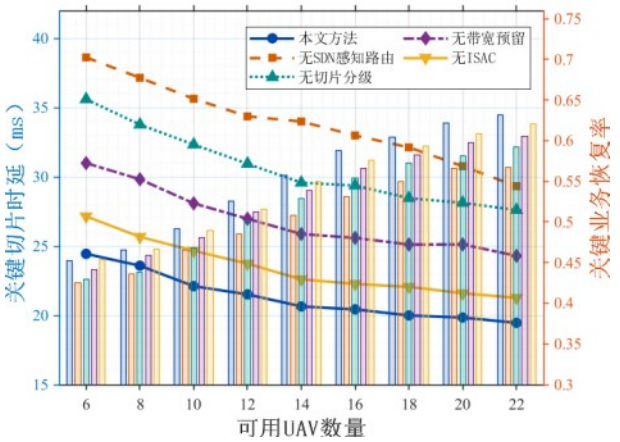


图6　关键切片时延和业务恢复率随可用UAV数量敏感消融对比结果

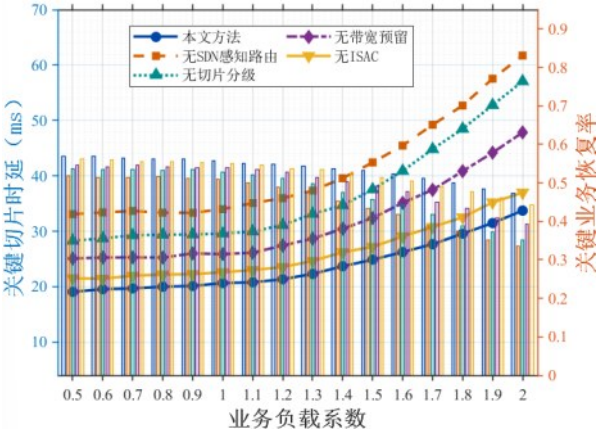


图7　关键切片时延和业务恢复率随业务负载系数敏感消融对比结果

源块、链路容量和切片带宽竞争，继续增加架次对时延和恢复率的改善幅度减小。消融结果表明，无SDN方法即使在UAV数量增加时仍存在较高时延，架次为22时其时延为29.3 ms。这说明缺少基于全局状态的路由与带宽联合控制，网络性能仍会受到不合理路径选择和链路负载不均衡的影响。

图7给出了业务负载系数变化时的关键切片时延和业务恢复率消融结果。业务量增加后，链路带宽和队列缓存竞争加剧，多跳链路中的瓶颈链路会导致排队时延累积。本文方法在负载变化下表现出最好的稳定性。当负载系数达到2.0时，时延为34.1 ms，恢复率为0.49。相比之下，无SDN方法和无切片分级方法在高负载场景下的性能恶化更明显。说明当业务负载增加时，仅依靠恢复网络连通性无法保障关键业务的交付质量。通过切片分级和带宽保留机制保障高优先级业务，在拥塞条件下可获得相对稳定的传输资源。无带宽预留方法在高负载下性能下降也较明显，说明带宽保留对抑制突发负载引起的队列积压具有一定作用。

图8给出了100次蒙特卡洛仿真下各消融方法在关键切片时延、业务恢复率等指标上的统计结果。其中无SDN方法的时延中位值为34.8 ms，且箱体和须线分布范围更大，说明缺少全局链路状态感知后，业务路径更容易经过拥塞链路和退化链路，导致多跳排队与转发时延增加。无切片分级和无带宽预留方法的时延中位值分别为30.3 ms和26.5 ms，表明高优先级切片仍需要通过优先级调度和链路级带宽预留获得资源隔离以保证其确定性传输。由关键业务恢复率结果可知，本文方法的中位恢复率高于其他方法，说明SDN全局路由、切片分级和带宽预留能够共同提升灾后关键业务交付能力。在感知达标率和导频开销比结果上，无ISAC方法感知达标率仅为0.22，这是由于该方法将感知与通信资源分离处理，无法根据目标感知需求、链路容量和切片业务状态进行统一调度。综合来看，SDN主要降低多跳路径时延并提高业务恢复率，切片分级和带宽预留主要抑制关键业务在拥塞条件下的资源竞争，ISAC可平衡通感资源的占用。

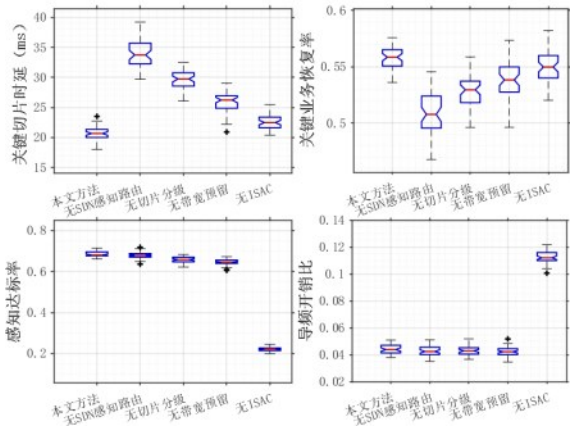


图8　不同消融方法下关键业务与感知性能统计结果

5　结束语

本文提出一种SDN控制的UAV辅助通感一体化电网应急通信恢复方法，对感知导频资源、链路预留速率和电力通信业务切片资源进行联合编排。针对联合优化问题变量维度高、链路状态时变以及在线求解实时性要求高等特点，提出基于代理值函数的多时间尺度滚动优化方法SVF-MTRO，将UAV部署、组网路由和通感资源调度分别映射至

秒级、百毫秒级和无线帧级时间尺度进行滚动优化。仿真结果表明，所提方法能够在满足受损电力设施感知精度要求的前提下，降低关键通信业务的端到端时延，提高受损通信网络的业务恢复率和数据交付能力，并能够在突发链路损毁和业务拥塞条件下快速调整路由与资源分配。后续工作将面向更长时间尺度的灾后恢复过程，进一步研究UAV能耗管理与续航调度问题。

参考文献：

[1] Zhong J, Chen C, Bie Z H, et al. Strategic SDN-based microgrid formation for managing communication failures in distribution system restoration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2025, 40(3): 2506-2518.

[2] Raghuraman P, Guvenc I, Baran M, et al. Assessment of 5G ultra-reliable low-latency communication for wide-area protection in a power distribution system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2026, 22(3): 1683-1694.

[3] Zhang Y, Shan H, Song M, et al. Packet-level throughput analysis and energy efficiency optimization for UAV-assisted IAB heterogeneous cellular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72 (7): 9511-9526.

[4] Luo X, Xie J, Xiong L, et al. Distributed topology control of multiple ISAC-UAVs for mobile search teams in unknown 3-D terrains[J]. Ad Hoc Networks, 2025, 169: 103753.

[5] 王莉, 魏青, 徐连明, 等. 面向通信-导航-感知一体化的应急无人机网络低能耗部署研究[J]. 通信学报, 2022, 43(7): 1-20.

[6] Wei X, Li R, Chen Y, et al. Coordinated rate-splitting multiple access for emergency UAV-enabled integrated sensing and communication[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2026, 12: 5999-6015.

[7] Zhang S, Liu J. Analysis and optimization of multiple unmanned aerial vehicle-assisted communications in post-disaster areas[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(12): 12049-12060.

[8] Wu J, Chen Q, Jiang H, et al. Joint power and coverage control of massive UAVs in post-disaster emergency networks: An aggregative game-theoretic learning approach[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2024, 11(4): 3782-3799.

[9] Hamid H, Begh G R. Maximizing the energy efficiency using M-PSO in multi-hop UAV-IRS network for improved post-disaster emergency communication services[J]. Vehicular Communications, 2025, 53: 100920.

[10] Carrillo D, Kalalas C, Raussi P, et al. Boosting 5G on smart grid communication: A smart RAN slicing approach[J]. IEEE Wireless Communications, 2023, 30(5): 170-178.

[11] Fan Z, Zhang M, Cao Y, et al. A novel UAV-assisted VANET routing protocol for post-disaster emergency communications[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2026, 13: 4863-4882.

[12] 柴蓉, 王丙燕, 孙瑞锦, 等. 基于系统成本函数优化的无人机辅助通感一体化系统数据调度、雷达预编码及飞行轨迹优化方法[J]. 电子学报, 2025, 53(3): 744-753.

[13] Liu H, Tsang Y P, Lee C K M, et al. Optimizing UAV flocks for emergency response in post-disaster industrial zones[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2026, 22(1): 37-48.

[14] Xu L, Zhu Q, Xia W, et al. Joint placement and beamforming design in UAV enabled multi-stage ISAC system[J]. IEEE Transactions on Communications, 2025, 73(11): 12248-12263.

[15] Zhang B, Yue D, Dou C X, et al. Co-design of active power control and UAV-assisted two-stage emergency communication for ADN: A cyber-physical cross-space understanding and cooperation method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2026, 17(2): 1457-1476.

[16] Li B, Liu J, Mu J, et al. UAV-enabled integrated sensing and communication in maritime emergency networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(24): 53997-54011.

[17] Alam M M, Moh S. Joint topology control and routing in a UAV swarm for crowd surveillance[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2022, 204: 103427.

[18] Dong S, Zhou B, Zang T, et al. Post-disaster multi-timescale coordinated restoration of power and thermal cyber-physical system considering hot standby resources[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2026, 17(1): 634-649.

[19] Zhu W, Han Y, Wang L, et al. Pilot optimization for OFDM-based ISAC signal in emergency IoT networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(18): 29600-29614.

[20] Zhang Y, Shan H, Zhou Y, et al. Cooperative beamforming design for anti-UAV ISAC systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2025, 24(3): 2249-2264.

[21] 李若光, 王琰, 陈颖玚, 等. 协作速率分割多址接入辅助的多站通感一体化波束赋形设计[J]. 电子学报, 2025, 53(5): 1491-1499.

[22] Xie X, Wang J, Chen J, et al. A sensing-then-communication architecture for low latency MIMO ad hoc networks: Design and optimization [J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2025, 11(5): 2821-2833.

[23] Bayessa G A, Chai R, Liang C C, et al. Joint UAV deployment and precoder optimization for multicasting and target sensing in UAV-assisted ISAC networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(20): 33392-33405.

[24] Ning Z L, Zhang Y Z, Wang X J, et al. Joint trajectory and beamforming optimization for UAV-ISAC secure communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2026, 25: 15216-15231.

[25] Duan T, Dinavahi V. Dataplane-based fast failover in SDN-enabled wide area measurement system of smart grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(7): 8148-8158.

[26] Jakaria A H M, Rahman M A, Gokhale A. Resiliency-aware deployment of SDN in smart grid SCADA: A formal synthesis model[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2021, 18(2): 1430-1444.

[27] 郭梦杰, 寿国础, 刘雅琼, 等. 面向混合多域组网的软件定义时间敏感网络[J]. 通信学报, 2025, 46(6): 1-17.



胡景禹（1998− ），男，电子科技大学博士研究生，主要研究方向为通感控一体、新型电力系统通信、电力系统频率控制。



陈勇（1977– ），男，博士，电子科技大学教授，主要研究方向为通感一体技术、网联系统控制、无人系统组网与控制、电力电子控制。