面向无人作业的天地一体 6G 网络：感传算控闭环与按需通信方法

方欣然[1, 2]，冯伟[1, 2]，段向阳[3, 4]，任保全[5]，王建伟[4]，龚谏君[6]，葛宁[1, 2]

（1. 清华大学电子工程系，北京 100084；2. 天基网络与通信全国重点实验室，北京 100084；3. 北京邮电大学信息与通信工程学院， 北京 1008763；4. 中兴通讯股份有限公司，深圳 518055；5. 军事科学院系统工程研究院，北京 100101；6. 深圳市中创鑫和科技有限公司，深圳 518108）

摘 要：随着信息技术不断演进，支持机器设备自主作业成为第六代移动通信（6G）的重要愿景。在网络连接下，异构设备协同构建“感知-通信-计算-控制”闭环（简称感传算控闭环），替代人类执行复杂、危险任务。感传算控闭环要求网络覆盖海洋、矿山等生产作业现场，并满足确定性信息服务需求。在资源受限条件下，如何高效构建任务型 6G 网络成为核心挑战。为此，打破传统网络以链路为基本单元的局限，提出基于感传算控闭环、外信息驱动的按需通信方法。首先，针对感传算控闭环中不同环节的度量差异性，建立闭环信息模型，提出闭环内上下行链路协同配置方案；其次，拓展至多闭环系统，针对严苛时延约束下短包传输的“雪崩效应”困境，提出面向控制任务的多闭环资源按需优化方案；进一步地，拓展至包含多个无人作业系统的天地一体网络，针对站址受限、频谱稀缺引发的覆盖盲区难题，设计基于电磁地图的随遇通信方案。仿真结果表明，通过利用任务和位置信息，所提方案显著提升天地一体网络支持无人作业任务的效率。最后，探讨天地一体 6G 网络发展的关键问题与潜在解决方案，为构建任务驱动型 6G 网络提供参考。

关键词：按需通信；感传算控闭环；天地一体网络；第六代移动通信（6G）

中图分类号：TN915.08

文献标志码：A

doi：10.11959/j.issn.2096−3750.

Space-Air-Ground Integrated 6G Network for Unmanned Operations: Sensing-Communication-Computing-Control Closed Loop and On-Demand Communications

FANG Xinran[1,2], FENG Wei[1,2], DUAN Xiangyang[3,4], REN Baoquan[5], WANG Jianwei[4], GONG Jianjun[6], GE Ning[1,2]

1. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2. State Key Laboratory of Space Network and Communications, Tsinghua University, Beijing 100084, China

3. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

4. ZTE Corporation, Shenzhen 518055, China

5. China Electronic System Engineering Company, Beijing 100101, China

6. Sinorise Technology (Shenzhen) Co., LTD., Shenzhen 518108, China

Abstract: With the evolution of information technology, enabling autonomous operations has become an important vision of sixth-generation (6G) mobile communication systems. Under network connectivity, heterogeneous devices collaboratively construct sensing – communication – computing – control (**SC³**) closed loops, enabling machines to replace humans in performing complex and hazardous tasks. Such **SC³** closed loops require network coverage over remote environments

收稿日期：2025−07−XX；**修回日期：**2025−XX−XX

通信作者：冯伟，fengwei@tsinghua.edu.cn

基金项目：国家自然科学基金（No.62425110, No. 62541104）

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62425110, No. 62541104)

such as oceans and mines, while providing deterministic low-latency information services. Under resource constraints, constructing efficient space–air–ground integrated networks (SAGINs) for 6G remains a core challenge. To address this challenge, this paper departs from the traditional link-centric network design paradigm and proposes an extrinsic-information-driven, **SC³**-closed-loop-based on-demand communication framework. First, to account for the metric heterogeneity across different components of the **SC³** closed loop, a closed-loop information model is established, and a joint uplink-downlink configuration scheme is developed. Second, extending to multi-loop systems, a control-oriented closed-loop resource optimization scheme is proposed to mitigate the rate loss inherent in short-packet communications. Furthermore, the framework is generalized to SAGINs, where a radio-map-based opportunistic communication scheme is designed to address coverage blind zones caused by site constraints and spectrum scarcity. Simulation results demonstrate that, by exploiting task and position information, the proposed schemes significantly enhance the coverage performance and operational efficiency of SAGINs in supporting unmanned operations. Finally, key challenges and potential solutions for developing 6G SAGINs are discussed, providing insights into the design of task-oriented 6G networks.

Key words: on-demand coverage, sensing-communication-computing-control (**SC³**) closed loop, space-air-ground integrated network (SAGIN), the sixth-generation (6G) communication

0　引言

随着信息技术不断发展，机器设备逐渐在应急救灾、煤矿开采、石油勘探等环境恶劣的任务中替代人类作业，并显著提升任务完成效率。以波士顿动力（Boston Dynamics）公司为例，该公司于2025年3月发布了全电力驱动的Atlas人型机器人，该机器人具备拎起重物、操作开关等关键救援能力[1]，可以实现灾害现场快速部署。

在复杂多变的环境中，机器设备要顺利完成各类作业任务，其间的协同配合至关重要。如图1所示，为覆盖高山、海域等生产作业区域，第六代移动通信（The Sixth Generation Communication System, 6G）将构建天地一体网络。在天地一体网络中，感知、通信、计算与控制功能协同工作，形成“感知–通信–计算–控制”闭环[2-3]（以下简称感传算控闭环）。感传算控闭环与生物学的反射弧类似，在每个闭环周期中，感知单元采集数据并上传至计算单元；计算单元对数据进行处理、分析与决策，生成作业指令，并通过通信链路将控制命令下发至执行单元；执行单元根据指令完成具体操作，实现从信息获取到动作执行的全流程闭环。生物的各种反射活动依赖反射弧的完整性[4]，类似地，感传算控闭环是一个整体，构成了面向无人作业的网络的最小功能单元。

然而，在海洋、高山等区域，地面基站站址受限且供电困难[5-6]，需要空中机动设施和通信卫星为地面网络提供协同覆盖[7-8]。但空天平台在频谱、能量等方面相较于地面设备具有显著差距[9-10]，在严苛资源约束下，如何构建支持无人作业的天地一体6G网络成为核心难题。

当前的通信系统采用分层架构，将上层应用与通信传输、通信传输与底层无线环境解耦；为追求通信传输效率，双工、多址技术将通信网络分解为独立链路，作为传输比特的“管道”[11-12]。尽管这种分层分解机制简化了系统设计，但带来显著的效率损失：因缺乏对环境和任务信息的关注，任务需求经过多层映射“层层加码”交由无线承载，底层无线承载依赖频繁发送导频获取信道信息，以“超额供给”的方式满足任务需求[13]；此外，将网络分解为独立链路破坏了链路间的协同关系，不同链路性能间的失配导致资源难以与需求匹配。

为此，本文提出基于感传算控闭环、外信息驱动的按需通信方法。通过利用任务和位置外信息、挖掘感传算控闭环中链路间的协同关系，实现按需、灵活的网络资源调度，缓解偏远地区资源受限与无人作业高通信需求之间的矛盾。

1　研究现状与关键问题

如图1所示，在高山、海洋等特殊生产作业区域，地面基础设施薄弱，空中机动设施、通信卫星与地面基站协同构建天地一体网络。为支持无人作业任务，本文将感传算控闭环作为天地一体网络的基本单位。从基于感传算控闭环、外信息驱动的按需通信研究思路出发，将多样化无人作业任务建模为对线性时不变不稳定系统的控制任务。遵循自底

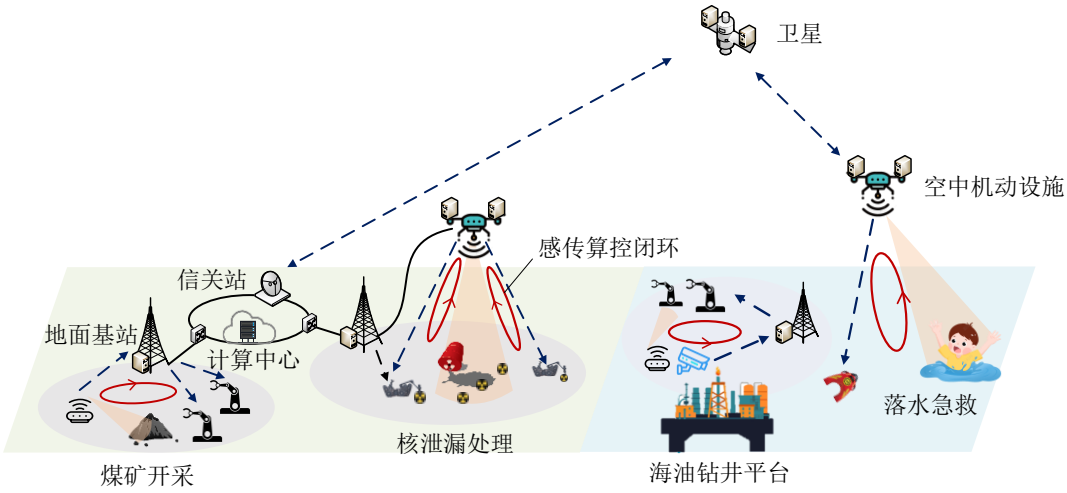


图1　面向无人作业的天地一体6G网络示意图

向上的顺序，研究面向单闭环、多闭环系统以及天地一体网络的资源按需优化方法。相关研究的现状和挑战分析如下。

1.1　感传算控闭环建模与链路协同配置难题

感知、通信、计算、控制四个领域几乎独立发展，度量存在差异。因此，尚无统一度量闭环性能的指标，闭环内链路间的配置准则未知。

近年来，相关研究从信息论出发取得进展：在通信与感知交叉领域，建立了收发互信息与感知参数估计误差（最小均方误差）之间的定量关联[14]；在通信与控制交叉领域，通过引入内禀熵率[15]（Intrinsic Entropy Rate），实现了通信性能与控制系统稳定性之间的跨域映射；在通信与计算交叉领域，语义通信将传统符号熵拓展至语义熵，使失真度量从符号空间的欧氏距离拓展为收发端语义空间的信息熵[16]，通过传输语义信息而非原始数据，缓解通信压力。上述研究表明，熵有望作为建立感传算控闭环模型的基础理论工具。但如何通过熵建立任务与闭环、闭环与各功能单元的统一映射，突破传统链路独立的假设，指导闭环内链路的协同配置，成为首要关键问题。

1.2　多闭环无人作业系统按需优化难题

大多数无人作业应用要求确定性的感传算控闭环时延。根据有限码长理论，当传输时延缩短至毫秒量级，短包可达速率较香农容量急剧下降，出现所谓的“雪崩效应”，导致通信成为制约闭环性能的瓶颈。

已有研究从通信速率－控制稳定性角度出发，建立了系统临界稳定性条件，并推导不同通信条件下的最优控制策略[16-21]。在此基础上，相关研究探索控制参数与通信资源联合优化算法[22-26]。此外，部分工作基于有限码长可达速率表达式，从包长、速率、时延等多维度出发，设计适用于低时延控制场景的资源分配策略[27-28]。但目前大多数研究仍以追求通信效率为核心目标，未能将通信传输与控制需求精准匹配。因此，如何突破传统分层设计的局限，利用任务信息按需配置多闭环资源，提升资源任务效用成为第二个问题。

1.3　天地一体网络非规则拓扑下的干扰协调难题

在频谱共享场景中，不同无人作业系统的信号相互交叠，天地一体网络非规则拓扑结构引发严重的同频干扰，制约网络覆盖性能。

现有研究从资源联合优化的角度出发，通过功率控制、波束优化、平台轨迹设计等手段来协调干扰[29-32]。然而，此类方法依赖频繁的导频交互以获取全部信道信息，需要在小尺度相干时间内动态调整系统参数，使得系统高度耦合且信令开销巨大[33]。因此，如何针对天地一体网络拓扑非规则特性，设计系统松耦合的干扰协调方案，按需覆盖作业区域成为关键问题。

2　闭环负熵率和上下行链路协同配置准则

2.1　研究思路

针对感传算控闭环建模难题，本节基于无线控制系统中线性二次控制器（Linear Quadratic Regulator）代价（下文简称LQR代价）与通信速率间的基本关系，用熵统一度量感传算控闭环中各功能环节，提出度量闭环的指标，称之为闭环负熵率；在

此基础上，拓展现有的速率－代价函数至控制代价－闭环负熵率函数，建立从控制任务至感传算控闭环，再到闭环中各功能的统一映射。基于建立的闭环负熵率模型，提出上下行链路协同配置准则，为闭环内链路配置提供参考。

图 2 给出了感传算控闭环模型，其中，图 2（a）为物理模型，物理模型简单直观，用于刻画感传算控闭环的实际运行机制：感知单元获取原始数据；上行链路传输感知的原始数据；计算单元从原始数据中提取出对当前任务有用的信息，形成控制命令；下行链路传输控制命令；执行单元执行控制命令。感传算控闭环的信息模型为图 2（b），在信息模型层面上，感传算控闭环的具体实施过程被抽象为信息的传输、提取和使用。在此基础上，利用熵理论对闭环进行量化表征，从而构建从控制性能到闭环性能，再到各功能单元的统一映射。

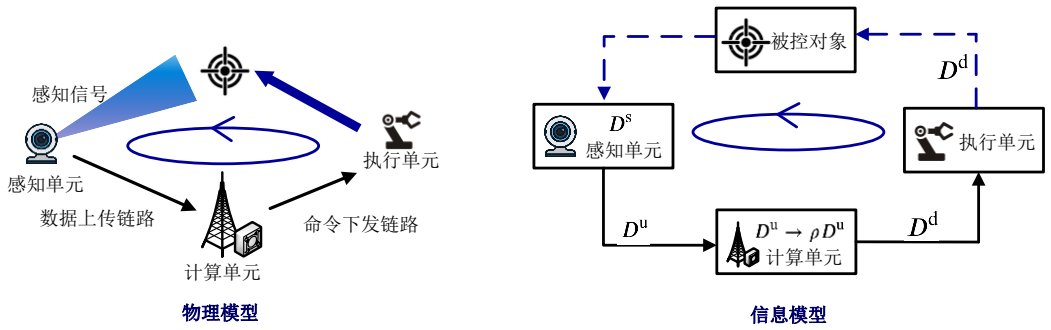


图2　感传算控闭环模型

2.2　案例说明

将无人作业过程建模为对线性时不变系统的控制过程，感知单元观测方程和系统演进方程如下，

$$\mathbf{y}_t = \mathbf{C}\mathbf{x}_t + \mathbf{w}_t, \tag{1}$$

$$\mathbf{x}_{t+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_t + \mathbf{B}\mathbf{u}_t + \mathbf{v}_t, \tag{2}$$

其中，$\mathbf{y}_t \in \mathbb{R}^{q\times 1}$代表观测状态，$\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{q\times m}$代表观测矩阵，$\mathbf{w}_t \in \mathbb{R}^{q\times 1}$代表观测噪声，其服从零均值高斯分布，方差记为 $\mathbf{\Sigma}_{\mathrm{w}} \in \mathbb{R}^{q\times q}$，$\mathbf{x}_t \in \mathbb{R}^{m\times 1}$ 和 $\mathbf{u}_t \in \mathbb{R}^{o\times 1}$ 分别表示离散时刻 t 的系统状态与控制输入。

$\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{m\times m}$表示状态转移矩阵，$\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{m\times o}$表示输入矩阵，$\mathbf{v} \in \mathbb{R}^{m\times 1}$表示系统噪声，其服从零均值高斯分布，方差记为$\mathbf{\Sigma}_{\mathrm{v}} \in \mathbb{R}^{m\times m}$，$m$表示被控系统状态的维度，$o$表示控制输入的维度。

针对上述线性时不变系统，LQR 代价是度量控制性能的核心指标，其具体的数学表达式如下

$$L(\mathbf{x}^{\infty},\mathbf{u}^{\infty}) = \limsup_{T\to\infty} \mathbb{E}\left[\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\left(\mathbf{x}_t^{\top}\mathbf{Q}\mathbf{x}_t + \mathbf{u}_t^{\top}\mathbf{R}\mathbf{u}_t\right)\right], \tag{3}$$

$\mathbf{Q}$和$\mathbf{R}$分别为状态偏差权重矩阵与控制输入权重矩阵，用于平衡系统状态偏差与控制输入代价在整体性能中的重要程度。从物理意义上看，LQR 代价越小，意味着闭环系统能够以更低的能量成本将被控系统状态维持在更接近平衡点的水平，代表控制性能越优。在信息论的视角下，LQR 代价与通信链路速率相互关联，文献[21]针对计算单元与执行单元合成为控制单元的闭环结构，定义了速率－代价函数，用于刻画给定 LQR 代价所需平均有向互信息的闭式下界：

$$D(l) \geqslant \log_2|\det\mathbf{A}| + \frac{m}{2}\log_2\left(1 + \frac{|\det\mathbf{NM}|^{1/m}}{\frac{1}{m}(l - l_{\min})}\right). \tag{4}$$

$l_{\min}$代表最低的 LQR 代价，在 D 趋于无穷时取得，

$$l_{\min} = \mathrm{tr}\left(\mathbf{\Sigma}_{\mathrm{v}}\mathbf{S}\right) + \mathrm{tr}\left(\mathbf{\Sigma}\mathbf{A}^{\top}\mathbf{M}\mathbf{A}\right). \tag{5}$$

式(4)中$\mathbf{N}$，$\mathbf{M}$的计算公式可参考文献[21]。基于代价－速率函数，在信息层面上对感传算控闭环进行建模。定义感知单元每周期获取的信息量为 D_s，称之为感知周期速率；上行链路传输的信息量为上行周期速率，用D_u表示；建模计算过程为信息提取过程，即从上行链路传递的信息量中提取出对当前任务有用的信息量，该过程信息量的变化为：

$$D_u \to \rho D_u. \tag{6}$$

定义每周期下行传输的信息量为下行周期速率，用D_d表示。根据级联水管流量原理，执行单元每闭环周期获取的信息量由闭环中的瓶颈环节决定：

$$D_{\mathrm{SC}^3} = \min\left(\rho\min\left(D_s, D_u\right), D_d\right) \quad (\mathrm{bits/SC^3\ cycle}) \tag{7}$$

定义$D_{\mathbf{SC}^3}$为闭环负熵率，表征单位闭环周期用于控制系统熵增的有效信息量。在此基础上，拓展(4)中的速率－代价函数至控制代价－闭环负熵率函数：

$$L(D^{\mathbf{SC}^3}) \triangleq \frac{m|\det(\mathbf{NM})|^{\frac{1}{m}}}{2^{\frac{2}{m}(D^{\mathbf{SC}^3}-\log_2|\det \mathbf{A}|)}-1}+l_{\min} \tag{8}$$

式(8)为速率－代价函数的反函数，刻画了给定闭环性能前提下，控制LQR代价的下界。根据文献[21]，该闭式表达式为紧致的下界。本文将其作为任务性能与闭环性能间的桥梁，基于此设计面向控制任务的按需通信方案。

对于单个感传算控闭环，闭环内上下行链路相互协同，共同服务于闭环中的信息流转，需协同配置上下行链路资源。由于控制代价－闭环负熵率函数关于闭环负熵率单调递减，最小化控制LQR代价等价于最大化闭环负熵率。为此，以闭环负熵率为目标，建立联合优化上下行链路带宽、传输时间和包长的优化问题（P1）

$$\begin{aligned}(\mathrm{P1})\ &\max_{B_u,t_u,n_u,B_d,t_d,n_d\geq 0} D_{\mathbf{SC}^3}\\ &\text{s.t. } D_{\mathbf{SC}^3}\leq min(\rho D_u, D_d),\\ &D_u\leq n_u\log_2(1+\frac{P_{u,max}h_u}{B_uN_0}),\\ &D_d\leq n_d\log_2(1+\frac{P_{d,max}h_d}{B_dN_0})-\sqrt{n_d}\,Q^{-1}(\epsilon)\log_2 e,\\ &t_u+\frac{\alpha D_u}{f_{max}}+t_d\leq T,\\ &n_{u/d}\leq t_{u/d}B_{u/d}, n_{u/d}\in\mathbb{N}^+,\\ &B_u+B_d\leq B_{\max},\end{aligned} \tag{9}$$

其中，$B_{u/d}$代表上下行带宽，$t_{u/d}$代表上下行传输时间，$n_{u/d}$代表上下行包长，$h_{u/d}$代表上下行信道增益，$P_{u,max}$、$P_{d,max}$代表上下行传输功率，ϵ代表传输错误概率，$Q^{-1}(\cdot)$代表Q函数的反函数，N_0代表噪声功率谱密度，α(cycles/bit)代表处理每单位比特原始数据所需的CPU频率，f_{max}代表CPU频率，T代表闭环周期，$B_{\max}$代表可用的带宽资源。假设感知单元周期速率远大于上行链路周期速率：$D_s \gg D_u$，闭环负熵率的表达式(7)转变为优化问题中的第一项约束；优化问题中的第二项和第三项约束分别为上下行链路传输能力的物理约束，考虑到上行链路需传输原始感知数据，数据量大，采用香农容量刻画上行链路传输性能；下行链路主要传输控制命令，信息量小，采用有限码长的可达速率刻画下行链路传输性能。

所建立的优化问题属于非线性混合整数规划问题，直接求解面临较高的计算复杂度。为避免瓶颈限制，在最优资源配置下，上下行链路传输信息量满足如下平衡关系

$$\rho D_u^* = D_d^*. \tag{10}$$

将上下行包长近似为连续变量$n_{u/d}=t_{u/d}B_{u/d}$，定义上下行传输速率：

$$\begin{aligned}&R_u(B_u)=B_u\log_2\left(1+\frac{P_{u,max}h_u}{B_uN_0}\right)\\ &R_d(B_d,t_d)=B_d\log_2\left(1+\frac{P_{d,max}h_d}{B_dN_0}\right)-\sqrt{\frac{B_d}{t_d}}\,Q^{-1}(\varepsilon)\log_2(e)\end{aligned} \tag{11}$$

基于(10)，可推导出传输时间关于速率的最优解

$$\begin{aligned}t_u^*&=\frac{T}{1+\frac{\rho R_u(B_u)}{R_d}+\frac{\alpha R_u(B_u)}{f_{max}}},\\ t_d^*&=\frac{\rho R_u(B_u)}{R_d(B_d,t_d^*)}\cdot\frac{T}{1+\frac{\rho R_u(B_u)}{R_d(B_d,t_d^*)}+\frac{\alpha R_u(B_u)}{f_{max}}}\end{aligned} \tag{12}$$

将传输时间替换为上式代入(9)，给定$R_d(B_d,t_d)$中t_d的值$t_d^{(s-1)}$，原始优化问题简化为如下带宽优化问题

$$\begin{aligned}(\mathrm{P2})\ &\min_{B_u,B_d\geqslant 0} g_u+g_d\\ &\text{s.t. }\rho R_u(B_u)\geqslant\frac{1}{g_u}, R_d(B_d,t_d^{(s-1)})\geqslant\frac{1}{g_d}\\ &B_u+B_d\leqslant B_{max}\end{aligned} \tag{13}$$

其中，g_u、g_d为辅助变量；由闭环负熵率关于速率的单调性，最大化闭环负熵率等价于最小化g_u+g_d。为此，构建两层迭代求解算法，算法细节可参见文献[34-35]，算法流程如算法1所示。

在算法仿真中，信道增益依据路径损耗模型计算：$h_{u/d}[\mathrm{dB}]=[32.4+20*\log_{10}(f_c)+20*\log_{10}(d_{u/d})]$，其中$f_c$(MHz)代表载波频率，$d_{u/d}$(km)代表上下行链路的传输距离。各参数设定如表1所示。

如图3所示，仿真对比了两种上下行链路配置方案。对比方案一以上下行链路和速率为优化目标：ρD_u+D_d，并引入速率差值约束：$|\rho D_u-D_d|\leqslant D_0$，$D_0=50(\mathrm{bits/SC^3cycle})$[36]；对比方案二参照5G

算法1　面向闭环负熵率的上下行链路协同配置算法

输入：通信参数：$P_{u/d,max}$、B_{max}、$h_{u/d}$、N_0、ε；计算参数：α、ρ、f_{max}、T；收敛阈值ε_0；

1：初始化：令 $B_d^{(0)}=\frac{B_{max}}{2}, t_d^{(0)}=\frac{T}{3}, s=1$；

2：外层迭代：重复执行步骤3~4；

3：内层迭代：固定$t_d^{(s-1)}$，对$R_d(B_d,t_d^{(s-1)})$中的$\sqrt{\frac{B_d}{t_d^{(s-1)}}}Q^{-1}(\varepsilon)\log_2(e)$在前次迭代解$B_d^{(s-1)}$处进行一阶泰勒展开，将(P1)转变为凸优化子问题(P2)，采用连续凸近似直至内层目标值收敛，求解得到$B_{u/d}^{(s)}$；

4：将内层求解的上下行带宽代入(12)，更新上下行传输时间以及上下行包长：$n_u^{(s)}=B_u^{(s)}t_u^{(s)}, n_d^{(s)}=B_d^{(s)}t_d^{(s)}$；

5：直至$\frac{\left|t_d^{(s)}-t_d^{(s-1)}\right|}{t_d^{(s)}}\leqslant\varepsilon_0$，迭代终止；

6：计算最优闭环负熵率$D_{SC^3}^*=\min\left(\rho D_u^*, D_d^*\right)$；

输出：上下行带宽$B_u{}^*$、$B_d{}^*$，传输时间$t_u{}^*$、$t_d{}^*$，包长$n_u{}^*$、$n_d{}^*$及闭环负熵率$D_{SC^3}^*$。

表1　面向闭环负熵率的上下行链路协同配置方案仿真参数

参数	参数取值
载波频率	$f_c=2800$MHz
上下行传输距离	$d_{u/d}=1$km
上下行传输功率	$P_{u,max}=0.1\ W, P_{d,max}=1\ W$
传输错误概率	$\epsilon=10^{-5}$
信道噪声功率谱密度	$N_0=$-174 dBm
计算CPU频率	$f_{max}=1$ GHz
信息提取率	$\rho=0.01$
每比特所需的CPU频率	$\alpha=100$(cycles/bit)
闭环周期	$T=10$ ms

频分双工（FDD），将带宽进行均分，固定下行传输时间为$t_d=2$ms，上行传输时间与计算时间的设定依据文献[35]确定。如图3所示，在设置参数下，所提方案相较于两种对比方案提升闭环负熵率超过30%。这是由于所提方案挖掘链路间的协同关系。相比之下，对比方案一[36]将上下行链路视为资源竞争关系；对比方案二对上下行链路进行正交隔离，独立配置上下行链路资源。两种对比方案均忽略了两条链路在闭环中的协同关系，导致某条链路成为短板，制约闭环整体效率。且所得最优闭环负熵率均大于被控系统的内禀熵率，满足稳定性条件。

3　面向控制任务的多闭环按需优化方法

3.1　研究方案

灾后救援、煤矿开采等无人作业任务对闭环时延要求严苛。在确定性闭环时延约束下，闭环中的链路需采用短包传输，香农容量难以精准刻画短包约束下的链路速率。为此，本节采用短包可达速率表征有限长编码下链路传输性能。基于控制代价－闭环负熵率函数，建立以最小化控制代价为目标，以包长与发射功率为变量的优化问题。所提方案引入任务外信息，通过以任务需求为导向的方式按需配置多闭环资源，提升资源的任务效用。

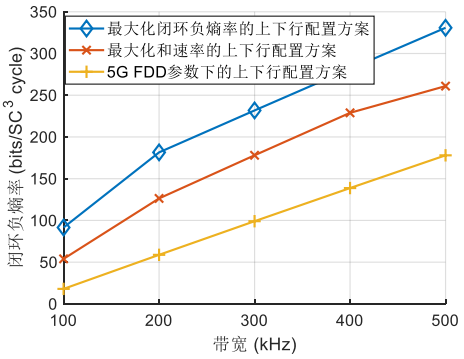


图3　不同上下行配置方案下的闭环负熵率

3.2　案例说明

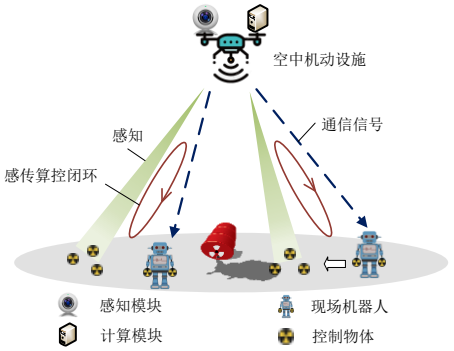


图4　应急救援场景下的多闭环无人作业系统

如图4所示，当核泄漏等事故发生后，搭载感知、通信与计算模块的空中机动设施迅速抵达现场，与部署在事故区域的机器人组成无人作业系统。空中机动设施感知核泄漏物质分布，生成控制指令，下发至现场机器人执行。空中机动设施与机器人协同构建K个感传算控闭环，各闭环独立承担不同的控制任务。

建模被控系统为独立演进的线性时不变高斯过程，以第k个感传算控闭环为例，下行每周期传输的信息量表达式如下[37]

$$D(n_k,p_k)\cong(1-\epsilon_k)\left(n_k\log_2(1+\frac{g_kp_k}{\sigma_k^2})\right)$$
$$-(1-\epsilon_k)\left(\log_2 e\sqrt{n_k(1-\frac{1}{(1+\frac{g_kp_k}{\sigma_k^2})^2})}\,Q^{-1}(\epsilon_k)\right)(\text{bits/SC}^3\text{cycle}). \tag{14}$$

定义$D(n_k,p_k)$为下行周期速率，n_k代表包长，p_k代表发射功率，g_k代表信道增益，σ_k^2代表信道噪声方差，$Q^{-1}(\cdot)$是Q函数的反函数，ϵ_k代表传输错误概率。在感知单元完美感知，被控系统维度与控制命令维度相同时，控制代价－闭环负熵率函数可简写为

$$L(n_k,p_k)\triangleq\frac{m_kN(\mathbf{v}_k)|\det\mathbf{M}_k|^{\frac{1}{m_k}}}{2^{\frac{2}{m_k}(D(n_k,p_k)-\log_2|\det\mathbf{A}_k|)}-1}+\mathrm{tr}\left(\mathbf{\Sigma}_{\mathbf{v}_k}\mathbf{S}_k\right). \tag{15}$$

$N(\mathbf{v}_k)$的计算公式如下：

$$N(\mathbf{v}_k)\triangleq\frac{1}{2\pi e}\exp\left(\frac{2}{m_k}h(\mathbf{v}_k)\right), \tag{16}$$

$h(\cdot)$代表微分熵函数。$\mathbf{S}_k$和$\mathbf{M}_k$由如下黎卡提方程决定

$$\begin{aligned}\mathbf{S}_k&=\mathbf{Q}_k+\mathbf{A}_k^{\mathrm{T}}(\mathbf{S}_k-\mathbf{M}_k)\mathbf{A}_k,\\ \mathbf{M}_k&=\mathbf{S}_k^T\mathbf{B}_k\left(\mathbf{R}_k+\mathbf{B}_k^T\mathbf{S}_k\mathbf{B}_k\right)^{-1}\mathbf{B}_k^{\mathrm{T}}\mathbf{S}_k.\end{aligned} \tag{17}$$

本小节以K个控制任务的LQR代价之和为目标，联合优化空中机动设施的下行发射功率和传输包长，建立如下优化问题：

$$\begin{aligned}&(\mathrm{P3})\ \min_{n_k,p_k\geq0}\sum_{k=1}^{K}L(n_k,p_k)\\ &\text{s.t.}\quad D(n_k,p_k)>\log_2|\det\mathbf{A}_k|,\forall k,\\ &\quad\frac{n_k}{B}\leq T_k,n_k\in\mathbb{N}^+,\\ &\quad p_k\geq0,\forall k,\\ &\quad\sum_{k=1}^{K}p_k\leq P_{\max},\end{aligned} \tag{18}$$

（P3）中的第一项约束为系统稳定性约束，该约束规定了让系统稳定的必要条件：周期速率大于被控系统的内禀熵率，$\log_2|\det\mathbf{A}_k|$；第二项约束为传输时延约束，假设感知、计算、控制环节的时间固定，因此，下行传输时延必须小于扣除上述环节时间后的闭环周期余量。其中，$\mathbf{A}_k$、$\mathbf{B}_k$分别为第k个闭环被控系统的状态矩阵与输入矩阵，$\mathbf{Q}_k$、$\mathbf{R}_k$分别为状态与输入权重矩阵，T_k为闭环周期，σ_k^2为信道噪声方差。上述问题属于混合整数规划问题，直接求解复杂度高。

通过推导可知，传输包长的最优解为带宽时延约束下允许的最大值：

$$n_k^*=\lfloor\mathrm{BT_k}\rfloor. \tag{19}$$

在此基础上，原始问题可转化为关于功率分配的凸优化问题：

$$\begin{aligned}&(\mathrm{P4})\ \min_{p_k\geq0}\sum_{k=1}^{K}L(p_k)\\ &\text{s.t.}\quad p_k\geq p_k^{th},\forall k,\\ &\quad\sum_{k=1}^{K}p_k\leq P_{\max},\end{aligned} \tag{20}$$

其中，p_k^{th}是$D(n_k^*,p_k)-\log_2|\det\mathbf{A}_k|=0$的解，（P4）为凸优化问题，可直接求解。关于该问题为凸优化问题的证明参见文献[38]。算法流程如算法2所示。

算法2　面向控制任务的多闭环资源按需优化算法

输入：控制参数：$\mathbf{A}_k$、$\mathbf{B}_k$、$\mathbf{Q}_k$、$\mathbf{R}_k$、$\Sigma_{\mathbf{v}_k}$、T_k；通信参数：g_k、ε_k、P_{max}、σ_k^2、B。

1：对每个闭环k，根据黎卡提方程计算$\mathbf{S}_k$与$\mathbf{M}_k$；

2：计算各闭环最优传输包长：$n_k^*=\lfloor BT_k\rfloor$；

3：对每个闭环k，利用二分法求解$D(n_k^*,p_k)-\log_2|\det\mathbf{A}_k|=0$，得到功率门限$p_k^{th}$；

4：求解凸优化问题（P4），得到下行发射功率分配p_k^*；

输出：各闭环包长n_k^*与发射功率p_k^*。

在仿真验证中，假设信道增益在单个闭环周期内保持恒定，采用路径损耗模型计算信道增益：

$$g_k=\frac{\beta_0}{d_k^{\alpha}}, \tag{21}$$

其中，β_0为参考的路径损耗因子，d_k代表空中机动设施和机器人之间的距离，α代表距离衰减因子。仿真中设定的参数值由表2给出。

如图5所示，相同通信资源约束下，所提面向控制任务的多闭环按需优化方案较最小速率最大化方案以及和速率最大化方案展现出更优的控制性能。相比于关注通信速率的传统方案，所提方案引入任务信息，通过直面任务的方式调度资源，实现通信资源与任务需求的精确匹配，有效缓解通信环节在感传算控闭环中的瓶颈效应。然而，以LQR控制为代表的最优控制有明确的目标函数和较为完

表 2　面向控制任务的多闭环按需优化方案仿真参数

参数	参数取值
闭环个数	$K = 4$
带宽	$B = 15$ kHz
传输错误概率	$\epsilon_k = 10^{-6}, \forall k$
信道相关参数	$\beta_0 = -60$ dB, $\alpha = 2.3$
噪声功率	$\sigma_k^2 = -110$ dBm, $\forall k$
距离参数	$d_k = [1,2,3,4]$ km
控制矩阵参数	$\mathbf{Q}_k = \mathbf{I}_{m_k}, \mathbf{R}_k = 0_{m_k}, \Sigma_{v_k} = 0.01\,\mathbf{I}_{m_k}$
被控制系统维度	$m_k = 100, \forall k$
时延阈值	$T_k = 5$ ms, $\forall k$
被控系统内禀熵率	$\log_2\lvert\det \mathbf{A}_k\rvert = [48,36,24,12]$

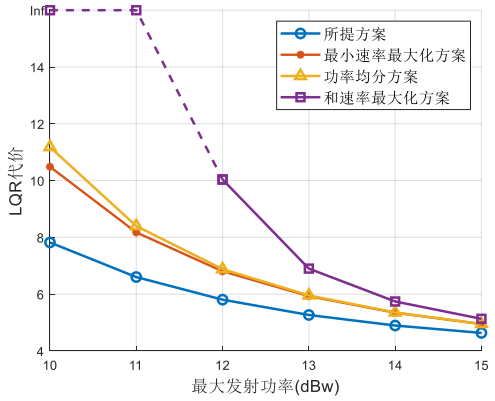
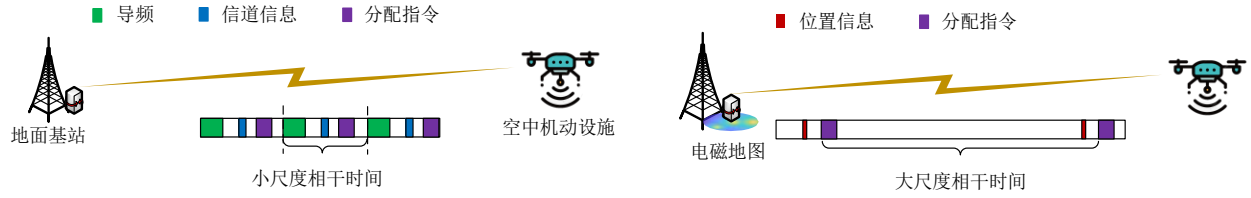


图 5　不同方案下 LQR 代价随发射功率变化曲线

本节面向包含多个无人作业系统的天地一体网络。在共享频谱的场景下，天地一体网络拓扑的非规则性导致信号分布强弱不均，复杂同频干扰制约网络的覆盖性能。现有基于全部信道信息的干扰协调方案需要频繁的导频交互，带来巨大的信令开销。为此，提出基于电磁地图的随遇通信方案。所提方案引入位置外信息，利用电磁地图将收发位置映射为大尺度信道信息，以此进行干扰协调。

图 6 以地面基站与空中机动设施的信息交互为例，对比了基于导频和基于电磁地图的干扰协调方案。如图 6（a）所示，在基于导频的方案中，地面基站与空中机动设施需以小尺度相干时间（通常为毫秒量级）进行三轮信息交互：□ 基站发送导频信号；□ 估计信道状态，反馈给调度中心；□ 调度中心计算资源分配结果并下发。相反地，基于电磁地



(a) 基于导频的交互示意图　　**(b) 基于电磁地图的交互示意图**

图 6　基于导频和基于电磁地图的信息交互示意图

图的干扰协调方案只需以大尺度相干时间为间隔（通常为秒量级），进行两轮信息交互：□ 发送位置信息给资源调度中心；□ 资源调度中心利用电磁地图估计大尺度信道信息，下发资源分配指令。可以看出，利用位置信息与电磁地图，网络能够以免导频的方式获取大尺度信道信息，为天地一体网络提供效费比高的干扰协调方案。

4.2　案例说明

图 7 展示了基于电磁地图的天地一体 6G 网络，假设网络中存在 K 个作业区域。以第 k 个作业区域为例，该区域包含 T_k 个地面基站和 U_k 个空中机动设施，两种设备均为单天线，通过以用户为中心的模式为用户（称为地面用户）提供服务；针对位于地面基站和空中基站覆盖盲区的用户（称为卫星用户），由通信卫星提供补充覆盖。同一作业区域内的地面用户分配正交的频段，不同作业区域之间及作业区域与卫星通信系统之间共享频谱。为了减少同频干扰，资源调度中心每大尺度相干时间采集一次用户位置，当占用同一频段的用户距离小于设定阈值时，触发干扰协调机制。此时，电磁地图以用户位置为输入，输出大尺度信道信息，基于大尺度信道信息执行资源调度策略。以分布在 K 个作业区

4　基于电磁地图的随遇通信方案

4.1　研究方案

备的理论支撑，但对于非线性系统，所提方案的应用面临瓶颈。未来研究可探究面向非线性系统的控制性能指标（如稳定裕度、鲁棒性度量等）与闭环性能之间的关系，让控制需求精准反馈至感、传、算环节，推动全闭环的协同。

域，使用相同频段的一组地面用户以及在作业区域以外使用相同频段的J个卫星用户为例，作业区域k中的用户携带M_k根天线，卫星用户携带单天线。定义作业区域i中的基站到作业区域k中的用户的下行信道为$\mathbf{H}^{(k,i)} \in \mathbb{C}^{M_k \times (T_i+U_i)}$；定义作业区域$i$中的基站到卫星用户$\mathbf{Q}_k = \mathbf{I}_{m_k}$，$\mathbf{R}_k = 0_{m_k}$，$\Sigma_{\mathbf{v}_k} = 0.01\,\mathbf{I}_{m_k}$的下行信道为$\tilde{\mathbf{h}}^{(j,i)} \in \mathbb{C}^{1 \times (T_i+U_i)}$，两者表达式如下：

$$\begin{aligned} \mathbf{H}^{(k,i)} &= \mathbf{G}^{(k,i)}\mathbf{S}^{(k,i)}\mathbf{L}^{(k,i)}, \\ \tilde{\mathbf{h}}^{(j,i)} &= \tilde{\mathbf{G}}^{(j,i)}\tilde{\mathbf{s}}^{(j,i)}\tilde{\mathbf{L}}^{(j,i)}, \end{aligned} \tag{22}$$

其中，$\boldsymbol{G}^{(k,i)} = \mathrm{diag}\left\{g_n^{(k,i)}\right\} \in \mathbb{C}^{(T_i+U_i)\times(T_i+U_i)}$和$\tilde{\boldsymbol{G}}^{(j,i)} = \mathrm{diag}\left\{\tilde{g}_n^{(j,i)}\right\} \in \mathbb{C}^{(T_i+U_i)\times(T_i+U_i)}$代表天线增益，对角元素$g_n^{[\cdot]}$代表作业区域中第$n$个设备与用户间的天线增益；$\boldsymbol{L}^{(k,i)} = \mathrm{diag}\left\{l_n^{(k,i)}\right\} \in \mathbb{C}^{(T_i+U_i)\times(T_i+U_i)}$和$\tilde{\boldsymbol{L}}^{(j,i)} = \mathrm{diag}\left\{\tilde{l}_n^{(j,i)}\right\} \in \mathbb{C}^{(T_i+U_i)\times(T_i+U_i)}$代表大尺度衰落，对角元素$l_n^{[\cdot]}$代表作业区域中第$n$个设备与用户间的大尺度衰落；$\boldsymbol{S}^{(k,i)} \in \mathbb{C}^{M_k \times (T_i+U_i)}$和$\tilde{\boldsymbol{s}}^{(j,i)} \in \mathbb{C}^{1\times(T_i+U_i)}$代表小尺度衰落，服从度衰落，每个元素为独立随机变量，服从$\mathcal{CN}(0,1)$分布

由于资源调度中心仅有大尺度信道信息，采用各态历经速率作为衡量通信性能的指标，其是对小尺度衰落进行统计平均后得到的平均传输速率。地面用户各态历经速率的数学表达式为：

$$\bar{R}_k(\mathbf{P}) = \mathbb{E}_{\mathbf{s}}\left[\log_2 \det\left(\mathbf{I}_{M_k} + \frac{\mathbf{H}^{(k,k)}\mathbf{P}^{(k)}\mathbf{H}^{(k,k)H}}{\sigma_k^2(\mathbf{P})}\right)\right], \tag{23}$$

其中，$\mathbb{E}_{\mathbf{s}}[\cdot]$代表对小尺度衰落取平均$\mathbf{P}^{(k)} = \mathrm{diag}\left\{P_n^{(k)}\right\}$代表作业区域$k$中基站的发射功率，$\sigma_k^2(\mathbf{P})$代表作业区域$k$中用户所受到的干扰和噪声：

$$\sigma_k^2(\mathbf{P}) = \sum_{i=1,i\neq k}^{K}\sum_{n=1}^{T_i+U_i}(l_n^{(k,i)}g_n^{(k,i)})^2 P_n^{(i)} + \sigma^2. \tag{24}$$

其中，$\mathbf{P} = \{\mathbf{P}^{(k)}\}$，$\sigma^2$代表信道噪声。

为了覆盖所有作业区域中的用户并满足对卫星用户的干扰约束，以最大化地面用户中最小各态

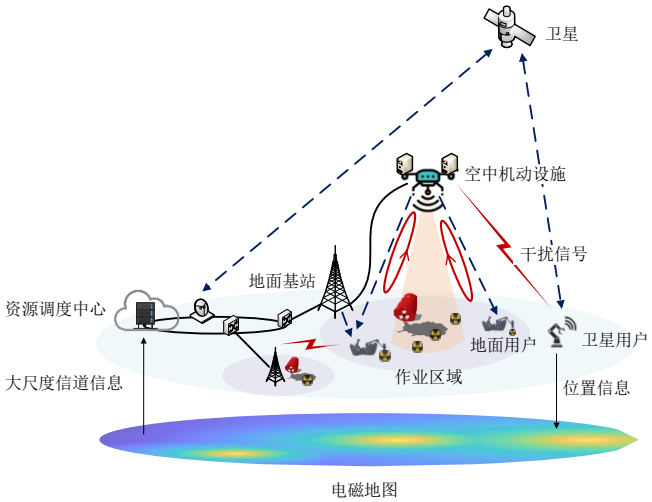


图7　基于电磁地图的天地一体6G网络示意图

历经速率为目标，在满足对卫星用户干扰门限约束的前提下，对多个作业区域中基站的下行发射功率进行联合优化。上述问题（P5）的数学表达式如下：

$$\begin{aligned} (\mathrm{P5})\ &\max_{\mathbf{P}} \min \bar{R}_k(\mathbf{P}) \\ &\text{s.t. } \mathrm{tr}(\mathbf{P}^{(k)}) \le P_{\max}^{(k)}, \\ &\quad \mathbf{P}^{(k)} \succcurlyeq 0, \\ &\quad P_n^{(k)} \le P_{T\max}, n = 1,\ldots,T_k, \\ &\quad P_n^{(k)} \le P_{U\max}, n = T_k+1,\ldots,T_k+U_k, \\ &\quad \sum_{i=1}^{K}\sum_{n=1}^{T_i+U_i} P_n^{(i)}(\tilde{g}_n^{(j,i)}\tilde{l}_n^{(j,i)})^2 \le \bar{P}, \forall k,j. \end{aligned} \tag{25}$$

其中，$P_{\max}^{(k)}$为作业区域k的功率预算，$P_{T\max}$和$P_{U\max}$为地面基站和空中机动设施的最大发射功率，最后一个约束为对卫星用户干扰的阈值约束：每个卫星用户接收到K个作业区域总干扰功率需低于容忍阈值$\bar{P}$。上述优化问题因包含非闭式目标函数，难以求解。采用随机矩阵理论、构造辅助函数及连续凸近似的方法，可将原始问题转化为迭代求解的凸优化问题（P6）。该优化问题形式如下：

$$
\begin{aligned}
&(\mathrm{P6})\ \max_{\mathbf{P}}\ \gamma\\
&\text{s.t. } F_k\left(\mathbf{P},z_k,\mathbf{t}_k\right)\geqslant\gamma,\\
&\frac{M_kP_n^{(k)}\left(l_n^{(k,k)}g_n^{(k,k)}\right)^2}{z_k\sigma_k^2(\mathbf{P})+M_kP_n^{(k)}\left(l_n^{(k,k)}g_n^{(k,k)}\right)^2}\geqslant t_{k,n},\\
&z_k^{-1}+\frac{1}{M_k}\sum_{n=1}^{T_k+U_k}t_{k,n}\geqslant 1,\\
&z_k\geqslant 1,\ t_{k,n}\geqslant 0,\\
&P_n^{(k)}\leqslant P_{Tmax},\ n=1,\cdots,T_k,\\
&P_n^{(k)}\leqslant P_{Umax},\ n=T_k+1,\cdots,T_k+U_k,\\
&\mathbf{P}^{(k)}\geqslant 0,\\
&\mathrm{tr}\left(\mathbf{P}^{(k)}\right)\leqslant P_{max}^{(k)},\\
&\sum_{i=1}^{K}\sum_{n=1}^{T_i+U_i}P_n^{(i)}\left(\tilde{g}_n^{(j,i)}\tilde{l}_n^{(j,i)}\right)^2\leqslant\bar{P},\ j=1,\cdots,J,\\
&k=1,\cdots,K,\ n=1,\cdots,T_k+U_k.
\end{aligned}
\tag{26}
$$

其中，γ，z_k，$\mathbf{t}_k=\left(t_{k,1},\cdots,t_{T_k+U_k}\right)^T$为辅助变量，$F_k\left(\mathbf{P},z_k,\mathbf{t}_k\right)$为各态历经速率的近似表达式：

$$
\begin{aligned}
F_k\left(\mathbf{P},z_k,\mathbf{t}_k\right)\triangleq&-\sum_{n=1}^{T_k+U_k}\left[\log_2\left(\left(1-t_{k,n}\right)\right)+\log_2(e)t_{k,n}\right]\\
&+M_k\log_2\left(z_k\right)
\end{aligned}
\tag{27}
$$

变量z_k的最优解由不动点方程确定：

$$
z_k=1+\sum_{n=1}^{T_k+U_k}\frac{P_n^{(k)}\left(l_{n^{(k,k)}}g_{n^{(k,k)}}\right)^2}{\sigma_k{}^2(\mathbf{P})+M_kP_n^{(k)}\left(l_{n^{(k,k)}}g_{n^{(k,k)}}\right)^2z_k^{-1}}
\tag{28}
$$

将(26)近似为凸优化子问题，需要对$\log_2\left(\left(1-t_{k,n}\right)\right)$，$\ln z_k+\ln t_{k,n}+\ln\sigma_k^2(\mathbf{P})$与$z_k^{-1}$在此前的迭代解处进行一阶泰勒展开，在此基础上，采用凸近似求解，算法流程如算法3所示，具体算法参考文献[39]。

算法3　基于电磁地图的随遇通信算法

输入：$P_{max}^{(k)}$、P_{Tmax}、P_{Umax}、$\bar{P}$，用户位置信息，迭代收敛阈值ε。

1：初始化：各作业区域内功率均分，记为$\mathbf{P}^{(0)}$，$\gamma^{(0)}=0$，$s=0$；

2：根据用户位置查询电磁地图获得大尺度信道信息$\boldsymbol{L}^{(k,i)}$和$\tilde{\boldsymbol{L}}^{(j,i)}$，计算天线增益$\boldsymbol{G}^{(k,i)}$和$\tilde{\boldsymbol{G}}^{(j,i)}$，求解不动点方程(28)得到$z_k^{(0)}$与$\mathbf{t}_k^{(0)}$：

$$
\mathbf{t}_k^{(0)}=\frac{M_k\left(P_n^{(k)}\right)^{(0)}\left(l_n^{(k,k)}g_n^{(k,k)}\right)^2}{z_k^{(0)}\sigma_k^2(\mathbf{P}^{(0)})+M_k\left(P_n^{(k)}\right)^{(0)}\left(l_n^{(k,k)}g_n^{(k,k)}\right)^2}
$$

3：重复执行步骤4~5；

4：在当前迭代解处对(26)中的非凸项进行泰勒展开，得到凸优化子问题；

5：s=s+1；求解凸优化子问题，更新基站发射功率$\mathbf{P}^{(s)}$、辅助变量$z_k^{(s)}$、$\mathbf{t}_k^{(s)}$与目标值$\gamma^{(s)}$；

6：直至$\frac{\left|\gamma^{(s)}-\gamma^{(s-1)}\right|}{\gamma^{(s)}}\leqslant\varepsilon$，迭代终止；

输出：各作业区域地面基站与空中机动设施的最优下行发射功率。

仿真拓扑由图8给出，共有$K=3$个作业区域，每个作业区域半径为100 km，作业区域中心分别为$(-180\ \mathrm{km},0\ \mathrm{km})$，$(0\ \mathrm{km},0\ \mathrm{km})$和$(180\ \mathrm{km},0\ \mathrm{km})$。三个作业区域有相同功率预算：$P_{\max}^{(1)}=P_{\max}^{(2)}=P_{\max}^{(3)}$，包含$T_1=T_3=2$，$T_2=1$个地面基站，$U_1=U_3=1$，$U_2=2$个空中机动设施。地面用户携带$M_1=M_2=M_3=3$根天线，存在$J=2$个共用相同频段的卫星用户。采用地面信道模型和空地信道模型模拟电磁地图，以收发位置为输入，计算大尺度信道信息：

$$
\begin{aligned}
l_n^{(k,i)}[\,\mathrm{dB}\,]=&(44.9-6.55\log_{10}h_t)\log_{10}\frac{d_n^{(k,i)}}{1000}+45.5+\\
&(35.46-1.1h_r)\log_{10}\frac{f_c}{1000000}-13.82\log_{10}h_r+0.7h_r+C,
\end{aligned}
\tag{29}
$$

$$
\begin{aligned}
l_n^{(k,i)}[\,\mathrm{dB}\,]=&\frac{\eta_{LOS}-\eta_{NLOS}}{1+ae^{-b\left(\frac{180}{\pi}\arcsin\left(\frac{h_u}{d_n^{(k,i)}}\right)-a\right)}}+20\log_{10}\left(d_n^{(k,i)}\right)\\
&+20\log_{10}\left(\frac{4\pi f_c}{c}\right)+\eta_{NLOS},
\end{aligned}
\tag{30}
$$

$$
\begin{aligned}
\left(g_n^{(k,i)}\right)^2=&G_{\max}\left(\frac{J_1\left(u_n^{(k,i)}\right)}{2u_n^{(k,i)}}+36\frac{J_3\left(u_n^{(k,i)}\right)}{\left(u_n^{(k,i)}\right)^3}\right)^2\\
u_n^{(k,i)}=&\frac{2.07123\sin\theta_n^{(k,i)}}{\sin\theta_{3dB}}
\end{aligned}
\tag{31}
$$

其中，f_c(Hz)代表载波频率，c(m/s)代表光速，$d_n^{(k,i)}(m)$为作业区域i中第n个基站到作业区域k中的用户之间的距离，C，a，b，η_{LOS}，η_{NLOS}为与环境相关的常数。天线增益的计算公式如下：其中，$J_1(\cdot)$和$J_3(\cdot)$为一阶和三阶贝塞尔函数，$G_{\max}$为天线主瓣增益，$\theta_{3\mathrm{dB}}$为单侧半功率波束宽度，$\theta_n^{(k,i)}$代表作业区域i中的第n个基站的波束与作业区域k中的用户天线之间的夹角，所有基站的波束正对服务的用户，即$\theta_n^{(k,k)}=0^\circ$。对于卫星用户而言，地面基站与卫星用户之间的大尺度衰落由公式(29)计算得到，空中机动设施与卫星用户之间的大尺度衰落由公式(30)计算得到，天线增益由公式(31)计算得

到。其余的仿真参数由表3给出。

表3　基于电磁地图的随遇通信方案仿真参数

参数	参数取值
天线增益参数	G_{max} = 23 dBi,θ_{3dB} = 12°
高度参数	h_u = 2 km,h_t = 100 m,h_r = 5 m
传输频率	f_c = 2 GHz
光速	$c = 3 \times 10^8$ m/s
噪声方差	σ^2 = -107 dBm
衰落模型常数	a = 5.0188,b = 0.3511, C = 1
衰落模型常数	η_{LOS} = 0.1, η_{NLOS} = 21
干扰阈值	$\bar{P}$ = -105 dBm
最大发射功率	$P_{T\max}$ = 46 dBm,$P_{U\max}$ = 45 dBm

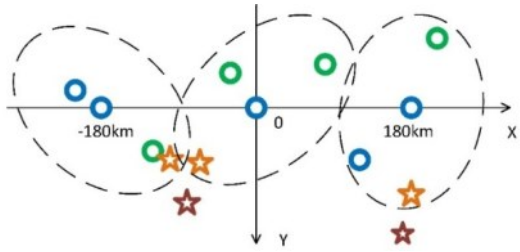


图8　仿真拓扑。蓝色圆圈代表地面基站，绿色圆圈代表空中机动设施，黄色五角星为地面用户，棕色五角星为卫星用户

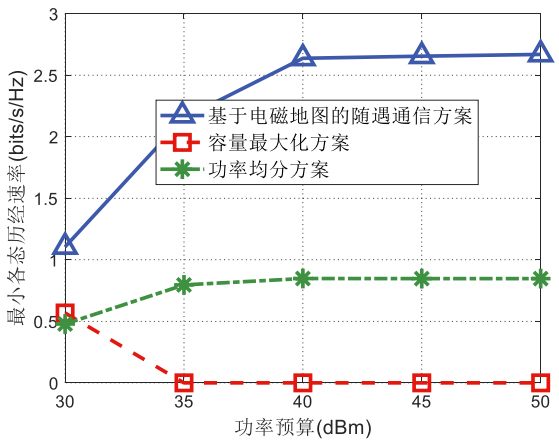


图9　不同功率分配方案下各态历经速率随功率预算的变化曲线

如图9所示，与文献[40]所提的容量最大化方案相比，所提方案可实现对所有作业区域的公平覆盖；与传统功率均分策略相比，所提方案提升通信速率超过50%。这一结果验证了基于电磁地图的干扰协调方案的有效性。在非规则网络拓扑下，利用大尺度信道信息可优化信号分布强度，有效解耦同频干扰，在空间维度上将通信资源聚焦于需求用户。

5　未来研究方向

5.1　感传算控闭环的动态组网问题

由于地面作业设备、空中机动设施及通信卫星均具有移动性，感传算控闭环的拓扑会随着设备位置变化或者任务需求演化而动态重构。现有研究尚未关注面向作业过程的动态组网问题。值得注意的是，为保证网络拓扑的平稳演进，该类优化的时间尺度应显著大于传统资源分配的毫秒级尺度，需开展面向多时间尺度的联合优化研究。此外，考虑到机动设施与机器设备位置的可调控性，未来可探索位置优化与闭环连接关系的联合设计，主动引导作业设备创造良好的信道环境，以适应环境的方式构建高效的闭环系统。

5.2　感传算控闭环的拓展问题

当前研究关注由单个感知单元、计算单元、控制单元串联构成的基本闭环模型，实际系统中常存在相同功能单元协同共建同一个闭环、多个闭环共享一个功能单元等复杂闭环结构。在此情形下，网络不再可简单拆解为若干独立闭环。针对闭环间的耦合问题，未来研究可遵循“从简单到复杂”的路径：先构建两闭环耦合的基础模型，研究共享感知单元、共享计算单元与共享执行单元三类基础场景；再以此为基础拓展至复杂的多闭环耦合模型，逐步研究不同耦合关系下的资源优化规律与性能边界，为复杂网络优化提供基础框架。

6　结束语

聚焦任务型天地一体6G网络，提出基于感传算控闭环、外信息驱动的按需通信方法。在信息层面，提出统一度量感传算控闭环的关键指标——闭环负熵率，拓展速率－代价函数至控制代价－闭环负熵率函数，建立控制性能、闭环性能与各功能单元性能之间的统一映射关系。针对单个感传算控闭环，提出闭环内上下行链路协同配置方案；拓展至多闭环无人作业系统，提出多闭环按需优化方案；面向包含多无人作业系统的天地一体网络，设计基于电磁地图的随遇通信方案。所提方案引入位置与任务信息对通信资源进行按需调度，有效提升了任务型6G网络的资源利用效率。

参考文献：

[1] STEPHEN G. 12 Examples of Rescue Robots to Know[EB/OL]. https://bostondynamics.com/atlas/.

[2] Lei C, Fang X, Feng W, et al. Satellite-UAV Networks for 6G Control: A Sensing-Communication-Computing-Control Closed Loop Perspective[J]. IEEE Network, 2025, 39(4): 62-69.

[3] 雷城乐阳，冯伟，葛宁. 面向机器救援的天地一体广域快响通信：闭环模型与系统设计[J]. 物联网学报, 2021, 9(1): 41-49.

[4] RIJNBERK A, VRIES H W. MEDICAL HISTORY AND PHYSICAL EXAMINATION IN COMPANION ANIMALS[M]. DORDRECHT: SPRINGER, 1995.

[5] DHILLON H S, HUANG H and VISWANATHAN H. Wide-area Wireless Communication Challenges for the Internet of Things[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(2): 168-174.

[6] Zhang N, Zhang S, Yang P, et al. Software defined space-air-ground integrated vehicular networks: Challenges and solutions [J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(7): 101-109.

[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, 4(3): 3-19.

[8] SHANG B, YI Y, LIU L. Computing over space-air-ground integrated networks: Challenges and opportunities[J]. IEEE Network, 2021, 35(4): 302-309.

[9] YANG K, WANG Y, GAO X, et al. Communications in space–air–ground integrated networks: An overview[J]. Space: Science & Technology, 2025, 5: 0199.

[10] XIAO Y, YE Z, WU M, et al. Space-air-ground integrated wireless networks for 6G: Basics, key technologies and future trends[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2024, 42 (12): 3327-3354.

[11] MOSTAANI A, VU T X, SHARMA S K, et al. Task-oriented communication design in cyber-physical systems: A survey on theory and applications[J]. IEEE Access, 2022, 10: 133842-133868.

[12] ZHANG S, ZHENG X, ZHANG Y, LI S, JIANG T. Bridging theory and practice: A review of task-oriented communication for embodied agent societies[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2025, doi:10.1109/TNSE.2025.3572239.

[13] FU B, XIAO Y, DENG H, et al. A survey of cross-layer designs in wireless networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 16(1): 110-126.

[14] OUYANG C, LIU Y, YANG H, et al. Integrated sensing and communications: A mutual information-based framework[J]. IEEE Communications Magazine, 2023, 61(5): 26-32.

[15] NAIR G N, FAGNANI F, ZAMPIERI S, et al. Feedback control under data rate constraints: An overview[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1): 108-137.

[16] GÜNDÜZ D, QIN Z, AGUERRI I E, et al. Beyond transmitting bits: Context, semantics, and task-oriented communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022, 41(1): 5-41.

[17] GUPTA R A, CHOW M Y. Networked control system: Overview and research trends[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 57(7): 2527-2535.

[18] MAHMOUD M S. Wireless networked control system design: An overview[C]//2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). IEEE, 2014: 2335-2340.

[19] TATIKONDA S, MITTER S. Control under communication constraints[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(7): 1056-1068.

[20] NAIR G N, EVANS R J, MAREELS I M Y, et al. Topological feedback entropy and nonlinear stabilization[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(9): 1585-1597.

[21] KOSTINA V, HASSIBI B. Rate-cost tradeoffs in control[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2019, 64(11): 4525-4540.

[22] MARTÍ P, YÉPEZ J, VELASCO M, et al. Managing quality-of-control in network-based control systems by controller and message scheduling co-design[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(6): 1159-1167.

[23] XIAO L, JOHANSSON M, HINDI H, et al. Joint optimization of communication rates and linear systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 48(1): 148-153.

[24] GATSIS K, RIBEIRO A, PAPPAS G J. Optimal power management in wireless control systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2014, 59(6): 1495-1510.

[25] LEI C, FENG W, WANG J, et al. Control-Oriented Power Allocation for Integrated Satellite-UAV Networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2023, 12(5): 883-887.

[26] LYU L, CHEN C, ZHU S, et al. Control performance aware cooperative transmission in multiloop wireless control systems for industrial IoT applications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(5): 3954-3966.

[27] CHANG B, ZHANG L, LI L, et al. Optimizing Resource Allocation in URLLC for Real-Time Wireless Control Systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(9): 8916-8927.

[28] YANG H, ZHANG K, ZHENG K, et al. Leveraging linear quadratic regulator cost and energy consumption for ultrareliable and low-latency IoT control systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(9): 8356-8371.

[29] KHAN A H, IMRAN M A, EVANS B G. Semi-adaptive beamforming for OFDM based hybrid terrestrial-satellite mobile system [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11 (10): 3424-3433.

[30] 朱江, 王彦敏. 无人机数据采集系统中基于动态干扰的轨迹优化方案[J]. 数据采集与处理, 2024, 39(5): 1271-1286.

[31] WEI Z, WANG L, GAO Z, et al. Spectrum Sharing between High Altitude Platform Network and Terrestrial Network: Modeling and Performance Analysis[J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71(6): 3736-3751.

[32] 孙韶辉, 戴翠琴, 徐晖, 等. 面向 6G 的星地融合一体化组网研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(6): 891-901.

[33] FANG X, FENG W, CHEN Y, et al. Radio Map-Based Spectrum Sharing for Joint Communication and Sensing[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2024, 5: 4541-4558.

[34] FANG X, LEI C, FENG W, et al. Structured connectivity for 6G reflex arc: Task-oriented virtual user and new uplink-downlink tradeoff[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2025, 14(1): 198-202.

[35] FANG X, FENG W, CHEN Y, GE N. Control-oriented uplink and downlink co-design for low-latency unmanned operations[C]// 2025 IEEE International Conference on Communications (ICC) Workshop, to appear, Montreal, Canada.

[36] EL-HAJJ A. M., DAWY Z. On optimized joint uplink/downlink resource allocation in OFDMA networks[C]//2011 16th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC), Kerkyra, Greece, 2011:248-253.

[37] Polyanskiy Y., Poor H. V. and Verdu S. Channel Coding Rate in the Finite Blocklength Regime[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(5): 2307-2359.

[38] Fang X, Feng W, Chen Y, Wang Y, Ge N. Sensing-communication-computing-control closed-loop optimization for coordinated UAV-robot systems[C]//2023 28th Asia Pacific Conference on Communications (APCC). IEEE, 2023: 48-52.

[39] Wang Y, Fang X, Feng W, Chen Y, Ge N, Lu Z. On-demand coverage for maritime hybrid satellite-UAV-terrestrial networks[C]// 2020 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). IEEE, 2020: 483-488.

[40] FENG W, WANG Y, Ge N, et al. Virtual MIMO in multi-cell distributed antenna systems: Coordinated transmissions with large-scale CSIT[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(10): 2067-2081.