

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

雷城乐阳^{1,2}, 冯伟^{1,2}, 葛宁^{1,2}

(1. 清华大学电子工程系, 北京 100084; 2. 清华大学天基网络与通信全国重点实验室, 北京 100084)

摘要: 随着人工智能和自动化技术的不断发展, 越来越多的机器被应用于环境恶劣或危险系数高的应急救援活动。利用地面基站、卫星、无人机 (UAV, unmanned aerial vehicle) 等设施构建天地一体广域快响通信网络、为救援机器搭建“神经系统”面临着迫切的需求。机器救援通常依赖现场感知、通信、态势计算和控制4个环节, 通常以类似反射弧的“感传算控” (SC³, sensing-communication-computing-control) 闭环形式开展作业。因此, 提出了面向“感传算控”闭环结构的广域快响通信设计新思路。首先, 综合考虑“感传算控”闭环中各个环节的耦合关系, 提出基于环路负熵的“熵匹配”模型, 优化闭环控制性能指标。在此基础上, 进一步研究多闭环并行作业以及复杂耦合时通信系统的设计准则。典型参数下的仿真结果表明, 所提的系统设计方法以闭环结构为基本单元, 可有效地兼顾异构环节, 并更直接地优化了机器救援效果, 相比传统的面向链路的通信系统设计模式, 显著地提升了网络效能。

关键词: 应急救援; 机器; 天地一体; 广域快响通信; “熵匹配”模型; 系统设计

中图分类号: TN927

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2025.00484

Satellite-terrestrial-integrated wide-area quick-response communications for machine rescue: closed-loop model and systematic design

LEI Chengleyang^{1,2}, FENG Wei^{1,2}, 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

Abstract: With the development of artificial intelligence and automation technologies, an increasing number of machines are being applied in emergency rescue operations in harsh or high-risk environments. This makes it necessary to develop satellite-terrestrial-integrated wide-area rapid-response communication networks based on ground bases, unmanned aerial vehicles, and satellites, so as to build a “nervous system” for rescue machines. Machine rescue typically relies on four key components: on-site sensing, communication, situational computing, and control, which operate in reflex-arc-like sensing-communication-computing-control (SC³) closed loops. Therefore, a new wide-area quick-response communication design approach was proposed, which oriented SC³-closed-loop structures. Firstly, by considering the coupling of the different components in the SC³ closed loops, an “entropy matching” model based on closed-loop negentropy was proposed to optimize closed-loop control performance. Based on the proposed model, the design principles for communication systems in scenarios involving parallel operation and complex couplings of multiple SC³ loops were further explored. Simulation results under typical parameters demonstrate that the proposed system design approach that focuses on the close loop structure as the fundamental unit, can effectively integrate heterogeneous components and optimize the performance of

收稿日期: 2025-02-25; 修回日期: 2025-03-18

通信作者: 冯伟, fengwei@tsinghua.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 62425110, No. U22A2002); 国家重点研发计划 (No. 2020YFA0711301)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No. 62425110, No. U22A2002), The National Key Research and Development Program of China (No. 2020YFA0711301)

machine rescue, thus greatly improving the network efficiency compared with the traditional communication-link-oriented design method.

Key words: emergency rescue, machine, satellite-terrestrial integration, wide-area quick-response communication, “entropy matching” model, system design

0 引言

我国地理跨度大，各类自然灾害频发。据应急管理部统计，2023年，我国各类自然灾害导致9 544.4万人次受灾，造成直接经济损失3 454.5亿元。灾害发生后，可以利用机器执行生命检测、漏油清理、核辐射修复、物资搬运等救援任务，以提升救援效率、减少人员伤亡。近年来，救援机器人技术不断发展^[1]，机器逐渐成为环境恶劣或危险系数高的应急救援活动中不可或缺的参与者。

机器救援需要依赖通信网络实现信息交互和指令传输。为了支持救援机器，应急通信网络面临新的需求。第一，自然灾害在空间上具有突发性，通常波及范围大，可达数千平方千米，因此，通信网络需要有广域覆盖能力；第二，自然灾害在时间上通常难以预测，网络需要快速响应^[2]以支持“第一时间”高效救援；第三，机器与人不同，传统面向人的容量、时延^[3]等通信指标不一定是机器最关注的，面向机器救援的通信网络应该更像“神经系统”，可以有效地协同多模异构机器，完成作业任务^[4]。

面向上述新需求，传统通信设计模式仍存在诸多局限性。在灾后地区，地面通信设施通常被破坏，因此需要借助卫星^[5-6]、无人机^[7-8]等非地面通信设施，这些非地面通信设施通常部署受限，难以像地面蜂窝一样密集组网。同时，载荷的体积和功耗受限，导致远超常规地面通信的资源瓶颈^[9]。这一资源瓶颈使基于地面基站的传统通信范式难以直接沿用。以5G通信中的超可靠低时延通信（URLLC, ultra-reliable and low-latency communication）为例，其依赖充足的通信资源来保障通信时延，而天地一体网络的受限资源难以支撑全通信链路的URLLC服务。此外，机器救援任务的复杂性对通信提出了更高维度的需求，例如，侦察无人机要求大带宽^[10]、核泄漏修复机器人要求快速闭环响应时延^[11]等。如何在有限资源下实现广域快响覆盖，并满足机器对通信的高维度要求，是构建面向

机器救援的天地一体广域快响通信网络需要解决的核心问题。

1 “感传算控”闭环与系统设计新思路

控制论创始人Wiener在文献[12]中提到，控制工程与通信工程是不可分割的，它们的核心不在于电子工程的技术，而在于更为基础的消息概念。因此，本文从消息的本质内涵入手，建立面向机器救援的广域快响通信系统设计新思路。

机器救援通常依赖现场感知、通信、态势计算和控制4个环节，以“感传算控”闭环形式开展作业。机器作业中的“感传算控”闭环示意图如图1所示，其中，传感器对现场状况进行实时监测，并将数据反馈给指挥中心，指挥中心进行分析处理，计算出控制指令并下发给现场设备，指导其进行控制作业。在“感传算控”闭环中，不同部分环环相扣，协同完成作业任务。生物体内的反射弧示意图如图2所示，“感传算控”闭环与反射弧具有结构上的相似性。反射弧在生物学领域被认为是反射活动的结构基础。类似地，“感传算控”闭环可以看作机器作业的基本单位。

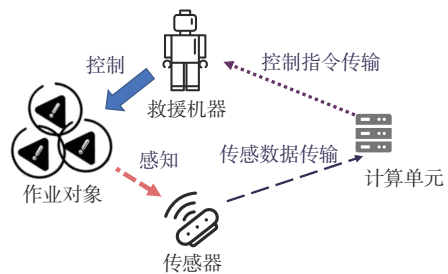


图1 机器作业中的“感传算控”闭环示意图

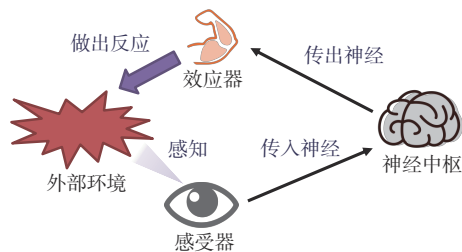


图2 生物体内的反射弧示意图

在“感传算控”闭环内部，通信与其他部分相互耦合，共同作用于闭环整体。例如，文献[13]指出，要维持控制系统稳定，闭环内每周期传输的信息量必须大于控制系统的内禀熵率。因此，为了最优化闭环的整体性能，必须综合考虑闭环内各个部分的耦合关系进行系统设计。然而，传统的设计逻辑大多遵循“还原论”，面向链路设计通信系统。传统通信设计中，面向链路的传统通信设计思路如图3所示，通信系统被分解为相对独立的通信链路，这些链路各自承载业务、链路指标，如5G的1 ms时延、10 Gbit/s峰值速率等，被用来指导系统设计。而在机器救援中，通信是“感传算控”闭环整体的一部分，系统设计的核心是闭环整体完成任务的性能。面向链路的传统通信设计思路忽略了闭环中通信链路间以及通信与其他部分间的“信息效用层面”的耦合关系。

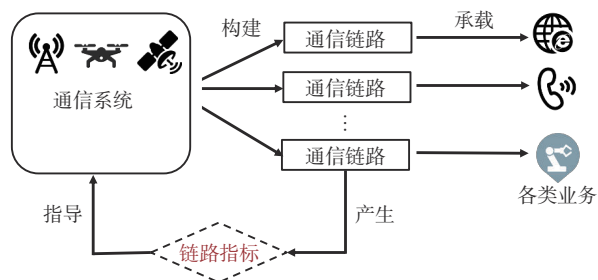


图3 面向链路的传统通信设计思路

机器通信中消息的本质内涵是完成“感传算控”闭环作业。本文考虑闭环内各部分的耦合关系，以闭环的控制性能为设计核心，直接优化机器作业的效果。面向“感传算控”闭环的创新通信设计思路如图4所示，闭环内的不同通信链路具有高层次的耦合性，通过以闭环为基本单位进行资源编排与系统设计，能够适配机器作业本源需求，提升资源利用效率。

面向“感传算控”闭环的广域快响通信系统面

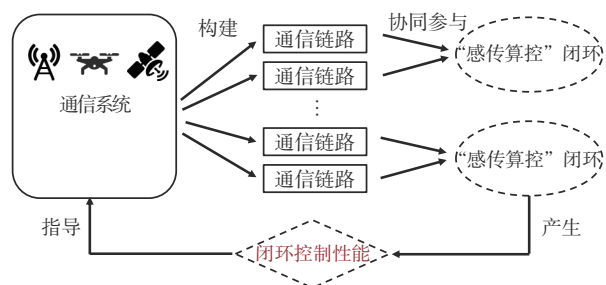


图4 面向“感传算控”闭环的创新通信设计思路

临以下独特难题。首先，闭环中感知、通信、计算、控制多环节复杂异构，难以统一衡量，需建立新模型，以定量刻画局部对整体的影响。其次，在资源约束下，闭环之间需竞争带宽、算力等系统资源，需发展资源编排新技术，提升多闭环总体性能。第三，闭环之间在任务上也可能存在复杂耦合，例如，一个传感器对应多个控制器、多个传感器对应一个控制器等，需研究任务耦合新模型，发展通信、感知、计算和控制深度耦合下的系统设计。

2 “感传算控”闭环模型与参数优化设计

2.1 研究现状与研究思路

目前，已有一些研究尝试整合闭环内部的异构部分，如控制领域提出网络控制系统的概念，探索控制系统在通信约束下的表现，特别研究了数据率、丢包率等对系统稳定性以及控制代价的影响^[13-15]；通信感知一体化技术利用通信基础设施集成通信与感知功能^[16]；移动边缘计算技术在通信网络边缘部署计算设备，以降低计算时延^[17]。这些研究对闭环模型的构建具有参考价值，然而，对“感传算控”闭环整体模型的研究仍是空白。

基于实际过程的“感传算控”闭环作业流程如图5所示，传感器获得图片、音频等感知数据，计算单元进行分析与决策，从预定义的机器指令集中选择合适的指令下发。控制指令的选择可以基于规则^[18]，也可借助深度学习工具^[19]等。

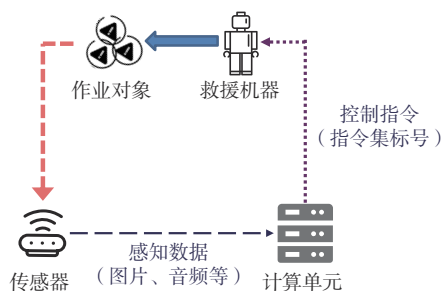


图5 基于实际过程的“感传算控”闭环作业流程

“感传算控”闭环的信号模型如图6所示，进一步对闭环内的信号进行了数学抽象。该模型将第 t 时刻的系统状态与控制输入抽象为数学向量 x_t 和 u_t 。

利用该模型，可以定量评估系统性能。例如，控制领域常用线性二次调节量（LQR, linear quadratic regulator）代价来衡量闭环的控制性能指标，

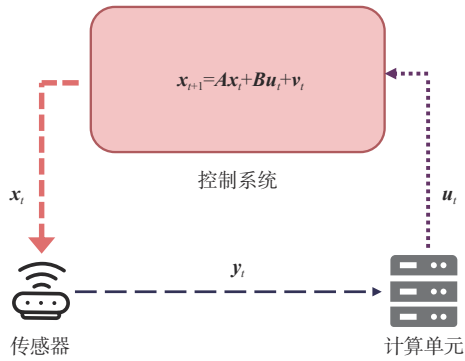


图6 “感传算控”闭环的信号模型

定义式为^[14]

$$LQR = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^T Q x_i + u_i^T R u_i) \quad (1)$$

其中， Q 和 R 是权重矩阵，可以根据具体情况设定。LQR代价是对系统状态收敛与控制能量消耗的综合衡量，较低的LQR代价代表更快的状态收敛和更低控制能耗。

以线性系统为例，系统方程可表示为^[15,20]

$$x_{t+1} = Ax_t + Bu_t + v_t \quad (2)$$

其中， A 为状态转移矩阵， B 为输入矩阵，由控制系统内部的物理性质决定。研究表明，最优控制输入 u_t 与 x_t 的估计值呈线性关系^[21]：

$$u_t = K_t \hat{x}_t \quad (3)$$

其中， K_t 为最优控制增益， \hat{x}_t 为 x_t 的估计值。

为进一步探究通信对控制的影响，在上述模型基础上，本文基于维纳“关注消息内涵”的设计思路，提出“感传算控”闭环的信息模型如图7所示。本文用“熵”来统一闭环内的异构环节，用环路负熵来刻画闭环整体的信息流转能力。

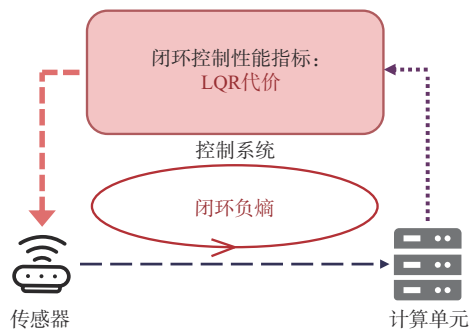


图7 “感传算控”闭环的信息模型

在基于环路负熵的“熵匹配”模型中，本文用传感器每周期获取的信息量来衡量感知能力，用计算单元提取有效信息量来描述计算能力。环路负熵

定义为感知获取的信息量与上下行传递的有效信息量的较小值：

$$D_{SC^3} = \min \{ \rho \{ D_s, D_U \}, D_D \} \quad (4)$$

其中， D_{SC^3} 为环路负熵， D_s 、 D_U 和 D_D 分别代表感知获取的信息量、上行传输的信息量和下行传输的信息量， ρ 为计算单元提取有效信息的比例。LQR代价与环路负熵满足如下关系^[15]：

$$l \geq \frac{nN(\mathbf{v}) |\det \mathbf{M}|^{1/n}}{2^{2(D_{SC^3} - h)/n} - 1} + l_{\min} \quad (5)$$

其中， l 表示闭环的LQR代价， n 、 $N(\mathbf{v})$ 、 \mathbf{M} 、 h 和 l_{\min} 是和控制有关的参数^[22]。上述关系式建立了感知、通信、计算能力与闭环控制性能的关系，为面向闭环作业的系统设计提供基础。从式(5)可以看出，闭环的LQR代价随着闭环负熵的增长单调递减，并呈指数下降的关系，而闭环负熵是上下行有效信息量和感知获取信息量的瓶颈值，这说明闭环性能存在短板效应，由感知信息量、上行通信容量和下行通信容量中最薄弱的环节决定，只有闭环内各环节实现任务级平衡，才能最大化资源效用。

2.2 参数优化设计举例

本节展示基于闭环模型的通信及计算参数设计实例^[23]。单闭环机器救援系统示意图如图8所示，无人机搭载计算和通信单元辅助地面机器完成救援任务。传感器、计算单元、通信单元和机器人构成“感传算控”闭环。在每个控制周期内，传感器通过上行链路向无人机发送感知数据，计算单元进行分析处理，提取态势信息，并计算出相应控制指令下发给机器人。

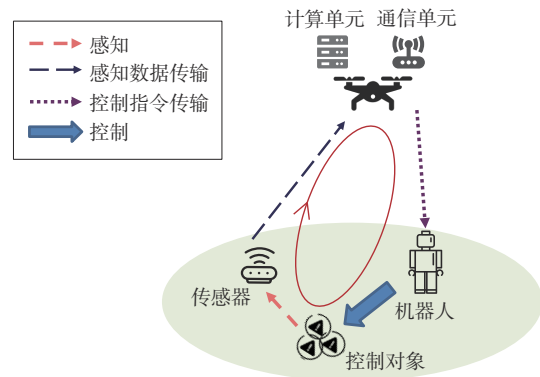


图8 单闭环机器救援系统示意图

基于上述系统模型，本文构建如下优化问题，通过联合设计上下行的功率、带宽、传输时间等参数，最小化闭环的LQR代价为

$$\begin{aligned}
& \min_{\substack{p_U, t_{U/D}, B_U, \\ f, p_D, t_D, B_D}} l \\
\text{s.t. } & \text{C1: } l \geq \frac{nN(\mathbf{v})|\det \mathbf{M}|^{1/n}}{2^{2(D_{sc^3} - h)/n} - 1} + l_{\min} \\
& \text{C2: } D_{sc^3} \geq h \\
& \text{C3: } D_{sc^3} \leq \min(\rho D_U, D_D) \\
& \text{C4: } D_{U/D} \leq t_{U/D} B_{U/D} \text{lb}\left(1 + \frac{p_{U/D} g_{U/D}}{B_{U/D} N_0}\right) \\
& \text{C5: } t_U + \frac{\alpha D_U}{f} + t_D \leq T \\
& \text{C6: } B_U + B_D \leq B_{\max} \\
& \text{C7: } p_U \leq P_{U_{\max}}, p_D \leq P_{D_{\max}}, f \leq f_{\max}
\end{aligned} \quad (6)$$

其中, $p_{U/D}$ 、 $B_{U/D}$ 、 $t_{U/D}$ 和 $g_{U/D}$ 表示上下行功率、带宽、传输时间和信道增益, f 为计算单元的 CPU 频率, B_{\max} 、 $P_{U/D_{\max}}$ 和 f_{\max} 为带宽约束、上下行功率约束和 CPU 频率约束, N_0 为信道噪声功率谱密度, α 为计算单元处理每比特数据所需的 CPU 周期数。C1 代表控制性能对闭环负熵的要求, C2 表示系统稳定性约束, C3、C4 表示闭环负熵为上下行传输信息量的瓶颈, C5 表明通信和计算的总时间不能超过闭环周期, C6 为带宽资源约束, C7 为上下行功率和计算频率的资源约束。

文献[23]给出上述问题的求解方法, 并提供仿真结果, 仿真参数设置如下^[23]: $P_{U_{\max}} = 0.1 \text{ W}$, $P_{D_{\max}} = 1 \text{ W}$, $B_{\max} = 1 \text{ MHz}$, $N_0 = -174 \text{ dBm}$ 。控制参数设置为 $h = 50$, $n = 100$, $T = 20 \text{ ms}$, \mathbf{Q} 和 \mathbf{R} 分别为单位矩阵和全零矩阵。计算相关参数为 $\alpha = 100 \text{ Hz/bit}$, $f_{\max} = 1 \text{ GHz}$, $\rho = 0.01$ 。对比两个基准方案, 一个是文献[24]提出的面向通信指标的上下行联合设计方案, 其在上下行速率差约束下最大化上下行速率之和, 另一个是上下行资源静态分配的方案。不同带宽约束下各方法的 LQR 代价对比如图 9 所示, 可以发现本文所提的面向闭环的参数设计方案能够大幅降低系统 LQR 代价。

3 面向并行闭环的网络资源编排方法

3.1 研究现状与研究思路

针对并行闭环之间的资源耦合, 控制领域的一些工作考虑在通信受限的情况下优化通信与控制策略, 例如, 文献[25]提出了控制和通信方案以最小化 LQR 代价和通信代价的加权求和, 但其将通信看作 0-1 管道, 只有传与不传两种状态。在通信领域, 一些文献考虑在控制约束下优化系统的

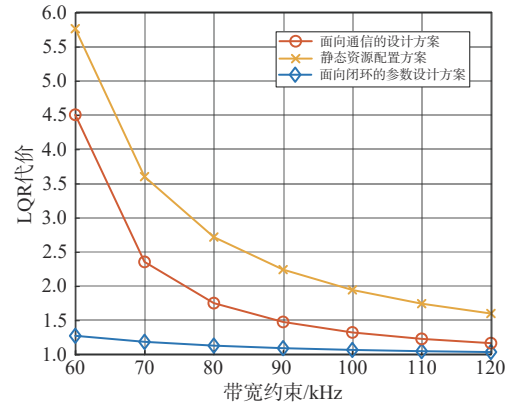


图9 不同带宽约束下各方法的LQR代价对比

通信指标, 例如通信能量效率^[26]或者时延确定性^[27]。考虑闭环内和闭环间的资源适配, 本文以闭环模型为基础, 综合考虑各部分资源约束, 构建以系统总体性能为目标的资源编排优化问题并进行求解。

3.2 网络资源编排举例

本文通过联合优化通信和计算资源的分配, 使系统内多个并行“感传算控”闭环的 LQR 代价之和最小^[28]。并行多闭环机器救援系统示意图如图 10 所示, 无人机携带感知、通信和计算单元, 服务多个现场机器人执行各自的控制任务, 构成多个并行“感传算控”闭环。

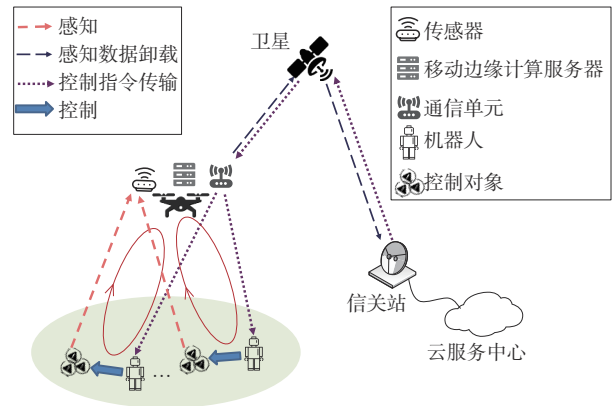


图10 并行多闭环机器救援系统示意图

考虑无人机有限的计算资源, 其接收到的感知数据切分为 3 个部分: 第一部分在无人机的计算单元处理; 第二部分在无人机上预处理和压缩后, 通过卫星卸载到云服务中心处理; 第三部分直接通过卫星卸载到云服务中心处理。面向并行闭环的总体控制性能最优, 可联合编排系统的功率、算力和回传速率的分配, 以及感知数据的切分比例。综

合考虑资源约束和环路负熵约束，提出如下优化问题^[28]：

$$\begin{aligned}
 & \min_{p, f, R, D, l} \sum_{k=1}^K l_k \\
 & \text{s.t.} \quad \sum_{k=1}^K p_k \leq P_{\max} \\
 & \quad D_{k,1} + D_{k,2} + D_{k,3} = D_k, \quad k = 1, 2, \dots, K \\
 & \quad \sum_{k=1}^K (f_{k,1} + f_{k,2}) \leq F_{\max} \\
 & \quad \sum_{k=1}^K (R_{k,2} + R_{k,3}) \leq R_{\max}^{\text{US}} \\
 & \quad T_k^{\text{comp}} + T_k^{\text{commu}} \leq T_k, \quad k = 1, 2, \dots, K \\
 & \quad l_k \geq \frac{n_k N(\mathbf{v}_k) |\det M_k|^{1/n_k}}{2^{2(BT_k^{\text{commu}} R_k^{\text{US}}(p_k) - h_k)/n_k}} + l_{k,\min}, \\
 & \quad k = 1, 2, \dots, K
 \end{aligned} \tag{7}$$

其中， p 、 f 、 R 、 D 和 l 分别表示功率、算力、卫星回传速率、感知数据量和LQR代价，下标 k 表示第 k 个闭环，下标 $\{1,2,3\}$ 则表示相关参数用于第几部分感知数据，例如， $f_{k,1}$ 表示用于第 k 个闭环中第一部分感知数据的算力。 T_k^{comp} 与 T_k^{commu} 分别表示用于计算与通信过程的时间。函数 R_k^{US} 表示第 k 个闭环中的通信速率，其定义为

$$R_k^{\text{US}}(p_k) = \text{lb} \left(1 + \frac{g_k p_k}{\sigma^2} \right) \tag{8}$$

其中， σ^2 表示通信噪声方差。该优化问题考虑了功率、算力、卫星回传速率和时间的资源约束，并综合考虑LQR代价和环路负熵的关系，以最小化 K 个并行闭环的LQR代价之和。

对该问题，文献[28]提出迭代求解算法，并通过仿真验证其优越性，仿真的基本参数设置如下： $B = 5 \text{ kHz}$ ， $\sigma^2 = -110 \text{ dBm}$ ，信道增益 g_k 利用自由空间损耗模型算出， $P_{\max} = 10 \text{ dBW}$ ， $R_{\max}^{\text{US}} = 50 \text{ Mbit/s}$ ， $F_{\max} = 5 \text{ GHz}$ ，其他相关参数可参考文献[28]。

仿真对比了文献[29]所提的最小化总时延的资源编排方法，以及文献[22]所提的面向LQR代价并优化功率的方案。不同传输功率约束下，3种方案的LQR代价对比如图11所示，可以看出，本文所提方案实现同样的控制效果所需的资源最少。

4 面向复杂耦合闭环的系统设计

4.1 研究现状与研究思路

单个机器通常能力有限，在实际作业场景中，多个传感器或多个机器人可协作完成作业任务。在

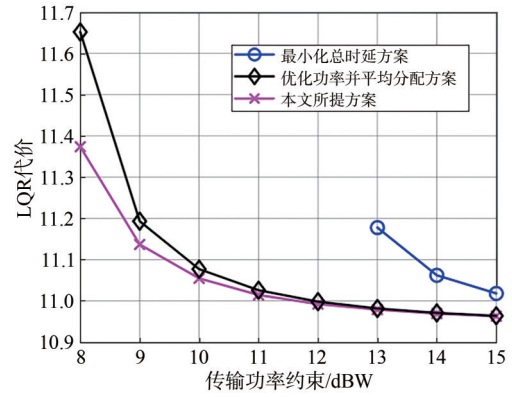


图11 不同传输功率约束下,3种方案的LQR代价对比

协同感知领域，研究人员提出了卡尔曼滤波^[30]、贝叶斯推断^[31]等感知数据融合技术。近些年来，利用深度学习进行多模态数据融合^[32-33]的方法也逐渐兴起。针对多机器协作控制，相关文献考虑一致性控制^[34]、队列控制^[35]等场景设计分布式控制算法。这些文献对于研究多传感器和多控制器协同工作的机理具有重要的参考价值，但是缺少对通信部分的综合考虑。有一些文献研究了多个传感器之间的通信资源分配，例如，文献[36]提出了一种绿色传感器网络的设计框架，通过联合优化子载波的分组配对以及功率分配，最大化网络传输速率。文献[37]研究了一种由无线电站供电的传感器网络，通过优化波束和时间分配来最大化网络吞吐量。然而，这些研究通常聚焦于传感器网络的通信性能，忽视了对最终控制效果的考虑，因此不能最有效地利用有限的通信资源。

当多个闭环任务相互耦合时，网络结构更复杂，难以直接分析处理。因此，本文提出将复杂模型渐进分解为相对简单的模型，由简入繁地进行研究。由简入繁分析机器作业复杂网络的示意图如图12所示，在前述简单闭环模型基础上扩展，分别研究多传感器、多执行器和多计算单元构成的闭环系统，探寻感知数据融合和多执行器协作以及协同计算的信息流转和相互作用机理。之后通过上述模型的非线性组合、编排，探索复杂耦合关系下的闭环模型和系统设计路径。

4.2 协同感知研究举例

考虑多个传感器的协同感知模型，在第 t 时刻，系统状态演进方程为

$$x_{t+1} = Ax_t + Bu_t + v_t \tag{9}$$

其中， A 为状态转移矩阵， B 为控制矩阵， x_t 为系

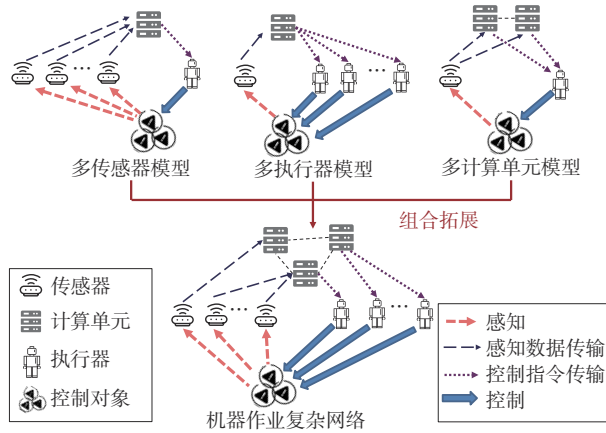


图12 由简入繁分析机器作业复杂网络的示意图

统状态， u_t 为控制输入， v_t 为控制过程噪声，服从均值为零向量、协方差矩阵为 V 的高斯分布。而传感器 k 的感知方程可以表示为

$$y_{k,t} = c_k^T x_t + w_{k,t} \quad (10)$$

其中， $w_{k,t}$ 为高斯分布的感知噪声， $y_{k,t}$ 为感知结果， $c_k \in \mathbf{R}^n$ 表示第 k 个传感器的感知系数。

由于通信带宽受限，传感器传输的观测结果存在失真，定义接收到的第 k 个传感器的观测结果为 $\tilde{y}_{k,t}$ ，可以表示为

$$\tilde{y}_{k,t} = y_{k,t} + n_{k,t} \quad (11)$$

其中， $n_{k,t}$ 表示传输带宽受限带来的失真。将 $n_{k,t}$ 建模为零均值高斯噪声，并假设传感器的观测结果 $y_{k,t}$ 服从高斯分布，方差为 $\sigma_{y_{k,t}}^2$ 。根据上述建模，可以计算出 $y_{k,t}$ 和 $\tilde{y}_{k,t}$ 的互信息为

$$I_k = I(y_{k,t}; \tilde{y}_{k,t}) = \frac{1}{2} \text{lb} \left(1 + \frac{\sigma_{y_{k,t}}^2}{\sigma_{n_{k,t}}^2} \right) \quad (12)$$

其中， $\sigma_{n_{k,t}}^2$ 表示失真噪声 $n_{k,t}$ 的方差。假设传感器 k 在第 t 时刻传输的数据量为 $D_{k,t}$ ，其中蕴含的有效信息量比例为 ρ ，那么可以将 $n_{k,t}$ 的方差计算为

$$\sigma_{n_{k,t}}^2 = \frac{\sigma_{y_{k,t}}^2}{2^{2\rho D_{k,t}} - 1} \quad (13)$$

上述建模给出了传输数据量和感知结果精度的基本关系。基于上述建模，可以利用卡尔曼滤波，基于多个传感器的感知结果获得对系统状态的最优估计及其方差，并利用LQR控制算法获得最优的控制指令^[21]。

进一步地，本文通过强化学习设计带宽分配策略。强化学习智能体的动作为每周周期时各个传感器的传输带宽。为了最小化系统的LQR代价，本文以每个时刻的LQR代价的负值作为奖励函数，即

$$r_t = -(x_t^T Q x_t + u_t^T R u_t) \quad (14)$$

而强化学习的状态则包括每周期的信道系数、传感器观测结果、对系统状态的先验估计及其协方差矩阵。考虑状态空间和动作空间均为连续空间，使用深度强化学习中的近端策略优化（PPO, proximal policy optimization）算法来进行强化学习网络的训练。仿真的基本参数设置如下：传感器的传输功率 $p_k = 0.1$ W，信道功率谱密度为 $N_0 = -174$ dBm/Hz，每周期的传输时间 $T = 1$ ms，信息提取率 $\rho = 0.005$ 。控制参数设置为

$$A = \begin{bmatrix} 0.12 & 0.63 & -0.52 & 0.33 \\ 0.26 & -1.28 & 1.57 & 1.13 \\ -1.77 & -0.30 & 0.77 & 0.25 \\ -0.16 & 0.20 & -0.58 & 0.56 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.66 & -0.58 & 0.03 & -0.20 \\ 2.61 & -0.91 & 0.87 & -0.07 \\ -0.64 & -1.12 & -0.19 & 0.61 \\ 0.93 & 0.58 & -1.18 & -1.21 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$V = \begin{bmatrix} 4.94 & -0.10 & 1.29 & 0.35 \\ -0.10 & 5.55 & 2.07 & 0.31 \\ 1.29 & 2.07 & 2.02 & 1.43 \\ 0.35 & 0.31 & 1.43 & 3.10 \end{bmatrix} \quad (17)$$

LQR的权重矩阵 Q 和 R 均设置为相应维度的单位矩阵除以100。感知矩阵 C 设置为单位矩阵，感知噪声方差 $\sigma_{w,k}^2 = 1$ 。

强化学习网络设置为：3个大小分别为 8×16 、 4×16 和 10×32 的全连接层分别输入 (\hat{x}_{t-1}, y_t) 、 h_t 和矩阵 P_{t-1} （由于 P_{t-1} 为对称阵，只需要输入其右上部分的元素），之后将3个网络输出拼接起来，经过一个 64×64 的隐藏层，再级联一个包含一个 64×64 全连接层的残差模块。上述输出分别输入动作估计网络和价值估计网络，动作估计网络为级联的 64×64 、 64×64 和 64×4 的全连接层，价值估计网络为级联的 64×64 、 64×64 和 64×1 的全连接层。网络一共训练50 000个步长，使用Adam优化算法，学习率为 3.0×10^{-4} ，强化学习网络的训练基于python的强化学习库Stable-Baselines 3。

在上述仿真条件下，本文对比了最大化信道速率和平均分配带宽的方案。不同带宽约束下，3种方案的LQR代价对比如图13所示，可以看出，所提方法能够有效降低系统的LQR代价，提升系统的控制性能。

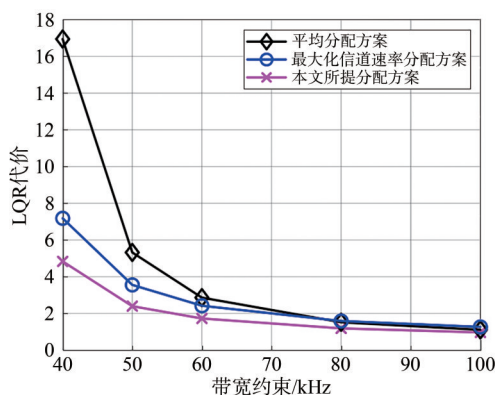


图13 不同带宽约束下,3种方案的LQR代价对比

5 结束语

机器在未来应急救援中将扮演日益重要的角色。在资源约束下,建立广域快速响应通信网络,为救援机器构建“神经系统”是未来应急通信网络的重要发展方向。本文结合机器作业特点,提出面向“感传算控”闭环的通信系统设计新思路。综合考虑“感传算控”闭环中各个环节的耦合关系,提出了基于环路负熵的“熵匹配”模型,优化闭环控制性能指标。在此基础上,提出了多闭环并行作业和复杂耦合时通信系统的资源编排准则。典型参数下的仿真结果表明,本文所提的系统设计方法以闭环结构为基本单元,可有效地兼顾异构环节,更直接地优化机器救援效果,相比传统面向链路的通信系统设计模式,显著地提升了资源利用率。

参考文献:

- [1] 张新,徐建华,陈彤,等.面向重大自然灾害的救援装备研究现状及发展趋势[J].科学技术与工程,2021,21(25):10552-10565.
ZHANG X, XU J H, CHEN T, et al. Research status and development trend of rescue equipment for major natural disasters[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(25): 10552-10565.
- [2] 陈前斌,李国军,李国权,等.应急指挥物联网系统架构与关键技术[J].物联网学报,2018,2(3):82-90.
CHEN Q B, LI G J, LI G Q, et al. System architecture and key technologies of emergency command Internet of Things[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2018, 2(3): 82-90.
- [3] 曹建宇,冯伟,葛宁.5G网络时敏业务的时延特性分析[J].物联网学报,2022,6(4):93-103.
CAO J Y, FENG W, GE N. Delay characteristics of time-sensitive services in 5G networks[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2022, 6(4): 93-103.
- [4] FENG W, WANG Y M, CHEN Y F, et al. Structured satellite-UAV-terrestrial networks for 6G Internet of things[J]. IEEE Network, 2024, 38(4): 48-54.
- [5] ALAGOZ F, GUR G. Energy efficiency and satellite networking: a holistic overview[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(11): 1954-1979.
- [6] WANG Y, XU Y C, ZHANG Y, et al. Hybrid satellite-aerial-terrestrial networks in emergency scenarios: a survey[J]. China Communications, 2017, 14(7): 1-13.
- [7] ZHAO N, LU W D, SHENG M, et al. UAV-assisted emergency networks in disasters[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(1): 45-51.
- [8] PANDA K G, DAS S, SEN D, et al. Design and deployment of UAV-aided post-disaster emergency network[J]. IEEE Access, 2019, 7: 102985-102999.
- [9] LIU X N, LI Z, ZHAO N, et al. Transceiver design and multihop D2D for UAV IoT coverage in disasters[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 6(2): 1803-1815.
- [10] SKINNEMOEN H. UAV & satellite communications live mission-critical visual data[C]//Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology. Piscataway: IEEE Press, 2014: 12-19.
- [11] BAUMGÄRTNER L, KOHLBRECHER S, EULER J, et al. Emergency communication in challenged environments via unmanned ground and aerial vehicles[C]//Proceedings of the 2017 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-9.
- [12] WIENER N. Cybernetics; or, Control and communication in the animal and the machine[M]. 2d ed. New York: M.I.T. Press, 1961.
- [13] 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.
- [14] FENG Y, CHEN X, GU G X. Output feedback stabilization for discrete-time systems under limited communication[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 62(4): 1927-1932.
- [15] KOSTINA V, HASSIBI B. Rate-cost tradeoffs in control[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2019, 64(11): 4525-4540.
- [16] LIU F, CUI Y H, MASOUIROS C, et al. Integrated sensing and communications: toward dual-functional wireless networks for 6G and beyond[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022, 40(6): 1728-1767.
- [17] MAO Y Y, YOU C S, ZHANG J, et al. A survey on mobile edge computing: the communication perspective[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(4): 2322-2358.
- [18] CHEN H G, GUERRERO H H. A rule-based robot scheduling system for flexible manufacturing cells[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 1992, 3(5): 285-296.
- [19] PIERSON H A, GASHLER M S. Deep learning in robotics: a review of recent research[J]. Advanced Robotics, 2017, 31(16): 821-835.
- [20] SONTAG E D. Mathematical control theory: deterministic finite

- dimensional systems[M]. New York, USA: Springer Science & Business Media, 2013.
- [21] SHAIJU A J, PETERSEN I R. Formulas for discrete time LQR, LQG, LEQG and minimax LQG optimal control problems[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2008, 41(2): 8773-8778.
- [22] LEI C L Y, 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.
- [23] FANG X R, LEI C L Y, FENG W, et al. Structured connectivity for 6G reflex arc: task-oriented virtual user and new uplink-downlink tradeoff[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2024, 23(10): 14466-14481.
- [24] EL-HAJJ A M, DAWY Z. On optimized joint uplink/downlink resource allocation in OFDMA networks[C]//Proceedings of the 2011 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC). Piscataway: IEEE Press, 2011: 248-253.
- [25] SOLEYMANI T, BARAS J S, HIRCHE S, et al. Value of information in feedback control: global optimality[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2023, 68(6): 3641-3647.
- [26] CHANG B, ZHANG L, LI L Y, et al. Optimizing resource allocation in URLLC for real-time wireless control systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(9): 8916-8927.
- [27] CHEN L J, ZHOU J T, CHEN Z Y, et al. Resource allocation for deterministic delay in wireless control networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(11): 2340-2344.
- [28] LEI C L Y, FENG W, WEI P, et al. Edge information hub: orchestrating satellites, UAVs, MEC, sensing and communications for 6G closed-loop controls[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2025, 43(1): 5-20.
- [29] REN J K, YU G D, HE Y H, et al. Collaborative cloud and edge computing for latency minimization[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(5): 5031-5044.
- [30] HARRIS C, HONG X, GAN Q. Multisensor data fusion using Kalman filters based on neurofuzzy linearisation[M]//Adaptive Modelling, Estimation and Fusion from Data. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2002: 255-280.
- [31] ZHOU Z J, HU C H, XU D L, et al. Bayesian reasoning approach based recursive algorithm for online updating belief rule based expert system of pipeline leak detection[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(4): 3937-3943.
- [32] YEONG D J, VELASCO-HERNANDEZ G, BARRY J, et al. Sensor and sensor fusion technology in autonomous vehicles: a review[J]. Sensors, 2021, 21(6): 2140.
- [33] 丁凯, 蒋超越, 陶铭, 等. 多源异构传感器数据融合和算力优化研究[J]. 物联网学报, 2024, 8(4): 23-33.
- DING K, JIANG C Y, TAO M, et al. Research on heterogeneous data fusion and arithmetic optimization in multi-sensor systems[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2024, 8(4): 23-33.
- [34] OLFATI-SABER R, MURRAY R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(9): 1520-1533.
- [35] CHEN Y Q, WANG Z M. Formation control: a review and a new consideration[C]//Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE Press, 2005: 3181-3186.
- [36] LU W D, GONG Y, LIU X, et al. Collaborative energy and information transfer in green wireless sensor networks for smart cities[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(4): 1585-1593.
- [37] CHU Z, ZHOU F H, ZHU Z Y, et al. Wireless powered sensor networks for Internet of things: maximum throughput and optimal power allocation[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017, 5(1): 310-321.

[作者简介]



雷城乐阳(1999-), 男, 清华大学电子工程系博士生, 主要研究方向为卫星无人机通信、机器通信等。



冯伟(1982-), 男, 博士, 清华大学电子工程系研究员, 主要研究方向为天地一体6G移动通信、海域物联网、卫星互联网等。



葛宁(1971-), 男, 博士, 清华大学电子工程系研究员, 主要研究方向为通信片上系统、短距离无线通信、卫星通信等。