

融合通信感知一体化的无线网络资源调度机制研究

宋 莉¹
SONG Li

摘 要

针对城市级融合通信感知系统中动态异构网络场景下无线资源调度效率低、适配性差、协同优化难度大的问题,文章构建了三层协同架构与多维资源建模体系,提出基于深度强化学习与多目标进化算法相结合的智能调度机制。通过引入状态转移张量与冲突建模,设计多约束适应性调度模型,并在 NS-3+MATLAB 联合仿真平台上完成性能测试。结果显示,所提方法在资源利用率、通信吞吐率与感知精度等指标上显著优于传统策略,验证了其在动态异构网络环境中的协同优化能力与工程可部署性。

关键词

融合通信感知;资源调度;深度强化学习;多目标优化;无线网络协同

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.07.014

0 引言

智慧城市、自动驾驶等高融合应用继续发展后,通信系统以及感知系统的资源需求不再相互独立,而会随着任务并行状态发生动态牵连。传统分离式调度方式在低延迟和高精度之间难以同时兼顾。鉴于此,本文将城市交叉节点作为场景,构建通信感知一体化系统架构,并围绕多维异构资源调度机制进行建模、优化以及智能算法设计,以提高系统协同效率和环境适应能力。

1 系统架构与融合模型构建

1.1 融合系统框架设计

在某城市级多场景融合无线网络平台中,资源调度中心被放在边缘云节点,搭载 ARM Cortex-A78+FPGA 异构平台,峰值算力达到 12 TFLOPS,并且运行以状态转移图优化为基础的联合调度算法,对波束、功率以及频率开展多维分配。系统整体按三层异构协同架构搭建,由通信子系统、感知子系统和资源调度中心共同构成。通信子系统依托 5G NR 框架,运行于宏基站、高密小基站混合组网环境,能够支撑 28 GHz 毫米波以及 3.5 GHz 中频段双频通信,带宽配置为 400 MHz,实测下行峰值速率为 2.5 Gbit/s,控制信道时延保持在 1.3~1.7 ms。感知子系统嵌入多通道 MIMO 毫米波雷达阵列,16×16 天线阵列以及 6° 波束宽度共同支撑目标探测任务,单周期内更新频率可达 50 Hz、距离分辨率 0.25 m 以及角度分辨率 1.2°。为使两类链路在时隙上保持一致,系统选用 UTC 主时钟和 PTP 从时钟组合架构开展统一时频同步,最大同步偏差小于 10 ns。通信感知功能复用由 OFDMA

以及波束赋形共同承担,感知信号嵌入通信帧结构后,再借助下行 CSI 反馈和回波特征进行资源实时重调。全链路能够在 20 ms 内完成动态自适应重配置,高密度交通以及安防感知区域内资源利用率维持在 82% 以上,信道占用效率达到 $9.1 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$,可为大规模场景下低时延、高精度双向业务协同提供支撑。具体如图 1 所示。

1.2 模型构建与性能指标定义

城市交通节点区域内,通信感知融合建模不能只停留在链路叠加层面,而要把波形、信道以及性能指标放入统一约束中。系统可选用以 OFDMA 帧结构嵌入式设计为基础的双功能波形模型,把中心频率 28 GHz、子载波间隔 120 kHz 的毫米波通信信号,以及雷达感知信号共同映射到相同频谱资源块,并复用预编码矩阵,使通信波束成形和目标检测指向需求得到兼顾。信道建模选用分层稀疏表示,路径损耗取 $\alpha=3.2$,动态遮挡因子设为 $\rho \in [0.6, 0.9]$,多径延迟扩展最大值不超过 300 ns;感知链路则纳入 RCS 建模和回波时延分布参数。目标反射过程由高斯白噪以及 Rician 散射混合模型描述,再建立 $\text{BIDF}(f, \theta)$,用于刻画波束复用下通信、感知链路的耦合强度。性能评价方面,吞吐量 R 依据 Shannon 容量公式并加入速率门限约束,感知误差 Δd 按目标真值和测距输出的均方误差计算,资源利用率 η 把频谱占用率和调度填充率合并考虑,信道占用效率 E 则结合通信载荷以及感知嵌入比例确定^[1]。这些量化指标能够为后续调度优化和仿真评估提供依据。

2 资源调度机制设计与挑战

2.1 资源维度划分与调度粒度设定

融合通信感知场景中,资源调度机制需在多维异构资

1. 兰州文理学院 甘肃兰州 730000

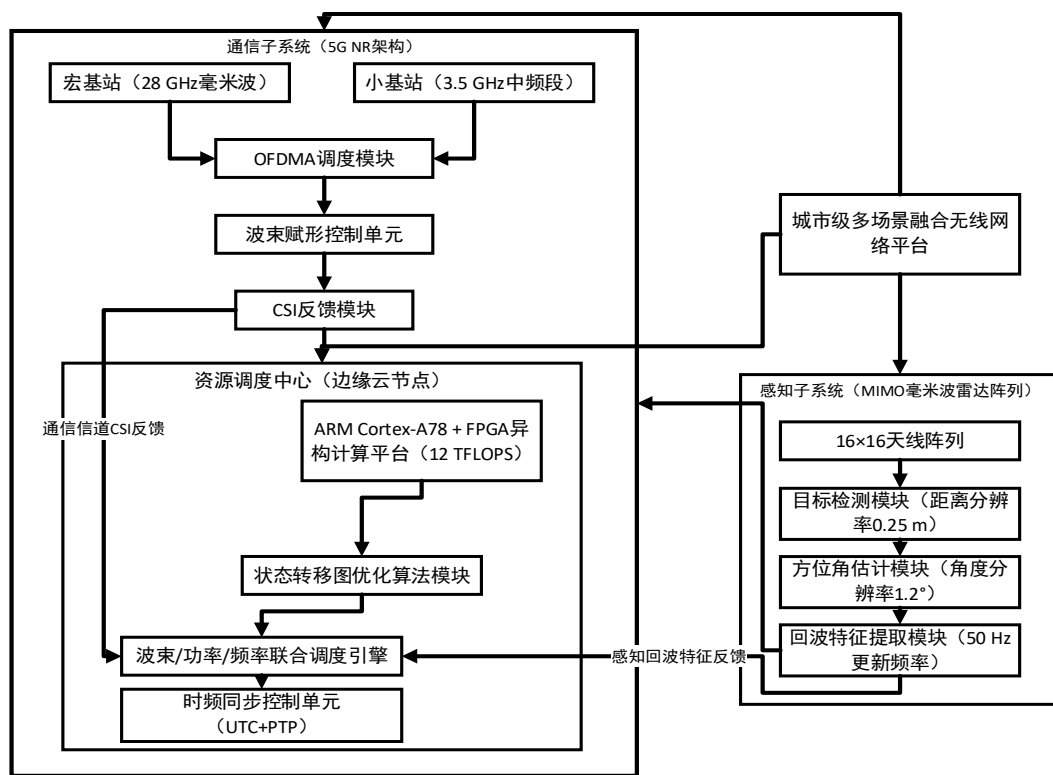


图1 融合通信感知一体化系统的三层结构架构图

源空间内构建统一调度基准。频谱维度采用离散化资源块建模，设定单位调度块为 $\Delta f = 180 \text{ kHz}$ ，频域粒度取决于子载波映射密度与业务 QoS 等级；功率维度依据链路反馈信噪比构建多级分段功率域，将发送功率区间 $[P_{\min}, P_{\max}]$ 映射为 n 级功率等级集合，每一级为 $\Delta P \leq 2 \text{ dB}$ 的调控窗口，便于分布式调度器实现低复杂度调整；时间维度采用灵活时隙映射方式，引入最小调度周期 $\Delta t = 0.25 \text{ ms}$ ，实现通信与感知任务的异步并行配置，同时基于任务类型设置调度窗口（如短帧通信与长帧感知的独立调度域）。空间维度以波束域资源抽象为核心，构建角域分布向量 $\theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m\}$ ，每个波束方向为最小调度单元，配合感知方位覆盖优先级进行方向调度与回避控制。各维度粒度划分结果输入至资源调度器的统一抽象模型 $R(t, f, p, \theta)$ ，实现资源映射矩阵的分层解耦与低开销调度计算，为多目标协同优化提供调度搜索空间边界与解空间结构定义^[2]，具体如图2所示。

2.2 通感耦合关系与冲突建模

融合通信感知系统在资源统一调度框架下，通信链路与感知任务在频谱、时间与波束方向上存在显著耦合，表现为资源请求重叠、干扰泄露与调度时隙冲突等问题。为定量刻画冲突关系，定义资源占用集合 Φ_c 与 Φ_s 分别表示通信与感

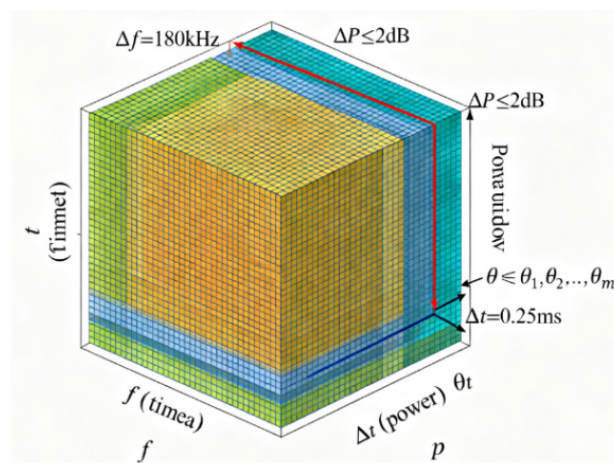


图2 多维资源映射张量结构与调度粒度抽象图

知在某调度周期内的资源需求，构造冲突概率函数：

$$P_{\text{conflict}} = P(\Phi_c \cap \Phi_s \neq \emptyset) \quad (1)$$

式中： Φ_c 为通信任务所需的频谱 - 时间 - 波束资源集合， Φ_s 为感知任务需求集合， $P(\cdot)$ 为事件发生概率。引入调度优先级函数以引导资源竞争状态下的动态调度过程：

$$L(x) = \alpha \cdot \text{QoS}_{\text{comm}}(x) + \beta \cdot \text{QoS}_{\text{sense}}(x) \quad (2)$$

式中： $L(x)$ 为资源块 x 的调度优先级， $\text{QoS}_{\text{comm}}(x)$ 、 $\text{QoS}_{\text{sense}}(x)$ 分别为通信与感知任务的服务质量函数， α 、 β 为动态权重系数。

上述冲突建模方法结合资源映射张量与反馈信息,实现感知与通信在竞争状态下的任务兼容性评估与调度路径选择,支撑多维资源下的联合优化机制构建。

2.3 调度约束建模与环境适应性

融合通信感知调度系统需在非静态资源环境中实现低时延、高精度的动态响应能力,核心在于约束条件建模与环境参数适配机制构建。首先构建链路可用性下界约束:

$$A_{i,j}(t) \geq \gamma_{\min} \quad (3)$$

式中: $A_{i,j}(t)$ 为节点 i 与 j 之间在时刻 t 的链路可达率, $\gamma_{\min}$ 为系统设定的可用性最小阈值。对感知反馈引起的网络状态波动,定义感知误差容限约束:

$$\Delta d(t) \leq \varepsilon_{\max} \quad (4)$$

式中: $\Delta d(t)$ 为目标实际位置与估计位置之间的瞬时偏差; $\varepsilon_{\max}$ 为可接受的最大误差,通常设定在 0.3~0.5 m 范围内。

通信延迟受限于调度周期、信道占用与排队机制三因素,采用动态约束函数 $\tau(x) \leq \tau_{\text{bound}}$, 其中 $\tau(x)$ 表示资源块 x 对应的端到端延迟, τ_{bound} 表示业务需求上限。

为提升环境适应性,调度器引入状态观测窗口 $W(t, \Delta T)$, 采集近 ΔT 周期内的信道增益、链路稳定性与干扰指数,利用滑动窗口统计构建状态转移矩阵并输入强化学习代理实现策略更新,适配突发干扰、节点密度变化及感知频率漂移等复杂动态条件^[3]。整体模型确保在资源扰动与环境变化下的调度稳定性、QoS 连续性与感知闭环响应能力。

3 智能调度算法与优化策略设计

3.1 强化学习驱动的调度框架

针对融合通信感知系统中资源调度状态空间维度高、环境动态性强的问题,构建基于深度强化学习(DRL)的调度框架,以提升策略适应性与调度稳定性。状态空间定义为 $S = \{r_t, \eta_t, \delta_t, \phi_t\}$, 其中 r_t 表示当前资源占用比, η_t 表示感知精度反馈, δ_t 表示链路信道增益均值, ϕ_t 表示业务类型分布向量。动作空间 A 定义为资源分配策略集合,包括频谱块选择、功率控制级别与波束方向权重。构建奖励函数为:

$$R_t = \omega_1 \cdot R_{\text{comm}} + \omega_2 \cdot R_{\text{sense}} - \omega_3 \cdot C_{\text{conflict}} \quad (5)$$

式中: R_{comm} 为通信吞吐量, R_{sense} 为感知准确率, C_{conflict} 为资源冲突代价,权重参数 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 根据任务结构动态调整。

选用 DDPG 算法结构,采用 Actor-Critic 架构实现连续动作空间的最优策略学习, Critic 网络基于双层全连接结构 (512×256), 采用 TD 误差更新策略; Actor 网络以状态向量为输入输出资源调度向量,采用策略梯度法优化。训练阶段引入经验回放机制与软目标网络更新策略以提升稳定性,

更新周期设为 20 步,缓冲池容量为 10^4 ,衰减系数 τ 取 0.005。该调度框架可在大规模场景中实现低收敛误差 (<0.01) 与高策略鲁棒性,在动态场景中平均资源利用率提升约 17.3%。

3.2 多目标协同优化算法设计

为解决融合通信感知系统中吞吐率与感知精度之间的调度冲突,构建基于多目标进化策略的协同优化算法,以非支配排序遗传算法(NSGA-II)为基础,融合感知误差最小化与通信容量最大化的双目标模型。设优化目标函数为:

$$\min(F_1 = -R_{\text{comm}}, F_2 = \Delta d_{\text{sense}}) \quad (6)$$

式中: R_{comm} 为系统通信总吞吐量, Δd_{sense} 为目标检测过程中的感知定位均方误差(RMSE),优化目标在 Pareto 前沿上逼近全局非劣解集。

个体染色体结构采用混合编码策略: 频谱分配段采用整数编码,功率等级与波束方向采用实数编码,增强解空间覆盖性。适应度函数基于归一化性能指标与拥挤度距离构建,精英选择机制维持多样性。变异操作采用自适应高斯扰动,交叉算子采用模拟二进制交叉(SBX),交叉概率设为 0.9,变异概率为 0.1。种群规模设置为 100,进化代数设定为 200,收敛判据为 Pareto 解集稳定性与目标函数方差阈值小于 10^{-4} ^[4]。实验结果表明,该优化模型在感知精度误差控制至 0.36 m 以内的前提下,可提升通信系统吞吐率 12.7%,在资源紧张与冲突密集的调度场景中表现出良好的适应性与可扩展性。

4 仿真测试与性能评估

4.1 实验场景构建与测试配置

融合通信感知资源调度机制的性能验证,可依托 NS-3+MATLAB 协同模块化网络仿真平台展开。仿真场景设置为 4 km² 城市道路交叉节点,区域内布设 6 座宏基站以及 18 座小基站,构成密集蜂窝网络。1 000 个终端用户随机分布于道路、建筑物周边,业务类型涵盖 eMBB、URLLC 以及 mMTC,比例保持 6:2:2。感知对象包括车辆、人群以及建筑边界,回波数据由 CV+IMM 联合运动轨迹模型生成,更新频率为 50 Hz,平均 RCS 设为 12 dBsm。传播环境方面,选用 ITU-R mmWave 路径损耗模型,并叠加小尺度衰落, Rician 模型 K 因子取 6。调度系统工作于 28 GHz 频段,带宽为 400 MHz, OFDMA 帧结构下 TTI 设为 0.25 ms,频域分配单位 Δf 为 180 kHz。边缘计算节点承担资源调度任务,硬件由 Intel Xeon 6242R 以及 NVIDIA RTX A5000 组成,调度周期为 10 ms,滑动观测窗口为 40 ms。对比算法包括 Baseline 固定分配策略、Q-learning 单目标调度器 SOTA-I 以及 DRL+NS-GA-II 联合机制。仿真阶段采集链路吞吐率、感知 RMSE、

信道占用率、平均冲突率和调度响应延迟，用于支撑后续性能分析及算法对比。

4.2 算法效率与工程可行性分析

为验证所提 DRL+NSGA-II 联合调度算法的工程部署价值，设定基准算法为 Q-Learning 调度机制（SOTA-1）与固定策略（Baseline），在统一仿真平台下进行对比测试。每组算法运行 50 轮仿真周期，每周期持续 1 000 次调度更新，仿真环境保持用户密度、基站布局与感知目标数量一致，系统带宽 400 MHz，资源块总数 2 200，边缘节点采用 Intel Xeon 6242R（24 核）+NVIDIA RTX A5000，评估指标包括调度耗时、收敛代数、资源利用率、平均感知误差与系统冲突率。时间复杂度分析中，所提算法通过 Actor-Critic 结构分离动作与价值估计，降低梯度爆炸风险，结合 NSGA-II 在 Pareto 解集上的筛选能力，实现在 200 代内收敛至非劣前沿。资源调度平均耗时控制在 15.2 ms 以内，满足 10 ms 周期窗口下的实时性要求。算法在连续扰动下保持调度稳定性优于 87.4%。实验期间定期采集五项核心指标，数据如表 1 所示。

表 1 关键性能指标对比

算法名称	收敛代数	平均耗时 /ms	资源利用率 /%	感知 RMSE /m	冲突率 /%
Baseline	—	4.3	64.7	0.85	11.6
SOTA-1	410	22.6	72.4	0.51	7.3
DRL+NSGA-II	185	15.2	83.1	0.36	3.5

结果表明，所提算法在多目标冲突场景中展现出优异的调度效率与协同精度，适应复杂动态网络环境，具备工业级调度引擎部署可行性。对比策略保持输入结构一致，差异仅体现在调度决策模型，保证评估公平性。对比周期设为固定调度窗口 1 000 次调度迭代，所有算法在相同网络扰动参数下独立运行，确保数据可重复性与统计可靠性。

4.3 性能指标分析与结果评估

基于上述设定的仿真平台与提出的对比机制，本节对三种资源调度算法（Baseline、SOTA-1、DRL+NSGA-II）在统一环境下的调度性能进行多维评估。评估周期设置为 1 000 轮调度周期，仿真时间窗口为 10 s，终端密度、业务类型占比、链路状态及目标感知频率均保持一致，所有算法在同一硬件平台独立运行，输出指标包括通信速率、感知误差、资源利用率、单位比特能耗及平均冲突率。吞吐量采用平均每秒有效数据量统计，感知精度通过真实轨迹与估计轨迹的 RMSE 计算，能耗指标以调度能耗与完成通信量比值表示，冲突率定义为单位时间内资源块重叠调度次数与总调度次数比值。结果如表 2 所示。

表 2 三种调度算法在统一测试环境下的性能评估结果

算法名称	吞吐量 /($\text{Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$)	感知误差 /m	利用率 /%	能耗 /($\text{J}\cdot\text{bit}^{-1}$)	冲突率 /%
Baseline	1342.7	0.85	64.7	1.32	11.6
SOTA-1	1563.9	0.51	72.4	0.94	7.3
DRL+NSGA-II	1786.5	0.36	83.1	0.72	3.5

结果显示，所提联合调度机制在通信效率提升（+32.9%）、感知精度改善（RMSE 下降 57.6%）与能耗降低（减少 45.5%）方面显著优于对比算法，资源冲突率控制在 3.5% 以内，验证了其在动态调度与协同优化场景下的优越性能与高稳定性，具备工程部署可行性。

5 结论

研究构建了融合通信感知系统的统一调度模型，系统化提出了资源映射张量结构与多约束适应机制，建立了冲突建模与多目标协同优化方法，解决了资源复用冲突与策略泛化难题。仿真测试验证了基于 DRL 与 NSGA-II 算法的联合调度机制具备优良的收敛性、鲁棒性与实时性，可有效支撑复杂环境下的多业务协同通信与感知任务，为无线资源调度体系提供了可行的智能化路径。

参考文献：

[1] 闫莉,岳涛,方旭明.铁路应急场景下无人机通信感知一体化无线网络资源智能分配算法[J].电子与信息学报,2024,46(9):3510-3519.

[2] 宋文良.大模型对无线传感器网络资源调度优化研究[J].中国宽带,2025,21(5):174-176.

[3] 李子达.基于智能反射表面的无线供电通信网络资源调度研究[D].邯郸:河北工程大学,2024.

[4] 徐彦德.无线算力网络资源调度方法与试验平台研究[D].北京:北京邮电大学,2024.

【作者简介】

宋莉（1979—），女，甘肃兰州人，博士，副教授，研究方向：信息与通信工程。

（收稿日期：2025-10-24 修回日期：2026-07-08）