

卫星与地面融合网络的动态频谱共享机制设计

高 鹏¹ 王洪涛^(通讯作者)²

1. 中兴通讯 广东省 深圳市 518057

2. 新疆维吾尔自治区 和田地区 848000

【摘 要】：针对星地融合网络中低轨星座扩展引发的频谱需求强突发与跨区域迁移问题，本文提出一种面向动态频谱共享的机制设计与评估框架。机制以认知无线电为统一底座，构建卫星侧混合检测与地面侧干扰测量的多源感知流程，在边缘节点完成时间对齐与可信融合，形成包含空闲率、干扰水平与链路质量的状态向量，并引入频偏补偿与置信度标注以提升非平稳场景下的状态一致性。在此基础上，将频谱分配建模为马尔可夫决策过程，采用 Q-learning 实现频段选择与功率谱密度上限的联合决策，通过干扰裕度可行性过滤、切换代价约束与置信度缩放抑制误判驱动的激进行为。同时设计 MAC 与网络层协同策略，将频谱结果映射为接入控制参数与路由度量以提升端到端稳定性。仿真结果表明，所提机制频谱利用率达到 85%，较静态分配提升 25%；系统吞吐量达到 120 Mbps，较随机分配提升 30%；端到端传输延迟收敛至 150 ms，较静态分配降低 20%。结果验证了该机制在频谱复用效率、业务承载能力与时延控制之间的综合优势。

【关键词】：星地融合网络；动态频谱共享；频谱感知与状态评估；Q-learning；跨层协同

0 引言

低轨卫星与地面蜂窝的深度融合推动了海洋、航空与应急等场景的广域接入，但业务在覆盖窗口与热点区域间快速迁移，固定频段规划难以兼顾供需匹配与利用效率。与此同时，星地链路传播差异与轨道运动带来的多普勒与频繁切换，使干扰关系呈现强时变与非对称特征，叠加跨域监管与协商时延约束，动态共享面临感知精度、干扰可控与可执行性的多重挑战。为提升频谱资源的弹性供给能力，本文围绕感知评估、学习型分配与跨层协同开展机制设计与验证。

1 卫星与地面融合网络动态频谱共享的需求与挑战

在星地融合网络中，低轨卫星星座扩展带来的回传与接入业务叠加，使得固定频段规划逐渐暴露出资源利用率不均衡的问题，尤其在海洋宽带、航空互联网以及应急通信等场景中，业务到达呈现强突发性与跨区域迁移特征，频谱需求随轨道覆盖窗口快速涨落。动态频谱共享的现实驱动力在于把卫星链路的广域覆盖与地面蜂窝系统的高密度复用并置到同一频谱池内，通过机会接入与可控复用来缓解边缘区域供给不足和热点区域拥塞并存的结构性矛盾。与此同时，星地链路传播损耗差异、波束指向性以及终端天线口径约束，会把同一频段下的干扰耦合关系变为时变且强非对称的问题，使传统以地面小区为中心的干扰建模难以直接迁移。进一步观察发现，卫星轨道运动带来的多普勒频移与切换频繁发生，叠加地面系统的动态负载与移动性，会把频谱占用状态评估推向高维、非平稳的统计过程。需重点关注的是，星地系统分别受制于不同监管框架与频谱授权边界，跨域协商延迟以及安全可信问题会约束共享决策的可执行性，并且在共址或邻频条件下还可能引入相互干扰的责任界定困难，由此使动态频谱共享在感知精度、干扰可控性、时延约束以及制度合规性之间形成难以回避的权衡关系。

2 卫星与地面融合网络动态频谱共享机制设计

2.1 频谱感知与状态评估模型

在星地融合网络的动态频谱共享语境下，频谱占用呈现出卫星波束覆盖窗口短时涨落以及地面小区负载快速起伏的叠加特性，使单一一节点的本地观测难以刻画跨域干扰耦合关系。本研究把认知无线电框架当作统一的感知与推理底座，在卫星节点侧结合波束指向与星历参数开展能量检测与导频相关检测的混合感知，在地面基站侧结合参考信号接收功率以及上行干扰测量来形成持续更新的占用证据流，并把多源观测在边缘计算节点完成时间对齐与可信聚合，从而把同一频段在不同空间位置的可用性映射到可比较的状态空间。鉴于低轨运动引入的多普勒频移会改变检测门限的稳健性，状态评估环节同步引入频偏补偿后的等效信噪比估计，以降低由载频漂移造成的误警与漏检风险，进而为后续分配策略提供一致的状态输入。见图 1 所示，感知流程由多源测量采集、特征提取、融合判决以及状态发布构成闭环，其中融合判决将卫星侧的波束内占用证据与地面侧的邻频泄漏评估共同纳入，从而把星地异构传播条件下的非对称干扰以结构化指标表达出来。

为使频谱共享决策在可解释性上契合监管与工程实现的双重约束，状态评估指标体系被构建为包含频谱空闲率、干扰水平以及链路质量的多维向量，其中频谱空闲率用于刻画时间域机会接入空间，干扰水平用于约束共信道复用强度，链路质量用于反映业务承载的可达性与稳定性。频谱空闲率的计算以感知窗口内的占用判决序列为基础，形式化表达如下：

$$U = 1 - \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T o_t$$

其中， U 表示频谱空闲率，取值范围为 0 至 1； T 表示状态评估的离散感知时隙数； o_t 表示第 t 个时隙的占用判决

结果，占用时取 1、空闲时取 0。

在指标融合方式上，状态评估把干扰水平表征为接收端等效干扰功率谱密度与允许阈值的相对裕度，并将链路质量表征为结合调制编码自适应后的有效吞吐映射值，从而把物理层测量与业务层需求在同一状态向量内联动表达。考虑跨域协商存在时延与可信边界，状态发布阶段仅上报经压缩的关键统计量与置信度，同时把卫星星历驱动的可见性预测作为先验信息写入状态标签，使调度器能够在短窗口内完成对频谱机会的前瞻性估计，并为后续以学习为核心的分配算法提供更稳定的马尔可夫近似条件。

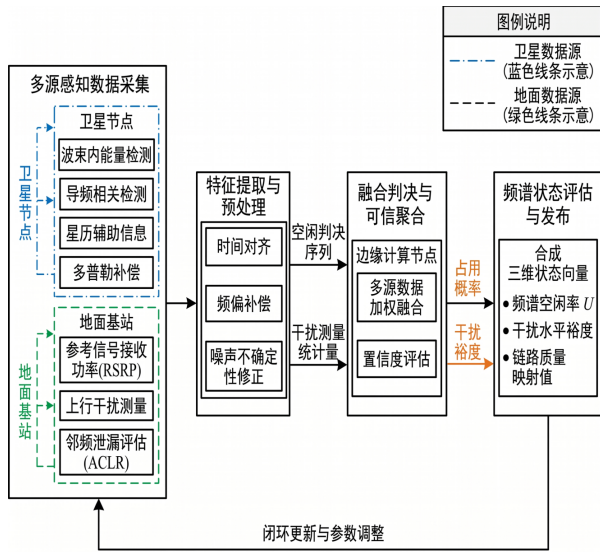


图1 频谱感知与状态评估流程

2.2 动态频谱分配算法设计

动态频谱分配面对的核心矛盾集中在卫星链路往返时延较长导致的状态滞后，以及地面网络在高密度复用条件下对瞬时干扰的严格约束，本研究将该问题表述为马尔可夫决策过程以获得可迭代优化的策略形式。状态集合由上一节发布的频谱状态向量及其置信度共同构成，动作集合定义为对候选频段的选择以及对发射功率谱密度上限的联合设定，奖励函数以业务有效吞吐、干扰罚项以及切换代价构成，使学习过程在追求资源利用效率的同时把频繁换频与越阈干扰的风险显式纳入。鉴于卫星回传调度与地面接入调度存在不同时间尺度，算法在实现上把卫星侧动作更新周期设置为覆盖窗口内的准稳态粒度，把地面侧动作更新周期设置为更细的时隙粒度，并在统一 Q 表中以扩展状态编码区分不同尺度下的策略收敛方向，以降低由时延差异引起的策略振荡。

在学习机制上，Q-learning 以在线交互的方式把观测到的即时奖励反馈到状态动作价值函数，依靠迭代更新来逼近最优策略，并在探索阶段引入随时间衰减的随机选择概率以兼顾新频段机会发现与稳定占用维持。Q 值更新公式如下：

$$Q(s,a) \leftarrow (1-\alpha)Q(s,a) + \alpha \left[r + \gamma \max_{a'} Q(s',a') \right]$$

其中， $Q(s,a)$ 表示在状态 s 下采取动作 a 的价值估计； α 表示学习率，用于调节新旧经验的权重； r 表示执行动作后获得的即时奖励； γ 表示折扣因子，用于平衡长期收益与短期收益； s' 表示转移后的下一状态； a' 表示下一状态下的候选动作集合元素。

结合星地融合网络的工程约束，动作执行前引入基于干扰裕度的可行性过滤，把可能触发地面受害小区干扰阈值越界的动作直接剔除，同时把卫星波束间协调所需的最小保持时长写入切换代价项，使策略倾向于在可见窗口内维持稳定的频段复用关系。进一步观察发现，状态置信度在强遮挡或测量噪声抬升场景中会显著下降，算法把置信度作为奖励缩放因子的一部分，以降低不可靠状态驱动的激进行为，从而在学习收敛速度与误判风险之间形成更可控的折中。

2.3 跨层协同的频谱共享策略

跨层协同的必要性来自频谱共享决策的结果不仅体现为物理层与 MAC 层的接入行为，还会改变网络层路由的拥塞位置与链路可达性，因此单层优化容易把局部收益转化为端到端性能损失。本研究构建 MAC 层与网络层的协同机制，其中 MAC 层围绕实时接入控制开展工作，把频谱感知输出的空闲率与干扰裕度映射为竞争窗口、退避参数以及准入门限的自适应调整依据，并在卫星上行与地面上行并存时把占空比约束当作软限制写入调度器，使短时突发业务能够在不突破干扰边界的条件下获得机会接入。网络层侧把频谱分配结果当作链路代价的动态组成部分，将不同频段对应的链路质量与可用时长映射为路由度量，从而把易受切换影响的星地链路从高可靠业务路径中适度分离，并对海洋宽带、航空互联网以及应急通信等业务流设置差异化的时延与丢包敏感权重，使路由选择在服务质量约束下具备更强的场景适配性。

协同过程以控制面信息交互为纽带，MAC 层把接入拥塞状态与重传统计上报至网络层，网络层把路径选择与流量分流结果反馈至 MAC 层以调整队列优先级与调度粒度，从而把频谱共享引起的冲突风险在跨层闭环内提前消解。鉴于星地系统受不同监管边界约束，策略在控制面交互中仅交换与共享决策直接相关的信息集，并把频段授权类别与可共享等级编码进路由度量与准入判据，使跨域协商在合规前提下保持可执行性。由此形成的跨层机制能够把频谱机会接入、干扰约束以及端到端路径稳定性在同一框架内联动刻画，使动态频谱共享从局部频段选择扩展为面向业务承载的整体资源调度过程。

3 动态频谱共享机制的性能评估

3.1 仿真实验设计

为把所提动态频谱共享机制在星地融合网络中的可实施性与性能边界表述为可重复的评估过程，本文搭建面向低轨卫星与地面蜂窝协同的离散事件仿真平台，并把轨道运动、波束覆盖窗口、地面负载波动以及跨域控制时延共同纳入时间推进逻辑。

辑，以便在同一仿真框架内复现频谱占用状态的非平稳演化。卫星侧选用轨道高度为 500 km 的低轨单层星座抽象模型，以星历驱动的可见性窗口来刻画波束覆盖随时间的迁移，并在链路层引入与窗口切换一致的会话保持与重连开销，使频段复用关系的稳定性能够对吞吐与时延产生直接影响。地面侧部署 10 个宏基站，站间距按蜂窝规则进行布设，并把用户业务的到达过程设置为具备突发性与跨小区迁移特征的混合负载，从而把海洋宽带、航空互联网以及应急通信等典型场景中热点随覆盖窗口移动的现象映射为可控的流量扰动源。

频谱资源配置以 20 MHz 带宽的共享频段为统一资源池，卫星与地面系统在同一频段上开展机会接入与可控复用，干扰约束则依靠接收端等效干扰裕度门限来执行，以保持与前述状态评估指标体系的一致性。算法对比设置选用传统静态频谱分配策略以及随机频谱分配策略作为基线，其中静态分配以固定频段规划与固定功率谱密度上限来刻画工程中常见的保守配置，随机分配则把频段选择与功率上限在候选集合内进行随机抽取，用于表征缺乏状态感知与协同推理条件下的机会接入水平。评估指标围绕频谱利用率、系统吞吐量以及端到端传输延迟展开，频谱利用率用于反映共享频段在时间与空间上的复用程度，系统吞吐量用于衡量星地链路联合承载业务的有效数据率，传输延迟则把排队、重传以及切换带来的时延开销统一纳入端到端口径，以便把跨层协同机制对路径稳定性的影响体现在可比较的量化结果中。为降低随机业务到达对单次实验的偶然性影响，仿真过程对不同随机种子进行多轮运行，并对指标进行统计汇总，以获得更接近稳态的对比结论。

表1 不同频谱共享机制的性能对比结果

机制	频谱利用率	系统吞吐量 (Mbps)	传输延迟 (ms)
静态频谱分配	60%	95	188
随机频谱分配	70%	92	170
所提动态频谱共享机制	85%	120	150

4 结语

本文面向星地融合网络的时变干扰与跨域约束，提出多源融合感知驱动的状态评估方法，并以学习型联合决策实现频段与功率上限的动态分配，进一步通过 MAC 与网络层协同提升端到端稳定性。仿真结果显示该机制在频谱利用率、吞吐量与时

3.2 性能指标分析与结果讨论

在统一的仿真参数与干扰门限约束下，不同频谱共享机制的差异主要体现为对频谱机会的把握能力以及对切换与干扰风险的抑制程度，这一差异会同步反映在频谱利用率、系统吞吐量与传输延迟的联合变化趋势中。所提机制依靠多源感知融合形成的状态向量来驱动动态分配，并把置信度与切换代价写入策略更新过程，使其在覆盖窗口更替与地面负载抬升时仍能维持较稳定的复用关系，因此频谱利用率能够提升至 85%，相较静态分配的基线结果形成 25% 的提升幅度。对吞吐量指标而言，随机分配由于缺乏对干扰裕度与链路质量的联合评估，容易在热点时段触发保守回退与重传放大效应，使有效承载速率受限；与之对照，所提机制在可行性过滤下把动作空间收敛到干扰可控区间，并在跨层协同中把频段可用时长映射为路由代价的一部分，从而把端到端路径的失配概率压低到更可接受的水平，最终系统吞吐量达到 120 Mbps，较随机分配提升 30%。传输延迟方面，静态分配在覆盖窗口迁移与负载突发条件下难以对拥塞位置进行及时调整，排队时延与切换重连的叠加会拉高端到端时延；所提机制通过把 MAC 层准入与网络层分流纳入闭环，使高时延路径的业务被更早地迁移到可用窗口更长且链路质量更稳定的组合上，因而传输延迟收敛至 150 ms，并相较静态分配降低 20%。不同机制的指标对比结果汇总如表 1 所示，结果表明该动态频谱共享机制在频谱复用效率、业务承载能力以及时延控制之间形成了更均衡的折中关系，并且在星地异构传播与时变干扰耦合条件下展现出更具工程价值的综合性能表现。

延方面取得更均衡的性能表现。后续可围绕更精细的轨道与波束模型、跨域可信协商与安全策略、以及面向多业务切片的差异化奖励设计开展扩展研究，以增强在复杂真实场景中的可部署性与稳健性。

参考文献

[1]王义学. 卫星与地面网络融合技术在广播电视中的应用[J]. 中国宽带, 2024, 20(11):82-84.

[2]韩昊宇. 面向中低轨卫星物联网的网络切片关键技术研究[D]. 导师: 冯志勇. 北京邮电大学, 2025.

[3]钮振宇. 异轨融合软件定义的高低轨卫星通信网络路由算法研究[D]. 导师: 谢永强. 军事科学院, 2024.

[4]胡延伟, 弓健, 马占书. 5G/6G移动通信星地融合频率共享技术分析[J]. 电信科学, 2024, 40(12):107-113.

[5]何立军, 贾子晔, 李世银, 汪彦婷, 王丽, 刘磊. 面向任务驱动的动态可伸缩空间信息网络架构设计与优化[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(12):4409-4421.

作者简介: 高鹏 (1983—), 男, 汉族, 本科, 研究方向为通信工程。