

基于天基干扰绘图的星地一体化系统频谱共享研究

王海涛, 茆习文, 张晨, 张更新

(南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

摘要: 针对未来星地一体化系统中新入低轨道地球卫星 (LEO) 组件的用频需求和现任地面组件聚合干扰影响的问题, 面向天基认知系统提出频谱感知和频谱数据库辅助的交织模式频谱共享方案。首先, 针对低轨认知系统节点稀疏分布属性对频谱感知和干扰绘图带来的负面影响, 提出“认知节点位置”概念。其次, 研究低轨认知系统的双门限混合频谱感知和干扰绘图的机制, 构建频谱数据库。最后, 面向多状态虚拟网络模型, 提出卫星组件上行频谱共享方案, 实现 LEO 组件和地面组件之间的同频共存工作。仿真结果表明, 所提双门限混合感知和干扰绘图能以较低密度的低轨认知节点实现高可靠性的频谱空间态势认知; 所提基于频谱数据库和交织模式的 LEO 组件协作接入方案可以实现与地面组件的频谱共享, 且不会显著增加 LEO 组件的端到端时延。

关键词: 星地一体化系统; 频谱感知; 频谱数据库; 干扰绘图; 频谱共享

中图分类号: TN927

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2024056

Study of spectrum sharing in integrated satellite-terrestrial system based on space-based interference cartography

WANG Haitao, MAO Xiwen, ZHANG Chen, ZHANG Gengxin

School of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

Abstract: To deal with the spectrum demand of new low earth orbit satellite (LEO) communication component and the aggregate interference generated by incumbent terrestrial component in future integrated satellite-terrestrial system, a novel space-borne spectrum-sensing (SS) and spectrum-database assisted spectrum-sharing scheme with interweave model for LEO cognitive system was proposed. Firstly, considering the adverse impact of the sparse distribution of LEO cognitive node (CN) on SS and interference cartography (IC), the concept of cognitive node position was put forward. Secondly, the spectrum-DB was built based on dual-threshold hybrid SS and IC with LEO cognitive system. Finally, a spectrum-sharing scheme with multi-state virtual network (MSVN) was designed, which could make the coexistence between terrestrial component and uplink of LEO component available. Simulation results indicate that the spectrum-database approach based on the proposed dual-threshold hybrid SS and IC can support the spectrum awareness of high reliability with relatively low-density LEO CN, and that the proposed cooperative access scheme based on spectrum-database and interweave model for LEO component can share spectrum with terrestrial one, but not significantly increase the end-to-end delay of LEO component.

Keywords: integrated satellite-terrestrial system, spectrum sensing, spectrum database, interference cartography, spectrum sharing

收稿日期: 2023-06-08; 修回日期: 2023-09-06

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点项目 (No.U21A20450)

Foundation Item: Key Program of the Regional Innovation and Development Joint Fund of the National Natural Science Foundation of China (No.U21A20450)

0 引言

随着人们对全球性（特别是偏远地区、海空区域）互联网服务的需求日益增长，利用卫星网络与地面网络在覆盖范围和移动接入等方面的互补性，建设覆盖全球的星地一体化信息网络，已经成为未来互联网的发展趋势^[1]。无线频谱是星地一体化信息网络的重要资源之一。目前，在频谱分配的标准范例中，一些服务拥有排他性的频谱资源使用权，从而导致新的无线服务业务缺少可用频谱。同时，一些研究表明，这些拥有专属频谱使用权的业务并未充分利用相应频谱资源。因此，频谱资源不足和频谱利用效率低的矛盾是目前亟待解决的问题。现代星地一体化信息网络具有海量随机宽带接入的迫切需求，频谱共享技术提供了若干有潜力的解决方案，从而有效缓解了频谱资源紧张和频谱利用率低的矛盾。Globalstar 已经提出并测试了一种地面低功率通信服务类型，使 Wi-Fi 类型的地面无线服务能够与卫星通信服务共享 2.4 GHz 频段，同时保护卫星通信服务免受有害干扰^[2]。链路预算分析和仿真显示，针对长期演进（LTE, long term evolution）协作场景，星地系统之间存在频谱共享的可能^[1-2]。

为了在星地一体化信息网络中实现星地组件的频谱共享，需要严格控制它们之间的干扰。频谱态势认知是频谱共享的要素之一^[3-4]。目前，频谱态势认知主要依靠频谱感知（SS, spectrum-sensing）和频谱数据库技术。频谱感知的最大优势在于不依赖先验知识而自主提供频谱占用信息^[5-8]。但是，考虑到无线通信中经常出现的遮蔽效应，仅采用频谱感知技术可能导致干扰源漏检，从而无法保证通信服务质量（QoS, quality of service）^[9-10]。而且，频谱感知技术所得到的结果受限于感知节点所在位置，无法提供连续大范围的频谱态势认知。另外，在某些特定场景下，频谱感知的工程实现存在客观困难^[11]。目前，双门限（阈值）方法是频谱感知领域的研究热点之一，它可以有效减少噪声不确定性带来的负面影响，相关研究聚焦于利用信噪比混合加权、马尔可夫模型或信任度评估等辅助方法增强双门限频谱感知的性能。

频谱数据库技术曾被视为频谱态势认知的最佳方法，但是它需要知识库提供用频设备的详细信息，这对于涉密部门来说是不可接受的，而且它在高动态复杂电磁环境中也存在一定的局限性^[11]。近年来，

由工业驱动而提出的频谱共享方案，例如，美国联邦通信委员会提出的频谱接入系统（SAS, spectrum access system）^[11-12]尝试整合频谱感知和频谱数据库技术，以获得灵活、广域和可信的频谱态势认知效果。目前，频谱数据库的研究主要集中在对电磁波传播环境（如地形、地表覆盖物、遮挡物等）进行精确建模，以通过先验知识库准确计算出干扰水平的空间分布。作为一种典型的基于频谱感知的频谱数据库技术，干扰绘图（IC, interference cartography）技术利用特定区域内多个认知节点的频谱感知结果绘制干扰地图并且提供干扰的空间描述^[13-14]。在地面通信领域中，干扰绘图技术已经得到广泛的研究和应用。相较于地面网络，卫星通信的覆盖区域更为广阔。因此，对于卫星通信，精确描述干扰的广域空间分布态势具有更加重要的意义^[15]。目前，干扰绘图的研究主要集中在绘图算法和工程应用两方面，前者包括复杂空间插值和深度学习等绘图支持技术，后者则包括干扰绘图在频率重用和数据挖掘等方面的实际应用。

星地一体化信息网络的频谱共享可以分为非协作和协作场景^[16-24]。在非协作场景中，工作于共享频段的卫星和地面组件是彼此独立的 2 个系统^[16-17]；在协作场景中，卫星组件利用其广域覆盖的特点作为中心控制器，指导星地系统的用频策略，实现 2 个组件以频谱共享的方式提供服务^[18-19]。频谱共享一般分为交织、底衬和覆盖 3 种工作模式^[24-25]。在交织模式中，当且仅当主要用户不占用特许频段的时候，辅助用户才可以利用该频段进行通信传输；在底衬模式中，只要辅助用户满足主要用户的干扰限制，就可以共用特许频段同时工作；覆盖模式则具有先进的干扰消除技术、编码方式和传输策略等主要特征。目前，最有潜力的频谱共享技术包括波束成形、跳波束、频率/功率分配等^[14]。针对星地一体化信息网络的频谱共享，已有研究聚焦于 L、S、C 等多个频段，相关内容涵盖禁止域规划、认知无线电、功率控制（信道分配）、自适应天线和小蜂窝等课题。

在星地一体化信息网络中，由于卫星组件接收端的信号水平较弱，因此其链路对来自地面组件的干扰非常敏感。为了保证卫星链路可用性，频谱共享系统应该能够监视地面组件的干扰态势并且及时调整频谱共享方案。本文面向星地一体化信息网络中新部署的低轨道地球卫星（LEO, low earth orbit

satellite) 网络用频需求, 提出基于天基干扰绘图和交织模式的星地系统频谱共享方案, 尝试利用低轨认知系统实现对地面组件聚合干扰进行高可靠性干扰绘图, 并根据其结果实现星地系统的频谱共享。与传统的陆基干扰绘图相比, 天基干扰绘图可以更好地实现全球广域频谱态势认知。而且, 所提基于高效协作接入体制的星地系统频谱共享方案可以在不影响地面组件正常工作的情况下减少低轨网络端到端时延。

针对主要技术挑战, 本文工作主要聚焦以下研究内容。首先, 协作频谱感知精度、干扰绘图可靠性与参与其中的认知节点空间密度直接相关, 本文利用 LEO 的高速运动特点, 提出低轨“认知节点位置 (CNP, cognitive node position)”概念, 构造空间密度可控的虚拟认知节点集合, 使高质量的天基频谱感知和干扰绘图成为可能^[26]。其次, 本文通过定义“检测模糊状态”, 研究新型双门限混合频谱感知方法, 在确保高度不确定性噪声环境中频谱感知性能的同时, 兼顾低轨认知系统的设计复杂度。再次, 为了有效指导星地系统频谱共享的系统设计, 定义干扰绘图的空域可靠性指标 (空间检测比率和空间虚警比率), 并构造相应的空域接收机工作特性曲线 (SROC, spatial receiver operating characteristic), 进而结合低轨认知节点位置的概念, 利用稀疏分布的低轨认知卫星, 获得高可靠性的频谱数据库。最后, 在利用天基频谱感知和干扰绘图获得高可靠性频谱数据库的基础上, 本文尝试设计基于交织模式和高效协作接入的星地系统频谱共享方案, 通过停用地面组件强干扰区域内的低轨通信节点, 转而利用多状态虚拟网络 (MSVN, multi-state virtual network) 模型实现高效信息传递^[27-32]。

1 应用场景

在强集成的星地一体化信息网络中, 共享频谱的地面和卫星组件采用双模用户终端^[3,20]。本文参考基于协作的频谱共享应用场景, 其中地面和卫星组件分别为现用户 (IU, incumbent user) 和共同主要用户 (CU, co-primary user)。星地一体化信息网络存在组件内和组件间两类干扰, 本文考察地面和卫星组件之间的同频干扰, 它与这 2 个组件的双工组合方式有关^[19]。卫星组件很少采用时分双工 (TDD, time division duplexing) 组合方式, 当它采用频分

双工 (FDD, frequency division duplexing) 组合方式时, 地面组件可能存在 4 种双工模式: 地面 FDD 正向模式、地面 FDD 反向模式、地面 TDD 下行模式和地面 TDD 上行模式。因此, 星地组件之间通常存在 4 种双工组合方式。本文以卫星 FDD-地面 FDD 正向双工的星地系统为研究对象, 如图 1 所示。在这种双工组合方式中, 存在 4 种组件间的同频干扰。其中, 干扰①是地面上行链路对卫星上行链路接收端所产生的干扰; 干扰②是卫星下行链路对地面下行链路接收端所产生的干扰; 干扰③是地面下行链路对卫星下行链路接收端所产生的干扰; 干扰④是卫星上行链路对地面上行链路接收端所产生的干扰。

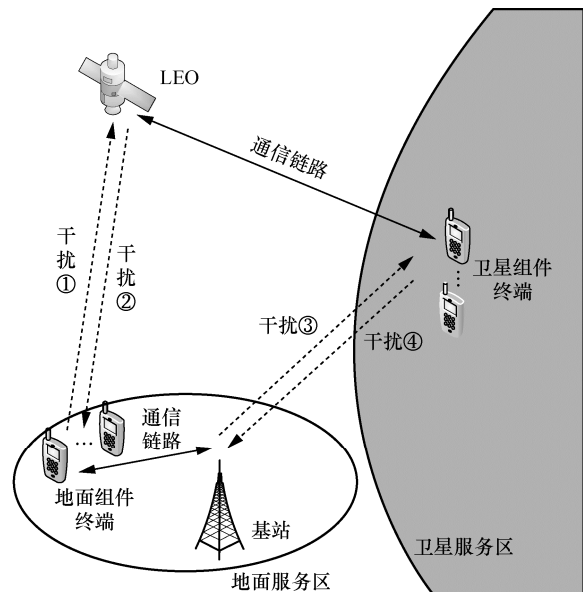


图 1 卫星 FDD-地面 FDD 正向双工的星地系统

通过合理设计系统, 可以有效控制干扰②~干扰④的影响。但是, 干扰①, 即地面组件上行链路对卫星上行链路接收端 (卫星) 形成的聚合干扰的影响较严重^[24]。虽然控制地面组件终端用户数量可以显著降低该聚合干扰, 但是这样做往往是不现实的, 因为地面组件具有更好的性价比、稳健性和实时性, 大量用户仍倾向于采用该组件进行通信。本文以卫星 FDD-地面 FDD 正向双工组合方式为参考, 针对地面组件上行链路对卫星组件上行链路所产生的聚合干扰, 研究基于低轨认知系统的频谱感知、干扰绘图和频谱共享技术。需要指出的是, 本文所述工作可以推广到其他星地组件双工组合方式的应用中。

2 天基频谱感知和干扰绘图

在低轨认知系统中, 假设每颗认知卫星都装配有频谱感知器并可以自主进行干扰检测。作为一个备选方案, 低轨认知卫星可以将检测结果发送到地面融合中心进行干扰绘图。但是, 低轨系统的噪声在时间和空间上具有高度不确定性, 因此诸如能量检测器 (ED, energy detector) 之类的常用频谱感知器性能可能会严重下降。目前已经证明, 对于高度不确定性的噪声环境, 软融合协作频谱感知方法的性能更为稳健^[3-4]。

另一方面, 地面通信领域的相关研究表明, 实现高可靠性干扰绘图所需的认知节点 (CN, cognitive node) 密度通常在 1 CN/km^2 量级^[5,8]。对于协作频谱感知, 为了获得特定地点的干扰检测结果, 希望参与频谱感知的认知节点与该地点在空间上尽量接近。而在天基场景中, 即使采用构建中的低轨巨型异构认知系统, 认知节点的分布仍显稀疏 (10^{-4} CN/km^2 量级)。因此, 低轨系统的认知节点稀疏分布属性会严重影响协作频谱感知精确度和干扰绘图可靠性。鉴于此, 本文引入“认知节点位置”的概念, 以实现认知节点稀疏分布条件下的低轨协作频谱感知和干扰绘图。

2.1 认知节点位置

在协作频谱感知和干扰绘图的时间分辨率内, 低轨认知卫星高速运动, 但在采集数据并形成一次检测统计量的时候, 近似认为其处于静止状态 (类似于无线电探测系统和合成孔径雷达成像原理中的“停-走-停”概念^[26]), 由此在相应位置上形成一个虚拟的认知节点。所谓“认知节点位置”, 就是低轨认知卫星采集信号并且形成单次检测统计量时所处的不同空间位置。对于能量检测器, 构造第 i 个认知节点位置检验统计量 X_i 为

$$X_i = \frac{2}{N_0} \int_0^T [r(t)]^2 dt \quad (1)$$

其中, N_0 为噪声功率谱密度, T 为积累时间, $r(t)$ 为接收信号。这些虚拟认知节点的密度和位置是可控的, 有利于改善天基协作频谱感知和干扰绘图的性能。在频谱感知和干扰绘图所需的时间分辨率内, 形成认知节点位置的有限集合, 认知节点位置的最小间距是单组数据采集和统计量计算之间卫星移动的距离。

如果低轨系统结合认知节点位置概念而完全采用协作感知策略, 那么地面融合中心需要具备很强的调度、评估和预测能力, 以确定关于特定 LEO 及其认知节点位置的检测统计量调取方案。同时, 频谱认知系统还需要具备存储大量认知节点位置统计量的能力, 以备地面融合中心调取。因此, 基于认知节点位置检验统计量的低轨协作频谱感知方案会显著增加频谱认知系统的工程实现复杂度。鉴于此, 本文提出一个新型双门限混合频谱感知方法。

2.2 双门限混合频谱感知

无线信道的噪声不确定度 ρ 为

$$\rho = \frac{\hat{\sigma}_w^2}{\sigma_w^2} \in \left[10^{-\frac{A}{10}}, 10^{\frac{A}{10}} \right], \quad A \geq 0 \quad (2)$$

其中, σ_w^2 和 $\hat{\sigma}_w^2$ 分别是噪声方差的标称值和真实值, A 是噪声的最大不确定度 ($10 \lg \rho$ 的上界)。 $10 \lg \rho$ 在区间 $[-A, A]$ 上服从均匀分布, 双门限混合频谱感知方法的高低门限 λ_H 和 λ_L 分别为

$$\begin{cases} \lambda_L = \left(\sqrt{\frac{2}{N_{\text{obs}}} Q^{-1}(P_{\text{fa}}^d)} + 1 \right) \frac{1}{\rho} \sigma_w^2 \\ \lambda_H = \left(\sqrt{\frac{2}{N_{\text{obs}}} Q^{-1}(P_{\text{fa}}^d)} + 1 \right) \rho \sigma_w^2 \end{cases} \quad (3)$$

其中, $Q(\cdot)$ 为标准高斯互补分布函数, N_{obs} 和 P_{fa}^d 分别为低轨认知卫星干扰检测 (频谱感知) 所采用的样本数量和虚警概率^[5]。本文考察干扰检测的频谱信道模糊状态^[6], 将干扰检测统计量 X_i 与 2 个检测门限值进行比较, 得到判决为频带占用 (存在干扰, 用“1”表示)、频带空闲 (不存在干扰, 用“0”表示) 或者模糊状态 (用“S”表示), 即

$$Y_i = \begin{cases} 1, X_i \geq \lambda_H \\ \text{S}, \lambda_L \leq X_i < \lambda_H \\ 0, X_i < \lambda_L \end{cases} \quad (4)$$

针对星地一体化信息网络应用场景中高度不确定性的噪声, 本文用 2 个检测门限定义干扰检测的模糊状态。由于低轨认知卫星的稀疏分布特性会影响针对特定地点的协作感知性能, 因此在运用时选择在空间上与该地点尽量接近的认知节点位置参与双门限混合频谱感知。如果选定的单个认知节点位置所产生的检验统计量处于检测模糊状态之外, 那么意味着 LEO 在该节点位置能够进行可信

的单节点能量检测。能量检测的判决表达式为

$$\begin{cases} H_1: X_i \geq \lambda_H \\ H_0: X_i < \lambda_L \end{cases} \quad (5)$$

反之，如果选定的低轨认知节点位置所产生的检验统计量处于检测模糊状态内，那么低轨认知系统发送该认知节点位置和邻近若干认知节点位置的干扰统计量至地面融合中心以执行等增益合并（EGC, equal gain combination）的协作频谱感知^[7]。等增益合并频谱感知的判决表达式为

$$\begin{cases} H_1: \sum_{i=1}^N \frac{X_i}{N} \geq \lambda_{\text{EGC}} \\ H_0: \sum_{i=1}^N \frac{X_i}{N} < \lambda_{\text{EGC}} \end{cases} \quad (6)$$

其中， N 为参与协作感知的认知节点位置数量， λ_{EGC} 为等增益合并频谱感知算法的门限。最后，融合中心整合相关认知节点位置的频谱感知结果并执行干扰绘图。

单节点能量检测在工程实现上较简单。在所提出的双门限混合频谱感知中，针对处于非模糊状态的认知节点位置采用能量检测，从而降低了系统存储、传输和调度的设计难度（相较于完全采用协作感知的情形）；同时，针对处于模糊状态的认知节点位置采用协作感知，以确保可用的频谱感知性能。所提的双门限混合频谱感知方法通过综合运用传统单节点能量检测和多节点协作感知，可以兼顾低轨认知系统的频谱感知性能和工程实现复杂度。

2.3 低轨干扰绘图

本文借鉴大多数认知无线电系统的设计思路，为所提频谱认知系统配置稳健的星地认知专属链路，以便于将感兴趣区域内低轨认知节点位置特定集合所对应的干扰检测结果及时汇聚到地面融合中心。同时，假设通过诸如星历定位等定位方法，融合中心可以获得这些认知节点位置的精确信息^[9]。据此，融合中心对分散的干扰检测结果进行干扰绘图，以它们的空间位置为索引，详细描述区域性（而非单个位置点）的干扰态势^[10-11]。干扰绘图的一般流程如下：首先，确定目标区域和频段（感兴趣的区域和频段）；然后，进行多次多处的测量，获得准确干扰测量数据；最后，采用精确的空间插值算法（如最近邻法、反距离加权法、克里金法等）构建干扰地图。

为了定量评估干扰绘图的空间可靠性并且有效指导星地频谱共享系统设计，引入2个性能指标，即空间检测概率 P_d^S 和空间虚警概率 P_{fa}^S ，计算式如下

$$\begin{cases} P_d^S = \text{prob}(\bar{\Delta} \geq \xi | I_r \geq I_{\max}) \\ P_{fa}^S = \text{prob}(\bar{\Delta} > \xi | I_r < I_{\max}) \end{cases} \quad (7)$$

其中， $\bar{\Delta}$ 为LEO在感兴趣区域内认知节点位置上所感知的能量向量， ξ 为干扰绘图所选择的门限， I_r 为接收到的干扰水平， I_{\max} 为最大可容忍干扰水平。 $I_r \geq I_{\max}$ 和 $I_r < I_{\max}$ 对应的区域分别是存在干扰和无干扰的区域， $\bar{\Delta} \geq \xi$ 和 $\bar{\Delta} < \xi$ 对应的区域分别是检测结果为存在干扰和无干扰的区域。

接下来定义 P_d^S 和 P_{fa}^S 的近似版本，即空间检测比率 F_d^S 和空间虚警比率 F_{fa}^S ，计算式如下

$$\begin{cases} F_d^S = \frac{M_{\text{CNP}}^C}{N_{\text{CNP}}^{I_r \geq I_{\max}}} \\ F_{fa}^S = \frac{M_{\text{CNP}}^F}{N_{\text{CNP}}^{I_r < I_{\max}}} \end{cases} \quad (8)$$

其中， M_{CNP}^C 是正确检测为存在干扰的认知节点位置数量， $N_{\text{CNP}}^{I_r \geq I_{\max}}$ 是位于干扰区域内的认知节点位置数量， M_{CNP}^F 是错误检测为存在干扰的认知节点位置数量， $N_{\text{CNP}}^{I_r < I_{\max}}$ 是位于无干扰区域内的认知节点位置数量。因此，从干扰绘图的空间观点，空间检测比率 F_d^S 表示正确检测为存在干扰的区域占有干扰区域的比例，空间虚警比率 F_{fa}^S 表示错误检测为存在干扰的区域占无干扰区域的比例。

被检测为存在干扰的认知节点位置数量 M_{CNP} 取决于所采用频谱感知方法的检测性能，因此，空间检测概率 P_d^S 和空间虚警概率 P_{fa}^S ，以及它们的近似版本空间检测比率 F_d^S 和空间虚警比率 F_{fa}^S 依赖于所采用频谱感知方法的检测性能（即虚警概率 P_{fa}^d 和检测概率 P_d^d ）和参与干扰绘图的低轨认知节点位置数量 $N_{\text{CNP}}^{\text{IC}}$ ，表示为

$$\begin{cases} F_d^S = f_{d^s}(P_{fa}^d, P_d^d, N_{\text{CNP}}^{\text{IC}}) \\ F_{fa}^S = f_{fa^s}(P_{fa}^d, P_d^d, N_{\text{CNP}}^{\text{IC}}) \end{cases} \quad (9)$$

其中， $f_{d^s}(\cdot)$ 和 $f_{fa^s}(\cdot)$ 分别表示空间检测比率和空间虚警比率的函数形式，而且难以用数学解析形式来表示，但由式(9)可知，通过恰当配置频谱感知器和

设置参与干扰绘图的认知节点位置数量, 就可以得到所需的干扰绘图空间可靠性。

3 频谱共享方案

3.1 问题定义

本文参考基于协作接入的星地一体化信息网络频谱共享应用场景, 地面组件和新入 LEO 组件分别作为现用户和共同主要用户, 卫星组件以频谱共享方式与地面组件共存。当地面组件在特定区域内产生聚合性强干扰的时候, 可能影响该区域内部分低轨系统用户的上行接入。令 $I_X \in \{0,1\}$ 为事件指标, 其中, $X \in \{Aggr, Acce\}$ 分别表示特定区域内“存在地面组件聚合干扰 (Aggr)”和“低轨上行接入 (Acce)”两类事件, $I_X = 1$ 和 $I_X = 0$ 分别表示事件 X 存在和不存在。如果 $I_{X=Aggr} = 1$ 的同时有 $I_{X=Acce} = 1$, 那么地面组件将干扰低轨系统的上行接入。

3.2 频谱共享模式

通信系统的频谱共享通常采用底衬、覆盖或交织 3 种工作模式。对于所参考的星地一体化频谱共享应用场景, 本文基于前述的天基干扰绘图而得到的广域频谱数据库, 采用交织模式实现星地组件的频谱共享。在特定区域内, 如果地面组件未产生聚合干扰 (或所产生的聚合干扰未超过可容忍水平), 那么卫星用户可以采用虚拟节点 (VN, virtual node) 模型上行接入特定 LEO^[27-28]; 否则, 停用该卫星的上行链路, 转而利用多状态虚拟网络模型选择卫星节点进行接入服务^[29-30]。多状态虚拟网络由若干个子网络组成, 每个子网络又由若干虚拟卫星节点、覆盖区内相邻虚拟卫星节点之间的链路集合, 以及虚拟卫星节点与地面节点之间的链路集合组成。每个虚拟子网络对应着一个特定状态, 并在若干时段内保持有效。面向多状态虚拟网络拓扑模型, 存在软性和半软性的 2 种切换方法。对于地面终端能够与多个中继卫星进行通信的情形, 可以采用软性切换方法。其中, 在一个覆盖区内, 无论是在卫星切换还是星地通信期间, 地面终端都可以对多颗卫星建立多个连接。对于地面终端仅能与一个中继卫星进行通信的情形, 可以采用半软性切换方法。其中, 虽然在一个覆盖区内存在多颗卫星, 但是仅有一颗卫星能够为地面终端服务。对于半软性切换, 为了避免数据重发的问题, 待启动的卫星

需要具备数据缓存功能, 而且参与切换的卫星之间应实现良好同步。

3.3 频谱共享架构

面向星地一体化信息网络, 设计基于交织模式的频谱共享架构, 如图 2 所示, 它由频谱认知系统、聚合干扰频谱数据库、认知推理机和接入切换控制器等功能模块组成, 其中, 地面融合中心、聚合干扰频谱数据库和认知推理机位于地面。当事件指标 $I_{X=Aggr}$ 分别为 1 或 0 时, 该频谱共享方案能够确保 $I_{X=Acce}$ 为 0 或 1, 从而减轻地面组件聚合干扰对 LEO 组件的影响, 实现星地组件同频共存。

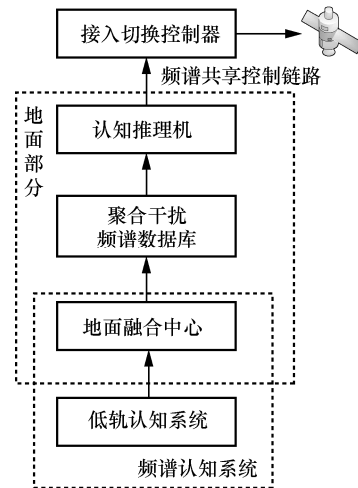


图 2 基于交织模式的频谱共享架构

频谱认知系统由低轨认知系统和地面融合中心组成。在星地共享频段上, 频谱认知系统通过感知技术观察地面组件所产生的干扰, 并利用干扰绘图技术形成聚合干扰频谱数据库。需要指出的是, 频谱态势认知具有时效性, 因此地面融合中心存在针对频谱数据库更新的实时性要求; 同时, 考虑到干扰绘图的空间可靠性, 认知节点位置应保持一定的分布密度, 从而导致相应的计算复杂度。为此, 除了配置稳健的星地认知专属链路 (如 2.3 节所述) 以及及时传送认知数据, 还需要通过增加融合中心算力等途径解决实时性问题。根据所得频谱数据库, 认知推理机确定受到干扰的卫星, 并形成上行接入卫星的切换方案, 然后通过频谱共享专属控制链路将切换指令发送至相关 LEO, 并由这些卫星上的接入切换控制器启动或停止各自的上行链路。

所提星地组件频谱共享方案的最大优势在于充分利用现代 LEO 网络的协作传输能力而不需要显著增加在轨处理负担。但是, 如果具有最短路径

的 LEO 位于地面组件强聚合干扰区域中，那么停用该卫星节点上行链路将影响端到端时延。因此，在所提频谱共享方案中引入半软性多状态虚拟网络模型，选定干扰环境下的最优上行接入 LEO，以避免过高的端到端时延。与传统的虚拟节点模型相比，多状态虚拟网络模型克服了物理卫星与虚拟节点之间单点对应的局限性，由多个物理卫星对应一个虚拟节点，采用全局模式的切换机制，实现低轨系统的高效协作接入和传输^[29-30]。

4 数值结果

本文针对星地一体化信息网络具体应用场景，设计数值仿真实例，分别考察所提双门限混合频谱感知、频谱感知辅助的干扰绘图和面向协作接入的频谱共享方案的性能。简单起见，本文假设“认知节点位置”在空间上服从均匀分布。计算机仿真所采用的星地一体化信息网络应用场景主要参数如表 1 所示^[3,21-22]。

表 1 星地一体化信息网络应用场景主要参数

参数	数值
工作频段/GHz	2.6 (S 频段)
轨道高度/km	1 200
采样率 (频谱感知) /MHz	10
噪声温度/K	290
CNP 数量 (协作感知)	5
能量检测样本数量	1 024
虚警概率 (混合频谱感知)	0.001
可容忍干扰门限	噪声基底以上 7 dB
卫星有效全向辐射功率/dBW	42.7
卫星天线直径/m	8.1
接入技术 (地面组件)	FDMA
部署区域 (地面组件)	城市
基站天线 (地面组件)	三扇区
终端模式	双模 (卫星+地面)
终端天线	全向
终端外形	手持型
技术标准	LTE
双工模式	FDD 正向

4.1 混合频谱感知

首先，针对不同不确定度的噪声环境，验证基于双门限混合频谱感知方法的性能。当噪声不确定度 $\rho=1.01$ 和 2 时，所提频谱感知方法（用 Hybrid ED&EGC 表示）和其他几种典型频谱感知方法的接

收机工作特征曲线分别如图 3 和图 4 所示，对比方法包括单节点能量检测（用 ED 表示）、K-秩（K-Order）硬融合感知和 EGC 软融合感知。需要指出的是，在常用的硬融合感知中，K-秩方法具有较好的频谱感知性能^[8]。另外，在这几种频谱感知方法中，单节点能量检测的计算复杂度最低，且计算量主要与参加运算的采样点数量有关；协作感知的计算复杂度不仅与各节点参加运算的采样点数量有关，还与节点数量等因素有关。特别地，EGC 方法的判决门限通常不存在解析表达式，需要采用数值方法进行求解，计算量较大。本文所提双门限混合频谱感知方法的计算复杂度介于单节点能量检测和协作感知之间。

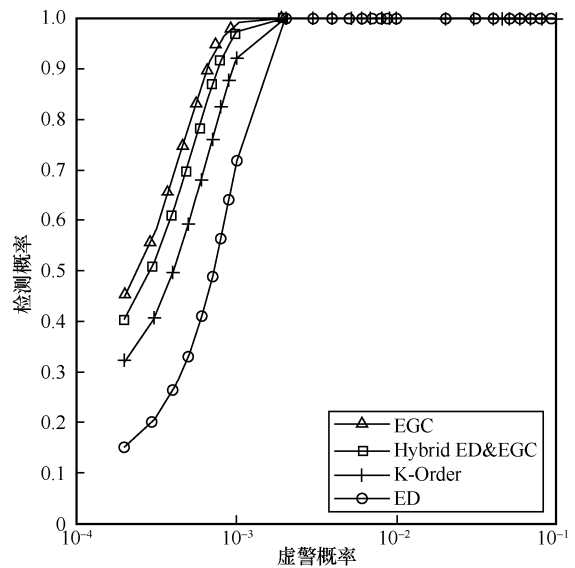


图 3 $\rho=1.01$ 时，不同频谱感知方法的接收机工作特征曲线

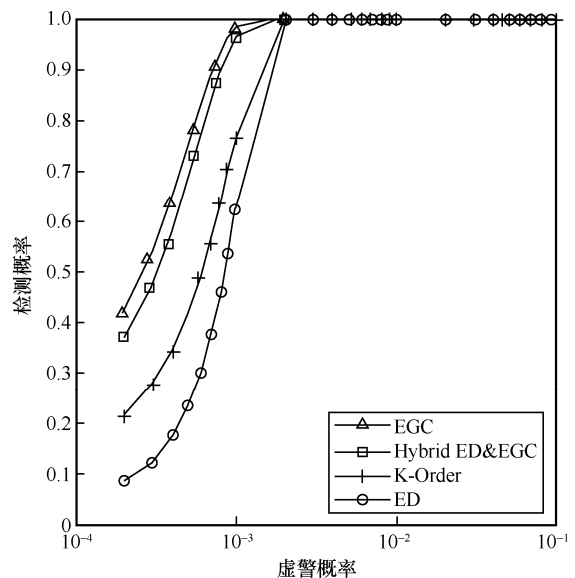


图 4 $\rho=2$ 时，不同频谱感知方法的接收机工作特征曲线

由图 3 和图 4 可知，在不同不确定度的噪声环境中，所提混合频谱感知的性能均优于单节点能量检测和 K-秩硬融合，且与 EGC 软融合的感知性能接近。另外，当噪声不确定度增加 (ρ 从 1.01 增加到 2) 时，单节点能量检测和 K-秩方法的性能严重下降，而所提方法则保持了稳健的频谱感知性能。

4.2 干扰绘图

本节考察地面组件出现聚合干扰，分析低轨认知系统执行干扰绘图的空间可靠性。假设混合频谱感知虚警概率 $P_{fa}^d = 10^{-3}$ ，且在感兴趣的区域 ($30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$) 内存在 N_{CNP}^{IC} 个认知节点位置。干扰绘图中空间检测比率 F_d^S 、空间虚警比率 F_{fa}^S 与低轨认知节点位置数量 N_{CNP}^{IC} 的关系如图 5 所示。空间检测比率随着认知节点位置数量的增加而增加，而且空间虚警比率从 0.1 下降到约 5×10^{-3} 。如果 $N_{CNP}^{IC} = 2000$ (对应的认知节点位置的空间密度约为 2 CNP/km^2)，那么可以获得具有较高空间可靠性 ($F_d^S \approx 0.9$ 、 $F_{fa}^S \approx 5 \times 10^{-3}$) 的干扰绘图结果。

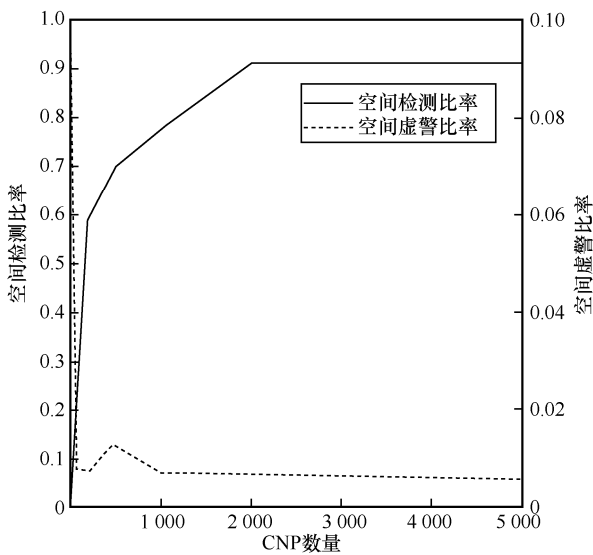


图 5 干扰绘图空间可靠性与低轨认知节点位置数量的关系

针对不同数量的认知节点位置，干扰绘图空间虚警比率与频谱感知虚警概率的关系如图 6 所示。由图 6 可知，干扰绘图空间虚警比率是频谱感知虚警概率的线性函数，且这种线性关系独立于低轨认知节点位置的数量值。针对不同数量的认知节点位置，干扰绘图空间接收机工作特性曲线如图 7 所示。由图 7 可知，在 $30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$ 的区域中，即

使只有 900 个认知节点位置，也可以得到高可靠性的干扰绘图。换言之，即使干扰绘图采用较低数量和密度的认知节点位置，也可以准确展示空间干扰态势。根据图 6 和图 7 可知，如果用户需要保证频谱利用率(即干扰绘图空间虚警比率不大于某特定值)，那么所设计的频谱感知器虚警概率也应不大于该值；如果用户需要保证干扰保护效果(即干扰绘图空间检测比率不小于某特定值)，那么可以通过考察认知节点位置数量和空间接收机工作特性曲线来确定所需的干扰绘图空间虚警比率和频谱感知器虚警概率。

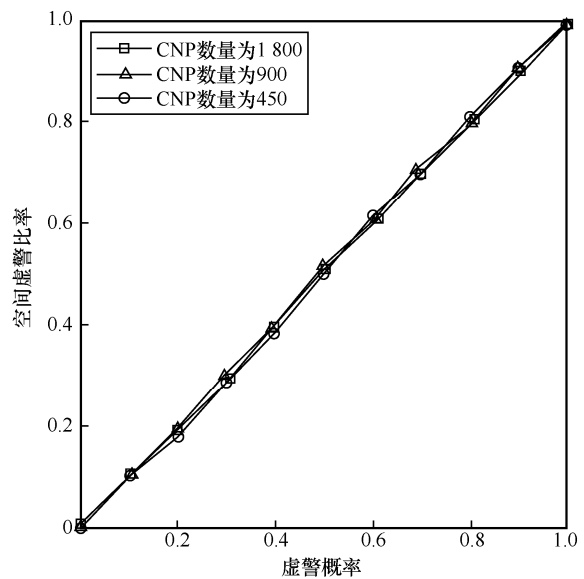


图 6 干扰绘图空间虚警比率与频谱感知虚警概率的关系

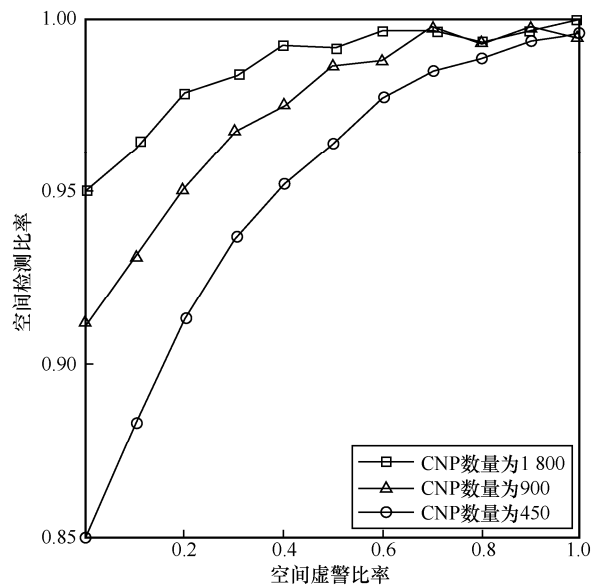
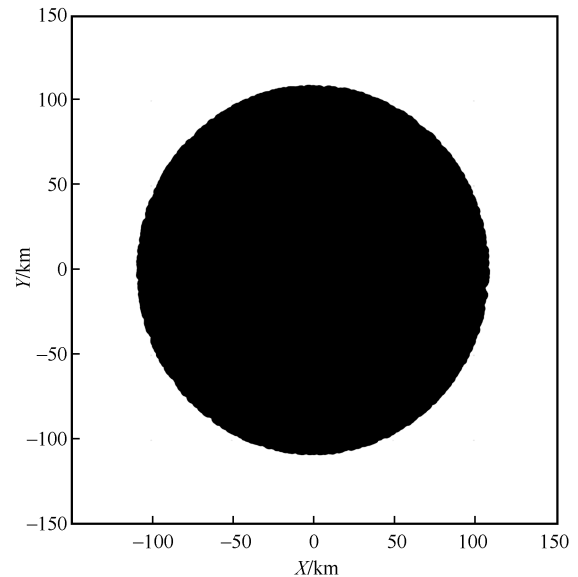


图 7 干扰绘图空间接收机工作特性曲线

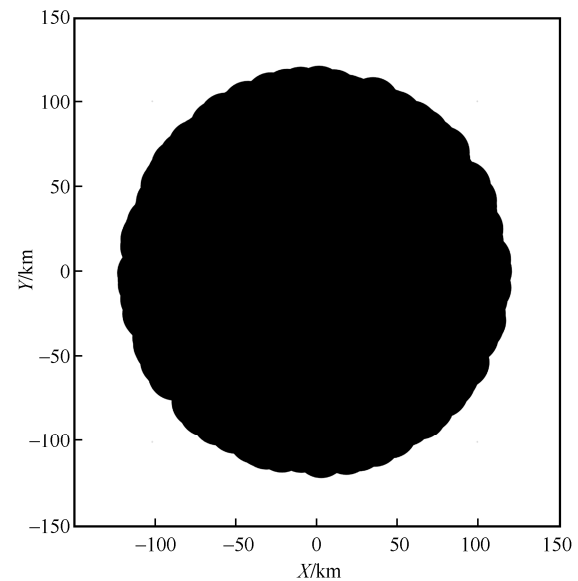
本文给出星地系统共存场景下所提天基干扰绘图的一个实例，地面组件聚合干扰态势的理论建模和干扰绘图如图 8 所示。对于地面组件，假设在以坐标 (0,0) 为中心、半径为 15 km 的城镇范围内，存在约 240 个服从泊松分布的用户终端同时进行上行通信，对卫星组件上行链路形成聚合性干扰区域[32]。对于卫星组件，假设该城镇上空 300 km×300 km 的区域上均匀随机分布着 $N_{\text{CNP}}^{\text{IC}} = 9 \times 10^4$ 个低轨认知节点位置(对应的认知节点位置的平均空间密度为 1 CNP/km²)，它们是在干扰绘图的时间分辨率内认知卫星在不同时刻形成的虚拟认知节点。通过场景建模精确计算感兴趣区域内每个位置点的干扰强度，并将其与可容忍的门限进行比较，形成二值检测图(即干扰态势的理论建模情况)，如图 8(a)所示。对应地，采用本文所提混合频谱感知和干扰绘图技术，通过数值方法得到的干扰绘图结果如图 8(b)所示。其中，黑色(数值为 1)代表聚合干扰超过可容忍门限(频带占用)，白色(数值为 0)代表干扰未超过可容忍门限(频带空闲)。从图 8 可以看出：1) 所得的干扰绘图结果与理论建模情况吻合较好，因此，本文所提的频谱态势认知方法能够以高空间可靠性确定地面组件聚合干扰态势；2) 即使只有少量的地面组件用户终端在较小区域上进行上行通信，也会在较大范围内产生不可忽略的聚合干扰。干扰区域与星地一体化信息网络的场景和系统配置有关，因此，利用先进的无线电认知技术实时获取可靠的干扰态势地图是有必要的。

4.3 端到端时延

本节中，采用图 8 所示场景，通过 MATLAB 数值仿真，考察采用第 3 节所提频谱共享方案得到的低轨系统协同接入端到端时延的性能改善。这里可分为 4 种情况进行讨论，即在有或无聚合干扰的场景中是否采用了所提方案。在无聚合干扰的场景中，采用多状态虚拟网络模型(也即本文方案)进行接入传输等效于传统虚拟节点模型；如果存在聚合干扰且采用传统虚拟节点模型进行协作接入传输，那么接入传输工作将长时间中断、端到端时延过大。因此，这里只分析其他 2 种情况的性能曲线，如图 9 所示。其中，虚线针对不存在地面组件聚合干扰且采用传统虚拟节点技术进行协作接入传输的情况，实线针对存在聚合干扰且采用多状态虚拟网络技术进行协作接入传输的情况。在本节数值实验中，假设链路信道速率为 1 Mbit/s，业务数据包长度为 1 KB，分组到达率为 500~10 000 packet/s。



(a) 地面组件聚合干扰态势的理论建模结果



(b) 地面组件聚合干扰态势的干扰绘图结果

图 8 地面组件聚合干扰态势的理论建模和干扰绘图结果

由图 9 可见，对于上述 2 个应用场景，卫星组件上行端到端时延随着分组到达率(星地通信时段内已服务的用户终端数量与服务时间的比值)的增加而增加。而且，当存在地面组件聚合干扰的时候，采用所提频谱共享方案，端到端时延仅增加约 6%。此时，如果不采用所提频谱共享方案，那么将产生较大的端到端时延而无法实现卫星组件上行通信。对于非实时服务，如文件和视频下载，所提频谱共享方案是合适的。例如，如果在无地面组件聚合干扰的情况中一个视频上传任务可以在 40 s 内完成，那么在有聚合干扰的情况下采用所提频谱共享方案进行传输，只会产生约 2.4 s 的传输时延，这对于用户来说是可以接受的。

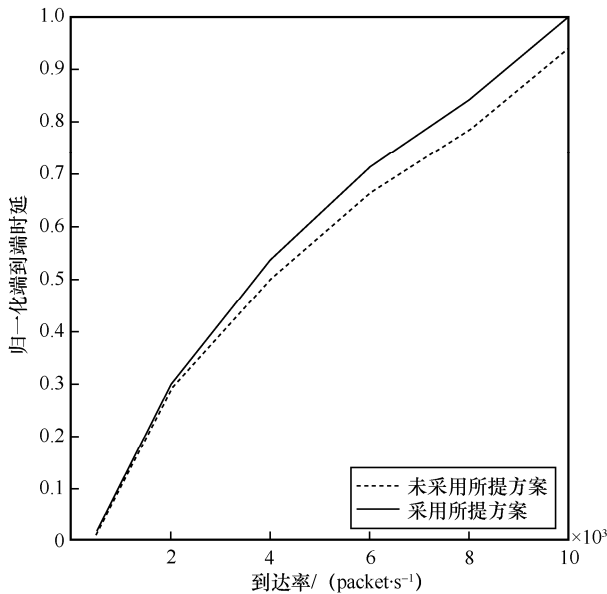


图 9 端到端时延与到达率的关系

5 结束语

作为下一代网络的发展方向,星地一体化信息网络有效整合了星地组件的互补优势,可以提供全球性和全天时的高质量通信服务。频谱短缺和频谱利用率低是星地一体化信息网络建设要解决的关键问题。因此,本文研究天基频谱感知和干扰绘图辅助的 LEO 组件上行接入频谱共享方案。首先,在对星地一体化信息网络架构和干扰进行分析的基础上,研究适合于低轨认知系统的混合频谱感知和干扰绘图方法,构建地面组件聚合干扰频谱数据库。其中,考虑到星地一体化信息系统的干扰和噪声存在高度不确定性,用双门限定义检测模糊状态,结合认知节点位置概念,综合运用能量检测和协作感知方法,在保证频谱感知性能的同时减少低轨认知系统的工程实现复杂度。同时,通过定义认知节点位置概念和空间可靠性指标,所提干扰绘图方法可以采用较低密度的低轨认知节点,获得高可靠性的干扰地图。本文通过数值实验研究了干扰绘图空间可靠性、频谱感知精度与系统配置之间的对应关系。数值仿真结果表明,在星地一体化信息网络中,地面组件所形成的聚合干扰可能对正在构建的先进 LEO 组件形成负面影响。

为了保护 LEO 组件免受地面组件的干扰,在由天基频谱感知和干扰绘图形成地面组件聚合干扰频谱数据库的基础上,本文提出基于交织模式的 LEO 组件上行通信频谱共享方案,即在出现地面通信聚合干扰的区域和时段内,停用部分低轨通信节点的星地

上行链路,转而利用多状态虚拟网络模型实现卫星组件通信。所提频谱共享方案的优势在于,它通过实现 LEO 组件与地面组件共存而改善了频谱资源利用率,且不会显著增加 LEO 组件的端到端时延。未来工作将尝试采用现实世界的地面组件配置和参数构建聚合干扰场景并验证所提频谱共享方案的性能。

参考文献:

- [1] XU J, ZHANG G X. Design and transmission performance analysis of satellite constellation for broadband LEO constellation satellite communication system based on high elevation angle[C]//Proceedings of International Conference on Insulating Materials, Material Application and Electrical Engineering. Melbourne: IOP, 2018: 2698-2706.
- [2] ZHU L D, MICHELE L, ZHANG G X, et al. Intelligent interference management and secure communications for satellite-terrestrial integrated systems[J]. China Communications, 2022, 19(7): 3-5.
- [3] HOYHTYA M, MAMMELA A, CHEN X F, et al. Database-assisted spectrum sharing in satellite communications: a survey[J]. IEEE Access, 2017, 5: 2169-3536.
- [4] NKALANGO S D A, ZHAO H, SONG Y X, et al. Energy efficiency under double deck relay assistance on cluster cooperative spectrum sensing in hybrid spectrum sharing[J]. IEEE Access, 2020, 8: 41298-41308.
- [5] ZHOU X, JIN X J, HANG H, et al. An enhanced double threshold energy detection in cognitive radio[C]//Proceedings of International Conference on Signal and Information Processing, Networking and Computers. Berlin: Springer, 2018:80-86.
- [6] 刘玉磊, 梁俊, 肖楠, 等. 基于马尔可夫模型的认知无线电动态双门限能量检测策略[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(10): 2590-2597.
- [7] LIU Y L, LIANG J, XIAO N, et al. Dynamic double threshold energy detection based on Markov model in cognitive radio[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(10): 2590-2597.
- [8] PARK H W, JANG Y S. Performance analysis of X-band satellite links using receive combining in a dual-contact scenario[J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2021, 22(5): 1251-1261.
- [8] 陈春梅. CR 网络中基于 K 秩融合的频谱感知算法[J]. 东北师大学报, 2017, 49(1): 78-82.
- [9] CHEN C M. The spectrum sensing algorithm based on K-rank fusion criterion in CR network[J]. Journal of Northeast normal University, 2017, 49(1): 78-82.
- [9] ICOLARI V, TARCHI D, VANELLI-CORALLI A, et al. An energy detector based radio environment mapping technique for cognitive satellite systems[C]//Proceedings of the 2014 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2014: 2892-2897.
- [10] IVANOV A, STOYNOV V, ANGELOV K, et al. 3D interference mapping for indoor IoT scenarios[C]//Proceedings of the 43rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP). Piscataway: IEEE Press, 2020: 265-269.
- [11] URETEN S, YONGACOGLU A, PETRIU E. A comparison of interference cartography generation techniques in cognitive radio networks[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2012: 1879-1883.
- [12] CHEN W E, FAN X Y. Design and implementation of a SAS conformance test tool for 5G citizens broadband radio service (CBRS)[C]//Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-2.

- [13] KARAKI R, MUKHERJEE A. Coexistence of contention-based general authorized access networks in 3.5 GHz CBRS band[C]//Proceedings of the IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Piscataway: IEEE Press, 2018: 848-853.
- [14] HOYHTYA M, MAMMELA A, ESKOLA M, et al. Spectrum occupancy measurements: a survey and use of interference maps[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(4): 2386-2414.
- [15] AFEF B H A-F, SANAB J, BERNAS, et al. Informed spectrum usage in cognitive radio networks: interference cartography[C]//Proceedings of the IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Piscataway: IEEE Press, 2008: 2688-2692.
- [16] KIM C W, RYOO J, BUDDHIKOT M M. Design and implementation of an end-to-end architecture for 3.5 GHz shared spectrum[C]//Proceedings of the 2015 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN). Piscataway: IEEE Press, 2015: 23-34.
- [17] YOUSSEF Z, MAJEED E, MUECK M D, et al. Concept design of medium access control for spectrum access systems in 3.5 GHz[C]//Proceedings of the International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-8.
- [18] FERRÚS R, KOUMARAS H, SALLENTO O, et al. SDN/NFV-enabled satellite communications networks: opportunities, scenarios and challenges[J]. Physical Communication, 2016, 18: 95-112.
- [19] GORATTI L, HERLE S, BETZ T, et al. Satellite integration into 5G: accent on testbed implementation and demonstration results for 5G Aero platform backhauling use case[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2021, 39(4): 380-399.
- [20] GUIDOTTI A, VANELLI-CORALLI A, FOGGI T, et al. LTE-based satellite communications in LEO mega-constellations[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2019, 37(4): 316-330.
- [21] EVANS B, WANG N, RAHULAN Y, et al. An integrated satellite-terrestrial 5G network and its use to demonstrate 5G use cases[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2021, 39(4): 358-379.
- [22] CHARBIT G, MEDLES A, JOSE P, et al. Satellite and cellular networks integration - a system overview[C]//Proceedings of the Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit). Piscataway: IEEE Press, 2021: 271-275.
- [23] ZHANG S J, YANG M C, SHAO X Y, et al. Interference analysis of frequency sharing in satellite terrestrial integrated mobile communication system[C]//Proceedings of International Conference in Communications, Signal Processing, and Systems. Berlin: Springer, 2019: 182-190.
- [24] BIGLIERI E. An overview of Cognitive Radio for satellite communications[C]//Proceedings of the IEEE First AESS European Conference on Satellite Telecommunications (ESTEL). Piscataway: IEEE Press, 2012: 1-3.
- [25] 敬晓晔. 星地频谱共享中基于干扰分析的频谱分配和切换技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
JING X Y. Research on spectrum allocation and handoff based on interference analysis in spectrum sharing between satellite and terrestrial[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [26] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
BAO Z, XING M D, WANG T. Radar imaging technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.
- [27] 齐小刚, 马久龙, 刘立芳. 基于拓扑控制的卫星网络路由优化[J]. 通信学报, 2018, 39(2): 11-20.
QI X G, MA J L, LIU L F. Routing optimization based on topology control in satellite network[J]. Journal on Communications, 2018, 39(2): 11-20.
- [28] KORCAK O, ALAGOZ F. Link-layer handover in earth-fixed LEO satellite system[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2009: 5134-5138.
- [29] KORCAK O, ALAGOZ F. Virtual topology dynamics and handover mechanisms in Earth-fixed LEO satellite systems[J]. Computer Networks, 2009, 53(9): 1497-1511.
- [30] KORCAK O, ALAGOZ F. Multi-state virtual network architecture for next generation satellite networks[C]//Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2007: 2031-2036.
- [31] WANG H T, REN R K, QU D X, et al. A radio environment mapping based spectrum awareness for cognitive space information network with GEO and LEO coexistence[C]//Proceedings of the International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Piscataway: IEEE Press, 2020: 654-659.
- [32] 谭志文. 无线通信网络中频谱接入技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
TAN Z W. Research on spectrum access technologies in wireless communication networks[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.

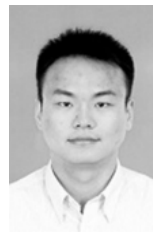
[作者简介]



王海涛(1980-), 男, 江苏徐州人, 博士, 南京邮电大学副研究员, 主要研究方向为卫星通信新体制、频谱共享技术等。



茆习文(1998-), 男, 安徽宣城人, 南京邮电大学硕士生, 主要研究方向为卫星通信新体制。



张晨(1985-), 男, 安徽淮南人, 博士, 南京邮电大学副研究员、高级工程师, 主要研究方向为天地一体化信息网络、卫星通信新体制。



张更新(1967-), 男, 浙江平湖人, 南京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为空间信息网络、卫星通信、深空通信、物联网、频谱监测。