

# 面向轨道交通的电磁频谱地图构建方法<sup>\*</sup>

邹劲柏<sup>1</sup> 兰 蒙<sup>1,2</sup> 洪 翔<sup>3</sup> 张立东<sup>4</sup> 胥智鹏<sup>4</sup>

(1. 上海应用技术大学轨道交通学院, 201418, 上海; 2. 同济大学电子与信息工程学院, 201804, 上海;

3. 上海申通轨道交通研究咨询有限公司, 200070, 上海;

4. 上海申通地铁集团有限公司技术中心, 201103, 上海//第一作者, 教授)

**摘 要** 目的: 轨道交通的电磁环境日益复杂, 电磁频谱地图的构建能有效地提升对电磁频谱资源的掌控, 为此, 特进行本研究。方法: 通过总结电磁频谱地图的应用领域和面临的挑战, 详细阐述了3种构建方法(空间插值构建法、参数构建法和混合构建法); 针对轨道交通的电磁环境特征, 分析了相关挑战和发展趋势; 针对轨道交通的电磁环境特征, 提出面向轨道交通的电磁频谱地图的平台架构。该架构包括全局电磁频谱地图、本地电磁频谱地图、认知引擎、数据采集与储存单元、先验信息数据库和轨道沿线地理位置数据库等。结果及结论: 面向轨道交通的电磁频谱地图构建是优化系统资源利用率的有效方法, 不同的构建方法适用于不同的场景和需求。通过合理的平台架构设计, 可以实现对电磁环境的准确感知和高效利用, 以应对如位置信息的利用、异构网络的管理和可靠性要求的满足等挑战。其未来的发展趋势应该是新技术的应用开发和数据整合, 以及探索电磁频谱地图的新应用。

**关键词** 轨道交通; 电磁频谱地图; 空间插值法; 平台架构  
**中图分类号** U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.12.038

## Construction Method of Electromagnetic Spectrum Maps for Rail Transit

ZOU Jinbai, LAN Meng, HONG Xiang, ZHANG Lidong, XU Zhipeng

**Abstract** Objective: With the increasingly complex electromagnetic environment in rail transit, the construction of electromagnetic spectrum maps can effectively enhance control over electromagnetic spectrum resources, for which purpose the research is carried out. Method: By summarizing the application areas and challenges faced by electromagnetic spectrum maps, three construction methods are detailed: spatial interpolation construction, parameter construction, and hybrid construction. Considering the electromagnetic environment characteristics of rail transit, relevant challenges and development trends are ana-

lyzed. Tailored to the electromagnetic environment characteristics of rail transit, a platform architecture for electromagnetic spectrum maps for rail transit is proposed. This architecture includes a global electromagnetic spectrum map, a local electromagnetic spectrum map, cognitive engine, data acquisition and storage unit, a priori information database, and a geographical location database along rail lines. Result & Conclusion: The construction of an electromagnetic spectrum map for rail transit is an effective method to optimize system resource utilization rate. Different construction methods are suitable for different scenarios and requirements. Through a well-designed platform architecture, accurate perception and efficient utilization of the electromagnetic environment can be achieved, for addressing challenges such as the utilization of location information, heterogeneous network management, and meeting reliability requirements. The future development trends should focus on the application development of new technologies, data integration, and exploring new applications for electromagnetic spectrum maps.

**Key words** electromagnetic spectrum map; rail transit; spatial interpolation method; platform architecture

**First-author's address** School of Railway Transportation, Shanghai Institute of Technology, 201418, Shanghai, China

## 0 引言

电磁频谱作为对无线电环境的抽象表达, 它可以更好地展现电磁环境的当前状态、综合形势和发展趋势, 为频谱的动态接入、管理和共享提供了极强的数据驱动力<sup>[1-3]</sup>。与此同时, 随着认知无线电的发展, 认知无线电技术在轨道交通行业中的应用引起了学术界和政府机构的极大兴趣, 而电磁频谱地图作为认知无线网络中功能强大的工具引

<sup>\*</sup> 上海市科委项目(20090503100); 上海市“一带一路”中老铁路工程国际联合实验室项目(21210750300)

人<sup>[4-6]</sup>,在进一步获取发射机信息规律、频谱态势感知、无线电资源管理、专用频谱监管和干扰抑制及定位等方面有着举足轻重的地位<sup>[7-9]</sup>。

基于电磁频谱地图的应用开发,在解决轨道交通干扰定位、高速切换优化、沿线网络规划和多普勒移频等方面也起到了重要的作用;在进一步实现频谱资源的高效利用、解决用频矛盾的同时,极大地维护了轨道沿线地区的频谱可用性<sup>[10-12]</sup>,保证列车的运行更加安全可靠。因此,轨道交通的电磁频谱地图也逐渐成为近年来轨道交通行业的研究热点。随着轨道交通对无线通信的需求不断增长,为更有效利用资源并改善系统性能,构建面向轨道交通的电磁频谱地图是一个具有挑战性的课题。

1 电磁频谱地图概述

1.1 典型电磁频谱地图及其应用

目前,典型的电磁频谱地图主要有基于美国联邦通信委员会标准的 TVWS<sup>[13]</sup>(电视空白空间)系统及欧盟的 FARAMIR<sup>[14]</sup>(基于认知无线电系统的测量与建模的感知无线电接入)项目。TVWS 系统能构建不同授权频段在空间和时间上的综合温度图,用于非主要用户的频谱接入。FARAMIR 项目重点研究和发展高精度高质量的电磁频谱地图构建策略,聚焦于测量终端的传感器设置及算法优化。

1.2 电磁频谱地图架构

电磁频谱地图主要由 MCDs(测量终端)、数据采集与储存单元、认知引擎及先验信息数据库等构成<sup>[15]</sup>,如图 1 所示。MCDs 是指可移动终端(提取接收的信号强度等)和专用频谱传感设备等,并能够识别公里标和执行频谱测量;先验信息数据库则储存了全局已知的发射机类型、配置(制式、允许的干扰水平、传输功率、工作频段、开关时间表等)、位置信息、传播模型和政策条件等;数据采集及储存单元包含了更多优选的动态参数,其主要包括信号强度、移动终端或监测节点的位置信息、QoS(服务质量)和传播损耗等。数据采集与储存单元用来存储和管理来自 MCDs 的测量数据及认知引擎处理的数据,电磁频谱地图构建结果也储存于该单元,供授权用户进行访问。认知引擎负责用户交互、电磁频谱地图构建、指令处理及信息决策。它通过基于先验信息数据库及数据采集与储存单元的已知/预先定义或监测的数据信息进行经验估计与建模,

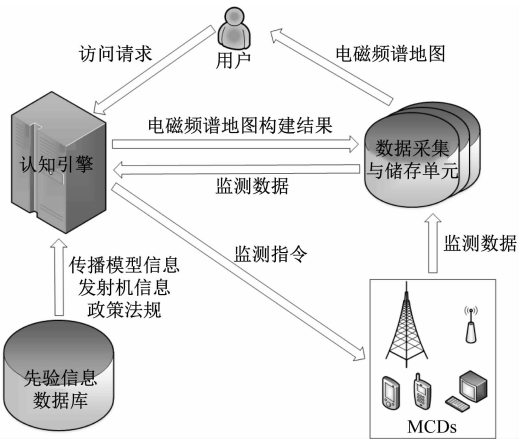


图 1 电磁频谱地图结构

Fig. 1 Structure of the electromagnetic spectrum map system

得出相应电磁频谱地图。

如图 2 所示,数据采集与储存单元的内容用于描述所属区域过去、当前及预期的状态,可分为 3 类:无线电要素类,其包括设备类型、位置信息等;无线场景类,其包含区域内的政策法规、信息安全、通信等级等信息;无线环境类,其包括用于表征特定操作环境中的环境和无线电的信息。该单元内的数据可根据有效期分为长期数据和短期数据:长期数据是静态或准静态的缓慢变化的数据,例如基站位置、天线倾角等;短期数据则是会根据电磁环境而快速变化的数据。

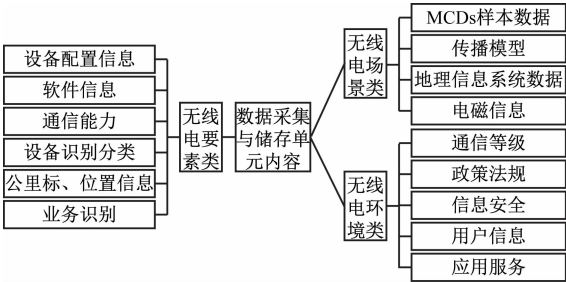


图 2 数据采集与储存单元

Fig. 2 Data acquisition and storage unit

2 面向轨道交通的电磁频谱地图的构建方法及性能对比

2.1 轨道交通电磁环境特征

与典型无线通信网络的电磁传播环境相比,轨道交通的电磁环境主要有以下几个特征:

1) 轨道沿线小区场强覆盖呈链状分布,列车天线接收到的信号会呈现周期性的强弱变化,并且列车快速的移动将导致快速切换、较大的多普勒移频和较小的相干时间;

2) 列车在运行过程中会遇到具有不同传播特性的场景,单一的传播模型无法准确描述无线通信信道特征,同时完全封闭的车体结构的穿透损耗直接降低了通信链路的信号质量,但传播损耗主要取决于基站和列车之间的距离,而且距离随列车 km 标的变化而变化;

3) 轨道交通的无线通信基础设施是由密集部署的异构无线网络组成,混合了不同的网络和无线电接入技术,支持具有不同 QoS 要求和优先级的许多类型的服务。

## 2.2 电磁频谱地图构建方法及性能对比

电磁频谱地图的构建是指构建无线网络覆盖区域的完整地图,针对每个测量点,根据预定义区域的空间坐标、时间及对应的 MCDs 测量到的 RF (射频)环境的 RSS (接收信号强度)、PSD (功率谱密度)等各种数据的映射,其表现形式如图 3 所示。

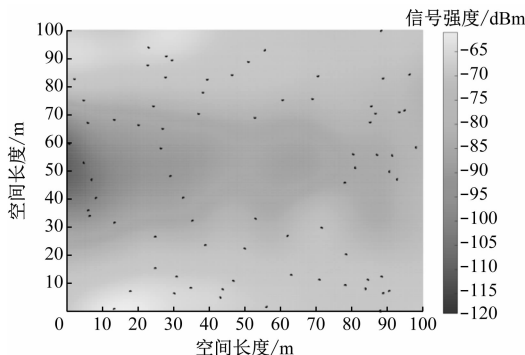


图 3 电磁频谱地图截图示例

Fig. 3 Example of electromagnetic spectrum map

电磁频谱地图的构建方法可分为三类:空间插值构建法、参数构建法和混合构建法。空间插值构建法属于电磁频谱地图的直接构建方法,通过将插值技术应用于预设区域来生成无线电环境的空间联系表面,通过采样数据点之间的空间关系,定义在未采样位置进行估计的函数;参数构建法属于电磁频谱地图的间接构建方法,基于已知或预测的发射机参数和无线电传播模型来生成;混合构建法则是上述两者的结合。

### 2.2.1 空间插值构建法

空间插值构建法,从测量值进行插值,以任意精度逼近轨道交通复杂电磁环境中的任何信道函数,因此能够重建不规则的电磁频谱地图<sup>[16]</sup>。但受地形地貌、人工建筑物等因素影响,测量终端采集的数据并不能完整的将电磁频谱地图进行呈现,需

要通过数据补全的方法来对数据进行补充。面对数据缺失的问题,常用的插值技术有 IDW (反距离权重)法、Kriging (克里金)法、KNN (最近邻居插值)法、Splines (样条)法、ALM (增广拉格朗日乘子)法和机器学习等。表 1 总结了几种目前比较常用的插值技术。

其中,IDW 法作为经典的空间插值方法原理简单、运算效率高、所需储存空间较小,但构建精度不高,在工程应用中受到的限制较多。Kriging 法及其变体,是实现估计误差方差最小的最优无偏线性插值方法。同样,属于空间随机变量的电磁环境信息,可以通过 Kriging 法及其变体完成精度较高的电磁环境地图的构建。ALM 法利用矩阵的低秩性和稀疏性,能够有效对频谱数据进行补全,轨道沿线的频谱数据是一种呈线状分布的采样数据,故可充分利用各数据点之间的空间相关性。同样,随着机器学习在各个研究领域的成功应用,基于机器学习的电磁频谱地图构建也十分有希望。

### 2.2.2 参数构建法

参数构建法在先验数据信息的基础上,如 km 标、监测数据、无线信道模型参数等,构建电磁频谱地图,尤其是存在长期稳定信号源的区域或者存在固定规律/路径的场景,能够更加精准地完成电磁频谱地图的构建和预测。

在此方法中,有 4 种可以区分的场景:① Tx (发射机)位置和相关参数已知,例如已知 Tx 位置、功率、天线高度、极化方向等;② Tx 位置已知,但其相关参数未知;③ Tx 位置未知,但其相关参数已知;④ Tx 位置和相关参数都为未知。在场景 1、2 中,通过 Tx 的位置信息,结合电波传播模型和信道建模,适当校准之后就可以估计其他 Tx 的位置和参数;在场景 3 中,可根据 MCDs 估算 Tx 位置,然后计算 RF 覆盖范围。为了解决最后一种场景的问题,可采用 LiVE (基于发射机位置估计)法和 SNR-aided 法。

在 LiVE 法中,使用基于已知传播模型计算出的路径损耗,估算 Tx 功率和位置的值。通过  $K$  个可用测量点处接收到的功率电平,来解决位置和 Tx 功率估计问题,再通过最小二乘进行优化和求解,计算得出的结果数据将用于单个 Tx 的电磁频谱地图构建。

在 SNR-aided 法中,只需知道 Tx 的功率,除此之外不需要任何先验信息。在开始时,估计每次测

表 1 空间插值构建法对比

Tab. 1 Comparison of spatial interpolation construction methods

插值方法	描述	优点	不足
IDW 法	每个测量单元都有着局部的影响,这些影响随距离的增加而减弱	① 复杂度低,构建速度快;② 插值结果平滑度较好	① 受监测点分布的不均匀性影响较大;② 无法对监测数据进行外推;③ 容易受异常值影响
Kriging 法	找出未知样本的 $K$ 个最近测试点,通过最近测试点赋值给未知点	① 实现最佳线性无偏估计;② 监测点足够多时精度较高	① 算法复杂度较高,计算时间/资源需求增加;② 需要人为对变差函数模型做选择;③ 仅适合较局部的范围
KNN 法	通过权重的确定,根据选定的优化函数来动态改变变量的数值、从而使插值处于最佳状态	① 构建速度快;② 对非均匀分布的监测插值效果比较好	① 监测数据外插效果较差;② 平滑度较低
Splines 法	通过样条函数建立一个通过所有测试点的面,使所有点的坡度变化最小	① 平滑度较高;② 能够表述空间变量的趋势;③ 监测数据外推效果好	① 容易受异常值影响;② 无法对邻域内变化剧烈的监测数据进行插值
ALM 法	离散数据构成相互连接的网络,若该网络上的已知节点满足某种约束条件(数量、空间相关性),则未知节点的值可由线性方程求解	① 算法复杂度较低;② 收敛速度较高,运行时间短,实时性可保证;③ 广域频谱数据补全效果较好	对空间相关性较差监测数据插值效果不佳
机器学习	找到从输入位置坐标到其输出 MCDs 测量的直接映射,将显式函数关系视为黑盒,通过 DNN(深度神经网络)对其进行建模	经过训练的 DNN 能够快速响应具有相应 MCDs 级别的任何输入位置坐标,随着迭代的进行,能够不断提高估计精度	训练样本(测量)数量不足可能会影响训练收敛和全/半监督学习技术的估计精度

量的 AoA(到达角),并将其用于预测 Tx 位置。接下来,通过结合 MCDs 与 SNR-aided 法的测量结果与信号源进行估计,同时结合适当的传播模型来完成电磁频谱地图的构建。但 SNR-aided 法在实现过程中往往需要 2 个或 2 个以上的天线进行辅助操作<sup>[17]</sup>。

2.2.3 混合构建法

混合构建法是空间插值法和参数构建法的组合,从有限数量的传感器中实现高估计精度,同时,对传感器放置和可能的测量误差具有鲁棒性。参数构建法建立在传播模型假设之上,对传感器放置和数据错误不太敏感,而所选择的传播模型反过来限制了其重建真实电磁频谱地图的能力。模型选择和验证在工程实践中也是具有挑战性的问题。空间插值法为了实现高估计精度,通常需要大量的传感器数据,其性能对传感器放置或测量误差也更敏感。混合构建法在实践中通过空间插值法完成初步构建,通过数字信号处理方法对信号源信息和传播模型进行估计,最后通过估计值和传播模型相结合完成电磁频谱地图的构建。

3 面向轨道交通的电磁频谱地图的平台架构

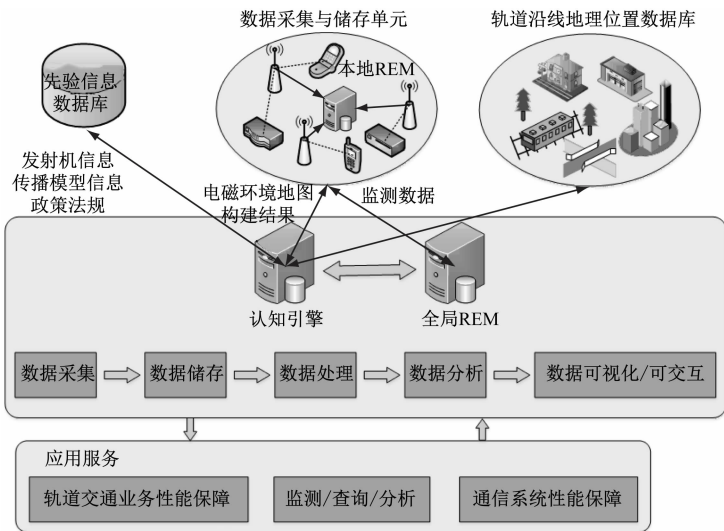
与传统的电磁频谱地图相比,面向轨道交通的

电磁频谱地图可更好地依据轨道交通特有的参数,如 km 标、固定的行驶路线和严格的业务要求等。其能准确地感知电磁环境,并有对位置和时间等多维度保持较高精度构建结果的能力。

如图 4 所示,面向轨道交通的电磁频谱地图还应包括全局电磁频谱地图、本地电磁频谱地图、认知引擎、数据采集与储存单元、先验信息数据库及轨道沿线地理位置数据库等。

为满足面向轨道交通的电磁频谱地图的功能要求,本研究提出了如图 5 所示的平台架构。其由硬件总线、硬件资源、软件模块、接口以及资源调度和功能管理模块等组成。硬件总线实现了硬件资源之间的数据传输,并提供了对平台的监视和控制,以及资源调度和功能管理的支持;软件模块和硬件资源之间的隔离和映射是通过硬件和软件接口来完成的;功能模块之间的连接和交互是通过应用程序服务接口实现的;资源调度和功能管理组件负责整个平台架构和所有接口的软件及硬件资源的调度、管理。

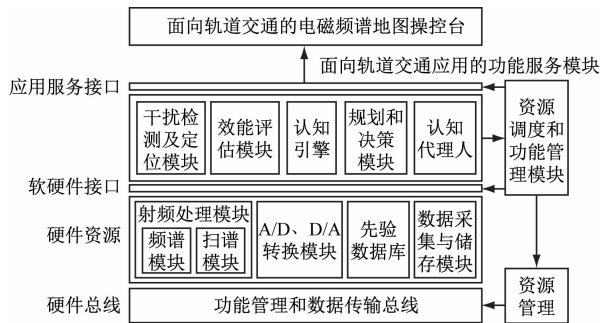
该平台架构可基于软件无线电技术,采用模块化设计。基于通用硬件、可重新配置的功能软件以及已开发的系统架构,并使用可开发、可扩展和简化的硬件作为通用平台,以使用可重构和可扩展的



注:REM 为电磁频谱地图。

图 4 采用面向轨道交通的电磁频谱地图表征现实无线电场景

Fig. 4 Representation of realistic radio scenes adopting rail transit-oriented radio environment map



注:A 为模拟;D 为数字。

图 5 面向轨道交通的电磁环境地图的平台架构

Fig. 5 Platform architecture of electromagnetic environment map for rail transit

模块化软件来实现干扰检测与定位、认知引擎以及规划决策等功能<sup>[18-19]</sup>。同时,由于平台架构的主要功能是通过软件实现的,因此可以方便地使用各种新的信号处理手段,例如机器学习和深度学习,来提高性能。

## 4 面向轨道交通的电磁频谱地图构建的研究展望

### 4.1 面临的挑战

随着网络致密化和网络异构技术与轨道交通的深度融合需要更深入的了解无线电环境,构建面向轨道交通的电磁频谱地图是一种优化系统资源利用率的有效方法,但仍然存在一些挑战。

1) 列车定位技术是轨道交通通信系统中的主要技术之一。如何利用位置信息提高电磁频谱地

图的构建能力,促使电磁频谱地图数据的补全更为全面、更具备时效性,是目前研究的趋势。

2) 在轨道交通的无线通信网络演进过程中,存在涉及多种通信技术的异构网络,同时,列车的高移动性,使得数据需要比在固定场景更频繁地传递,为保持每个数据的新鲜与准确,所产生大量的电磁环境信息数据的存储、管理以及测量数据的实时处理,面临着新的挑战。因此,不仅对于具有频谱感知能力的节点的接口通道质量提出了很高的要求,也需要对存储频谱数据和数据量大小做出规划。

3) 轨道交通行业对于无线通信的可靠性要求对电磁频谱地图的构建也是极大的挑战。电磁频谱地图的构建精度是其应用的前提,同时,轨道交通对于一些核心业务有着严格的可靠性要求,随着轨道交通的业务延伸和用户体验对车地无线通信系统不断提出新的要求,如何权衡构建方法的精度和效率,设计更符合轨道交通的电磁频谱地图的构建方法以确保可靠性是一个重要的挑战。

4) 在先验信息相对不完备,部分线路设施设备老化严重时,难以直接建立合适的电磁频谱地图,往往只能利用测量数据进行电磁频谱地图的构建。因此,需要进一步的研究来解决先验信息不足的一系列问题,高效构建适用于最坏工况下,即无先验信息以及少部分先验信息的电磁频谱地图,也是当前的重要挑战。

### 4.2 发展趋势展望

电磁频谱地图是功能强大的工具,而轨道交通



通信系统的一些特性,对电磁频谱地图的构建提出了一系列的挑战,但也正因为这些特性,可以开发出更加具有指向性的电磁频谱的构建方法和架构,以减少计算资源的开销。随着泛在感知、边缘计算等新一代通信技术的成熟和投入使用,大量的不同种类的传感器部署在轨道交通当中,在不影响其主要功能的条件下,可对海量电磁环境信息进行采集和整理,而如何有效地进行数据的清洗和整合,构建融合多精度传感数据的电磁频谱地图,也将是接下来的发展趋势。利用电磁频谱地图挖掘发射机及电磁干扰规律等增量信息以及探索电磁频谱地图的新应用,如切换算法优化、干扰定位等,都是非常值得进一步探索的新思路。

## 5 结语

随着人工智能、云计算、物联网、大数据等新兴技术与轨道交通深度融合,为更好地提升轨道交通行业对电磁频谱资源的掌控能力,面向轨道交通的电磁频谱地图的构建可认为是当今的趋势。本研究通过讨论适用于轨道交通电磁环境特征的电磁频谱地图构建方法,提出了面向轨道交通的电磁频谱地图的平台架构。对于轨道交通的电磁频谱地图的设计不仅需要探索结合新技术的应用开发,更需要结合轨道交通场景的业务特征和指标,设计适用于轨道交通的专用的构建方法和体系结构。

## 参考文献

- [1] BI S, LYU J, DING Z, et al. Engineering radio maps for wireless resource management [J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(2): 133.
- [2] RODRIGUEZ A C S, HAIDER N, HE Y, et al. Network optimisation in 5G networks: a radio environment map approach [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(10): 12043.
- [3] AI B, MOLISCH A F, RUPP M, et al. 5G Key technologies for smart railways [J]. Proceedings of the IEEE, 2020, 108(6): 856.
- [4] WU C, WANG Y, YIN Z. Realizing railway cognitive radio: a reinforcement base-station multi-agent model [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(4): 1452.
- [5] KAKALOU I, PSANNIS K, GOUDOS S K, et al. Radio environment maps for 5G cognitive radio network[C]//2019 8th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCAS). New York: IEEE, 2019: 1.
- [6] KALLEHAUGE T, KALØR A E, RAMÍREZ-ESPINOSA P, et al. Delivering ultra-reliable low-latency communications via statistical radio maps [J]. IEEE Wireless Communications, 2023, 30(2): 14.
- [7] SUAREZ-RODRIGUEZ C, HE Y, DUTKIEWICZ E. Theoretical analysis of REM-based handover algorithm for heterogeneous networks [J]. IEEE Access, 2019, 7: 96719.
- [8] WANG C, WU Q, TANG Z, et al. Spectrum management in high-speed railway cooperative cognitive radio network based on multi-agent reinforcement learning[C]//2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). New York: IEEE, 2020: 702.
- [9] LEVIE R, YAPAR C, KUTYNIOK G, et al. Radiounet: fast radio map estimation with convolutional neural networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(6): 4001.
- [10] WILD T, BRAUN V, VISWANATHAN H. Joint design of communication and sensing for beyond 5G and 6G systems [J]. IEEE Access, 2021, 9: 30845.
- [11] KIM T, KO K, HWANG I, et al. RSRP-based doppler shift estimator using machine learning in high-speed train systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(1): 371.
- [12] MU X, LIU Y, GUO L, et al. Intelligent reflecting surface enhanced indoor robot path planning: a radio map-based approach [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(7): 4732.
- [13] SAYRAC B. D2.4: final system architecture [J]. FARAMIR Project, 2011, 1.
- [14] SUCHANSKI M, KANIEWSKI P, ROMANIK J, et al. Radio environment maps for military cognitive networks: deployment of sensors vs. map quality[C]//2019 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS). New York: IEEE, 2019: 1.
- [15] ZHOU H. An introduction of cognitive electronic warfare system [C]//2020 Signal Processing, and Systems, Singapore. New York: IEEE, 2020: 1202.
- [16] SATO K, SUTO K, INAGE K, et al. Space-frequency-interpolated radio map [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(1): 714.
- [17] TZOREFF E, WEISS A J. Path design for best emitter location using two mobile sensors [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2017, 65(19): 5249.
- [18] SANTOS J F, KIST M, ROCHOL J, et al. Virtual radios, real services: enabling RANaaS through radio virtualisation [J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2020, 17(4): 2610.
- [19] KAKKAVAS G, TSITSEKLIS K, KARYOTIS V, et al. A software defined radio cross-layer resource allocation approach for cognitive radio networks: from theory to practice [J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2020, 6(2): 740.

(收稿日期:2021-06-03)