

面向智慧矿山物联网的机会性通信频谱共享赋能研究

王海涛¹, 张海杰², 蒋世杰³, 张更新¹

(1. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003; 2. 南京邮电大学应用技术学院, 江苏 南京 210042; 3. 新疆红山能源矿业有限公司, 新疆 塔城 834400)

摘要: 针对智慧矿山工业物联网中海量异构频谱需求和复杂信道条件影响, 提出基于服务优先级化、通信量建模和普遍协作传输的机会性通信频谱共享方案, 分析相应的系统架构和关键技术。首先, 根据频谱需求的不同属性, 对物联网服务进行分类, 进而设计服务优先级化的动态频谱调度方法。其次, 利用连续时间马尔科夫链, 构建异构通信量的信息物理系统模型, 推导最优频谱接入概率并且指导频谱分配。最后, 根据不充分可用的信道状态信息, 设计部分机会性的中继选择准则, 构建基于增量型解码转发协议的普遍协作机制, 最小化主要信号传输的中断概率, 同时以覆盖方式为次要网络提供频谱共享的机会。数值仿真结果表明, 通信量建模辅助的服务优先级化频谱调度方法具有低时延、高完成率和公平性, 可以实现各类物联网服务的机会性频谱共享; 所研究的基于部分机会性中继选择的普遍协作传输机制可以在强化主要信号传输服务质量的同时促进次要网络的频谱共享。

关键词: 物联网; 智慧矿山; 频谱共享; 机会性通信; 信息物理系统; 普遍协作传输

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.XXXX.

Research on spectrum-sharing enabler with opportunistic communication for internet of things in smart mine

WANG Haitao¹, ZHANG Haijie², JIANG Shijie³, ZHANG Gengxin¹

1. College of Telecommunications & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

2. School of Applied Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210042, China

3. Xinjiang Hongshan Energy Mining Co., Ltd., Tacheng 834400, China

Abstract: To address the impact of massive heterogeneous spectrum demands and complex channel conditions in industrial Internet of Things(IoT) of smart mine, a spectrum-sharing scheme with opportunistic communication based on service prioritization, traffic modeling and generalized cooperative transmission was proposed, and its system architecture and key technologies were analyzed in this paper. Firstly, IoT services were classified according to diverse attributes of their spectrum demands, and then a service-prioritized spectrum-scheduling approach was designed. Secondly, a cyber-physical system model of heterogeneous IoT traffic was built with continuous-time Markov chain, and optimal spectrum access probabilities were derived to guide spectrum allocation. Finally, according to imperfect channel state information, a partially opportunistic relay-selection criterion was designed and a mechanism of generalized cooperative transmission based on incremental decode-and-forward protocol was constructed in order to minimize outage probability of primary

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修回日期: XXXX-XX-XX

通信作者: 王海涛, 348009686@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.U21A20450); 江苏省前沿引领技术基础研究专项课题 (No.BK20192002); 徐州矿务集团有限公司科学技术项目 (No.2024-0060)

Foundation Items: National Natural Science Foundation of China (No.U21A20450), Jiangsu Special Project for Basic Research on Frontier Leading Technologies (No.BK20192002), Science and Technology Project of Xuzhou Mineral Group Co.,Ltd. (No.2024-0060)

signal transmission and to provide overlay-based spectrum-sharing chances for secondary networks. Numerical results show that the proposed traffic-model-assisted spectrum-scheduling approach has the properties of low latency, high completion rate and fairness, and that opportunistic spectrum sharing is achieved among all kinds of IoT services. What's more, the proposed mechanism of generalized cooperative transmission based on partially opportunistic relay selection improves quality of service of primary signal transmission while facilitating spectrum sharing of secondary networks.

Key words: internet of things, smart mine, spectrum sharing, opportunistic communication, cyber-physical system, generalized cooperative transmission

0 引言

采矿业因其自身的高危属性，一直都是先进生产技术的前沿应用领域。近年来，矿山智能化建设成为预防生产事故和提高生产效率的迫切需求^[1]。工业互联网是物联网在工业生产领域的拓展，也是智慧矿山所依靠的关键技术之一，它以智能化工业生产升级为目标，具有智慧感知、精准决策、资源整合等重要特征^[2-4]。当前，物联网利用长期演进技术高级版（LTE-A, Long Term Evolution-Advanced）和机器交互（M2M, Machine-to-Machine）业务，实现工业设备的智能互联^{[3][5-6]}。智慧矿山工业互联网利用无线组件和有线组件的互补协调工作来提升矿山的安全水平和生产效率。

频谱资源为矿山的各类数据提供交互媒介，是矿山物联网的核心资源之一。随着智慧矿山建设的不断推进，越来越多的设备将接入工业互联网并提出海量服务请求。虽然矿山物联网的无线组件一般采用具有专用频段的移动通信系统，但是大量制式终端设备的工作频率和带宽往往集中在若干频段范围内，从而对这些范围内的频谱资源形成巨大压力^[7-9]。为此，国内外机构广泛研究了物联网频谱共享课题^[10-15]。在文献[10-11]中，假设物联网设备管理各自的频谱资源，从而形成分布式的频谱共享解决方案。这些分布式的解决方案需要物联网设备具有较强的本地信息处理能力。文献[12]和[13-14]分别提出了基于策略服务器和固定优先级的中心化频谱共享方案，它们的处理时间较长，难以适应智慧矿山工业互联网每秒数以千计的服务用频需求，而且未考虑频谱调度的公平性。文献[15]提出基于干扰消除技术的集中式频谱共享方案，但未涉及利用服务优先级的频谱分配方法。因此，针对智慧矿山工业互联网服务高完成率、低延时和公平性的应用需求，研究面向海量用频需求的集中式机会性服务

优先级化频谱调度方法具有重大的实用价值。

智慧矿山工业物联网提供设备之间的普遍连接和多样化应用服务。这些服务在频谱利用模式和服务质量等方面的需求存在显著差异，从而产生不同的数据通信量模式。研究显示，通信量的异构属性将加剧物联网频谱拥塞^[16-19]。建立通信量模型有利于预测异构服务的频谱占用情况，从而增强频谱需求和可用频谱之间的匹配程度、改善频谱利用率^[20-21]。目前，国内外研究机构已经尝试对机器交互网络的通信量进行建模以估计总体负载，但尚未对如何改善服务完成率和服务时间给出结论和建议^[21-22]。

矿山的复杂环境导致其物联网的拓扑结构脆弱、频谱利用效率低^{[2][23]}。近年来，国内外研究机构提出认知机器交互通信方案，以增强物联网通信的可靠性和频谱效率^{[18][24]}。在认知机器交互网络中，存在共用特许频谱资源的两个系统：主要网络和次要网络^[25-26]。主要网络拥有特许频谱并且可以无限制接入；次要网络采用认知无线电技术动态接入特许频谱，同时限制其对主要网络的干扰影响。因此，在确保主要网络的能量约束和服务质量的前提下，认知机器交互网络对次要网络提供频谱共享的机会，从而改善特许频谱的利用率^[27-29]。一般的，次要网络可以采用交织、底衬或覆盖三种工作方式接入主要网络的特许频谱。与前两种方式相比，覆盖（overlay）方式不需要限制次要发射机工作的时空范围和发射功率，因此具有更好的网络覆盖（coverage）性能。进一步的，针对认知机器交互网络，[26][27][30]等文献在分析通信节点之间的空间相关性基础上，讨论了普遍协作传输机制。当主要网络由于严重衰落信道条件而通信中断的时候，通过次要网络的协作传输机制可以获得更好的网络覆盖和吞吐量。普遍协作传输机制通常采用放大转发和解码转发协议，其中后者可以有效抑制

“噪声传递效应”^[31-32]。为了保证主要信号传输的服务质量，中继节点的选择准则通常与相关链路信道状态信息的可用性有关^[32-33]。目前，工程上往往难以获取充分可用的端到端信道状态信息，特别是对于矿山的复杂通信环境而言^{[3][23][33]}。

针对主要技术挑战，本文工作主要聚焦下面四项研究内容。首先，针对智慧矿山工业物联网中存在的频谱资源短缺压力和复杂信道条件，构建面向频谱共享的机会性通信系统架构，分析其系统组成和 workflows。其次，为了应对智慧矿山工业物联网设备所提出的海量异构服务请求，根据频谱利用模式和服务质量的不同需求，对物联网服务进行分类、形成服务请求等待队列，继而综合考察服务的类型、临界时间和公平性，设计服务优先级化的机会性频谱调度算法、实现物联网异构服务的频谱共享。再次，利用连续时间马尔科夫链对异构通信量进行建模，形成频谱需求事件驱动的信息物理系统（CPS, Cyber-Physical Systems）模型，并且推导多状态稳态概率，支持服务优先级化算法进行频谱分配，进一步改善服务质量。最后，为了有效应对矿山复杂信道环境的不利影响，研究基于部分机会性的普遍协作传输方案。根据不充分可用的相关链路信道状态信息（CSI, Channel State Information），设计部分机会性的中继选择准则，利用增量型解码转发协议最小化主要信号传输的端到端中断概率；同时，次要网络也以覆盖方式实现与主要网络的频谱共享，完成自身的数据传输。

1 应用场景

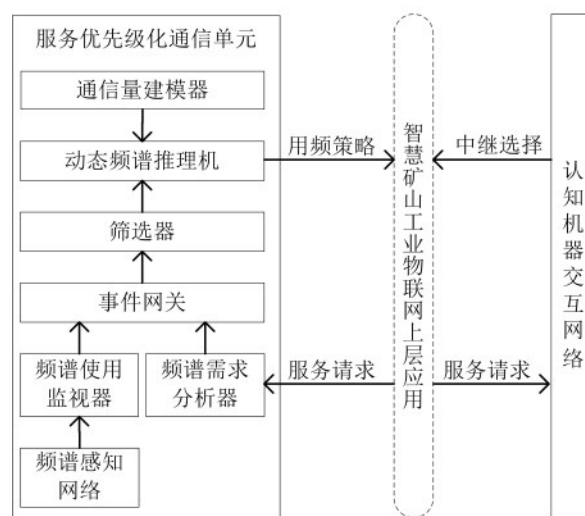
1.1 系统架构

作为智慧矿山的公共基础设施，矿山工业物联网综合采用有线和无线通信方式，连接各类终端设备。文献[3]阐述了矿山工业物联网的常见架构和分布方式。完善的矿山物联网无线组件对提高矿山生产运行效率、促进矿山自我感知能力起到巨大的推动作用，而高效配置通信资源是智慧矿山物联网建设的关键之一。在矿山物联网系统中，快速增长的设备产生了海量的数据，对矿山网络的频谱资源形成巨大压力。由于矿山通信条件恶劣，为了保证矿山物联网系统的稳定运行，需要优化网络负载、调节网络通信量、调度频谱资源。目前矿山物联网发展的关键课题之一在于如何提高矿山无线网络的

服务质量。为此，首先应该对相应的业务和通信量进行精准分类和建模。

终端设备与接入点之间的无线信道特性对矿山物联网无线组件的服务质量有很大影响。终端设备无线通信的功耗包括两部分，分别是调制电路的固定功耗和信号传输功率。大多数矿山物联网终端由电池供应电力，其通信距离与传输功率密切相关。另外，这些终端可能在狭长巷道内移动，而巷道的特殊环境导致电磁波信号的传输距离较短。因此，矿山所部署的基站密度比其它工业场所要大得多。尽管如此，复杂的矿山通信环境仍然加剧了无线传输的误码和丢失数据帧的风险。

智慧矿山工业物联网的机会性通信系统架构如图1所示。该系统由“服务优先级化通信单元”和“认知机器交互网络”两部分组成。服务优先级化通信单元包括频谱使用监视器、频谱需求分析器、通信量建模器、筛选器、动态频谱推理机、事件网关等主要功能模块。频谱使用监视器通过频谱感知网络评估不同频段的干扰水平，进而构建频谱数据库、获取和预测频谱态势、选定可用频段；频谱需求分析器收集物联网设备的频谱需求，并对相关服务进行分类；通信量建模器通过基于连续时间马尔科夫链的CPS模型推导各种类型的物联网服务稳态概率；筛选器面向可用频谱争用而筛选物联网设备的服务请求；动态频谱推理机根据服务请求的优先级等要素完成频谱调度决策；事件网关是动态频谱推理机与系统事件之间的数据接口^{[4][6]}。



认知机器交互网络的普遍协作传输机制如图2所示,该传输机制的设计目标在于实现次要链路接入主要网络的特许频谱,同时保证主要网络的传输性能。在认知机器交互网络中,存在具有发射机-接收机对子的一个主要网络和多个次要网络。为了与各自配对的次要接收机(节点 D_k , $k=1,2,\dots,K$)进行通信,多个次要发射机(节点 C_k)需要通过竞争方式获得共享主要网络特许频谱的机会。进一步的,当主要直接链路由于矿山的复杂信道条件而通信中断的时候,主要发射机(节点 A)将特定次要发射机作为中继节点并且向主要接收机(节点 B)转发信息,从而改善主要网络的服务质量。

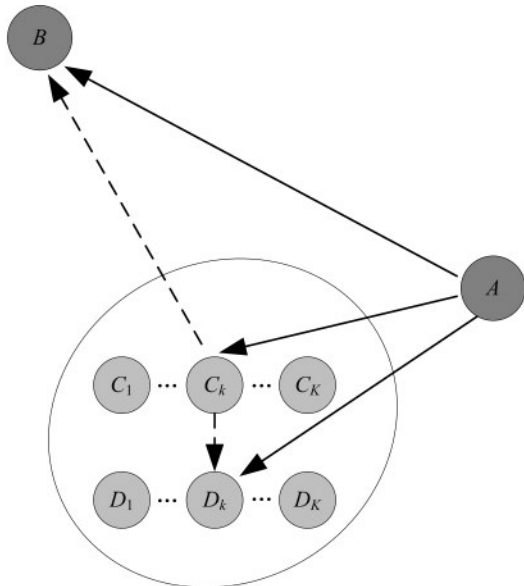


图2 认知机器交互网络的普遍协作传输机制

这里所研究的普遍协作传输机制采用增量型解码转发协议和覆盖频谱共享方式,它包含两个时间阶段。在第一个传输阶段中,主要发射机尝试直接向主要接收机传输信息。如果主要接收机能够成功接收前者发送的消息,那么它将广播反馈消息、通知传输成功。接着,主要网络可以传输后续消息。否则,主要发射机和主要接收机之间的直接链路信噪比低于可接受的门限。这时,主要接收机将广播反馈消息,通知主要直接链路传输失败并且提出中继请求。接下来,在第二个传输阶段中,根据特定准则在次要发射机集合中选择中继节点并且由其向主要接收机转发消息。主要网络所选定的中继节点,同时还是与特定次要接收机配对的次要发射机。需要指出的是,普遍协作传输机制需要健壮的

认知反馈信道,用以通知主要发射机和中继节点是否成功传输。

在第二个传输阶段中,首先根据特定准则选择中继节点。如果次要网络中至少存在一个发射机符合条件,那么有可能成功实现解码转发,否则主要网络将发生中断。主要接收机采用最大比值合并技术整合来自主要发射机的(第一个传输阶段)和来自次要发射机的(第二个传输阶段)两个接收信号副本。

1.2 服务类型

根据频谱利用模式和服务质量的不同需求,将智慧矿山工业物联网提供的服务分为四个主要类型^{[3][6][24]}。(1)类型-1:它是普遍存在的一类服务,对物联网设备的输出信息提供可靠的传输,通常需要较大的频谱带宽,比如远程监测服务。(2)类型-2:它是面向身份识别的一类服务,采用诸如无线射频识别的技术,用于确认关于人员、设备或资源(比如矿业物资)的信息。(3)类型-3:它是关于信息处理的一类服务,它采集并处理信息,并且对所产生的数据进行管理和传输,比如矿山智能交通服务。(4)类型-4:它是关于紧急情况的一类传输服务(比如井下有毒气体超标预警)。在不同的应用场景中,同一台的物联网设备可能产生不同类型的服务请求。比如,当一个监测设备向数据中心发送其周期性信号的时候,它产生类型-1的服务请求。但是,当该设备发现异常情况并且发送紧急数据的时候,它将产生类型-4的服务请求。

各个频谱需求对应的服务优先级由三个乘式因子综合确定,其中包括与服务类型有关的优先级因子(见第3节)。结合智慧矿山工业物联网的实际情况,设定类型-1、-2、-3、-4的服务具有依次增加的服务类型优先级因子。而且,当类型-4的服务采用可用频谱的时候,类型-1、-3的服务不能与之共存,反之则类型-1、-2、-3的服务可以共存。进一步设定,如果当前物联网系统中存在类型-1、-2或-3的服务,那么当出现类型-4的服务请求的时候,类型-1和-3的服务将会被取代,而类型-2的服务不会被取代(因为这类服务一般只在很短时间内占用频谱)。接下来,被取代的服务重新加入相应等待队列,在具备条件的时候再次启动该服务。

2 信息物理系统模型

信息物理系统以事件为驱动，采用感知、计算等技术，通过网络实现终端设备之间的信息交换，以此来监测或控制物理环境。CPS模型通常由三个层次（物理层、信息-物理层和信息层）和一条流线（比如，信息汇聚流）组成，并且利用有限状态机表示系统特定层次的状态和状态转移的集合。

在智慧矿山工业物联网中，设备以事件的形式发送环境信息和提出服务请求，因此对其进行事件驱动的CPS时空建模^[17-18]。在服务优先级化通信单元中，存在两类系统事件：（1）频谱资源事件：频谱使用监视器周期性的产生这类事件，它们提供频谱可用性信息（空闲频段、时空范围、信干噪比等）；（2）频谱需求事件：当设备需要传输数据的时候，它们产生这类事件，并且将其作为服务请求提交给频谱需求分析器。本文所提出的服务优先级化频谱调度方法面向频谱需求事件的智能化处理。针对智慧矿山工业物联网，频谱需求事件的结构化层次如图3所示，其中从下到上的层次对应着服务优先级化的事件处理流程，事件网关、筛选器和动态频谱推理机分别对应着CPS模型的物理层、信息-物理层和信息层。

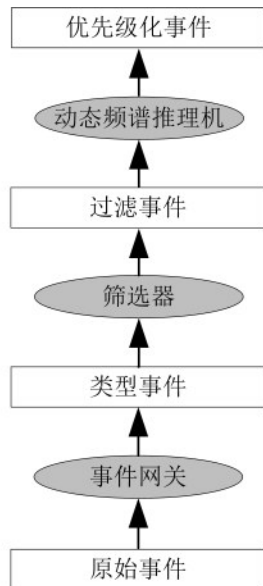


图3 频谱需求事件的结构化层次

由图3可见，物联网设备产生频谱需求的原始事件，它们包含特定服务请求的带宽、数据分组长度、临界时间（数据分组可容忍的最大服务时延）、

通信协议等信息。接下来，事件网关、筛选器和动态频谱推理机分别依次产生类型事件、过滤事件和优先级化事件，这些频谱需求事件形成CPS模型中的信息汇聚流。

针对智慧矿山的服务优先级化通信单元，设置六个不同状态，即状态-1、-2、-3、-4、-S和-OFF。状态-1、-2、-3和-4分别表示类型-1、-2、-3和-4的服务占用频谱。状态-S表示多个不同类型的服务同时存在且共享可用频谱。状态-OFF表示频谱空闲、不产生通信量。根据第1.2节所述内容，构建智慧矿山工业物联网的连续时间马尔科夫链多状态转换图，如图4所示，它描述了相应CPS模型的信息层有限状态机。

智慧矿山工业物联网存在大量服务请求，将类型- i （ $i = 1, 2, 3, 4$ ）的服务请求到达建模为具有参数 λ_i 的泊松过程（ λ_i 为到达率），并将其持续时间建模为具有参数 $1/\mu_i$ 的负指数分布（ μ_i 为服务率）^[20-21]。在智慧矿山工业物联网的CPS模型中，利用实际通信数据和实验方法估计不同类型服务的统计量（比如，状态转移概率）。

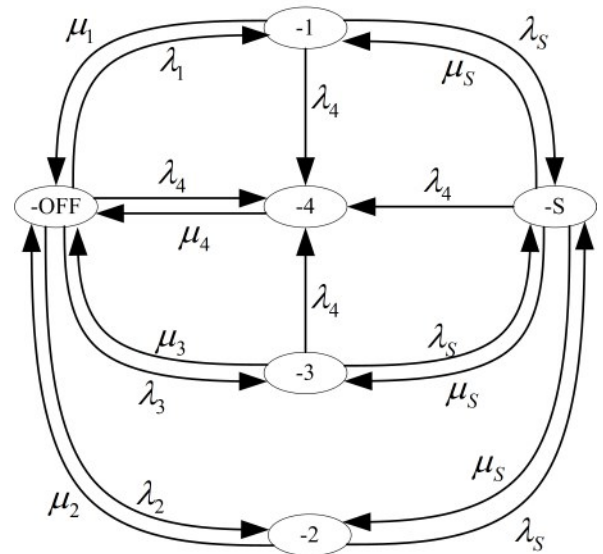


图4 连续时间马尔科夫链的多状态转换图

当物联网处于状态-1、-3或-S的时候，如果有类型-4的服务请求到达，那么原先这些状态所对应的各类型服务将被终止，并且物联网将以速率 λ_4 进入状态-4。当物联网处于状态-4的时候，即使类型-4的服务没有充分利用可用频谱，其它类型的服务请求也不能得到响应。当多个不同类型的服务进行

频谱共享的时候, 物联网将以同时出现的多类服务联合到达率 λ_s 转移到状态-S。根据智慧矿山工业物联网的CPS模型, 推导通信量平衡方程^{[17][20]}, 如式(1)所示:

$$\begin{cases} \mu_1\pi_1 + \mu_2\pi_2 + \mu_3\pi_3 + \mu_4\pi_4 = \pi_{OFF}\beta \\ \lambda_1\pi_{OFF} + \mu_s\pi_s = (\mu_1 + \lambda_s + \lambda_4)\pi_1 \\ \lambda_2\pi_{OFF} + \mu_s\pi_s = (\mu_2 + \lambda_s)\pi_2 \\ \lambda_3\pi_{OFF} + \mu_s\pi_s = (\mu_3 + \lambda_s + \lambda_4)\pi_3 \\ \lambda_4(\pi_{OFF} + \pi_1 + \pi_3 + \pi_s) = \mu_4\pi_4 \\ \lambda_s(\pi_1 + \pi_2 + \pi_3) = (3\mu_s + \lambda_4)\pi_s \end{cases} \quad (1)$$

同时有

$$\pi_{OFF} + \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 + \pi_s = 1 \quad (2)$$

其中 π_j 表示物联网处于状态-j的稳态概率($j \in \{OFF, 1, 2, 3, 4, S\}$), $\beta = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4$ 为四类服务的组合到达率。式(1)可以改写为

$$\mathbf{Q}\boldsymbol{\pi} = \mathbf{0} \quad (3)$$

其中 $\mathbf{0}$ 为 6×1 的零向量, 稳态概率向量 $\boldsymbol{\pi} = [\pi_{OFF}, \pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_s]^T$ 。 $\mathbf{Q}$ 为状态转移速率矩阵, 如式(4)所示:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} -\beta & \mu_1 & \mu_2 & \mu_3 & \mu_4 & 0 \\ \lambda_1 & P1 & 0 & 0 & 0 & \mu_s \\ \lambda_2 & 0 & P2 & 0 & 0 & \mu_s \\ \lambda_3 & 0 & 0 & P3 & 0 & \mu_s \\ \lambda_4 & \lambda_4 & 0 & \lambda_4 & -\mu_4 & \lambda_4 \\ 0 & \lambda_s & \lambda_s & \lambda_s & 0 & P4 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中 $P1 = -(\mu_1 + \lambda_s + \lambda_4)$, $P2 = -(\mu_2 + \lambda_s)$, $P3 = -(\mu_3 + \lambda_s + \lambda_4)$, $P4 = -(3\mu_s + \lambda_4)$ 。

结合式(2)和式(3), 可以计算连续时间马尔科夫链的多状态稳态概率分布 $\boldsymbol{\pi}$, 支持动态频谱推理机改善工业物联网的频谱接入性能。

3 服务优先级

在智慧矿山机会性通信系统的服务优先级化通信单元中, 频谱需求分析器、事件网关、筛选器协同工作, 对物联网的服务请求进行监测和分类, 进而形成四个服务请求队列 Qu_1 、 Qu_2 、 Qu_3 、 Qu_4 (长度分别为 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4)。动态频谱推理机的工作原理框图如图5所示。

每个服务请求队列根据到达时间先后分别对相应类型的物联网频谱需求进行排序。接下来, 动态

频谱推理机推导各个频谱请求的服务优先级, 并结合频谱态势和多状态稳态概率进行频谱资源调度决策。

为了计算第 s 个服务请求 (具有服务类型- i) 的优先级, 考察经验性的服务优先级索引函数 $P(s, i)$, 如式(5)所示:

$$P(s, i) = \alpha_i^e \times \left(\frac{n_i}{N}\right)^f \times \left(\frac{t_s}{T_s}\right)^g \quad (5)$$

其中 α_i 为服务类型优先级因子, n_i 为当前待响应的类型- i 服务请求数量 (服务队列 Qu_i 的长度), N 为当前所有待响应的服务请求数量 (四个服务请求队列的总长度), t_s 为第 s 个服务请求已等待的时间, T_s 为第 s 个服务请求的临界时间, e 、 f 和 g 为指数。针对特定矿山工业物联网的应用场景, 对比和分析多种形式的服务优先级函数, 设定 $e = f = g = 1$ 。

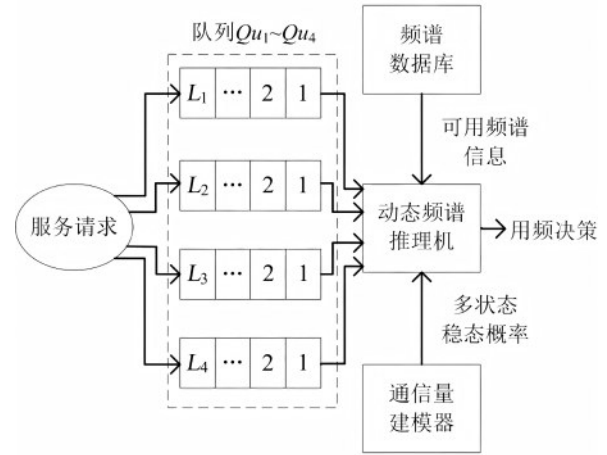


图5 动态频谱推理机的工作原理框图

该服务优先级索引函数包含三个乘式因子。服务类型优先级因子 α_i 根据服务类型评估相应数值; 公平性优先级因子 n_i/N 根据不同类型的待响应服务请求数量评估相应数值, 从而避免具有低服务类型优先级因子的频谱需求产生“响应饥饿”、保证服务公平性; 时延优先级因子 t_s/T_s 则将较高的数值赋予那些等待时间接近临界时间的服务请求。

接下来, 根据通信量的CPS模型, 如果物联网处于状态-1、-2、-3或-4, 那么动态推理机将在相同类型的服务请求之间共享可用信道; 如果物联网处于状态-S, 那么多个类型的服务可以共享可用信

道。需要指出的是，在每次重新分配频谱的时候，通信量建模机和频谱使用监视器都要分别更新多状态稳态概率和频谱数据库。而且，各个队列中的服务请求都受制于可用带宽容量，不匹配的服务请求将会被丢弃。

4 普遍协作传输

面向普遍协作传输的认知机器交互网络（见图2），仅参考主要发射机-中继节点的信道状态信息，设计部分机会性的中继节点选择准则，最大化第二个传输阶段第一跳的信噪比。

该部分机会性的中继节点选择准则表示如下：

$$k^* = \arg \max_{k \in \{1, \dots, K\}} \gamma_{A-C_k} \quad (6)$$

其中 K 为可用中继节点的总体数量， k 为可用中继节点的序号， C_k 为所选中的中继节点（ k^* 为相应序号）， A 为主要发射机， γ_{A-C_k} 为中继节点处主要信号的信噪比。部分机会性的中继节点选择准则只面向第二个传输阶段第一跳的 K 个链路（而非两跳的 $2K$ 个链路），因此具有较低的工程复杂度。

在第二个传输阶段，选定中继节点 C_{k^*} 转发主要发射机 A 的信号到主要接收机 B 。同时，这个中继节点作为次要发射机，还需要发送自己的信号到配对的次要接收机 D_{k^*} 。为了实现两者的并行传输，次要发射机 C_{k^*} 以分配因子 μ_{k^*} （ $\mu_{k^*} \in (0,1)$ ）分解其发射功率 P_C ，并且以功率 $\mu_{k^*} P_C$ 和 $(1 - \mu_{k^*}) P_C$ 分别转发中继链路的信号和发送次要链路的信号^{[27][31]}。假设所有接收机处都存在方差为 N_0 的零均值加性白高斯噪声。通过主要直接链路和中继链路，在主要接收机处形成的主要信号信噪比 γ_{A-B} 和 $\gamma_{C_{k^*}-B}$ 分别为

$$\gamma_{A-B} = \frac{P_A |h_{A-B}|^2}{N_0} \quad (7)$$

和

$$\gamma_{C_{k^*}-B} = \frac{\mu_{k^*} P_C |h_{C_{k^*}-B}|^2}{(1 - \mu_{k^*}) P_C |h_{C_{k^*}-B}|^2 + N_0} \quad (8)$$

其中 P_A 为主要发射机的发射功率， h_{A-B} 和 $h_{C_{k^*}-B}$ 分别为主要直接链路和中继链路第二跳的信道系数。在与次要发射机 C_{k^*} 配对的次要接收机 D_{k^*} 处，次要信号信噪比 $\gamma_{C_{k^*}-D_{k^*}}$ 可以写成

$$\gamma_{C_{k^*}-D_{k^*}} = \frac{(1 - \mu_{k^*}) P_C |h_{C_{k^*}-D_{k^*}}|^2}{N_0} \quad (9)$$

其中 $h_{C_{k^*}-D_{k^*}}$ 为次要链路的信道系数。需要指出的是，虽然在第二个传输阶段中次要接收机处可能存在主要直接链路的信号，但是该接收机在第一个传输阶段中已经获得该信号的副本，从而可以将其作为干扰信号而消除之^[30-31]。

在增量型解码转发的普遍协作传输方案中，如果主要信号端到端的瞬时速率低于目标速率门限，则发生中断。也就是说，当直接传输（第一个传输阶段）无法达到速率门限而且中继节点集合也为空（第二个传输阶段）的时候，主要信号传输会发生中断；或者，虽然存在中继节点成功检测并解码了主要信号，但是主要直接链路和中继链路的协作传输仍不能达到目标速率的时候，主要信号传输也会发生中断^{[30][32]}。因此，考察下面的两个情形：

情形1：在第二个传输阶段第一跳中，所有次要发射机都未能成功解码主要发射机源消息（即 $K=0$ ），形成空的中继集合 F_0 。从信息理论的角度，它可以表示为中继链路第一跳的传输速率低于次要网络速率门限 R_s 的事件，此类事件发生概率为

$$\Pr(F = F_0 | P_A) = \Pr\left[\frac{1}{2} \log(1 + \gamma_{A-C_k}) < R_s, \forall k \in \{1, 2, \dots, M\}\right] \quad (10)$$

其中 M 为次要发射机的总体数量，因子“ $1/2$ ”考虑了完成每次传输需要两个传输阶段。

在情形1中，没有中继节点参与转发源消息。如果主要直接链路的传输速率也低于主要网络门限 R_p ，那么就会发生中断事件。在这个情形中，主要接收机处的信噪比等于式（7）给出的 γ_{A-B} 。此时主要信号传输的中断概率如式（11）所示：

$$P_{out|F=F_0, P_A} = \Pr[\log(1 + \gamma_{A-B}) < R_p] \quad (11)$$

情形2：在第二个传输阶段第一跳中，有 K 个次要发射机能够成功解码主要发射机的源消息（ $K > 0$ ），形成非空的可用中继节点集合 F_K 。这个事件的概率为

$$\Pr(F = F_K | P_A) = \Pr\left[\frac{1}{2} \log(1 + \gamma_{A-C_i}) \geq R_s, \forall i \in F_K, \frac{1}{2} \log(1 + \gamma_{A-C_j}) < R_s, \forall j \in \bar{F}_K\right] \quad (12)$$

在这个情形中，如果通过主要直接链路和中继

链路进行协作传输,但主要接收机处的总体瞬时速率仍低于速率门限,那么主要信号传输会发生中断,中断概率可以表示如下:

$$P_{out|F=F_K, P_A, P_{C_k}} = \Pr \left[\log(1 + \gamma_{A-B}) < R_P, \right. \\ \left. \frac{1}{2} \log(1 + \gamma_{A-B} + \gamma_{C_k-B}) < R_P \right] \quad (13)$$

综合以上两个情形,主要信号的端到端中断概率表示如下:

$$P_{out|P_A, P_{C_k}} = P_{out|F=F_0, P_A} \Pr(F=F_0|P_A) + \\ \sum_{K=1}^M \binom{M}{K} P_{out|F=F_K, P_A, P_{C_k}} \Pr(F=F_K|P_A) \quad (14)$$

5 数值仿真

在三台高性能计算机上执行系统仿真和性能评估,其中A机仿真频谱需求事件,B机实现所提频谱调度算法和参照算法,C机实现所提普遍协作传输机制及其参照方法。主要仿真参数如表1所示。

采用套接口程序,以事件驱动的方式将仿真得到的频谱需求从A机传送给B机和C机,分别产生相应的用频策略和协作传输策略,进而评估其服务时间、服务完成率、公平性、中断概率等关键性能指标。

5.1 服务时间和服务完成率

将基于自有临界程度的优先级算法(OCBP, Own Criticality Based Priority)作为参照算法,它是基于Audsley方法的固定优先级化频谱调度算法^[13-14]。针对1000个均匀分布的四类物联网服务请求,评估该参照算法和所提频谱调度算法的服务时间和服务完成率,分别如图6和图7所示,其中服务时间是特定服务类型的频谱需求到达服务请求队列和服务完成之间的时间间隔。

服务完成率和服务时间是智慧矿山工业物联网频谱调度方法的关键性能指标。由图6和图7可见,与OCBP算法相比,对于四类物联网服务,所提频谱调度算法的平均服务时间和平均服务完成率都有超过50%的改善。而且,由图6可见,相较于其它三类频谱需求,所提频谱调度算法对具有最高服务类型优先级因子(即类型-4)的服务请求提供了最短的服务时间。

表1 仿真参数

参数	数值
工作(共享)频率	C频段
类型-1服务类型优先级因子 α_1	0.2
类型-1服务工作带宽(MHz)	2-16
类型-1服务临界时间(ms)	60-800
类型-2服务类型优先级因子 α_2	0.4
类型-2服务工作带宽(kHz)	8-16
类型-2服务临界时间(ms)	120-300
类型-3服务类型优先级因子 α_3	0.6
类型-3服务工作带宽(kHz)	20-40
类型-3服务临界时间(ms)	20-50
类型-4服务类型优先级因子 α_4	0.8
类型-4服务带宽(kHz)	2-20
类型-4服务临界时间(ms)	20
服务优先级索引函数指数 e, f, g 默认值	1
主要网络速率门限 R_p (bps/Hz)	0.5
次要网络速率门限 R_s (bps/Hz)	0.5
次要发射机的总体数量 M	3
可用中继节点的数量 K	2
中继节点发射功率分配因子 μ_k	0.75
信道模型	Nakagami-m 模型
多径散射平均功率 Ω	1
主要直接链路的衰落因子 m_{A-B}	1
中继链路第一跳的衰落因子 m_{A-C_k}	2
中继链路第二跳的衰落因子 m_{C_k-B}	2

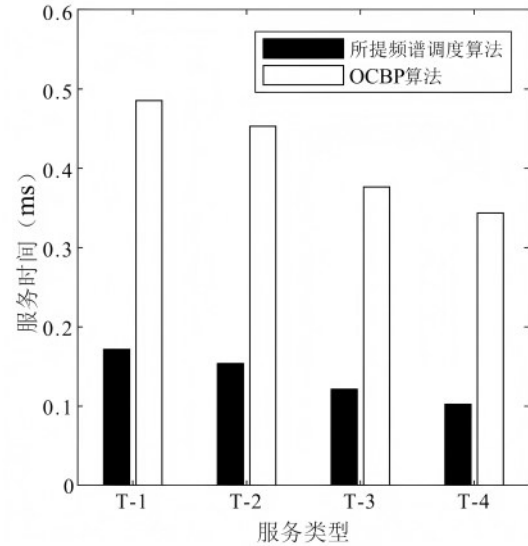


图6 服务时间比较

5.2 通信量建模

将仅服务优先级化的算法作为参照算法,该算法仅根据式(5)所确定的服务请求优先级分配可

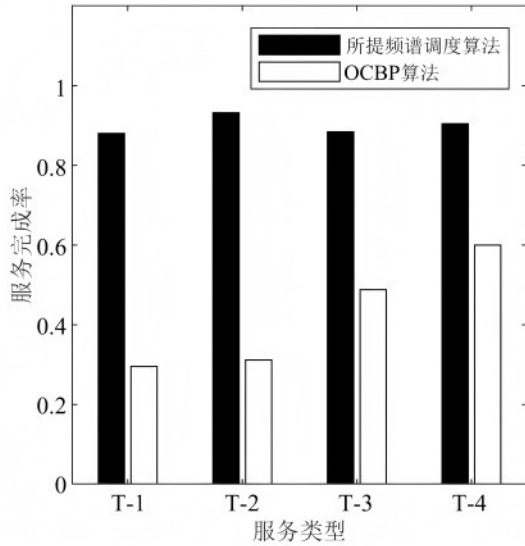


图7 服务完成率比较

用频谱。针对1000个均匀分布的四类物联网服务请求，评估参照算法和所提频谱调度算法的服务完成率，考察通信量建模所带来的性能改善，如图8所示。

由图8可见，面向服务优先级化频谱调度算法，基于CPS的通信量建模器提供了约15%的平均服务完成率提升，从而进一步迎合了实时和非实时的物联网服务质量需求。

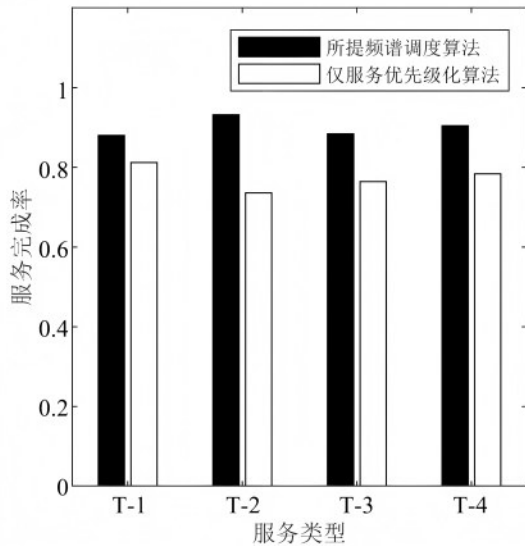


图8 通信量建模所提供的服务完成率改善

5.3 服务公平性

针对1000个均匀分布的四类物联网服务请求，将最大-最小算法作为参照算法，与所提频谱调度

算法进行服务公平性的比较，如图9所示。

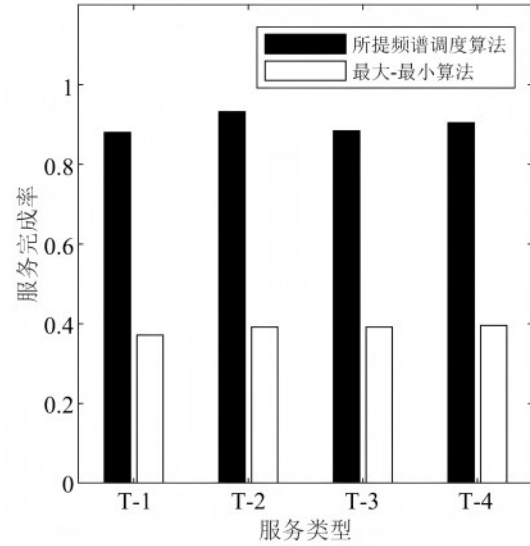


图9 服务公平性比较

最大-最小算法以平等方式将可用频谱带宽分配给各种类型的服务，因此具有较好的公平性^{[11][19]}。结合图7和图9可见，与OCBP算法相比，所提频谱调度算法和最大-最小算法对四类物联网服务提供了基本均等的服务完成率，因此具有较好的服务公平性；但是，所提频谱调度算法的平均服务完成率明显优于最大-最小算法。

5.4 服务优先级索引函数

如前所述，式（5）所示服务优先级索引函数是对特定矿山工业物联网实际应用场景和大量实测数据进行分析对比所得到的经验公式。限于篇幅，在本文中无法展示所有的对比分析结果。因此，我们考察四个情形，展示该服务优先级索引函数的有效性，如图10所示。这四个情形分别是：（1）Case-1：指数 $e=f=g=1$ ；（2）Case-2： $e=f=g=0.5$ ；（3）Case-2： $e=f=g=2$ ；（4）Case-4： $e=f=g=3$ 。针对1000个平均分布的四类物联网服务请求，评估所提频谱调度算法的平均服务完成率。由图10可见，与 $e=f=g=1$ 的情形相比，当向小于1或大于1的方向调整三个乘数因子的指数（即 e 、 f 或 g ）时，物联网服务的平均完成率性能都会出现不同程度的退化。因此，在本文工作中，将这三个指数都设置为1，如表1所示。

5.5 普遍协作传输

针对所提认知机器交互网络的普遍协作传输机

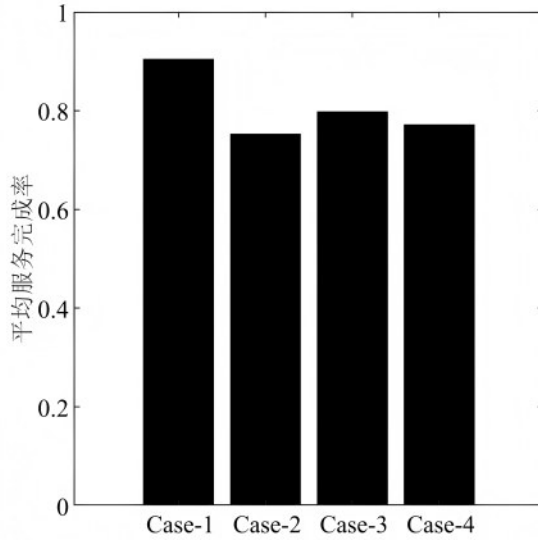


图10 服务优先级索引函数指数对服务完成率的影响

制, 本节执行蒙特卡洛数值仿真并且验证其中断性能。假设主要发射机 A 和中继节点 C_k 处具有相同的发射信噪比。进一步的, 将主要直接链路、中继链路(含两跳)和次要链路的衰落信道都建模为Nakagami-m模型, 并将它们的多径散射平均功率 Ω 都设置为1; 将主要直接链路 $A-B$ 的衰落因子 m_{A-B} 设置为1, 即该信道处于严重多径衰落条件; 而将中继链路第一跳 $A-C_k$ 和第二跳 C_k-B 的衰落因子 m_{A-C_k} 和 m_{C_k-B} 都设置为2, 以表示一般多径衰落信道^{[23][33]}。

将仅采用主要直接链路的传输机制、部分机会性的增量型放大转发传输机制和全机会性的增量型解码转发传输机制作为参照方法。仅利用主要直接链路的传输机制不采用普遍协作方式进行数据传输; 部分机会性的放大转发传输机制工作流程与本文所提的普遍协作传输机制相似, 但它采用增量型放大转发协议; 在全机会性的解码转发传输机制中, 假设第二个传输阶段两跳的信道状态信息都充分可用, 并据此选择中继节点。将参照方法与本文所提的普遍协作传输机制进行主要信号端到端中断概率性能比较, 结果如图11所示。

由图11可见, 与仅利用主要直接链路进行传输的机制相比, 本文所提出的传输机制由于采用了普遍协作传输方法, 所以主要信号的端到端中断概率大幅下降(比如, 在信噪比15dB处, 中断概率下降约130倍)。与部分机会性的放大转发机制相

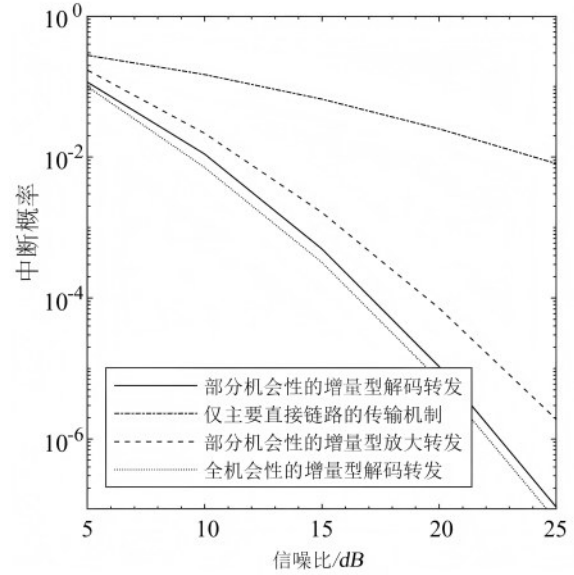


图11 主要信号端到端中断概率与信噪比的关系

比, 本文所提出的传输机制由于采用了解码转发协议, 从而避免了噪声传递效应的影响, 因此也具有较好的中断概率性能(比如, 在信噪比15dB处, 中断概率下降约4倍)。而且, 虽然本文所提出的普遍协作传输机制只考虑了第二个传输阶段第一跳的信道状态信息, 但是它与全机会性的解码转发传输机制性能相近。

接下来, 针对所提出的认知机器交互网络普遍协作传输机制, 考察次要网络在频谱共享方式下的中断性能。如前所述, 次要网络也被建模为Nakagami-m衰落信道模型, 图12给出了其中断概率和信噪比之间的关系曲线。结合图11和图12可以看到, 所提出的普遍协作传输机制在保证主要信号传输服务质量的同时, 也为次要网络提供了频谱共享的机会。而且, 由图12可见, 当信道的多径散射衰落影响减弱的时候(Nakagami-m模型衰落因子从1变为2), 次要网络的中断概率有一定程度的改善(比如, 在信噪比15dB处, 中断概率下降约4倍)。

6 结束语

随着智慧矿山建设的不断推进, 来自工业物联网设备的海量异构频谱接入需求快速增长, 频谱资源短缺的问题日益凸显。这些物联网设备在地理上呈现分散性分布, 它们的通信链路易于受到矿山复杂信道环境的影响而发生中断。为此, 本文研究基

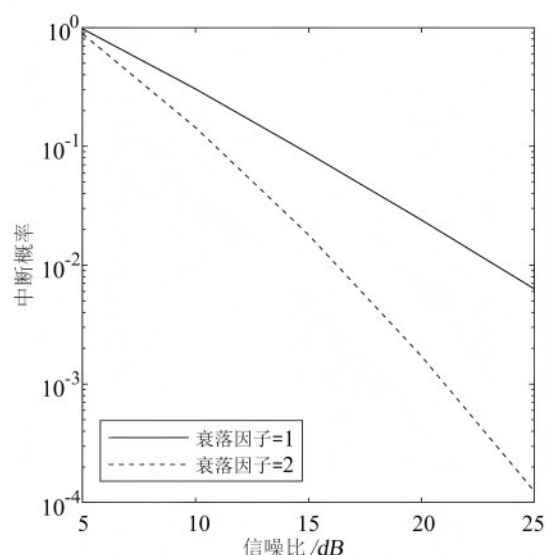


图12 次要网络中断概率与信噪比的关系

于服务优先级化、通信量建模和普遍协作传输的机会性通信系统架构和相关赋能技术。该机会性通信系统根据频谱利用模式和服务质量的不同属性，对物联网服务的频谱需求进行分类，进而结合物联网服务的重要程度、临界时间和公平性动态推导它们的服务优先级，并据此自适应的完成频谱调度实时决策。特别的，在所提出的服务优先级化频谱调度方法中，利用多状态连续时间马尔科夫链构建关于物联网异构通信量的CPS模型，推导相应的状态稳态概率，支持频谱分配决策。进一步的，为了减轻矿山复杂信道条件对物联网通信的影响和促进机器交互网络的频谱共享，本文研究认知机器交互网络的普遍协作传输机制，根据不充分可用的信道状态信息，设计部分机会性的中继节点选择准则，实现增量型解码转发协议和覆盖方式频谱共享。

数值仿真表明，所设计的服务优先级化频谱调度方法具有低服务时延、高服务完成率和服务公平性，可以实现不同类型物联网服务之间的频谱共享；通信量建模机制则进一步提高了该频谱调度方法的服务完成率；在不充分可用的信道状态信息条件下，所研究的普遍协作传输机制能够强化认知机器交互网络主要网络的服务质量和促进次要网络的动态频谱共享。

参考文献：

[1] MIN M H, XIAO J Y, ZHANG P, et al. Learning-based IRS-assisted secure transmission for mine IoTs[J]. *Sensors*, 2023, 23

(14): 6321.

[2] 龚淑蕾, 李堃, 童恩, 等. 基于蜂窝工业物联网的智能工厂解决方案[J]. *物联网学报*, 2019, 3(2): 108-114.

GONG S L, LI K, TONG E, et al. Smart factory solutions based on cellular industrial Internet of Things[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2019, 3(2): 108-114.

[3] ZHANG J, YAN Q C, ZHU X G, et al. Smart industrial IoT empowered crowd sensing for safety monitoring in coal mine[J]. *Digital Communications and Networks*, 2023, 9(2): 296-305.

[4] 史晓雪. 基于Kubernetes的无服务器平台服务端的设计与实现[D]. 南京: 东南大学, 2022.

SHI X X. Server-side design and implementation of Kubernetes-based serverless platform[D]. Nanjing: Southeast University, 2022.

[5] IZZELDIN M, ZHANG L, SATHYA V, et al. Analysing the performance of commercial 5GC in private network deployment[J]. *International Journal of Mobile Network Design and Innovation*, 2024, 11(1): 19-26.

[6] ESWARAN S P, ARIHARAN V, BAPAT J. Event driven opportunistic communication enabler for smart city[C]//2014 Eighth International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies. Oxford: IEEE Press, 2014: 313-319.

[7] ROSLEE M, CHUAN L L, LEONG P W, et al. Analysis of spectrum utilization in data centers for Internet of Things[C]//2021 IEEE 15th Malaysia International Conference on Communication. Kuala Lumpur: IEEE Press, 2021: 7-12.

[8] ZHANG L, YANG W, et al. Edge computing resource allocation method for mining 5G communication system[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 49730-49737.

[9] SLATER D. Machine-to-machine systems improve mine efficiency[J]. *Creamer Media's Mining Weekly*, 2015, 21(17): 34-35.

[10] 王威, 李祖广, 吴启晖. 基于区块链的动态频谱共享接入技术[J]. *物联网学报*, 2020, 4(2): 26-34.

WANG W, LI Z G, WU Q H. Dynamic spectrum sharing access technology based on blockchain[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2020, 4(2): 26-34.

[11] ZHANG C, WAN X, LI W J, et al. A survey on communication and computing resources allocation and management for cohesive clustered satellites systems[J]. *Science China Information Sciences*, 2025, 68(9): 94-124.

[12] RAJESH C B, AMUTHA B, KADIYALA R, et al. Elite-CAM: an elite channel allocation and mapping for policy engine over cognitive radio technology in 5G[J]. *Sensors*, 2022, 22(13): 5011-5032.

[13] HAWA M, JUBAIR F, ZUBI A R, et al. Priority-based band sharing for secondary users in cognitive radio networks[J]. *AEUE - International Journal of Electronics and Communications*, 2024, 187: 5533-5548.

[14] SOCCI D, POPLAVKO P, BENSALEM S, et al. Priority-based scheduling of mixed-critical jobs[J]. *Real-Time Systems*, 2019, 55(4): 709-773.

[15] NATTHANAN P. Development of interference mitigation tech-

- niques based artificial neural network for IoT network[C]//2021 18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology. Chiang Mai: IEEE Press, 2021: 374-377.
- [16] MOHAMMADKARIMI M, DOBRE O A, WIN M Z. Massive uncoordinated multiple access for beyond 5G[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(5): 2969-2986.
- [17] ESWARAN S P, BAPAT J. Service centric markov based spectrum sharing for Internet of Things (IoT)[C]//2015 IEEE Region 10 Symposium. Ahmedabad: IEEE Press, 2015: 9-12.
- [18] KHUJAMATOV K, REYPAZAROV E, KHASANOV D, et al. Networking and computing in Internet of Things and cyber-physical systems[C]//2020 IEEE 14th International Conference on Application of Information and Communication Technologies. Tashkent: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [19] LAKHDARI A, BOUGUETTAYA A. Fairness-aware crowdsourcing of IoT energy services[C]//2021 19th International Conference on Service-Oriented Computing. Dubai: IEEE Press, 2021: 351-367.
- [20] 吴呈瑜. 认知无线网络中频谱接入与切换技术的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- WU C Y. Research on spectrum access and spectrum handoff in cognitive radio networks[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [21] QI H, YAN S, QIANG Z. Study of a traffic model based on adaptive chaotic mapping for mMTC services[C]//2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. Xi'an: IEEE Press, 2019: 363-368.
- [22] BELGIOVINE M, GU J, GROEN J, et al. MEGATRON: Machine learning in 5G with analysis of traffic in open radio access networks[C]//2024 International Conference on Computing, Networking and Communications. Big Island: IEEE Press, 2024: 1054-1058.
- [23] COULIBALY Y, MNASRI B, NEDIL M, et al. Experimental characterization of a mimo underground mine channel at 2.45 GHz[J]. Progress in Electromagnetics Research B, 2013, 50: 219-234.
- [24] MISHRA N, KUNDU S, MONDAL S, et al. Cognitive machine to machine communication with energy harvesting in IoT networks [C]//2019 11th International Conference on Communication Systems and Networks. Bengaluru: IEEE Press, 2019: 672-677.
- [25] 张更新, 揭晓, 曲至诚. 低轨卫星物联网的发展现状及面临的挑战[J]. 物联网学报, 2017, 1(3): 6-9.
- ZHANG G X, JIE X, QU Z C. Development status and challenges of LEO IoT[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2017, 1(3): 6-9.
- [26] 王巍, 谷壬倩, 彭力, 等. 基于无人机的物联网空基中继鲁棒优化[J]. 物联网学报, 2022, 6(1): 101-112.
- WANG W, GU R Q, PENG L, et al. Robust optimization of air based relay for internet of things based on UAV[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2022, 6(1): 101-112.
- [27] PANKAJ K S, PRABHAT K U, DANIEL B C, et al. Performance analysis of overlay spectrum sharing in hybrid satellite-terrestrial systems with secondary network selection[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(10): 6586-6601.
- [28] WANG H T, REN R, QU D, et al. A radio environment mapping based spectrum awareness for cognitive space information network with GEO and LEO coexistence[C]//2020 12th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. Nanjing: IEEE Press, 2020: 654-659.
- [29] 王海涛, 茆习文, 张晨, 等. 基于天基干扰绘图的地空一体化系统频谱共享研究[J]. 通信学报, 2024, 45(3): 155-165.
- WANG H T, MAO X W, ZHANG C, et al. Study of spectrum sharing in integrated satellite-terrestrial system based on space-based interference cartography [J]. Journal on Communications, 2024, 45 (3): 155-165.
- [30] HAGAG A, AMIN O, CAO L, et al. Generalized cooperative spectrum sharing scheme for Internet of Things systems[C]//2018 IEEE International Conference on Communications. Kansas City: IEEE Press, 2018: 4423-4429.
- [31] SANGKU L, JANGHYUK Y, CHUL B J. Hybrid AF/DF cooperative relaying technique with phase steering for industrial IoT networks[J]. Energies, 2021, 14(4): 937-948.
- [32] OJO S I, ABOLADE R O, ALAGBE O L, et al. Performance enhancement of decode and forward relaying network in a log-normal fading channel using diversity technique[J]. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics, 2024, 12(2): 255-265.
- [33] 王承祥, 黄杰, 王海明, 等. 面向 6G 的无线通信信道特性分析与建模[J]. 物联网学报, 2020, 4(1): 19-32.
- WANG C X, HUANG J, WANG H M, et al. 6G oriented wireless communication channel characteristics analysis and modeling[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(1): 19-32.

[作者简介]



王海涛 (1980-), 男, 博士, 南京邮电大学副教授, 主要研究方向为物联网先进传输方案、卫星通信新体制、频谱共享技术等。



张海杰 (2003-), 男, 学士在读, 南京邮电大学应用技术学院本科生, 主要研究方向为 AI 与物联网融合、低功耗嵌入式系统设计等。



蒋世杰 (1974-), 男, 硕士, 新疆红山能源矿业有限公司总经理, 高级工程师, 主

要研究方向为智慧矿山建设、先进信息系

统管理、综采工作面分析控制等。