

认知容量收集网络中网络切片频谱共享策略

黄杰¹, 杨凡¹, 谢应昭², 左迅¹, 邱天¹

(1. 重庆理工大学电气与电子工程学院, 重庆 400054; 2. 国家电网重庆电力公司信息通信分公司, 重庆 400012)

摘 要: 针对认知容量收集网络中网络切片的频谱共享问题, 提出了一种认知容量收集网络中网络切片频谱共享策略。通过建立 4D 冲突图模型, 提出了无冲突节点集的求解方法, 并建立了频谱共享的机会容量模型, 推导了非授权信道的机会容量, 联合 4D 冲突图模型和机会容量模型提出了一种认知容量收集网络中网络切片频谱共享策略。仿真结果表明, 与现有算法相比, 所提算法能有效利用机会频谱资源, 进一步提高信道利用率。

关键词: 认知容量收集网络; 网络切片; 频谱共享; 冲突图模型

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2021137

Network slicing with spectrum sharing strategy in cognitive capacity harvesting network

HUANG Jie¹, YANG Fan¹, XIE Yingzhao², ZUO Xun¹, QIU Tian¹

1. School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China

2. State Grid Chongqing Information and Telecommunication Company, Chongqing 400012, China

Abstract: To realizing the network slice with spectrum sharing in cognitive capacity harvesting network, a spectrum sharing strategy was proposed based on 4D conflict graph and opportunistic capacity. Firstly, a 4D conflict graph model for mesh network was built and a method to achieve the node sets with conflict free was proposed. Then, the opportunistic capacity model of spectrum sharing was established and the opportunistic capacity of the unlicensed channel was derived. Finally, the spectrum sharing strategy based on 4D conflict graph and opportunistic capacity was proposed for cognitive capacity harvesting network. The simulation results show that compared with existing algorithms, the proposed algorithm can effectively utilize opportunistic spectrum resources and further improve channel utilization.

Keywords: cognitive capacity harvesting network, network slicing, spectrum sharing, conflict graph model

1 引言

近年来, 无线应用需求急剧增加, 使无线通信网络不仅承载了传统移动通信业务, 还需进一步支持更多新兴物联网 (IoT, Internet of things) 业务。未来, 无线通信网络将进一步向面向异构服务需求的大规模异构网络发展^[1]。针对此, 网络切片应运而生,

其被认为是 5G 移动通信系统的关键技术之一^[2]。网络切片可使移动网络运营商在一个公共的物理基础设施上构建多个逻辑网络, 从而为不同的需求方提供定制的网络。频谱是网络切片中必须考虑的关键资源, 现有网络切片研究大多考虑授权频谱的分配问题^[3-4]。然而, 随着无线业务的急剧增加, 频谱越来越稀缺, 在网络切片中如何进一步利用原本稀缺的

收稿日期: 2021-01-05; 修回日期: 2021-07-01

通信作者: 杨凡, 34179861@qq.com

基金项目: 重庆市基础科学与前沿技术研究专项基金资助项目 (No.cstc2019jcyj-msxmX0233); 重庆市教育委员会科学技术研究计划基金资助项目 (No.KJQN201901125); 重庆理工大学科研启动基金资助项目 (No.2019ZD42, No.2019ZD63)

Foundation Items: Chongqing Research Program of Basic Research and Frontier Technology (No.cstc2019jcyj-msxmX0233), Science and Technology Research Program of Chongqing Education Commission of China (No.KJQN201901125), Scientific Research Foundation of Chongqing University of Technology (No.2019ZD42, No.2019ZD63)

频谱资源是未来无线网络所面临的亟待解决的问题。

认知无线电的机会频谱共享可进一步提高频谱的利用率, 该技术与网络切片结合可极大提高网络承载业务的能力。针对机会频谱共享研究, 现有研究主要分为理论边界分析^[5-8]和机制设计^[9-12]。文献[5]分析了信道变化的统计特性, 将信道受到的干扰假设为随机变量, 并研究干扰以较大概率小于干扰约束门限时的资源分配问题, 采用机会约束方法提出了一种信道条件存在随机变化特性时能够以较大概率满足干扰约束的资源分配方案。文献[6]考虑了信道的时变性, 提出了一种非完美信道感知情况下的联合信道和功率的资源分配模型, 并采用了一种低复杂度的次优算法对该模型进行了求解。文献[7]基于 Fenton-Wilkinson 理论和随机规划, 研究了用户 SINR 存在时变性情况下的功率分配问题。文献[8]研究了非完美感知导致信道条件存在时变性场景下的资源分配问题, 并基于机会约束规划建立了考虑信道条件非确定性的资源分配方案, 随后采用 Bernstein 近似法进行了化简求解。文献[9]提出了一种联合频谱共享和频谱聚合的增强型认知无线网络, 该方案可整合授权和非授权频谱。文献[10]提出了一种基于能量收集的物联网频谱共享模型, 其中共享频谱不仅用于数据传输, 还用于系统收集能量。文献[11]联合车辆移动性管理和机会频谱共享提出了一种支持时延容忍业务的认知容量收集网络。针对非授权频谱的不确定性, 文献[12]提出了一种频谱感知能量自适应传输协议, 该协议主要用于认知无线电传感器网络。

现有研究大多关注传统无线网络的机会频谱共享, 较少关注网络切片的机会频谱共享。文献[13-15]提到了网络切片中专用频谱和共享频谱共同使用的思想。将认知网络和网络切片结合进一步利用共享频谱资源, 可有效提高移动网络运营商的网络容量。由于频谱共享不需要对现有已授权频谱进行重新分配, 该方案的另一个优势是可减少重新划分授权频谱的高昂费用和烦琐过程。如何联合网络切片和频谱共享进一步提升频谱利用率是未来无线网络所面临的亟待解决的问题^[13-15]。

针对网络切片中的频谱共享问题, 本文建立了无线网格 (Mesh) 网络 4D 冲突图模型, 提出了无冲突节点集的求解方法; 建立了频谱共享的机会容量模型, 推导了非授权信道的机会容量; 联合 4D 冲突图模型和机会容量模型提出了一种认知容量收集

网络中网络切片频谱共享策略。与现有算法相比, 所提算法能有效利用机会频谱资源, 进一步提高信道利用率。

2 认知容量收集网络模型

本文研究的场景为认知容量收集网络 (CCHN, cognitive capacity harvesting network) 结构场景^[16], 如图 1 所示。其中, 辅助服务提供商 (SSP, secondary service provider) 主要负责网络的运行管理和资源分配。基站 (BS, base station) 和认知路由器 (CRR, cognitive radio router) 都可实现 IoT 终端的接入。BS 负责接入网和核心网的接入。CRR 组成 Mesh 网络辅助 BS 进行数据传输, 并采用多跳传输的方式中继 IoT 终端的数据。该网络结构可支持 5G 中的终端与终端 (D2D, device-to-device) 通信, 并支持各类 IoT 终端以不同的接入方式 (如 4G/5G、NB-IoT、eMTC) 等接入网络^[17]。CCHN 场景中包含 2 种频段, 即授权频段和非授权频段。其中, 非授权频段以机会频谱占用的方式接入, 且只适合时延容忍 (DT, delay-tolerant) 类业务传输。授权频段可用于时延敏感 (DS, delay-sensitive) 类业务和 DT 业务传输。假设网络中有 $Z = [1, 2, \dots, z]$ 个 CRR, 每个 CRR 都可以接入授权频段或机会接入非授权频段。CRR 组成的无线接入网络可采用网络切片的方式满足不同业务对象差异化服务的需求。本文将建立该网络的冲突模型, 并提出一种认知容量收集网络中网络切片频谱共享策略。

3 4D 冲突图模型

为了分析 CCHN 中 CRR 之间的干扰冲突关系, 本文根据 CCHN 中可能出现的冲突情况建立了一个考虑频谱共享的无线接入 Mesh 网络 4D 冲突图模型 $G(V, E)$, 其中 V 表示节点的集合; E 表示边的集合; 4D 表示冲突图包含的 4 个维度信息 (节点包含信道、切片序号和链路信息, 边包含节点间冲突关系信息)。每个节点的表示形式为 $(\alpha, \beta, (a, b))$, α 表示切片序号, β 表示信道序号, (a, b) 表示相邻 CRR a 和 b 之间的链路。节点表示在 α 切片上 (a, b) 链路采用信道 β 的情况。每一条边表示 2 个节点之间存在冲突 (2 种情况产生冲突), 即无法同时激活。冲突的评判标准如下。

1) 2 个节点使用同一个信道且链路中有相同的发送或接收 CRR。

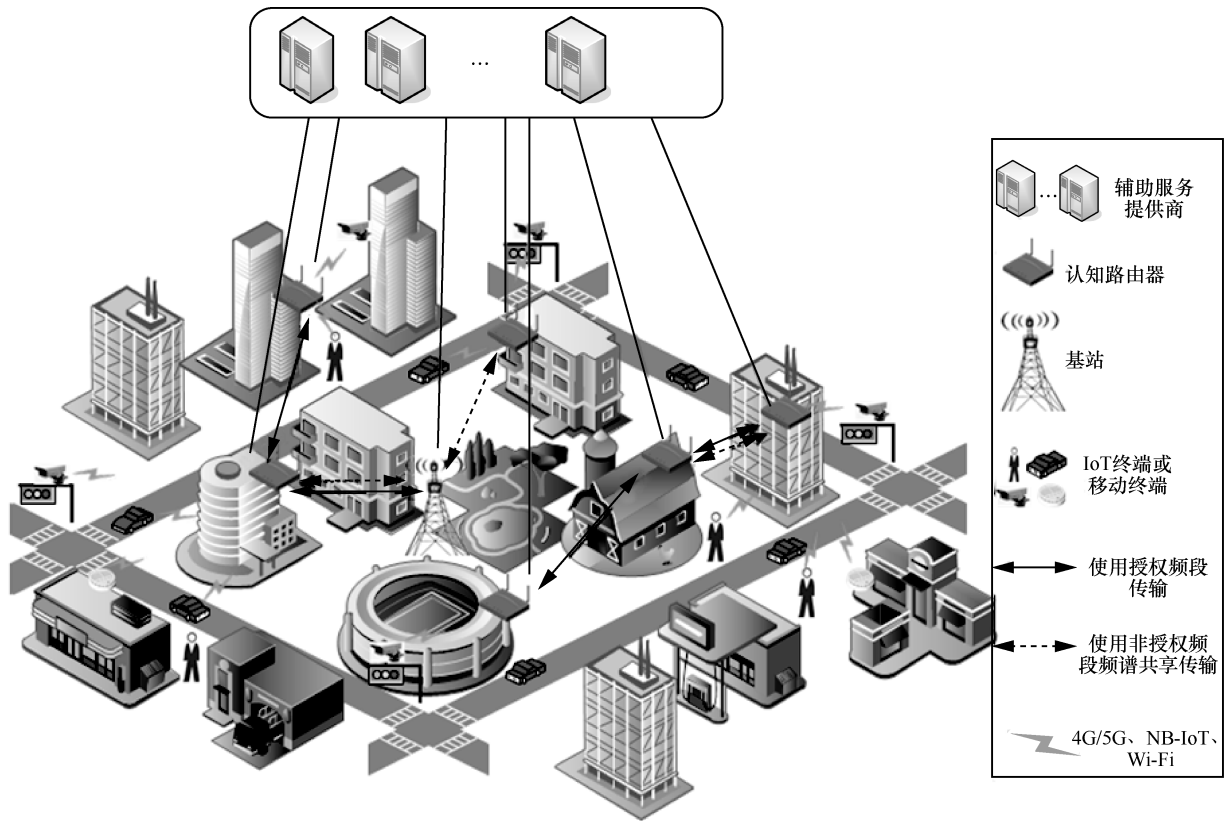


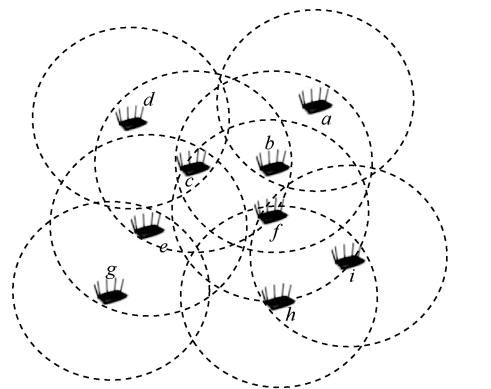
图 1 认知容量收集网络场景

2) 2 个节点使用同一个信道且一个节点的发送或接收 CRR 处于另一个节点的 CRR 通信范围。

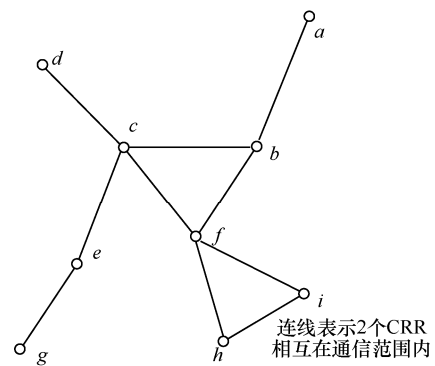
为便于理解，图 2 构造了一个 CRR 组成的 Mesh 结构，其中包括 9 个 CRR；2 个服务供应商 (SP, service provider)，即需要的切片数；2 个信道，信道 1 为授权信道，信道 2 为非授权机会共享信道。

图 3 为根据冲突评判标准得到的冲突图，其中，节点间的连线表示 2 个节点存在冲突。例如，对于节点(1,1,(a,b))和节点(1,1,(b,c))，CRR b 同时作为两者的收发端且使用同一信道 1，存在冲突，因此 2 个节点间有连线；对于节点(1,1,(a,b))和节点(1,1,(c,d))，CRR b 处于 CRR c 的干扰范围且使用同一信道 1，存在冲突，因此 2 个节点间有连线。SP 之间的连线关系仅画出部分作为示意图。由图 3 可知，每个 SP 内的冲突关系相似，且每个信道的冲突关系也相似。节点间的无冲突关系可以用独立集表示，定义如下。

独立集。冲突图中选取一组节点集，若这组节点集中任意 2 个节点都不存在连线，则该节点集为独立集。



(a) CRR Mesh 网络结构



(b) CRR Mesh 网络通信范围

图 2 CRR Mesh 网络结构和网络通信范围

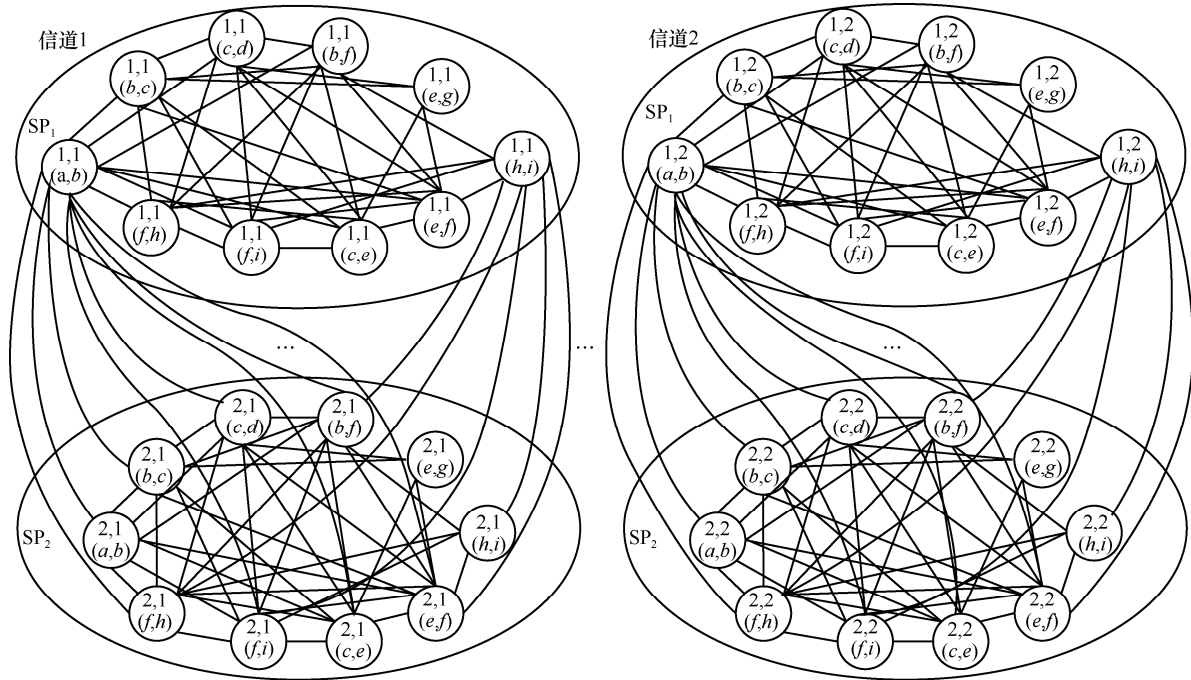


图 3 CRR Mesh 冲突图

极大独立集。对于一组独立集，若增加任何一个节点都会产生冲突，即破坏独立集的关系，则该独立集为极大独立集。

独立集内的节点可同时激活，并不产生干扰。因此一组独立集可表示一组可同时激活的无冲突的资源分配方案。极大独立集则是可提供更多同时激活的最优方案。每一个 SP 的最终切片中将包含多个极大独立集，每个极大独立集之间采用不同的激活时间确保其不产生冲突。因此求解冲突图的全部极大独立集，则可得到不同的无冲突分配方案。得到全部极大独立集后，可根据业务需求分配不同的激活时间实现无冲突的网络切片动态分配。

求解全部极大独立集是一个 NP-Hard 问题，该问题很难得到全部解。目前的求解方法是遍历所有可行组合，复杂度极高。本文给出了一种求解网络 4D 冲突图极大独立集的计算方法，即 Hasse 图遍历法，并以图 3 的冲突图为例进行求解。求解所需的定理证明如下。

定理 1 设拟序集^[14] $\langle A, B \rangle$ ， A 为任意集合， $B \subseteq A \times A$ ，其中 $A \times A$ 为笛卡儿积，则盖住关系 $\text{cov}(A, B) = B - B^2$ ， $B^2 = B \cdot B$ 为 B 的符合运算。

证明 取 $\langle a, b \rangle \in B - B^2$ 。由于 $\langle a, b \rangle \in B$ 且 $\langle a, b \rangle \notin B^2$ ，因此不存在 $c \in A$ 使 $(aBc) \wedge (cBb)$ 。则 b 盖住 a ，即 $\langle a, b \rangle \in \text{cov}(A, B)$ 。因此 $\text{cov}(A, B) = B - B^2$ 。

求解 4D 冲突图极大独立集的方法如下。

设 S_a 表示冲突图中与 a 不冲突的节点集合，则 $S_a = [a, c, d, e, f, g, h, i]$ 。设 \bar{S}_a 表示冲突图中与 a 冲突的节点集合，则 $\bar{S}_a = V - S_a = [b]$ 。 S_a 的不相邻关系 R 的关系矩阵 M_{R, S_a} 可表示为

$$M_{R, S_a} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

由 Warshall 算法^[18]可得关系 R 的传递闭包 $t(R)$ 的关系矩阵 $M_{t(R), S_a}$ 为

$$M_{t(R), S_a} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据定理 1 可得到 S_a 和 $t(R)$ 的盖住关系 $\text{cov}(S_a, t(R))$ 为

$$\text{cov}(S_a, t(R)) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

据此，可画出 $\langle S_a, t(R) \rangle$ 的 Hasse 图，如图 4 所示。

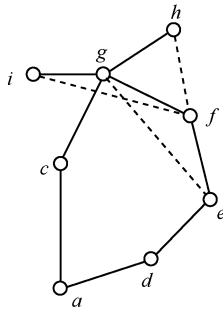


图 4 $\langle S_a, t(R) \rangle$ 的 Hasse 图

由于 $t(R) - R = \{ \langle e, g \rangle, \langle f, h \rangle, \langle f, i \rangle \}$ ，因此，在图 4 中节点 e 和 g 、 f 和 h 、 f 和 i 之间用虚线连接。这表明冲突图 G 中上述节点间是连接的，而在 $\langle S_a, t(R) \rangle$ 中不连接。因此，为避免冲突，从 Hasse 图的极小元遍历至极大元所得的每条链路中，若存在上述链路都要分别剔除 e 、 f 节点。

由 Hasse 图的极小元沿盖住方向遍历至极大元，并剔除 $t(R) - R$ 中的冲突节点，所得的每条链即为冲突图 G 中含节点 a 的全部极大独立集。图 4 中从极小元 a 分别遍历至极大元 h 和 i ，并剔除 e 和 g 、 f 和 h 、 f 和 i 链路中的 e 、 f 节点，得到包含节点 a 的全部极大独立集 $T_a = \{ \langle a, c, g, h \rangle, \langle a, d, g, h \rangle, \langle a, c, g, i \rangle, \langle a, d, g, i \rangle \}$ 。

采用上述方法分别求取包含 \bar{S}_a 中的每一个节点的全部极大独立集然后取并集得到 \bar{T}_a ，则全部极大独立集 $T_{\text{all}} = T_a \cup \bar{T}_a$ 。

上述求解方法可适用于任意 4D 冲突图模型。所得的极大独立集即为无冲突节点集，该集内的节点可同时激活但不产生冲突。无冲突节点集可表示一组无冲突的资源分配方案。不同无冲突节点集之间

可根据业务需求分配不同的激活时间，实现无冲突的网络切片动态分配。

4 频谱共享的机会容量模型

图 5 为单个信道的频谱共享机会占用示意，其中 t 为时间，阴影部分为授权用户占用时间段，两段授权用户占用时间段之间的空白时间段即为信道可以频谱共享的机会可用时间资源。令 h 为机会可用时间空洞数， l_i 为授权占用的出现位置， v_s 为频谱共享的机会可用持续时间， y_i 为授权占用的持续时间。本节推导了 l_i 服从泊松分布、 y_i 服从任意分布时频谱共享的机会可用持续时间的概率密度函数，并基于此建立了频谱共享状态转移模型，进一步推导了信道机会容量的解析表达形式。

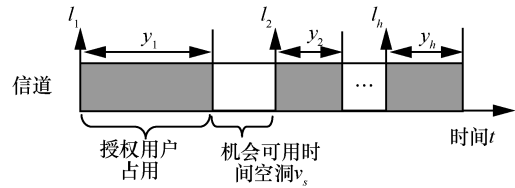


图 5 单个信道的机会频谱共享示意

设授权占用出现服从泊松分布，则相邻 2 次授权占用出现时间间隔 g_i ($g_i = l_{i+1} - l_i$) 服从指数分布

$$f_g(g) \approx \lambda e^{-\lambda g} \quad (4)$$

其中， λ 为授权占用到达速率。由于 y_i 在 $(0, g_i]$ 内服从条件分布，采用截尾分布表示条件概率密度函数。

$$f_{\text{cond}}(y) = \frac{f_y(y)}{F_y(g)} \quad (5)$$

其中， $f_y(y)$ 为 y 的概率密度函数。通过贝叶斯公式可得到 y 和 g 的联合概率密度函数为

$$f_{y,g}(y, g) = f_g(g) f_{\text{cond}}(y) \quad (6)$$

进一步可得到 v_s 的概率密度函数为

$$f_{v_s}(v_s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{y,g}(y, y + v_s) dy = \int_0^T \frac{f_y(y)}{F_y(y + v_s)} \lambda e^{-\lambda(y + v_s)} dy \quad (7)$$

由于 y_i 服从任意分布，式(7)表示授权占用出现服从泊松分布时，频谱共享时域时间资源概率密度函数的通用表示形式。

当授权占用的持续时间服从参数为 λ_y 的指数分布时，式(7)可进一步得到

$$f_{\text{exp}}(v_s) = \lambda \lambda_y e^{-\lambda v_s} \int_0^T \frac{e^{-(\lambda_y + \lambda)x}}{1 - e^{-\lambda_y v_s} e^{-\lambda_y x}} dx \approx \lambda_y \lambda e^{-\lambda v_s} \text{hypergeom} \left(1 + \frac{\lambda}{\lambda_y}, 2 + \frac{\lambda}{\lambda_y}, \frac{1}{e^{\lambda_y v_s}} \right) \quad (8)$$

其中, hypergeom 为广义超几何函数。

图 6 为频谱共享状态转移示意。其中, State_1 表示授权占用状态 (即信道被授权用户占用的状态), State_0 表示频谱共享状态 (即信道未被授权占用的状态), $P_{0,1}$ 表示信道从频谱共享状态转移至授权占用状态的转移概率; $P_{1,0}$ 表示信道从授权占用状态转移至频谱共享状态的转移概率。当授权占用持续时间 $f_y(y)$ 服从参数为 λ_y 的指数分布时, 根据之前模型可得, 频谱共享状态的持续时间 $f_{v_s}(v_s)$ 服从式(8)。则信道授权占用持续时间期望和频谱共享持续时间的期望可表示为

$$\text{Exp}[f_y(y)] = \frac{1}{\lambda_y} \quad (9)$$

$$\text{Exp}[f_{v_s}(v_s)] = \int_0^{+\infty} v_s \lambda_y \lambda e^{-\lambda v_s} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{e^{-\lambda_y v_s k}}{\lambda_y + \lambda + \lambda_y k} dv_s \quad (10)$$

则该信道的机会可用概率 p_{op} 为

$$p_{\text{op}} = \frac{\text{Exp}[f_{v_s}(v_s)]}{\text{Exp}[f_y(y)] + \text{Exp}[f_{v_s}(v_s)]} \quad (11)$$

因此频谱共享的机会容量可表示为 $c_{\text{op}} = p_{\text{op}} C$,

其中 C 为信道容量。后续的认知容量收集网络中网络切片频谱共享策略将结合该模型进行仿真。

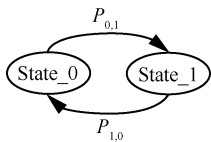


图 6 频谱共享状态转移示意

5 网络切片频谱共享策略

本节联合前两节的 4D 冲突图模型和机会容量模型, 提出一种认知容量收集网络中网络切片频谱共享策略, 具体模型为

$$\max \sum_{m \in M^k} \sum_{k \in K} r_{i,j}^k(m) x_m^k w_m^k \quad (12)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{s=1}^S t_s \leq 1, t_s \geq 0 \quad (13)$$

$$\sum_{m \in M^k} r_{i,j}^k(m) x_m^k \leq \sum_{s=1}^S t_s \sum_{n \in N_i, c_{i,j,n}^k \in T_s} c_{i,j,n}^k + \sum_{s=1}^S t_s \sum_{n \in N_s, c_{i,j,n}^k \in T_s} \tilde{c}_{i,j,n}^k \quad (14)$$

$$\sum_{m \in M^k} r_{i,j}^k(m) x_m^k \leq \sum_{s=1}^S t_s \sum_{n \in N_i, c_{i,j,n}^k \in T_s} c_{i,j,n}^k \quad (15)$$

$$d^k(m) x_m^k \leq r_{i,j}^k(m), i, j \in U_{k,m} \quad (16)$$

其中, $d^k(m)$ 表示第 k 个切片中的第 m 个业务的速率需求, 业务的最终收发节点是 i 和 j ; t_s 表示每个无冲突节点集所占用的时间比例; T_s 表示序号为 s 的无冲突节点集; $r_{i,j}^k(m)$ 表示分配给第 k 个切片中的第 m 个业务在 i, j 链路上的速率; x_m^k 表示第 k 个切片中的第 m 个业务是否能够接入; w_m^k 表示第 k 个切片中的第 m 个业务的收益; N_i 表示授权信道; N_s 表示非授权信道, 即频谱共享信道; $c_{i,j,n}^k$ 表示授权信道 n 在 i, j 链路上的容量; $\tilde{c}_{i,j,n}^k$ 表示非授权频谱信道 n 在 i, j 链路上的频谱共享机会容量; M_s^k 表示 k 切片中时延敏感业务的合集; M_t^k 表示 k 切片中时延容忍业务的合集; $U_{k,m}$ 表示第 k 个切片中的第 m 个业务传输所经过的节点集合。 x_m^k 、 t_s 和 $r_{i,j}^k(m)$ 为决策变量。时延敏感业务只能用授权频谱传输, 保证其稳定性; 时延容忍业务可以用频谱共享传输。根据文献[19-21], 可得到 MQAM 调制下的 $c_{i,j,n}^k$ 和 $\tilde{c}_{i,j,n}^k$ 分别为

$$c_{i,j,n}^k = B_w \text{lb} \left(1 + \frac{\bar{\gamma}_j}{-\frac{2}{3} \ln \frac{P_b}{2}} \right) \quad (17)$$

$$\tilde{c}_{i,j,n}^k = p_{\text{op}} B_w \text{lb} \left(1 + \frac{\bar{\gamma}_j}{-\frac{2}{3} \ln \frac{P_b}{2}} \right) \quad (18)$$

其中, $\bar{\gamma}_j$ 为平均信干噪比, B_w 为信道带宽, P_b 为最大可容忍误码率, p_{op} 为 i, j 链路机会可用概率。

上述模型为混合整数规划问题, 即业务接入为 0-1 整数规划, 而 t_s 和 $r_{i,j}^k(m)$ 的分配具有连续性。因此该问题很难获得最优解。该问题的一种解法是通过启发式算法进行求解。当总业务数为 M 时, 求解全局最优解需计算比较 2^M 种业务接入组合。因此启发式算法需要运行的复杂度为 $O(2^M)$, 并且执行每种分配组合时都需要求解该组合下每个无冲突节点集所占用的时间比例 t_s 和

每条链路速率 $r_{i,j}^k(m)$ 。可以看出,当 M 的值较大时,该算法复杂度过高。

本文采用复杂度较低的次优算法进行求解。该问题可以近似转化成背包问题。背包问题可采用贪婪算法进行求解,即将业务根据速率需求从高到低进行排序,每次先选取数据需求高的业务直至达到容量上限。当总信道数为 N 时,所提算法搜索次优解的复杂度为 $O(N)$, N 远小于 2^M ,因此该算法的复杂度有所减少。此外,所提算法不需要多次求解 t_s 和 $r_{i,j}^k(m)$,这也减少了每次执行算法的计算量。具体分配方案如下所示。

步骤 1 设 t_s 平均分配, $d^k(m)x_m^k = r_{i,j}^k(m)$, 将所有业务和授权信道传输速率 $c_l^k = \sum_{s=1}^S t_s \sum_{n=1}^{N_j} c_{i,j,n}^k$ 代入贪婪算法,求得授权信道的分配方案。

步骤 2 将时延容忍业务 M_i^k 中剩余的业务和频谱共享传输速率 $c_h^k = \sum_{s=1}^S t_s \sum_{n=1}^{N_s} \tilde{c}_{i,j,n}^k$ 代入贪婪算法,求得频谱共享的分配方案。

6 仿真分析

本节采用 MATLAB 软件对所提认知容量收集网络中网络切片频谱共享策略进行了仿真对比,对比算法为非机会容量算法和同样采用信道统计特性的统计多背包算法^[22]。仿真场景为认知容量收集网络。其中,节点数目为 10 个,随机分布在 $800\text{ m} \times 800\text{ m}$ 区域;切片数量为 2 个;信道数量为 4 个,包括授权信道 2 个,频谱共享信道 2 个,每个信道带宽为 2 MHz;调制方式为正交频复用 (OFDM, orthogonal frequency division multiplexing) 和正交相移键控 (QPSK, quadrature phase shift keying) 调制。

图 7 给出了各种算法在不同时延敏感业务数量情况下的总吞吐量对比。该场景中每个切片内时延容忍业务数量为 4。为了仿真频谱共享信道的不确定性,设 q 为频谱共享信道的可用率。由图 7 可知,随着时延敏感业务数量增加,3 种算法的总吞吐量都有所增加,且算法在 $q=0.9$ 时的吞吐量大于其在 $q=0.6$ 时的吞吐量。这是由于 $q=0.6$ 时频谱共享信道的可用率降低,因此总吞吐量减少。在 $q=0.9$ 和 $q=0.6$ 时,所提算法都有较高的总吞吐量,这是因为所提算法根据无冲突节点集进行分配提高了信

道利用率,并且在分配时考虑信道的机会容量进一步提高了共享频谱的使用效率。

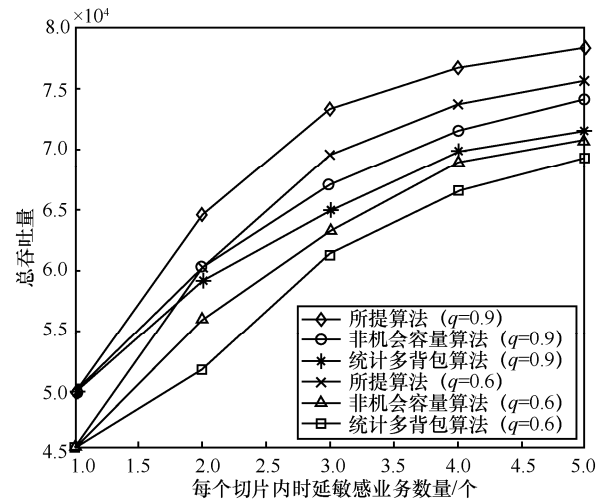


图 7 不同延迟敏感业务数量情况下的总吞吐量

图 8 给出了各种算法在不同时延容忍业务数量情况下的总吞吐量对比。该场景中每个切片内时延敏感业务数量为 4 个。由图 8 可知,随着时延容忍业务数量增加,3 种算法的总吞吐量都有所增加。所提算法在 $q=0.9$ 和 $q=0.6$ 时都有较高的总吞吐量,这是由于所提算法利用机会容量分配共享信道,提高了共享信道的利用率。非机会容量算法并未考虑频谱共享信道的机会可用容量,因此在时延容忍业务数量增多时性能下降较快。统计多背包算法采用时频空洞的统计信息进行分配,因此在时延容忍业务数量增多时性能有所提高。

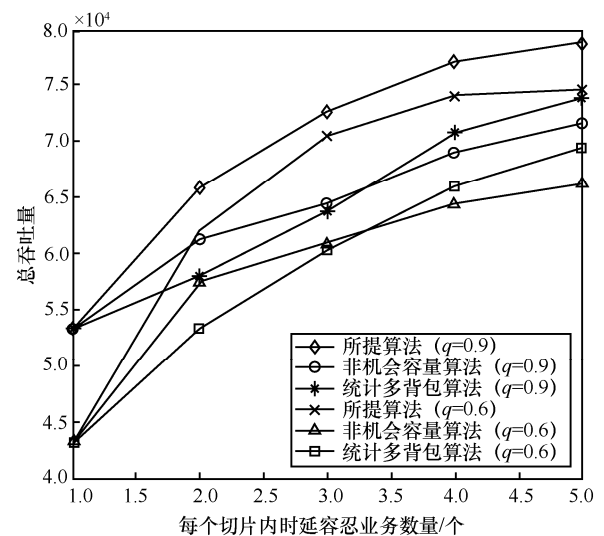


图 8 不同延迟容忍业务数量情况下的总吞吐量

图 9 给出了各种算法在不同信道数量（授权信道和共享信道数量相同）情况下的总吞吐量对比。该场景中每个切片内时延敏感业务和时延容忍业务数量都为 5 个。由图 9 可知，随着信道数量增加，可用的信道资源增多，因此 3 种算法的总吞吐量都有所增加。所提算法在不同信道数量的情况下都有较高的总吞吐量。当总信道数为 10 时，所提算法比其他 2 种算法总吞吐量分别提高了 20% 和 50%。这是由于所提算法根据无冲突节点集进行分配减少了信道的冲突干扰，提高了信道的利用率。针对时延容忍业务，所提算法利用机会容量进行分配提高了共享信道的利用效率。

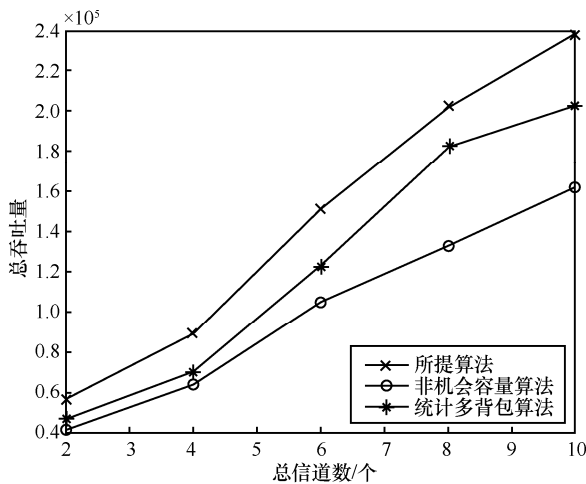


图 9 授权信道和共享信道数量相同时的总吞吐量

图 10 给出了各种算法在不同信道数量（授权信道数少于共享信道数）情况下的总吞吐量对比。该场景中每个切片内时延敏感业务和时延容忍业务数量都为 5 个。授权信道的数量分别为 [1, 1, 2, 2, 3]，其余信道为共享信道。由于该场景中共享信道数量较多，因此该场景可反映算法利用共享信道的性能。由图 10 可知，3 种算法在信道数量增多时吞吐量都有所增加。所提算法在共享信道数量较多情况下都有较好的性能。当总信道数为 10 时，所提算法比其他 2 种算法总吞吐量分别提高了 15% 和 35%。这说明了采用机会容量进行分配可以更好地利用共享信道。

7 结束语

本文针对网络切片中的频谱共享问题，建立了 4D 冲突图模型，提出了无冲突节点集的求解方法。随后，本文建立了频谱共享的机会容量模型，推导

了非授权信道的机会容量，并基于 4D 冲突图模型和机会容量模型提出了一种认知容量收集网络中网络切片频谱共享策略。仿真结果表明，与现有算法相比，所提算法能有效利用机会频谱资源，进一步提高信道利用率。

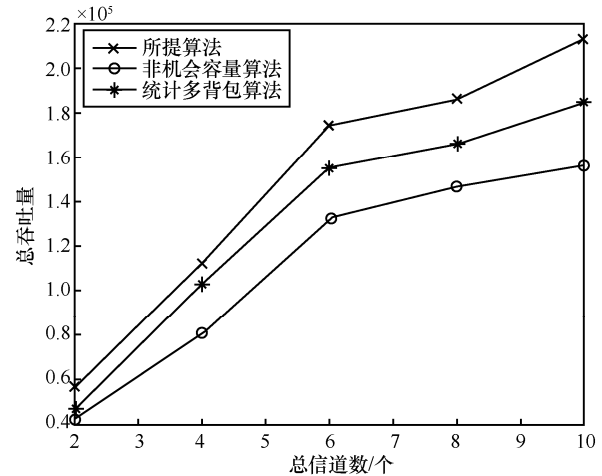


图 10 授权信道较共享信道数量少时的总吞吐量

参考文献:

- [1] PAN Y, LI S N, LI B Q, et al. CDD: coordinating data dissemination in heterogeneous IoT networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(6): 84-89.
- [2] FENG L, ZI Y Q, LI W J, et al. Dynamic resource allocation with RAN slicing and scheduling for uRLLC and eMBB hybrid services[J]. IEEE Access, 2020, 8: 34538-34551.
- [3] ROST P, MANNWEILER C, MICHALOPOULOS D S, et al. Network slicing to enable scalability and flexibility in 5G mobile networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(5): 72-79.
- [4] CHEN Y B, WANG Y, LIU M, et al. Network slicing enabled resource management for service-oriented ultra-reliable and low-latency vehicular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(7): 7847-7862.
- [5] BARIAH L, MUHAIDAT S, AL-DWEIK A. Error performance of NOMA-based cognitive radio networks with partial relay selection and interference power constraints[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(2): 765-777.
- [6] MOKARI N, PARSAEEFARD S, AZMI P, et al. Robust ergodic up-link resource allocation in underlay OFDMA cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2016, 15(2): 419-431.
- [7] QURESHI M A, TEKIN C. Rate and channel adaptation in cognitive radio networks under time-varying constraints[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(12): 2979-2983.
- [8] ZHANG Y J, WANG S W. Resource allocation for cognitive radio-enabled femtocell networks with imperfect spectrum sensing and channel uncertainty[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(7): 7847-7862.

2016, 65(9): 7719-7728.

- [9] ZHANG W S, WANG C X, GE X H, et al. Enhanced 5G cognitive radio networks based on spectrum sharing and spectrum aggregation[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(12): 6304-6316.
- [10] KANG X, LIANG Y C, YANG J. Riding on the primary: a new spectrum sharing paradigm for wireless-powered IoT devices[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(9): 6335-6347.
- [11] DING H C, LI X H, CAI Y, et al. Intelligent data transportation in smart cities: a spectrum-aware approach[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2018, 26(6): 2598-2611.
- [12] BICEN A, ERGUL O, AKAN O B. Spectrum-aware and energy-adaptive reliable transport for Internet of sensing things[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(3): 2359-2366.
- [13] XIANG H Y, ZHOU W, DANESHMAND M, et al. Network slicing in fog radio access networks: issues and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(12): 110-116.
- [14] SALLENTO, PEREZ-ROMERO J, FERRUS R, et al. On radio access network slicing from a radio resource management perspective[J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(5): 166-174.
- [15] KSENTINI A, NIKAEIN N. Toward enforcing network slicing on RAN: flexibility and resources abstraction[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(6): 102-108.
- [16] DING H C, FANG Y G, HUANG X X, et al. Cognitive capacity harvesting networks: architectural evolution toward future cognitive radio networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(3): 1902-1923.
- [17] LIU X L, ANSARI N. Green relay assisted D2D communications with dual batteries in heterogeneous cellular networks for IoT[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017, 16(5): 102-120.
- [18] ROSEN H. Discrete mathematics and its applications[M]. New York: McGraw-Hill Inc., 2006.
- [19] GOLDSMITH A. Wireless communications[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [20] FOSCHINI G J, SALZ J. Digital communications over fading radio channels[J]. The Bell System Technical Journal, 1983, 62(2): 429-456.
- [21] LI X K, ZEKAVAT S A R. Distributed channel assignment in cognitive radio networks[C]//Proceedings of the 2009 International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing Connecting the World Wirelessly. New York: ACM Press, 2009: 21-27.
- [22] HUANG J, ZENG X P, TAN X H, et al. Spectrum allocation for cognitive radio networks with non-deterministic bandwidth of spectrum hole[J]. China Communications, 2017, 14(3): 87-96.

[作者简介]



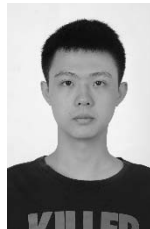
黄杰(1988-),男,重庆人,博士,重庆理工大学讲师,主要研究方向为无线通信理论、通信网络、下一代移动通信技术、认知无线电、无线通信资源分配等。



杨凡(1983-),男,湖北广水人,博士,重庆理工大学副教授,主要研究方向为无线宽带自适应传输、无线通信网络、下一代移动通信技术、无线通信中的编码技术等。



谢应昭(1987-),男,重庆人,博士,国家电网重庆电力公司工程师,主要研究方向为无线通信理论、通信网络、下一代移动通信技术、电力通信网络组网与控制等。



左迅(1998-),男,重庆人,重庆理工大学硕士生,主要研究方向为下一代移动通信技术、无线通信网络、无线自组网技术等。



邱天(1996-),男,浙江宁波人,重庆理工大学硕士生,主要研究方向为无线通信网络、信息与压缩感知、多载波通信技术等。