

# 认知车载网络中基于 QoS 保障的频谱共享新策略

张磊<sup>1,2</sup>, 罗涛<sup>1,2</sup>, 刘蔚<sup>3</sup>

(1. 泛网无线通信教育部重点实验室, 北京 100876; 2. 北京邮电大学 信息与通信工程学院, 北京 100876;  
3. 中国电子科技集团公司 第二十研究所, 陕西 西安 710068)

**摘 要:** 构建了基于认知无线电的新型车载网络, 并提出基于安全业务服务质量(QoS)保障的两步式频谱共享策略: 多认知小区间的频谱分配和单认知小区内的频谱共享。仿真结果表明, 提出的 GNBS(generalized nash bargaining solution)分配方案综合考虑了系统的公平性和总效用, 可获得明显大于最大化最小方案的系统和速率, 以及明显优于最大化和速率方案的多认知小区间的公平性; GNBS 方案可以根据多小区间频谱需求的差异性来动态调节资源分配的比例, 有效地实现了需求非对称的多小区间频谱资源的最优化配置; 此外, 单小区内的协作频谱共享机制, 使得协作双方均获得了优于非协作方案的系统效用, 有效地提高了系统吞吐量以及认知 OBU 间的公平性。

**关键词:** 认知无线电; 车载网络; 频谱共享; 合作博弈; 认知协作; 服务质量

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2011)11-0159-09

## Novel spectrum sharing strategy based on QoS support in cognitive vehicular network

ZHANG Lei<sup>1,2</sup>, LUO Tao<sup>1,2</sup>, LIU Wei<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education, Beijing 100876, China;

2. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

3. Corporation No.20th Research Institute, China Electronics Technology Group, Xi'an 710068, China)

**Abstract:** A two-step spectrum sharing strategy consisting of inter-cell allocation and intra-cell allocation was developed to guarantee the system quality of service (QoS) in the cognitive vehicular network (CVN). Simulation results indicate that the proposed GNBS scheme considering both the fairness and utility can obtain larger transmission rate than Max-min scheme and achieve much better fairness than Max-rate scheme. Considering the difference of spectrum requirements between cognitive cells, GNBS scheme can allocate the spectrum resource dynamically in a weighted fairness manner. Furthermore, the cognitive cooperative spectrum sharing scheme outperforms than the non-cooperative scheme, and it can greatly improve the system utility and fairness between OBU than the non-cooperative schemes.

**Key words:** cognitive radio; vehicular network; spectrum sharing; cooperative game theory; cognitive cooperative; quality of service

收稿日期: 2011-07-31; 修回日期: 2011-11-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60872049, 60971082, 60972073); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2009CB320407); 国家重大科技专项基金资助项目(2010ZX03001-003); 泛网无线通信教育部重点实验室开放基金资助项目(ZRJJ-2010-5)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China(60872049, 60971082, 60972073); The National Basic Research Program of China (973 Program) (2009CB320407); The National Great Science Specific Project (2010ZX03001-003) Open Fund of Key Laboratory of Universal Wireless Communications (ZRJJ-2010-5)

## 1 引言

车载网络作为智能交通系统的重要组成部分,通过车与车、车与路边单元(RSU, road side unit)间实时交互各种安全信息(如碰撞避免、道路拥塞等)和非安全信息(如 Internet 接入、多媒体娱乐等),可以提供更加安全、高效和舒适的驾驶环境。为有效保障道路交通安全,车辆自组织网络(VANET, vehicular ad hoc network)对安全业务数据传输的时延和分组丢失率等 QoS 提出了较高的要求。但是,当发生交通事故或严重道路拥塞时,大量车载节点频繁竞争接入现有协议固定分配的带宽有限的信道,或者链路的通信质量发生严重下降时,数据传输过程中会产生严重的分组丢失率和时延。为此,本文将构建基于认知无线电<sup>[1]</sup>技术的新型车载网络(CVN, cognitive vehicular network),在紧急情况时将快速启动认知频谱检测机制,在不影响主用户(PU, primary user)性能的前提下允许车载节点(OBU, on board unit)机会式地接入空闲频谱,以提高频谱资源利用率及车载业务的服务质量(QoS)。

在发生交通事故或严重交通堵塞的认知小区(CC, cognitive cell),大量碰撞避免和辅助驾驶等信息的传输将导致该小区频谱资源需求急剧增加,而网络容量的有限性将不能保证安全业务的 QoS。然而,交通状况良好的相邻小区的通信负载要轻,可能会存在频谱资源的盈余。为实现频谱资源的最优化配置,提出了一种基于 QoS 保障的两步式频谱共享策略,包括多认知小区间频谱分配和单小区内频谱共享两部分。针对车载网络多小区间负载不均衡的特点,本文构建了基于议价博弈的广义纳什议价解(GNBS, generalized Nash bargaining solution)的多小区资源分配模型,可有效实现权重比例公平和系统整体效用的折衷。结合显著的主用户频谱活动性、与授权用户的干扰限制以及不同的网络负载等特点,本文将上述模型推广到重负载情形,并提出了基于安全业务 QoS 保障的两段式多小区间信道分配的简化算法。此外,本文将采用基于认知协作的频谱共享策略,在保证授权用户 QoS 的前提下,提高单小区的系统吞吐量以及认知节点间的公平性。

## 2 相关研究工作

近年来,车辆自组织网络虽已得到了广泛的关

注,然而基于认知无线电的车载网络的研究才刚起步。文献[2]研究了认知 VANET 中基于路边单元的协作频谱感知技术,其融合了单节点频谱感知和协作频谱感知的优缺点,提出了一种适合于认知 VANET 的协作频谱感知新技术。文献[3,4]则主要讨论了认知 VANET 中的信道分配与接入技术。其中,文献[3]提出了 VANET 中基于二分图的分布式信道分配方案,以降低车车通信的中断概率;文献[4]则针对基于分簇结构的认知车载网络,提出了基于约束马尔可夫决策过程的信道接入管理模型,在保证一定分组丢失率、传分组延迟及与授权用户的碰撞概率等 QoS 的基础上,通过控制车载节点的接入来限制簇的大小。但是,在重负载情形下,上述模型并不能有效保证所有认知节点间的公平性,会使得一些贫困节点无法接入信道,不能保证安全信息传输的可靠性。而且,鲜有文献针对车载网络多小区间负载不均衡的特点,通过一定的资源分配和频谱共享策略来实现动态负载均衡,提高认知链路的可靠性。

博弈论作为处理多个具有利益冲突的局中人的策略选择及均衡的有效数学工具,近年来被广泛用来解决无线通信网络的资源分配问题。文献[5]针对基于 OFDMA 的单小区系统,采用基于合作博弈的纳什议价解(NBS, nash bargaining solution)来解决 2 个用户间的信道及功率分配问题;基于文献[5],文献[6]提出了基于权重比例公平的议价博弈解,区分了多用户间资源分配的权重比例。但是,上述模型均是用于解决单小区内多用户间的资源分配问题,尚未有研究将 NBS 算法应用于解决认知网络中多小区间的资源分配。此外,关于协作频谱共享机制的研究才刚刚起步,文献[7]提出了认知网络中主用户和从用户协作频谱共享的模型,主用户为回报从用户分布式空时协作传输带来的收益,将租赁给从用户一定的信道使用时间;基于文献[7],文献[8]对协作中继的选择、时间和功率分配等问题进行了深入研究,但该模型会导致未被选作中继的贫困节点无法接入信道,导致认知节点间存在严重的不公平。

## 3 认知车载网络系统模型

VANET 系统中,当固定分配的频谱资源可以满足通信负载及业务需求时,车载网络无需启动认知检测机制,以避免认知网络频谱检测和管理等额外的开销。当大量车载节点频繁竞争接入带宽有限

的频谱资源，系统传输质量受到严重影响时，VANET 系统将快速启动认知机制来检测并租用授权频谱，为重负载情形下的车载网络提供额外的频谱资源。本文主要研究系统重负载且认知检测机制已启动情况下，空闲频谱资源的最优化分配算法。

按照地理位置，本文将认知车载网络分为不同的簇，每个簇由若干认知小区组成，考虑图 1 所示的系统模型，其包括一个簇，并将分为 4 个认知小区。为避免邻道干扰，同一簇中不同小区间不能使用相同频率的信道。每个认知小区中央的路边单元，将代表该小区参与多小区间频谱资源的议价博弈，且负责将频谱分配给小区内的 OBU。假设通过理想频谱检测可精确得到网络当前的可用频谱，且能预测主用户频谱占用的统计特性，理想信道估计能获得认知 OBU 在不同子信道的信道状态信息。

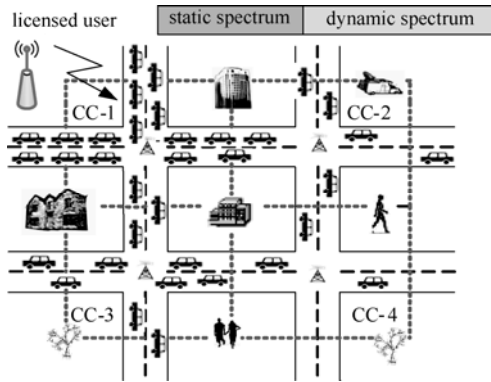


图 1 认知车载网络系统模型

由于认知车载网络中可用的频谱资源、通信负载均为动态变化，本文定义负载指数  $LS$  来表征网络当前的负载状况。

$$LS \triangleq (R_{req}^{safe} + R_{req}^{nonsafe}) / R_{total} \quad (1)$$

其中， $R_{req}^{safe}$ 、 $R_{req}^{nonsafe}$  分别代表当前网络中安全和非安全业务的最小速率需求， $R_{total}$  为网络当前所能提

供的总信道容量。基于负载指数及对安全业务的速率需求，可定义 3 种负载状态，即轻负载、重负载和超重负载状态。 $LS < 1$  时，定义为轻负载状态，指的是车载网络能够满足所有业务的速率需求； $LS \geq 1$  时，定义为重负载或超重负载状态：当仅能优先满足安全业务的最小需求，不能支持所有的非安全业务时，定义为重负载 ( $R_{req}^{safe} / R_{total} \leq 1$  且  $LS \geq 1$ )；更有甚者，安全业务的最小速率需求也得不到满足时，定义为超重负载状态 ( $R_{req}^{safe} / R_{total} > 1$ ，显然会有  $LS \gg 1$ )。

在重负载/超重负载时，认知 RSU 将给优先级高的车载节点优先分配资源，这些节点将以 overlay 方式接入频谱，并定义为 A 类 OBU。此时，未分配到频谱的 OBU 将无法接入信道，大大降低了这些节点的 QoS 以及系统吞吐量。为了使得更多的 OBU 获得接入信道的机会，提高认知 OBU 间的公平性，本文提出了基于主用户和从用户协作传输（简称为主从协作）的单小区频谱共享新模型，通过协作使得双方均获得一定的性能增益。如图 2 所示，假设小区内存在一个正在通信的 PU (PT 发，PR 收) 和若干等待信道接入的 OBU 通信对，PU 将在未获得频谱的 OBU 中选择对其有益的节点作为中继协助转发数据，这些被选中中继的节点称为 B 类 OBU，剩余的则称为 C 类 OBU。PU 为奖励 B 类 OBU 的协作所带来的速率增益，将给予其一定的频谱接入机会。同时，为使得 C 类贫困 OBU 也获得一定的传输机会，同样构建了 A 类、C 类 OBU 间的协作频谱共享模型。

本文将认知协作模型分为协商选择、协作传输和中继独传 3 个阶段。在协商选择阶段，主用户将选择 B 类 OBU 作为中继节点协助转发数据，贫困的 C 类 OBU 则与 A 类 OBU 进行互选组成协作传输对，假设协商带来的时间开销为  $\tau$ 。假设采用 AF

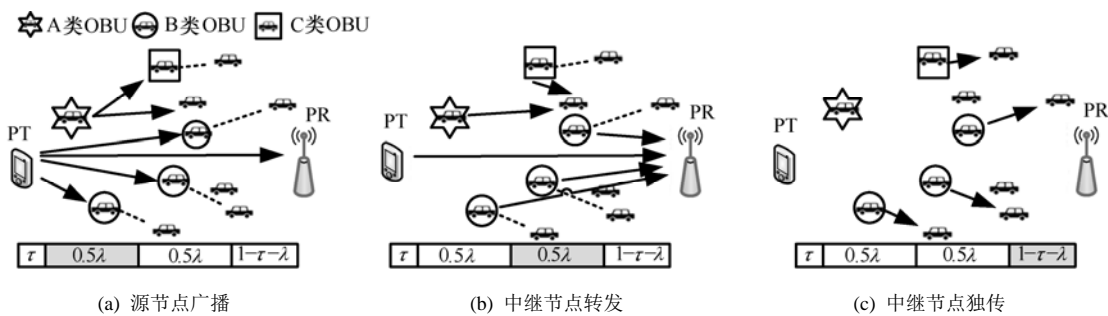


图 2 单小区认知协作频谱共享模型

转发模式，传输周期为  $\lambda$ ，并将其等分为广播和中继转发 2 个阶段，源节点首先广播信息到目的节点及中继协作点，然后中继节点转发信息到目的节点。在中继独传阶段，认知 OBU 可以在  $1-\tau-\lambda$  的时间内以 FDMA 的方式共享整个频谱，或以 TDMA 方式共享  $1-\tau-\lambda$  的传输时间。本文选择后者，并以主从协作为例，得到每个 B 类 OBU 可以获得的频谱接入时间如式(2)所示，其与该节点的中继功率和信道增益等因素有关，即与对主用户的贡献成正比。

$$t_i = (1-\tau-\lambda) \frac{P_i G_{P,i} G_{i,P}}{\sum_{j \in B} (P_j G_{P,j} G_{j,P})} \quad (2)$$

其中， $P_i$  为中继功率， $G_{P,i}$  和  $G_{i,P}$  为 PT 到中继节点以及中继节点到 PR 的信道增益。

综上所述，认知车载网络的系统时隙结构如图 3 所示。当 VANET 启动认知机制后，认知 OBU 将频谱检测的信息上报至中心节点，将感知得到所有非连续频谱形成频谱池，并参照 IEEE802.11p 协议规定的 OFDM 物理层参数将其划分为若干子信道。在资源分配阶段，首先采用 GNBS 算法完成多认知小区间的资源分配，随后利用支持区分业务优先级信道分配算法，将频谱资源优先分配给承载安全信息的高优先级 OBU。在重负载状态下，系统则通过基于认知协作的频谱共享机制，使得更多的贫困节点获得接入信道的机会，提高系统的整体性能。

#### 4 基于 GNBS 的多认知小区间的频谱分配

基于合作博弈的纳什议价解强调的是集体利益的最大化，其综合考虑了系统整体效用和参与人间的公平性，但博弈参与人可能并不对等，通过个人理性、弱帕累托效率、不变性、不相关选择独立性等公理，可以得到基于议价因子的

GNBS 存在性和唯一性的定理证明<sup>[9]</sup>。为使得参与者具有不同的议价能力，对 NBS 引入议价因子  $\theta_n$ ，得到 GNBS。

$$f(S, \mathbf{R}^{\min}) = \arg \max_{R \in S, R \geq \mathbf{R}^{\min}} \prod_{n=1}^N (R_n - R_n^{\min})^{\theta_n} \quad (3)$$

其中， $(\theta_1, \dots, \theta_N) \in [0, 1]^N, \sum_{n=1}^N \theta_n = 1$ 。结合认知车载网络的特点，定义议价因子  $\theta_n \triangleq R_n^{\min} / \sum_{n=1}^N R_n^{\min}$ ，代表认知小区 CC- $n$  的议价能力，即认知小区的最小速率需求越大，议价能力越强，为其分配的频谱资源越多。

综合考虑系统的有效性、权重比例公平性以及授权频谱的活动性，基于 GNBS 的需求非对称的两认知小区间的频谱资源分配问题可建模为

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{n=1}^2 \theta_n \log(R_n - R_n^{\min}) \\ \text{s.t.} \quad & a_n^k \geq 0, \quad \forall n, k \\ & \sum_{n=1}^2 a_n^k = 1, \quad \forall k \\ & \sum_{k=1}^K a_n^k r_n^k \geq R_n^{\min}, \quad \forall n \end{aligned} \quad (4)$$

其中，

$$R_n = \sum_{k=1}^K a_n^k \xi_k \bar{r}_n^k = \sum_{k=1}^K a_n^k \xi_k (\sum_{i=1}^{N_n} r_i^k) / N_n \quad (5)$$

$$r_i^k = W \text{lb}(1 + (p_i^k h_i^k) / \sigma^2); \quad i \in \{1, 2, \dots, N_n\} \quad (6)$$

其中， $R_n$  表示 CC- $n$  在所分配子信道上的和速率， $\bar{r}_n^k$  则为 CC- $n$  使用子信道  $k$  时的一个平均速率。 $a_n^k$  为子信道分配变量， $\xi_k$  为子信道  $k$  所对应的主用户活动性对速率的折扣因子。

借鉴文献[10]的思想，对上述优化问题构建拉格朗日函数：

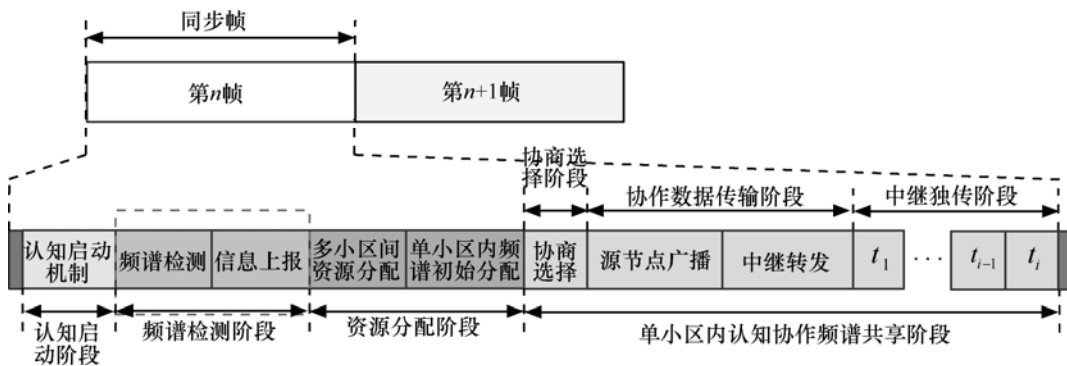


图 3 认知车载网络的系统时隙结构

$$f(\mathbf{a}) = -\sum_{n=1}^2 \theta_n \log(R_n - R_n^{\min}) - \sum_{n=1}^2 \sum_{k=1}^K \lambda_n^k a_n^k + \sum_{k=1}^K \gamma_k (\sum_{n=1}^2 a_n^k - 1) - \sum_{n=1}^2 \delta_n (\sum_{k=1}^K a_n^k \xi_k \bar{r}_n^k - R_n^{\min}) \quad (7)$$

对  $a_n^k$  进行连续放松, 将  $f(\mathbf{a})$  对连续变量  $a_n^k$  求偏导数并令其结果为 0, 得到

$$\frac{\xi_k \theta_n r_n^k}{R_n - R_n^{\min}} = -\lambda_n^k + \gamma_k - \delta_n \xi_k r_n^k \quad (8)$$

这样, 可以得到包含式(8)在内的一组 KKT 条件:

$$\frac{\xi_k \theta_n r_n^k}{R_n - R_n^{\min}} + \lambda_n^k - \gamma_k + \delta_n \xi_k r_n^k = 0, \forall n, k \quad (9a)$$

$$-a_n^k \leq 0, \forall n, k \quad (9b)$$

$$-(\sum_{k=1}^K a_n^k \xi_k r_n^k - R_n^{\min}) \leq 0, \forall n \quad (9c)$$

$$\sum_{n=1}^2 a_n^k - 1 = 0, \forall k \quad (9d)$$

$$\lambda_n^k a_n^k = 0, \forall n, k \quad (9e)$$

$$\delta_n (\sum_{k=1}^K a_n^k \xi_k r_n^k - R_n^{\min}) = 0, \forall n \quad (9f)$$

$$\lambda_n^k \geq 0, \forall n, k; \gamma_k \geq 0, \forall k; \delta_n \geq 0, \forall n \quad (9g)$$

其中, 式(9e)和式(9f)称为互补松弛条件。如果优化问题存在最优解, 那么 CC-1 和 CC-2 的传输速率必须大于各自的最小速率需求, 由互补松弛条件式(9f)可得  $\delta_1 = \delta_2 = 0$ 。此时, 如果子信道  $k$  分配给 CC-1, 则有  $a_1^k = 1, a_2^k = 0$ , 由式(9e)可得  $\lambda_1^k = 0, \lambda_2^k \geq 0$ 。这时式(9a)简化为

$$\frac{\xi_k \theta_1 \bar{r}_1^k}{R_1 - R_1^{\min}} = \gamma_k, \quad \frac{\xi_k \theta_2 \bar{r}_2^k}{R_2 - R_2^{\min}} = \gamma_k - \lambda_2^k \leq \gamma_k \quad (10)$$

假设 CC-1 和 CC-2 以 TDM 方式共享子信道  $k$ , 此时必有  $a_1^k > 0, a_2^k > 0$ , 且可得到

$$\frac{\xi_k \theta_1 \bar{r}_1^k}{R_1 - R_1^{\min}} = \frac{\xi_k \theta_2 \bar{r}_2^k}{R_2 - R_2^{\min}} \quad (11)$$

定义如式(12)所示的判决函数  $f(\bar{r}_1^k, \bar{r}_2^k)$ , 将其与 0 进行比较即可判断子信道  $k$  应该分给哪一个认知小区。当  $f(\bar{r}_1^k, \bar{r}_2^k) > 0$ ,  $a_1^k = 1$ , 子信道  $k$  分给 CC-1; 当  $f(\bar{r}_1^k, \bar{r}_2^k) < 0$ ,  $a_2^k = 1$ , 子信道  $k$  分给 CC-2。

$$f(\bar{r}_1^k, \bar{r}_2^k) = \frac{\theta_1 \bar{r}_1^k}{\theta_2 \bar{r}_2^k} - \frac{R_1 - R_1^{\min}}{R_2 - R_2^{\min}} \quad (12)$$

通过分析, 可以先对所有的子信道以  $M_k = (\theta_1 \bar{r}_1^k) / (\theta_2 \bar{r}_2^k)$  为指标进行降序排列, 序号小的子信道对 CC-1 的效用更大, 序号大的则应优先分配给 CC-2。如式(14)所示定义  $k_{\max}$  和  $k_{\min}$ , 其分别对应于满足 CC- $n$  最小速率需求的子载波划分位置。采用与文献[5]类似的两段式划分算法, 即可在找到唯一的帕累托最优分割点  $k_s$  ( $k_{\min} \leq k_s \leq k_{\max}$ )。

$$A_k = \sum_{l=1}^k \bar{r}_1^l - R_1^{\min}, B_k = \sum_{l=k+1}^K \bar{r}_2^l - R_2^{\min} \quad (13)$$

$$k_{\min} = \min_{k \in \{1, 2, \dots, K\}} \{k | A_k \geq 0\}, k_{\max} = \min_{k \in \{1, 2, \dots, K\}} \{k | B_k < 0\} \quad (14)$$

若 GNBS 存在最优解, 必须满足 CC-1 和 CC-2 获得传输速率大于各自的最小速率需求, 因此上述分配模型只适用于轻负载情形。在重负载情形下, 为保证保障安全信息的高可靠性传输, 本文对上述模型进行改进, 提出了重负载情形下基于安全业务 QoS 保障的动态频谱分配方案。

当网络只能满足安全业务需求时, 首先将排序之后的子信道进行初始化分配, 满足安全业务传输的最小速率需求, 剩余的子信道按照上述算法分配频谱给认知小区。在超重负载情形下, 由于不能满足安全业务最小需求, 此时本文将以安全业务的最小需求作为分配权重, 将式(2)中的最小需求  $R_n^{\min}$  置为 0, 并称之为 GNBS-S 方案。

当  $R_n^{\min} = 0, \forall n$  时, NBS 准则也被称为线性比例公平准则。根据文献[11], 引入议价因子  $\bar{\theta}_n$ , 两小区资源竞争博弈可建模为

$$\max \sum_{n=1}^2 \bar{\theta}_n \log(R_n) \quad (15)$$

其中,  $\bar{\theta}_n = R_n^{\min-s} / \sum_{n=1}^N R_n^{\min-s}$ 。

综上所述, 本文提出了一种基于 GNBS 算法的两段式频谱分配简化方案, 在有效减小系统实现复杂度的基础上, 可实现资源的最优化分配, 具体实现过程如下。

**步骤 1** 初始化。计算 CC-1 和 CC-2 的最小速率需求  $R_1^{\min}, R_2^{\min}$ , 确定 CVN 网络的负载状态, 并计算相应的议价因子  $\theta_1, \theta_2$ 。

**步骤 2** 将子信道按照  $M_k = (\theta_1 \bar{r}_1^k) / (\theta_2 \bar{r}_2^k)$  降序排列, 初始分配信道满足 CCs 的最小需求, 计算相应负载状态下的  $k_{\min}$  和  $k_{\max}$ , 以确定搜索子信道划分位置的区间 ( $k_{\min}, k_{\max}$ )。

**步骤 3** 计算  $U = (R_1 - R_1^{\min})^{\theta_1} (R_2 - R_2^{\min})^{\theta_2}$ , 选

择最大效用  $U$  对应的信道划分标号  $k_s$ 。

**步骤 4** 完成信道分配。CC-1 和 CC-2 分配的子信道分别为  $\{1, 2, \dots, k_s\}$  和  $\{k_s + 1, \dots, K\}$ 。

### 5 基于认知协作的单小区内的频谱共享

在单小区内的资源分配中, 本文采用“优先级+随机数”的分配方案, 即将频谱资源优先分配给承载安全信息的高优先级 OBU, 对于相同的优先级, 则根据随机数的大小决定分配顺序。特别地, 为保障车载节点在重负载情形下的公平性, 本文将通过认知协作的频谱共享机制来有效地使得协作双方均获得速率增益, 提高系统吞吐量。下面以主从协作为例, 对认知协作模型进行详细分析。

在图 2 所描述的主从协作模型中, 中继节点采用 AF 转发协议, 接收端采用最大比合并算法, 主用户的直传信噪比可表示为  $\Gamma_p = P_0 G_p / \sigma^2$ , 每条协作支路上的等效信噪比为

$$\Gamma_i = \frac{P_i P_0 G_{p,i} G_{i,p}}{\sigma^2 (P_0 G_{p,i} + P_i G_{i,p} + \sigma^2)} \quad (16)$$

主用户和 B 类 OBU 的传输速率可表示为

$$R_p = W \ln(1 + \Gamma_p + \sum_{i \in B} \Gamma_i) \quad (17)$$

$$R_i = W \ln \left( 1 + \frac{P_b G_b}{\sigma^2} \right) \quad (18)$$

主用户需要通过一定的准则选择合适的中继, 并确定协作传输周期  $\lambda$ 。当  $\lambda$  太大时, 分配给中继节点单独通信的时间相对较少, 认知节点参与协作的积极性将减弱; 当  $\lambda$  太小时, 主用户的效用也将随之变小。本文假设主从用户都是自私的, 目的均为最大化各自的效用, 如主用户最大化其收益, 其优化问题可描述为

$$\max \lambda R_p(\lambda) \quad (19)$$

同样地, 认知 OBU 的优化目标也是最大化其效用。综合考虑认知 OBU 可达传输速率及其用于协作所付出的能量损失, B 类 OBU 的效用可表示为

$$\begin{aligned} U_i &= R_i t_i - \frac{1}{2} \lambda P_i C_i \\ &= (1 - \tau - \lambda) \sum_{j \in B} \frac{P_j G_{p,j} G_{j,p}}{(P_j G_{p,j} + G_{j,p})} R_i - \frac{1}{2} \lambda P_i C_i \end{aligned} \quad (20)$$

其中,  $C_i$  为单位中继功率的速率损失。

采用与文献[8]类似的方法, 通过对  $U_i$  求极值, 得到最优中继功率为

$$P_i^* = \left( D - \frac{M-1}{G_{p,i} G_{i,p} R_i} \right) \frac{2(1-\tau-\lambda)(M-1)}{\lambda C_i G_{p,i} G_{i,p} D^2} \quad (21)$$

其中,  $D = \sum_{j \in B} 1/(G_{p,j} G_{j,p} R_j)$ ,  $M$  为备选中继节点的个数。由于必须保证中继功率非负, 因此可以得到如下的限制条件, 并将其作为中继选择的判决标准。

$$D > \frac{M-1}{G_{p,i} G_{i,p} R_i}, \quad \forall i \in B \quad (22)$$

简单地, 主用户选择中继的策略如下。首先将所有认知 OBU 放入备选中继集合, 并按照  $G_{p,i} G_{i,p} R_i$  指标进行降序排列, 然后从后向前依次遍历所有的认知 OBU, 判断是否满足式(22), 若不满足条件, 则将该节点从中继集合移除, 直到找到满足条件的节点结束搜索, 并选择该节点之前的所有 OBU 均作为主用户的中继。

由式(21)可知, 对于不同的  $\lambda$  将有唯一的中继功率与之对应, 因此可采用遍历迭代的方法得到最佳的时间分配和中继功率。首先, 将  $\lambda$  初始化为 1, 并以一定的步长  $\delta$  进行递减; 其次, 根据式(21)计算相应的中继功率  $P_i$ , 进而得到 PU 的效用  $U_p$ ; 最后, 选择使得 PU 效用最大的协作周期  $\lambda^*$  及其对应的最优中继功率  $P_i^*$ 。

与主从协作不同的是: A 类、C 类 OBU 间的协作将采用双向选择策略。首先, 每个 C 类 OBU, 将优先选择承载非安全业务、主用户活动性弱以及中继链路质量好的 A 类源节点, 即作为使得式(23)最大的源节点的备选中继。随后, A 类 OBU 将按照主从协作的中继选择策略, 对备选中继进行删选, 以保证协作双方都能获得一定的速率增益。

$$F = S \xi G_{AT_i, CT_j} G_{CT_j, AR_i} \quad (23)$$

其中,  $S$  代表 A 类 OBU 的业务类型,  $S=1$  为非安全业务,  $S=0$  则为安全业务;  $\xi$  为主用户频谱活动性对传输速率的折扣; 在 C 类 OBU 选择源节点的过程中, 本文仅以信道增益来表征链路质量, 且  $G_{AT_i, CT_j}$ 、 $G_{CT_j, AR_i}$  分别代表 A 类 OBU (源节点) 到 C 类 OBU (中继节点) 以及 C 类中继节点到 A 类目的节点的信道增益。

### 6 仿真结果与分析

利用 Matlab 仿真工具, 对不同场景下基于 GNBS

算法的非对称多认知小区间频谱分配方案进行性能仿真,并在重负载情形下对认知协作的频谱共享机制进行了仿真和分析。假设每个 OBU 的安全和非安全业务的最小速率需求分别为 200kbit/s 和 1000kbit/s, 认知频谱池中每个子信道的带宽为  $W = 156.25\text{kHz}$ , 且当前可用的子信道数为 256, 掩膜功率为  $p_i^k = 10\text{mW}$ , 噪声功率为  $\sigma^2 = 10^{-15}\text{W}$ 。仿真中, 每个传输链路的信道增益包括小尺度瑞利衰落以及大尺度路径损耗  $0.097/d^4$ , 子信道主用户活动性对应的速率折扣因子  $\xi_k$  服从  $[0.2, 1]$  上的均匀分布。

图 4 对基于 GNBS 的多小区间资源分配方案的性能与最大化速率(Max-rate)以及最大化最小(max-min)公平方案进行了比较。假设 CC-1 和 CC-2 的最小速率需求相同, 即  $\theta_1 = \theta_2$ , 但认知节点分别均匀分布在  $1\text{km} \times 1\text{km}$  和  $1.3\text{km} \times 1.3\text{km}$  的矩形区域内。由于 Max-rate 方案以最大化系统效用为目标, 将频谱资源优先分配给信道条件好的小区, 其系统和速率明显大于其他方案, 但会导致两认知小区间严重的不公平性。Max-min 方案则充分考虑了信道质量差的认知小区, 每一个子信道的分配都最大化和速率较小的认知小区的效用。但是, Max-min 方案在保证绝对公平的同时, 损失了信道条件好小区的性能, 从而对和效用带来了损失。仿真结果表明, 基于 GNBS 算法的分配方案综合考虑了系统的公平性和总效用, 其得到的和速率明显大于 Max-min 方案, 且信道条件的差异性对多认知小区间公平性的影响比 Max-rate 方案小得多。因此, 本文提出的 GNBS 分配方案在系统效用和公平性上得到了很好的折中。

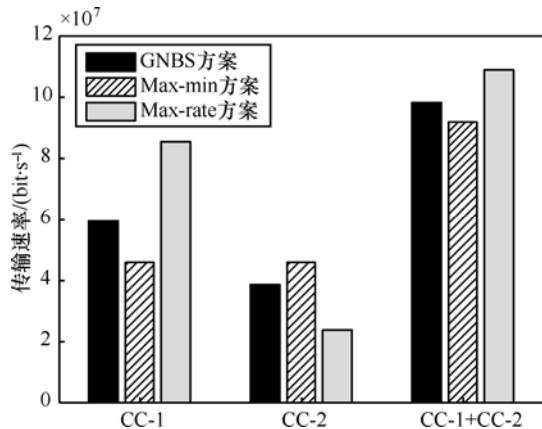


图 4 不同分配方案下认知小区可达传输速率的比较

图 5 直观地描述了采用 GNBS 分配方案时, CC-1 与 CC-2 可得的传输速率随 CC-1 议价因子的变化情况。仿真结果表明, 本文提出的 GNBS 方案可以根据多小区间认知用户数目和需求的差异性来动态调节资源分配的比例, 随着认知小区议价能力的增强, 其分得的频谱资源也相应增加。然而, Max-min 方案则没有考虑多小区间的差异性, 只能保证小区间的绝对公平。因此, GNBS 方案更适合于非对称多小区间的资源分配, 具有更强的自适应性和顽健性。

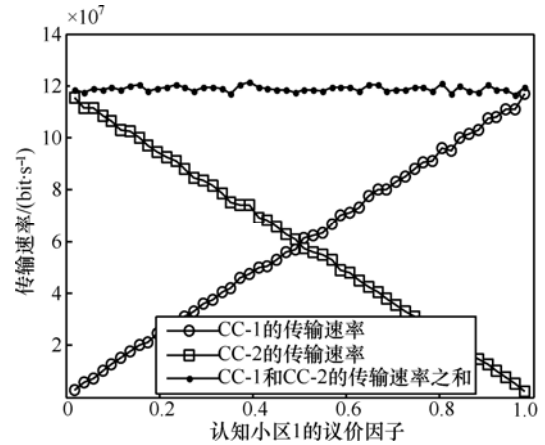


图 5 认知小区的传输速率与议价因子的关系

图 6 则对比了 GNBS 与 Max-min 方案中每个认知 OBU 间的公平性随 CC-1 议价因子的变化情况。纵坐标的公平性使用式(24)定义的 Jain's 公平指数。结果表明, 随着 CC-1 议价因子的增加, GNBS 方案可以有效地保证多个认知 OBU 间的公平性, 其公平指数接近于 1 并几乎保持不变, 这是因为该算法充分考虑了多个认知小区间需求的差异性。然而, Max-min 方案则只有当认知小区绝对对称时, 才能保证多个车载节点间的公平性, 随着认知小区间频谱需求和节点数目差异性的增大, 认知 OBU 间的公平性将不断恶化。

$$JFI = (\bar{R}_1 + \bar{R}_2)^2 / (2\bar{R}_1^2 + 2\bar{R}_2^2) \quad (24)$$

其中,  $\bar{R}_n = R_n / N_n$ ,  $n \in \{1, 2\}$ , 它表示每个认知 OBU 的平均速率, 且 JFI 的范围为  $[0.5, 1]$ 。

假设 CC-1 发生了严重的交通事故或拥塞, 频谱检测到的可用频谱不能满足大量碰撞避免等安全业务的需求。假设 CC-1 和 CC-2 中 OBU 的数目为 200 和 80, 且分别存在 160 和 30 个认知节点请求传输安全信息。由图 7 可知, GNBS-S 方案的性

能要明显优于其他方案，这是因为该算法在信道分配过程中充分考虑了安全业务的优先级，以认知小区安全业务的需求表征议价力量的强弱，可以有效地降低安全业务的中断概率，保障信息传输的可靠性。

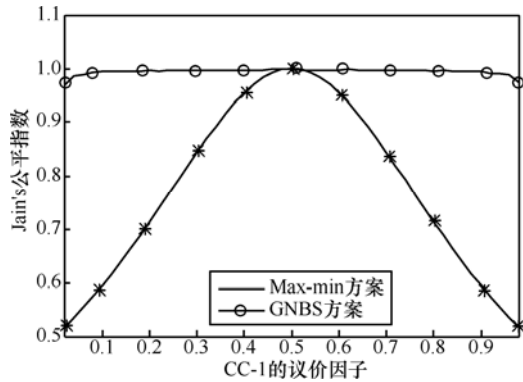


图6 GNBS方案与Max-min方案公平性的比较

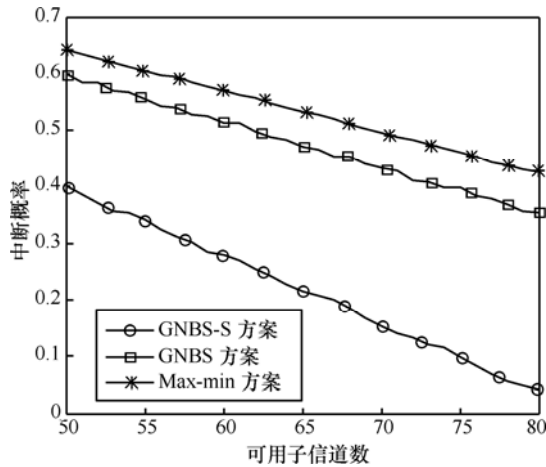


图7 超重负载情形下不同分配方案的中断概率比较

下面将对基于认知协作的单小区频谱共享机制进行分析。假设在1km×1km的小区内存存在一个主用户通信对，PT和PR分别位于(0, 0)和(1 000, 0)，15个OBU通信对均匀分布在小区内，其中2对OBU承载安全业务，其余均为非安全业务。假设协商时间开销 $\tau=0$ ，速率损耗因子 $C=1$ ，迭代步长 $\delta=10^{-4}$ ，其余参数同上。

图8描述了单小区内认知协作频谱共享的结果示意图，其中A、B类OBU分别以“\*”和“•”标注。由仿真结果可知，认知小区中存在5对已分配得到频谱的A类OBU，2对认知OBU被选作主用户的中继节点协助转发信息，C类OBU将优先选择承载非安全业务的节点，且与其标注相同的A类节点进行协作。通过分析可知，认知节点的位置

及其通信距离将影响主用户中继选择的结果，PU将选择与其距离近、信道条件好的OBU协助转发数据，因为对于相同的中继功率，信道质量好的OBU将可能获得更大的收益。

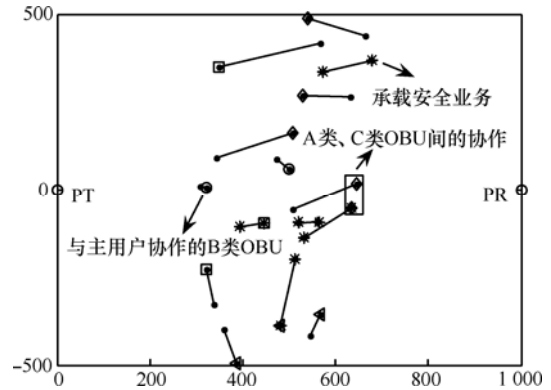


图8 单小区内的认知协作频谱共享

图9则表征了PU的效用随协作周期 $\lambda$ 的变化情况，可以看到，当 $\lambda=0.96$ 时，PU的传输速率达到最大，相对于 $\lambda=1$ （未分配时间给协作节点）时的效用高出35%到40%。图10表征了每个认知OBU

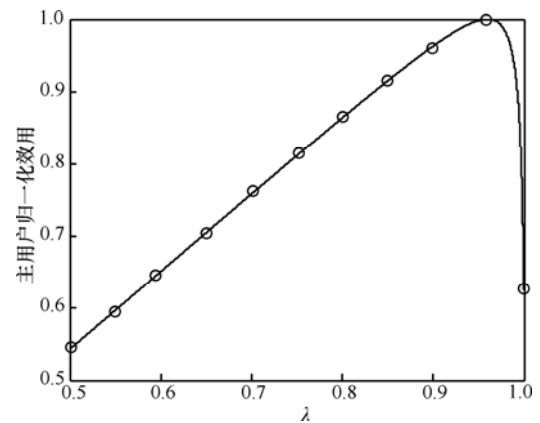


图9 主用户效用随协作周期 $\lambda$ 的变化

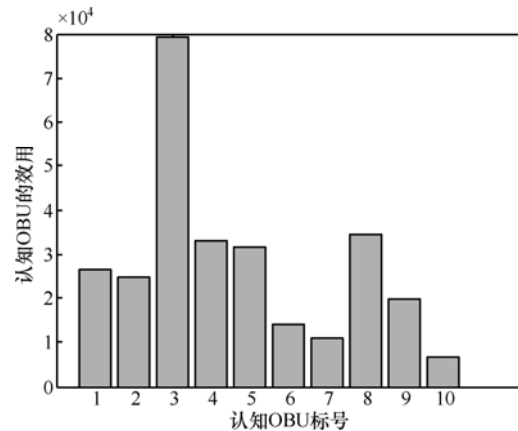


图10 认知协作频谱共享机制下认知OBU的传输速率

通过协作通信所得到的总传输速率, 由此可知, 初始未得到子信道的 10 对瓶颈 OBU 也可通过与主用户以及 A 类 OBU 的协作获得一定的频谱接入机会。因此, 本文提出的认知协作模型使得协作双方均获得了一定的速率增益, 提高了认知 OBU 间的公平性以及系统的整体效用。

## 7 结束语

综合考虑系统效用以及权重比例公平性, 本文将需求非对称的多认知小区间的资源分配构建为基于讨价还价博弈的 GNBS 模型, 并充分考虑了不同的负载状况以及主用户频谱活动性, 提出了一种基于安全业务 QoS 保障的多认知小区间频谱分配简化算法, 以减小系统实现的复杂度。此外, 在单小区的资源分配方案中, 构建了基于认知协作的频谱共享新模型, 使得协作双方均能获得一定的速率增益。仿真结果表明, 本文提出的基于认知车载网络的频谱分配和共享策略, 在充分保障安全业务 QoS 的基础上, 可以显著提高认知 OBU 间的公平性及系统总效用。

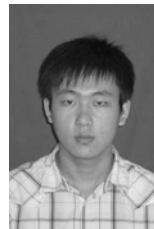
## 参考文献:

- [1] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE JSAC, 2005, 23(2): 201-220.
- [2] WANG X Y, HO P H. A novel sensing coordination framework for CR-VANETs[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(4):1936-1948.
- [3] BAI B, CHEN W. Low complexity outage optimal distributed channel allocation for vehicle-to-vehicle communications[J]. IEEE JSAC, 2011, 29(1): 161-172.
- [4] NIYATO D, HOSSAIN E, WANG P. Optimal channel access management with QoS support for cognitive vehicular networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2011, 10(5):573-591.
- [5] HAN Z, JI Z, LIU K J R. Fair multiuser channel allocation for OFDMA networks using nash bargaining solutions and coalitions[J]. IEEE Transactions on Communications, 2005,53(8): 1366-1376.
- [6] ZEHAVID E, LESHEM A. Alternative bargaining solutions for the interference channel[A]. IEEE International Workshop on

CAMSAP[C].2009. 9-12.

- [7] SIMEONE O, STANOJEV I. Spectrum leasing to cooperating secondary ad hoc networks[A]. IEEE JSAC, 2008, 26(1): 203-213.
- [8] WANG H B, GAO L, GAN X Y. Cooperative spectrum sharing in cognitive radio networks: a game-theoretic approach[A]. IEEE ICC[C]. 2010.1-5.
- [9] CHRISTINA M. 博弈论与经济学[M]. 张琦译. 北京: 经济管理出版社, 2005.165-172.  
CHRISTINA M. Game Theory and Economics[M]. ZHANG Q, Translation. Beijing: Economy and Management Publishing House, 2005.165-172.
- [10] LIU W, LUO T, HE X. Fair resource allocation for cooperative relay OFDMA networks[A]. IEEE International Conference on Communication Technology[C]. 2010.1394-1398.
- [11] FANG Z Y, BENSOU B. Fair bandwidth sharing algorithms based on game theory frameworks for wireless ad-hoc networks[A]. Proceedings of IEEE INFOCOM[C]. 2004.1284-1295.

## 作者简介:



张磊 (1989-), 男, 山西忻州人, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为移动通信、认知无线网络和车载无线通信等。



罗涛 (1971-), 男, 陕西凤翔人, 博士, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为宽带移动通信、认知无线电和车辆通信 WAVE 等。



刘蔚 (1978-), 男, 山西兴县人, 博士, 中国电子科技集团公司第二十研究所工程师, 主要研究方向为无线资源管理、无线电导航和定位等。