

# 认知无线电协同传输在车联网中的应用及性能分析

刘 阳, 黎锁平

兰州理工大学理学院, 甘肃 兰州  
Email: yangl9606@126.com

收稿日期: 2021年3月18日; 录用日期: 2021年4月2日; 发布日期: 2021年4月15日

---

## 摘 要

随着通信技术与智能天线技术的快速发展, 车联网得到广泛关注与研究。但频谱匮乏、通信覆盖范围有限一直困扰着车联网的发展与应用, 本文将认知无线电协同传输引入到车联网系统中, 通过协同传输在不增加发射功率的前提下扩大了传输范围。通过对信干噪比的分析与推导, 计算出了端到端传输的中断概率; 数值模拟结果表明相较于直接通信, 采用认知无线电协同传输能够有效降低中断概率, 提升车联网的性能。

## 关键词

车联网, 认知无线电, 协同传输, 中断概率

---

# Application and Performance analysis of Cognitive Radio Cooperative Transmission in Internet of Vehicles

Yang Liu, Suoping Li

School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu  
Email: yangl9606@126.com

Received: Mar. 18<sup>th</sup>, 2021; accepted: Apr. 2<sup>nd</sup>, 2021; published: Apr. 15<sup>th</sup>, 2021

---

## Abstract

With the rapid development of communication and smart antenna technology, the Internet of Vehicles (IoV) has received extensive attention and research. The application of IoV is hampered by

lack of spectrum and limited communication coverage. In this paper, cognitive radio cooperative transmission is introduced into the IoV system to expand the transmission range without increasing the transmission power. The outage probability of end-to-end transmission is calculated by analyzing and deducing the signal to interference plus noise ratio. Numerical simulation results show that compared with direct communication, the use of cognitive radio cooperative transmission can effectively reduce the outage probability and improve the performance of the IoV.

## Keywords

Internet of Vehicles, Cognitive Radio, Cooperative Transmission, Outage Probability

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着无线电技术的发展与普及,无线用户不断增加,对于无线频谱的需求不断增加,如何有效增加频谱利用率已经成为许多学者关注的焦点。[1] [2] [3]提出的认知无线电技术中,次级用户可以使用主用户授权的频谱,这有效的增加了频谱利用率。在[4]中,提出了一种 underlay 认知无线电模式,在 underlay 模式下次级网络跟主网络被允许可以共同使用频谱资源,但次级网络必须满足严格的干扰约束,这是以次级用户牺牲自己的发射功率为代价的。由于次级用户的发射功率受到严格限制,因此次级网络的传输覆盖范围通常较小,并且发射功率的限制使得次级用户的 Qos (服务质量)较差。因此围绕上述出现的问题学者们进行了许多研究,中继协同传输是一种被认为可以不增加发射功率借助中继节点扩大传输范围改善通信性能的策略,因此许多学者将中继协同传输引入到认知无线电中,中继协同传输在认知无线电中的推广应用[5] [6] [7]引起了研究领域的广泛关注。

[8]将最佳中继协同传输引入到认知无线电中,推导了对主网络的干扰小于或等于阈值的情况下,精准的中断概率表达式。但[8]中的协同中继转发策略依赖大量信道状态信息,实现起来并没有那么容易。在[9]中提出一种新的中继协同传输方法,通过选择部分具有固定增益的中继,减少对于信道信息的需求。[8] [9]都为单中继协同传输策略,[10]提出了多中继的协同传输策略,它们以牺牲一定的带宽来获得更高的信干噪比。

随着汽车和公路的日益智能化,越来越多的汽车和路边基础设施装备了通信设备,构建一个智能、高效的城市车联网已成为必然趋势,车联网也受到广泛关注[11] [12] [13]。通过车辆自身装配的电子设备静态或动态的检测周围环境信息,例如自身车速、周围车辆速度、路况、交通拥挤状况等信息,通过强大的车联网系统将信息进行整合,进行有效的路况预测、指导出行,服务于居民交通出行。但由于车辆自身的限制不可能配备大功率的信号发射器、并且城市车辆多给所有车辆划分好通信频谱也是不现实的。因此本文提出将认知无线电 underlay 协同传输应用到城市车联网系统中,解决城市车辆长距离互连、频谱稀缺问题。并且对该方案进行了性能分析,计算了 underlay 协同传输策略的中断概率,最终结果证明 underlay 协同传输策略能改善通信质量,具有广阔的应用前景。

本文剩余结构如下:第2节建立了系统模型并对信干噪比进行了分析。第3节进行了性能分析及数值模拟。第4节给出了本文的结论。

## 2. 系统模型及信干噪比分析

### 2.1. 系统模型

如图 1 所示, 次级网络为车联网, 主网络为城市中移动通信网络, 车辆 S 想要将收集到的数据传输给车辆 D, 但由于距离较远, 车辆 S 可能无法直接传输, 因此车辆 S 会利用道路中的其它车辆 R 作为中继节点将数据转发给车辆 D, 以便实现远距离的车辆互联互通, 但我们可以看到的是由于主、次网络是在同一区域内使用相同频谱进行通信的, 因此不可避免的会产生互干扰。本研究目的在于证明 underlay 中继协同传输在车联网中的应用是可行的, 因此只关注主网络对次级网络的干扰。

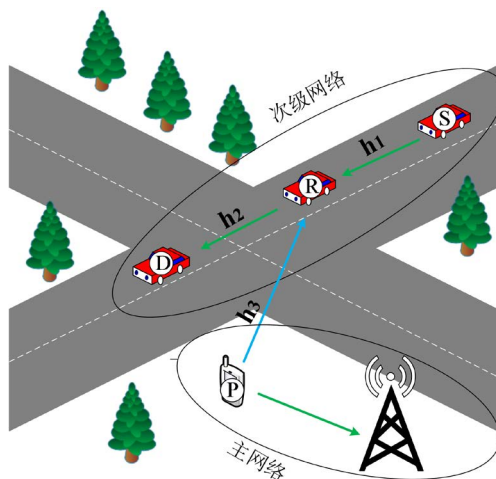


Figure 1. System model  
图 1. 系统模型

车辆 S 与车辆 D 的数据传输可分为两步, 第一步为车辆 S 向中继车辆 R 传输数据, 第二步为车辆 R 采用解码转发技术向车辆 D 转发数据。我们假设车辆 S 发送的数据为  $x_1$ , 主网络源节点 P 发送的数据为  $x_2$ , 车辆 S 到车辆 R 的信道系数为  $h_1$ , 车辆 R 到车辆 D 的信道系数为  $h_2$ , 主网络源节点 P 到车辆 R 的信道系数为  $h_3$ , 所有信道均为瑞利衰落信道。

### 2.2. 信干噪比分析

我们首先对次级网络的信干噪比进行分析, 以便之后推导中断概率。信干噪比为有用信号与噪声加干扰信号的比值, 其大小直接决定着信号的质量, 并且信干噪比的分布函数与中断概率密切相关。因此我们先对信干噪比进行详细分析。

第一步数据传输结束后, 车辆 R 接收到的信号为:

$$y_1 = \sqrt{P_1}h_1x_1 + n_0 + \sqrt{P_3}h_3x_2 \quad (1)$$

其中  $P_1$ 、 $P_3$  分别代表车辆 S、主用户 P 的发射功率,  $n_0$  代表车辆 S→车辆 R 链路上的噪声。

车辆 R 在采用解码转发技术[14]将接收到的数据包解码、检错、纠错在编码转发给车辆 D, 此时车辆 D 接收到的信号为:

$$y_2 = \sqrt{P_2}h_2x_1 + n_0 \quad (2)$$

其中  $P_2$  为车辆 R 的发射功率。

根据式(1), 第一跳的信干噪比为:

$$\zeta_1 = \frac{P_1 |h_1|^2}{N_0 + P_3 |h_3|^2} = \frac{\frac{P_1 |h_1|^2}{N_0}}{1 + \frac{P_3 |h_3|^2}{N_0}} = \frac{\gamma_1}{1 + \phi_1} \quad (3)$$

其中  $\gamma_1$  为车辆 S 到车辆 R 链路的信噪比,  $\phi_1$  为主网络源节点对车辆 R 的干扰。

根据式(2), 第二跳的信噪比为:

$$\zeta_2 = \frac{P_2 |h_2|^2}{N_0} = \gamma_2 \quad (4)$$

其中  $\gamma_2$  为车辆 R 到车辆 D 链路的信噪比。

因为信道被建模为瑞利衰落, 因此  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ 、 $\phi_1$  均服从指数分布, 我们假设服从的参数分别为  $\mu_1$ 、 $\mu_2$ 、 $\mu_3$ 。下面推导第一跳信干噪比  $\zeta_1$  的分布函数, 以便性能分析。

因为, 即  $x \geq 0$ ,  $F_{\gamma_1}(x) = 1 - e^{-\mu_1 x}$ ,  $F_{\phi_1}(x) = 1 - e^{-\mu_3 x}$ 。为得到  $F_{\zeta_1}(x)$ , 我们先推导  $F_{\phi_1+1}(x)$ 。

当  $x \geq 1$  时,  $F_{\phi_1+1}(x) = \Pr\{\phi_1 + 1 \leq x\} = \Pr\{\phi_1 \leq x - 1\} = F_{\phi_1}(x - 1)$ ,  $\phi_1 + 1$  分布函数为:

$$F_{\phi_1+1}(x) = 1 - e^{-\mu_3(x-1)} \quad (5)$$

对(5)式求导得到  $\phi_1 + 1$  概率密度函数为:

$$f_{\phi_1+1}(x) = F'_{\phi_1+1}(x) = \mu_3 e^{-\mu_3(x-1)} \quad (6)$$

当  $x < 1$  时,  $F_{\phi_1+1}(x) = 0$ ,  $f_{\phi_1+1}(x) = 0$ 。

因此根据卷积公式, 得到  $\zeta_1$  的分布函数为:

$$\begin{aligned} \because F_{\zeta_1}(x) &= \Pr\left\{\frac{\gamma_1}{1 + \phi_1} \leq x\right\} = \int_0^{\infty} \Pr\{\gamma_1 \leq xt\} \cdot f_{\phi_1+1}(t) dt \\ &= \int_0^{\infty} (1 - e^{-\mu_1(xt)}) \cdot (\mu_3 e^{-\mu_3(t-1)}) dt = e^{\mu_3} - \frac{\mu_3 e^{\mu_3}}{\mu_1 x + \mu_3} \end{aligned} \quad (7)$$

(7)式为车辆 S 到车辆 R 链路的信干噪比分布函数, 又因为  $\zeta_2 = \frac{P_2 |h_2|^2}{N_0} = \gamma_2 \sim \exp(\mu_2)$ 。

$\zeta_2$  的分布函数为:

$$F_{\zeta_2}(x) = 1 - e^{-\mu_2 x} \quad (8)$$

下面我们推导车辆 S → 车辆 R → 车辆 D 链路的端到端信干噪比分布函数, 以便进行性能分析。

根据[15], 车辆 S → 车辆 R → 车辆 D 链路的端到端信干噪比可由第一、二跳的信噪比表示, 端到端信干噪比为:

$$\zeta_{e2e} = \min\{\zeta_1, \zeta_2\}$$

其中  $\zeta_{e2e}$  表示端到端的信干噪比。

因此  $\zeta_{e2e}$  分布函数可以表示为:

$$\begin{aligned} F_{\zeta_{e2e}}(x) &= \Pr\{\min\{\zeta_1, \zeta_2\} \leq x\} = 1 - \Pr\{\min\{\zeta_1, \zeta_2\} > x\} \\ &= 1 - \Pr\{\zeta_1 > x\} \cdot \Pr\{\zeta_2 > x\} = 1 - (1 - F_{\zeta_1}(x)) \cdot (1 - F_{\zeta_2}(x)) \end{aligned} \quad (9)$$

将(7)、(8)式代入(9)式, 得到车辆 S → 车辆 R → 车辆 D 链路端到端分布函数为:

$$F_{\zeta_{e2e}}(x) = 1 - \left( 1 - e^{\mu_3} + \frac{\mu_3 e^{\mu_3}}{\mu_1 x + \mu_3} \right) \cdot (e^{-\mu_2 x}) \quad (10)$$

### 3. 性能分析及数值模拟

#### 3.1. 中断概率

中断概率是指通信双方在进行通信时中断的概率, 通常当链路实际传输速率小于要求的传输速率时则认为会发生中断事件。中断概率的大小直接决定着车辆 S 能否将信息传输给车辆 D, 这对实现车联网中的互连具有重要意义。因此我们选取该指标, 测试 underlay 中继协同传输策略的性能。

我们假设要求传输速率为  $r$ , 车辆 S→车辆 R→车辆 D 链路的中断概率可表示为:

$$P_{out} = \Pr \left( \frac{1}{2} \log_2 (1 + \zeta_{e2e}) \leq r \right) = F_{\zeta_{e2e}}(2^{2r} - 1)$$

将上式带入(10)式, 我们得到中断概率表达式为:

$$P_{out} = 1 - \left( 1 - e^{\mu_3} + \frac{\mu_3 e^{\mu_3}}{\mu_1 (2^{2r-1}) + \mu_3} \right) \cdot (e^{-\mu_2 (2^{2r-1})}) \quad (11)$$

#### 3.2. 数值模拟

为了验证认知无线电协同传输的性能, 使用 MATLAB 平台进行了中断概率的数值模拟, 并且与直接通信进行了对比。结果显示协同传输能够有效降低中断概率, 让车辆与车辆之间的信息交互变得可靠。

图 2 为车辆 S→车辆 R 的信噪比  $\gamma_1$  对中断概率的影响曲线。随着  $\gamma_1$  的不断增大, 不论是协同传输还是直接通信其中断概率  $P_{out}$  均不断降低, 并且可以发现的是协同传输的中断概率要低于直接通信, 这也说明协同传输在车联网中具有应用价值。当要求的传输速率  $r$  相同时,  $\phi_1$  越大, 中断概率越高, 这也表明在认知无线电协同传输中, 主网络对次级网络的干扰会降低次级网络的性能。当主网络干扰  $\phi_1$  相同时,  $r$  越大就越难达到这个值, 因此就越容易发生中断事件, 中断概率就越高。图 2 证明了认知无线电协同传输能够有效降低通信的中断概率, 改善车联网的通信性能, 并且在通信中应该尽可能的消除或减少干扰。

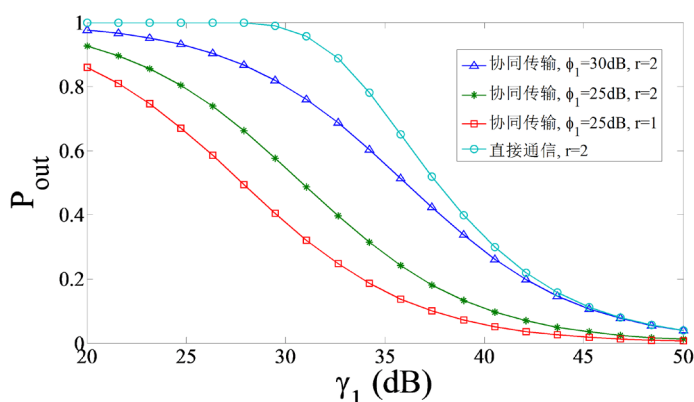


Figure 2. The influence curve of  $\gamma_1$  on  $P_{out}$

图 2.  $\gamma_1$  对  $P_{out}$  的影响曲线

图 3 为主网络干扰  $\phi_1$  对中断概率的影响曲线。随着  $\phi_1$  的增加, 中断概率不断上升。在强干扰(40~50dB)下, 中断概率接近于 1, 这表明干扰导致了车联网的信息传输基本无法进行, 在实际应用中这会导致车

辆之间的信息无法进行交互, 会严重阻碍信息的收集与传输, 无法进行有效的交通预测。因此在将认知无线电协同传输应用到车联网系统时, 应注意给车辆装配抗干扰设备与技术, 尽可能减少主网络对车联网的干扰, 以确保通信质量。

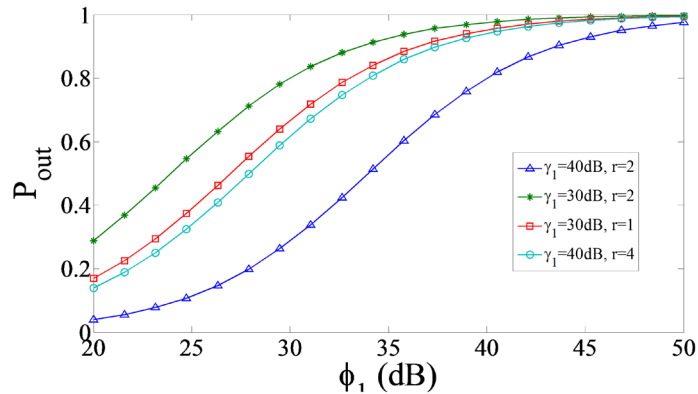


Figure 3. The influence curve of  $\phi_1$  on  $P_{out}$

图 3.  $\phi_1$  对  $P_{out}$  的影响曲线

#### 4. 结论

本文将认知无线电协同传输引入到车联网中, 在不增加发射功率的前提下提升了车联网的覆盖范围, 并且由于采用了认知无线电 underlay 模式使得车联网与主网络可以共存, 节省了频谱资源。通过对信干噪比的分析与推导, 计算出了端到端传输的中断概率, 数值模拟结果表明相较于直接通信, 采用认知无线电协同传输能够有效降低中断概率, 大幅提升车联网的性能, 证明了认知无线电协同传输在车联网系统应用的可行性, 并且本文还揭示了干扰对车联网性能的影响, 为今后的研究指明了方向。

#### 参考文献

- [1] Haykin, S. (2005) Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, **23**, 201-220. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2004.839380>
- [2] 曹华孝, 鲜永菊, 徐昌彪. 认知无线电技术的国内外发展与研究现状[J]. 数字通信, 2009, 36(2): 62-68.
- [3] 刘元, 彭端, 陈楚. 认知无线电的关键技术和应用研究[J]. 通信技术, 2007, 40(7): 87-90.
- [4] Kusaladharna, S. and Tellambura, C. (2012) Aggregate Interference Analysis for Underlay Cognitive Radio Networks. *IEEE Wireless Communication Letters*, **1**, 641-644. <https://doi.org/10.1109/WCL.2012.091312.120600>
- [5] Suoping, L., Wei, L., Jaafar, G., Kejun, J. and Fan, W. (2020) Design and Analysis of Adaptive Full-Duplex Cognitive Relay Cooperative Strategy Based on Primary System Behavior. *Wireless Networks*, **26**, 6237-6252. <https://doi.org/10.1007/s11276-020-02433-w>
- [6] Zou, Y., Zhu, J., Zheng, B. and Yao, Y. (2010) An Adaptive Cooperation Diversity Scheme with Best-Relay Selection in Cognitive Radio Networks. *IEEE Transactions on Signal Processing*, **58**, 5438-5445. <https://doi.org/10.1109/TSP.2010.2053708>
- [7] Simeone, O., Bar-Ness, Y. and Spagnolini, U. (2007) Stable Throughput of Cognitive Radios with and without Relaying Capability. *IEEE Transactions on Communications*, **55**, 2351-2360. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2007.910699>
- [8] Ashrafinia, S., Pareek, U. and Naeem, M. (2011) Biogeography-Based Optimization for Joint Relay Assignment and Power Allocation in Cognitive Radio System. 2011 *IEEE Symposium on Swarm Intelligence*, Paris, 11-15 April 2011, 1-8. <https://doi.org/10.1109/SIS.2011.5952589>
- [9] Elalem, M., Zhao, L. and Liao, Z. (2010) Interference Mitigation Using Power Control in Cognitive Radio Networks. *Vehicular Technology Conference*, Taipei, 16-19 May 2010, 1-5. <https://doi.org/10.1109/VETECS.2010.5494050>
- [10] Anghel, P.A. and Kaveh, M. (2004) Exact Symbol Error Probability of a Cooperative Network in a Rayleigh-Fading

- 
- Environment. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **3**, 1416-1421. <https://doi.org/10.1109/TWC.2004.833431>
- [11] Yu, S., Lee, J., Park, K., Das, A.K. and Park, Y. (2020) IoV-SMAP: Secure and Efficient Message Authentication Protocol for IoV in Smart City Environment. *IEEE Access*, **8**, 167875-167886. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3022778>
- [12] 程刚, 郭达. 车联网现状与发展研究[J]. 移动通信, 2011, 35(17): 23-26.
- [13] Li, S.P., Wang, F., Gaber, J. and Chang, X.K. (2020) Throughput and Energy Efficiency of Cooperative ARQ Strategies for VANETs Based on Hybrid Vehicle Communication Mode. *IEEE Access*, **8**, 114287-114304. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3003813>
- [14] Islam, S.N., Sadeghi, P. and Durrani, S. (2013) Error Performance Analysis of Decode-and-Forward and Amplify-and-Forward Multi-Way Relay Networks with Binary Phase Shift Keying Modulation. *IET Communications*, **7**, 1605-1616. <https://doi.org/10.1049/iet-com.2013.0284>
- [15] Ikki, S. and Ahmed, M.H. (2007) Performance Analysis of Cooperative Diversity Wireless Networks over Nakagami-m Fading Channel. *IEEE Communications Letters*, **11**, 334-336. <https://doi.org/10.1109/LCOM.2007.348292>