

Performance Analysis of Cooperative Vehicle Network Based on Energy Harvesting

Yaxian Xie, Suoping Li

School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu
Email: xieyaxian_1993@163.com, lsuop@163.com

Received: Apr. 6th, 2018; accepted: Apr. 23rd, 2018; published: Apr. 30th, 2018

Abstract

In this paper, vehicle network system model with energy harvesting relay is set up, and then the principle of power splitting and time switching is described. Next the signal to noise ratio is used as the index of the outage, and the outage probability and throughput are calculated respectively. Finally, the effects of each parameter on the system performance are analyzed, and the two energy collection schemes are compared in the numerical results.

Keywords

Vehicle Network, Energy Harvesting, Outage Probability, Throughput

基于能量收集的协作车联网性能分析

谢亚贤, 黎锁平

兰州理工大学理学院, 甘肃 兰州
Email: xieyaxian_1993@163.com, lsuop@163.com

收稿日期: 2018年4月6日; 录用日期: 2018年4月23日; 发布日期: 2018年4月30日

摘 要

本文首先建立一个具有能量收集中继的双跳车联网系统模型, 然后描述了功率分流和时间切换技术的工作原理。接着取信噪比作为系统中断的参考指标, 分别计算了系统的中断概率和吞吐量。最后在数值模拟中, 分析了各个参数对系统性能的影响, 并对两种能量收集方案进行比较。

关键词

车联网, 能量收集, 中断概率, 吞吐量

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

能量收集技术在克服低成本移动设备的电池容量有限问题中有良好的前景。传统的能量收集技术来自于太阳能、风力、机械振动。目前从环境中传输的射频信号(Radio Frequency, RF)中收集能量得到了广泛应用, 即将 RF 信号作为信息和能量的载体。为了同时提取能量和信息, 文献[1] [2] [3] [4]都使用不同的信息和功率传输方案。常用的有功率分流(Power Splitting, PS)技术和时间切换(Time Switching, TS)技术。文献[1]分析了放大转发中继系统的功率分配机制。文献[5]中主要研究双向中继网络能量受限的 AF 模式下, 中继采用时间切换技术从两个源节点收集能量的系统性能。文献[6]将文献[5]的模型拓展为 TWCR 双向认知无线网络。其中考虑了主用户节点的存在、两个源节点的功率限制, 以及单中继等问题; 为保护主用户不受此用户的干扰, 还提供了收发器硬件损伤的详细研究。本文基于文献[7] [8]对能源受限的双跳车联网性能进行了分析。

2. 具有能量收集中继的车联网模型

如图 1 所示, 本文考虑的是协同能量收集中继网络。S 是源信息车辆, R 是中继车辆, D 是目标车辆, S 和 D 之间由于信道的深度衰落没有直传链路, 必须借助中继 R 进行通信, 且每一部车都配有收发信号的单天线。假设作为中继的车辆 R 能从射频信号 RF 收集能量。图中 $h_i (i \in 1, 2)$ 是链路之间的瑞利衰落系数, $h_i \sim CN(0, \sigma^2)$ 是复高斯随机变量, 用 $\omega_1 = |h_1|^2$ 和 $\omega_2 = |h_2|^2$ 两个指数分布随机变量来描述信道的衰落特征。其中 $\lambda_1 = (d_1)^\beta$ 、 $\lambda_2 = (d_2)^\beta$, d_1 和 d_2 分别是 S-R 和 R-D 之间的距离, β 是路径损耗指数。

3. 功率分流和时间切换技术工作原理

如图 2, 在功率分流技术中, R 按照功率分配比 ρ , $\rho \in (0, 1)$, 把 $(1-\rho)P$ 的功率分配给信号接收器用于提取接收到的信号, ρP 的功率分配给能量接收器用于收集能量, 收集到的能量用于信号接收器的转发过程。如图 3 在时间切换技术中, R 按照时间分配比 α , $\alpha \in (0, 1)$, 把一个时间 T 块分割成三部分。R 在前 $\frac{T}{2}$ 时间收集射频信号的能量, 在中部 $\frac{(1-\alpha)T}{2}$ 时间解码源信息, 在后 $\frac{(1-\alpha)T}{2}$ 时间向 D 传输信息。

信息传输过程中衰落系数 h 在一个时间块 T 中保持不变, 与下一个时间块独立同分布。在每一个时间块 T 的开始, 源信息广播信号 $s(t)$, $E|s(t)|^2 = 1$, 其中 $E\{\cdot\}$ 表示期望, $|\cdot|$ 表示绝对值。R 接收到的射频信号[10]为:

$$y_r(t) = \sqrt{P_s} h_1 s(t) + n_r^a(t) \quad (1)$$

其中 P_s 是车辆 S 的传输功率, $n_r^a(t)$ 是 R 的天线收到的加性高斯白噪声, $n_r^a(t) \sim N(0, N_0)$ 。

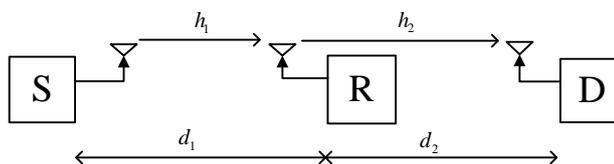


Figure 1. System structure with relay of energy harvesting
图 1. 具有能量收集中继的系统结构图

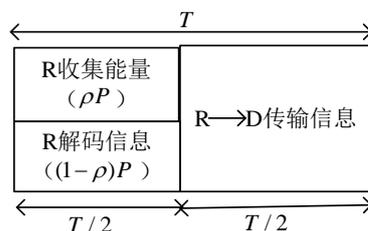


Figure 2. Principle of power splitting
图 2. 功率分流原理

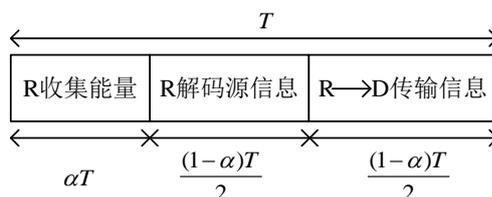


Figure 3. Principle of time switching
图 3. 时间切换原理

4. 中断概率和吞吐量分析

在功率分流技术中, 根据文献[8]的图 3(b), R 解码的源信号为:

$$y_{r,d}(k) = \sqrt{(1-\rho)P_s}h_1s(k) + \sqrt{1-\rho}n_r^a(k) + n_r^c(k) \quad (2)$$

其中 $n_r^c(k)$ 是信号从射频带向基带转换出现的噪声, $n_r^c(k) \sim N(0, \mu N_0)$, $\mu > 0$.

本文取信噪比 ψ 作为参照指标, 分析系统的中断概率。根据公式(2), 可得链路 S-R 的信噪比为:

$$\psi_{SR}^{PS} = \frac{(1-\rho)P_s|h_1|^2}{(1-\rho+\mu)N_0} = \frac{(1-\rho)P_s\omega_1}{(1-\rho+\mu)N_0} = \tau\psi\omega_1 \quad (3)$$

其中 $\psi \triangleq \frac{P_s}{N_0}$, 等效为 S 不借助中继直接向 D 传输时的信噪比; $\tau \triangleq \frac{1-\rho}{1-\rho+\mu}$ 。

根据文献[8], 车辆中继 R 收集的能量和转发信息的功率分别为: $E_r = \eta\rho P_s|h_1|^2 T/2 = \eta\rho P_s\omega_1 T/2$,

$P_r = \frac{E_r}{T/2} = \eta\rho P_s\omega_1$, 其中 η 是能量收集效率, $0 \leq \eta \leq 1$ 。

根据图 2 可知, 车辆中继 R 在剩下的 $T/2$ 时间将源信息重新编码, 并发送给车辆目的节点 D。而车辆 R 将前 $T/2$ 时间收集的能量全部用于转发信息, 不消耗自身的能量, 即传输功率 $P_r^{PS} = P_r$ 。因此仿照公式(2), 车辆 D 接收到的基带信号为:

$$y_D(k) = \sqrt{P_r^{PS}}h_2s(k) + n_D^a(k) + n_D^c(k). \quad (4)$$

其中 $n_D^a(t)$ 和 $n_D^c(k)$ 分别是链路 R-D 的加性高斯白噪声和射频信号向基带信号转换时产生的噪声, $n_D^a(t) \sim N(0, N_0)$ 、 $n_D^c(t) \sim N(0, \mu N_0)$ 。

与公式(3)类似, 链路 R-D 的信噪比 ψ_{RD}^{PS} 为: $\psi_{RD}^{PS} = \frac{P_R^{PS} |h_2|^2}{(1+\mu)N_0} = \frac{\eta\rho P_S \omega_1 \omega_2}{(1+\mu)N_0} = \iota \psi \omega_1 \omega_2$, 其中 $\iota = \frac{\eta\rho}{1+\mu}$ 。

假设系统的目标信噪比为 ψ_t , 当车辆 R 或 D 接收到的信息瞬时信噪比小于 ψ_t 时, 就会发生通信中断事件。在功率分流技术中, 具有能量收集中继的双跳车联网系统的中断概率为:

$$\begin{aligned} P_{out}^{PS} &= Pr\{\psi_{SR}^{PS} < \psi_t\} + Pr\{\psi_{SR}^{PS} \geq \psi_t, \psi_{RD}^{PS} < \psi_t\} \\ &= Pr\left\{\omega_1 < \frac{\psi_t}{\tau\psi}\right\} + Pr\left\{\omega_1 \geq \frac{\psi_t}{\tau\psi}, \omega_1\omega_2 < \frac{\psi_t}{\iota\psi}\right\} \\ &= F_{\omega_1}(\nu) + [1 - F_{\omega_1}(\nu)] \cdot Pr\{\omega_1\omega_2 < \theta\} \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\nu = \frac{\psi_t}{\tau\psi}$, $\theta = \frac{\psi_t}{\iota\psi}$, ω_1 、 ω_2 相互独立。 $Pr\{\omega_1\omega_2 < \theta\} = 1 - \lambda_2 \int_0^\infty e^{-\frac{\lambda_1\theta}{x} - \lambda_2 x} dx = 1 - \lambda_2 \sqrt{\frac{4\lambda_1\theta}{\lambda_2}} K_1(\sqrt{4\lambda_1\theta\lambda_2})$, $K_1(\cdot)$

是一阶第二类修正的贝塞尔函数。可得功率分流技术下的双跳车联网中断概率为:

$$\begin{aligned} P_{out}^{PS} &= F_{\omega_1}(\nu) + [1 - F_{\omega_1}(\nu)] \left[1 - 2\sqrt{\lambda_1\lambda_2\theta} K_1(2\sqrt{\lambda_1\lambda_2\theta})\right] \\ &= (1 - e^{-\lambda_1\nu}) + e^{-\lambda_1\nu} \left[1 - 2\sqrt{\lambda_1\lambda_2\theta} K_1(2\sqrt{\lambda_1\lambda_2\theta})\right] \end{aligned} \quad (6)$$

根据文献[8]中(27)式, 可得功率分流技术下的双跳车联网系统的吞吐量为:

$$T^{PS} = (1 - P_{out}^{PS}) R \frac{T/2}{T} = (1 - P_{out}^{PS}) \frac{R}{2} \quad (7)$$

其中 R 是车辆源信息的传输速率, $R \triangleq \log_2(1 + \psi_t)$ (bit/s/Hz)。

同理, 在时间切换技术中链路间的信噪比为: $\psi_{SR}^{TS} = \frac{P_S |h_1|^2}{(1+\mu)N_0} = \frac{\psi\omega_1}{1+\mu}$, $\psi_{RD}^{TS} = \frac{P_R^{TS} |h_2|^2}{(1+\mu)N_0} = \xi\psi\omega_1\omega_2$,

其中 $\xi \triangleq \frac{2\eta\alpha}{(1+\mu)(1-\alpha)}$ 。令 $\phi = \frac{\psi_t(1+\mu)}{\psi}$, $\varepsilon = \frac{\psi_t}{\xi\psi}$, 系统模型的中断概率为:

$$\begin{aligned} P_{out}^{TS} &= F_{\omega_1}(\phi) + [1 - F_{\omega_1}(\phi)] \cdot \left[1 - 2\sqrt{\lambda_1\lambda_2\varepsilon} K_1(2\sqrt{\lambda_1\lambda_2\varepsilon})\right] \\ &= (1 - e^{-\lambda_1\phi}) + e^{-\lambda_1\phi} \left[1 - 2\sqrt{\lambda_1\lambda_2\varepsilon} K_1(2\sqrt{\lambda_1\lambda_2\varepsilon})\right] \end{aligned} \quad (8)$$

根据文献[7]的(21)式, 可得时间切换技术下双跳车联网模型系统的吞吐量为:

$$T^{TS} = (1 - P_{out}^{TS}) R \frac{(1-\alpha)T/2}{T} = (1 - P_{out}^{TS}) \frac{R(1-\alpha)}{2} \quad (9)$$

5. 数值结果

本文将车辆 S-D 之间的距离看作 1, 车辆 R 是随机分布在 S 和 D 之间的协同中继, $d_1 = x_R$ 、 $d_2 = 1 - x_R$, 路径损耗因子 $\beta = 3$ 。前两图中 $x_R = 0.8$ 、 $\eta = 0.9$ 、 $\mu = 1$ 、 $\psi_t = 1$, 即中继距目的车辆近、能量收集效率高、下转换噪声低、目标信噪比低的通信条件。从图 4 可以看出, 功率分配比 ρ 和中断概率的关系呈现为偏 U 型曲线, 即中断概率随 ρ 值的增大, 先急速下降后平稳上升。图 5 表明: 时间分配比 α 的值越大, 中断概率越低; 当 $\alpha > 0.2$ 时, 中断概率逐渐趋于稳定值。

图 6 是时间切换技术和功率分流技术在相同参数下的系统中断概率比较图, 其中 $x_R = 0.6$ 、 $\psi = 10$ 、

$\psi_i = 1$ 。可以看出：能量收集效率 η 的值越大，中断概率越低；当下转换噪声相同时，时间分配比 α 和功率分配比 ρ 取值均为 0.5 时，应用时间分流技术的系统中断概率较低。图 7 是两种能量收集方案的系统吞吐量比较图，其中 $x_R = 0.5$ 、 $\mu = 1$ 、 $\psi = 10$ ，可以看出：当时间分配比 α 和功率分配比 ρ 的取值均为 0.6 时，应用时间分流技术的系统吞吐量整体优于应用功率分流技术的吞吐量。

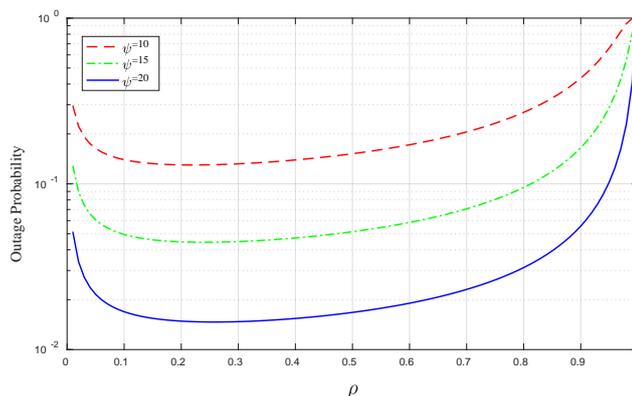


Figure 4. Interruption probability and power distribution ratio
图 4. 中断概率与功率分配比关系

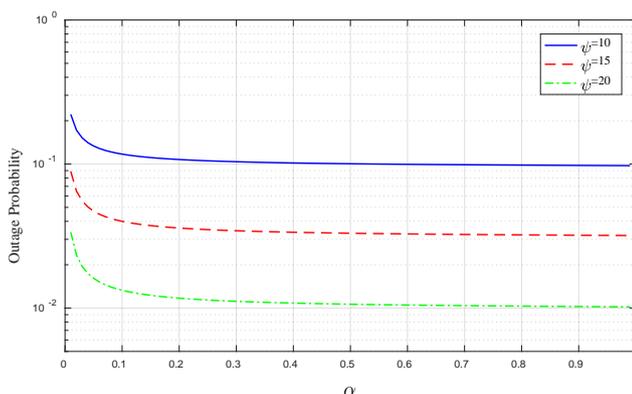


Figure 5. Interrupt probability and time allocation ratio relationship
图 5. 中断概率与时间分配比关系

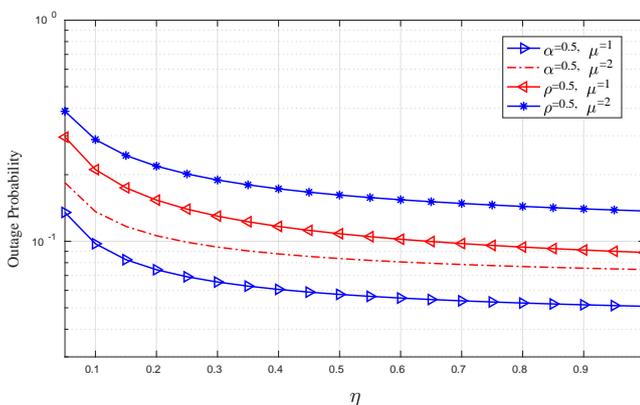


Figure 6. The relationship between interruption probability and energy collection efficiency
图 6. 中断概率与能量收集效率关系

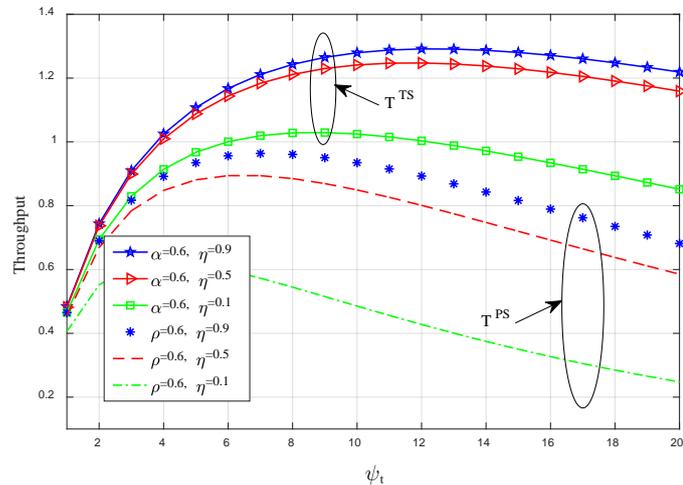


Figure 7. Throughput and target signal-to-noise ratio relationship
图 7. 吞吐量与目标信噪比关系

6. 结束语

中断概率是反映通信系统稳定性的指标, 中断概率的值越小, 系统性能越好。吞吐量是单位时间内, 成功传输的数据包个数。通信系统的吞吐量越大, 其性能越好。本文首先描述了具有能量收集中继的车联网模型, 以及功率分流和时间切换技术的原理。然后以信噪比作为参考指标, 对中断概率和吞吐量进行了分析。最后通过数值模拟得出 ρ 、 α 、 η 对中断概率的影响以及 ψ_t 对吞吐量的影响。在对两种能量收集方案的比较中, 发现采用时间分流技术的系统性能较优。

基金项目

国家自然科学基金项目资助(61663024)。

参考文献

- [1] Li, S.P., Zou, X.W. and Yan, L.F. (2015) Power Allocation Scheme for Channel Capacity Maximization in Multi-Relay Amplify-and-Forward Cooperative System. *Journal of Information and Computational Science*, **12**, 1365-1372. <https://doi.org/10.12733/jics20105383>
- [2] Zhou, Z., Peng, M., Zhao, Z., et al. (2015) Joint Power Splitting and Antenna Selection in Energy Harvesting Relay Channels. *IEEE Signal Process Letters*, **22**, 823-827. <https://doi.org/10.1109/LSP.2014.2369748>
- [3] Ding, Z., Perlaza, S., Esnaola, I., et al. (2014) Power Allocation Strategies in Energy Harvesting Wireless Cooperative Networks. *IEEE Transaction Wireless Communications*, **13**, 846-860. <https://doi.org/10.1109/TWC.2013.010213.130484>
- [4] Son, P.N. and Kong, H.Y. (2015) Exact Outage Analysis of Energy Harvesting Underlay Cooperative Cognitive Networks. *IEICE Transactions on Communications*, **E98-B**, 661-672. <https://doi.org/10.1587/transcom.E98.B.661>
- [5] Liu, Y., Wang, L., Elkashlan, M., et al. (2014) Tow-Way Relaying Networks with Wireless Power Transfer: Policies Design and Throughput Analysis. *Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference*, Austin, 4030-4035.
- [6] Nguyen, D.K., Matthaiou, M., Duong, T.Q., et al. (2015) RF Energy Harvesting Two-Way Cognitive DF Relaying with Transceiver Impairments. *Proceedings of IEEE International Communications Conference*, London, 1970-1197.
- [7] Nguyen, S.Q. and Kong, H.Y. (2016) Generalized Diversity Combining of Energy Harvesting Multiple Antenna Relay Networks: Outage and Throughput Performance Analysis. *Annals of Telecommunications*, **71**, 265-277. <https://doi.org/10.1007/s12243-016-0508-9>
- [8] Nasir, A.A., Zhou, X.Y., Durrani, S., et al. (2013) Relaying Protocols for Wireless Energy Harvesting and Information Processing. *IEEE Transaction on Wireless Communications*, **12**, 3622-3636. <https://doi.org/10.1109/TWC.2013.062413.122042>

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2161-8801，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：csa@hanspub.org