

铁路物联网中无线携能中继网络性能分析

李亚平¹, 熊轲¹, 张煜², 杨玺³

(1. 北京交通大学计算机与信息技术学院, 北京 100044;

2. 国网能源研究院有限公司, 北京 102209;

3. 北京物资学院, 北京 101149)

摘要: 面向铁路物联网场景研究了能量受限的两跳多中继网络的系统性能。源节点部署在列车上, 向地面上能量受限的中继节点传输能量和信息, 中继节点利用收集的能量向目的节点转发信息, 中继节点采用半双工放大转发模式。在考虑中继电路具有能量激活门限的情况下, 推导出在莱斯衰落信道下系统中断概率和吞吐量的闭合表达式。通过蒙特卡洛仿真验证了理论分析的正确性, 对比分析了第一跳距离最短和两跳距离之和最短的两种中继选择策略下, 莱斯因子、时间分割因子、源节点天线数量、源节点总发射功率、能量转化效率、各节点相对位置对系统端到端中断概率和吞吐量的影响。当列车先后经过各个中继时, 系统的中断概率先减小后增大, 吞吐量先增大后减小, 并且选择两跳距离之和最短时的系统性能优于选择第一跳距离最短时的系统性能。

关键词: 能量收集; 中断概率; 莱斯衰落信道; 电路能量门限值; 中继选择; 放大转发

中图分类号: TP212.9

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2020.00193

Performance analysis of simultaneous wireless information and power transfer relay network in railway Internet of things

LI Yaping¹, XIONG Ke¹, ZHANG Yu², YANG Xi³

1. School of Computer and Information Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

2. State Grid Energy Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China

3. Beijing Wuzi University, Beijing 101149, China

Abstract: The system performance of energy constrained dual-hop multi relay network was studied in railway Internet of things. The source node was deployed on the train to transmit energy and information to the relay node with constrained energy on the ground. The harvested energy was used by the relay node to forward information to the destination node, and the relay node used half-duplex amplify-and-forward mode. Considering that the relay circuit has energy activation threshold, the closed-form expression of outage probability and throughput in Rician fading channel was derived. The correctness of the theoretical analysis was verified by Monte Carlo simulation, and the effects of Rician factor, time switching factor, the number of source node antennas, total transmission power of source node, energy conversion efficiency, relative position of each node on the end-to-end outage probability and throughput were compared and analyzed under the two relay selection strategies with the shortest first hop distance and the shortest sum of dual-hop distance. When the train passes through each relay successively, the outage probability of the system decreases first and then in-

收稿日期: 2020-05-18; 修回日期: 2020-08-06

通信作者: 杨玺, yangxi@bwu.edu.cn

基金项目: 中央高校基本科研业务费资助项目 (No.2020JBZD010); 国网能源研究院有限公司科技项目 (No.SGNY202009014); 北京市智能物流系统协同创新中心项目 (No.BILSCIC-2019KF-07)

Foundation Items: The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.2020JBZD010), The Self-Developed Project of State Grid Energy Research Institute Co., Ltd. (No.SGNY202009014), The Beijing Intelligent Logistics System Collaborative Innovation Center Project (No.BILSCIC-2019KF-07)

creases, and the throughput increases first and then decreases. The performance of the system with the shortest sum of dual-hop distances is better than that with the shortest first hop distance.

Key words: energy harvesting, outage probability, Rician fading channel, circuit energy threshold, relay selection, amplify-and-forward

1 引言

传统的物联网设备大多采用电池供电，未来越来越多的无线设备需要部署在复杂环境中，电池更换困难、人为管理成本高的问题将日益凸显^[1]。无线携能通信利用无线射频信号在传输信息的同时为设备充电，可以为设备提供稳定的电源，设备不需要再频繁更换电池，因此得到了广泛研究。另一方面，受信道衰落的影响，无线信号传输距离越大，传输可靠性越低。协作中继可以扩大网络覆盖范围，对抗信道衰落，是提高传输可靠性和服务质量的重要无线传输技术之一^[2]，融合无线携能通信和协作中继技术可有效解决无线网络中节点能量受限和信息长距离传输的问题。

在多中继网络中，中继的选择会直接影响系统性能，因此，中继选择策略至关重要。文献[3]在两跳多中继网络中，基于机会中继和选择合作两种中继选择策略分析了系统性能。文献[4]从可以正确解码的中继中选择信噪比最大的中继转发信息。文献[5]提出了一种改进的协同中继选择算法，选择一个最优中继转发信息。

系统中断概率是衡量无线网络性能的重要指标之一^[6-8]。因此，现有工作对不同场景下无线携能通信网络的中断概率进行了分析。文献[9]分析了瑞利衰落信道下的无线携能通信网络的中断性能。文献[10]在瑞利衰落信道下研究了基于功率分割接收结构的无线携能通信放大转发中继网络的中断概率，考虑了直连链路的影响。文献[11]在 Nakagami- m 衰落信道下分析了混合能量收集策略的无线携能通信的中断性能。文献[12]分析了 Nakagami- m 衰落信道下两跳放大转发无线携能通信中继网络的中断性能。

随着铁路物联网的部署不断加快，解决网络电源管理和通信可靠性的问题日益迫切。因此，可以考虑将能量充足的源节点部署在列车上，利用列车的移动性为沿途能量受限的节点提供能量并传输信息，节点可以利用收集的能量协助源节点向目的节点传输信息。

与现有的采用瑞利衰落和 Nakagami- m 衰落的

工作不同，本文关注的是铁路物联网场景，在信号传输过程中存在明显的直射路径，因此，采用莱斯衰落模型刻画信道更准确。虽然 Nakagami- m 衰落信道通过改变 m 的取值可以近似为莱斯衰落信道，但在具有明显直射路径的环境中，Nakagami- m 衰落会引起较大的偏差。因此，本文在莱斯衰落环境下研究无线携能中继网络中断和吞吐量性能。考虑距离因素对系统性能的影响较大，因此，对比分析了两种基于距离的中继选择策略对系统性能的影响。第一种中继选择策略是选择第一跳距离最短的中继转发信息，第二种中继选择策略是选择两跳距离之和最短的中继转发信息。另外，现有的研究大多采用了理想假设，认为无论中继节点收集了多少能量都可以进行信息传输。而实际上，当中继节点收集的能量不能达到激活门限时，系统不启动信息传输，此时也会产生中断。

本文考虑中继电路门限值的影响，基于概率的方式求出了中继能量受限的概率，推导出两跳多中继放大转发网络在莱斯衰落信道下的中断概率和吞吐量的闭合表达式，采用蒙特卡洛仿真验证了理论分析的正确性。

2 网络系统模型

铁路物联网场景下的两跳多中继网络模型如图 1 所示，网络由一个部署在列车上能量充足的源节点 S 、 n 个能量受限的中继节点 $R_i(1 < i < n)$ 和一个有固定电源的目的节点 D 组成，其中， S 配备多根天线， R_i 和 D 均为单天线设备。假设从源节点到目的节点不存在直射路径，源节点只能通过中继 R_i 转发信息到目的节点，该系统根据两种基于距离的中继选择策略，从多个中继中选择一个中继进行能量和信息传输，选定的中继节点 R_i 采用半双工放大转发模式工作。

能量和信息传输过程如图 2 所示，将整个传输过程分为 3 个阶段，第一阶段为 R_i 从 S 处收集能量，第二阶段为 R_i 从 S 处接收信息，第三阶段为 D 从 R_i 处接收信息，其对应的时间分别为 ρT 、 $\frac{(1-\rho)T}{2}$ 和 $\frac{(1-\rho)T}{2}$ 。其中， ρ 为时间分割因子， T 为一个传输周期。

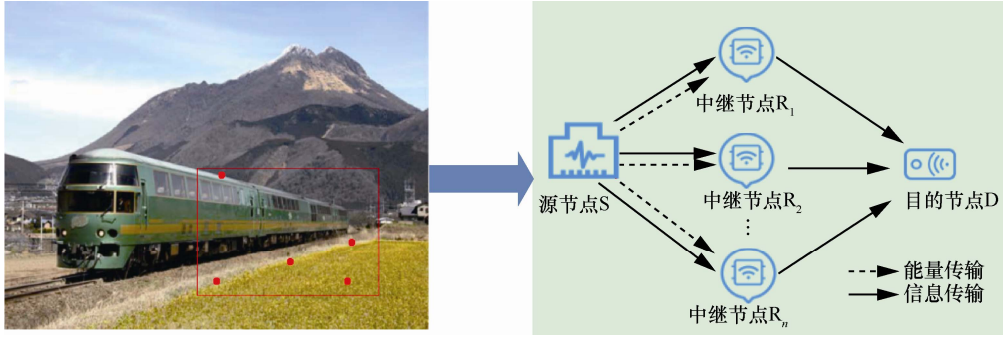


图1 铁路物联网场景下的两跳多中继网络模型

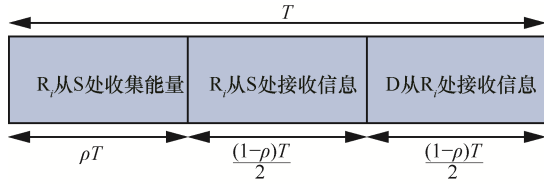


图2 能量和信息传输过程

当列车运行时，S的位置处于动态变化中，而中继节点 R_i 的位置不变，则从S到 R_i 的距离 d_{SR_i} 会随着S位置的改变而动态变化，但每个传输周期的时间很短，在一个传输周期内假设S相对于 R_i 是静止的，即从S到 R_i 的距离 d_{SR_i} 保持不变。假设每跳信道是准静态、独立、同分布的莱斯衰落信道。

3 系统建模

在第一阶段即收集能量阶段， R_i 从S处收集的能 E_i 为

$$E_i = \eta \sum_{j=1}^{N_s} |h_{S,R_i}|^2 P_s \rho T d_{SR_i}^{-m} \quad (1)$$

其中， $\eta(0 < \eta < 1)$ 为能量转换效率， N_s 为S配备的天线数量， $P_s = \frac{P_{\text{sum}}}{N_s}$ 为S的每根天线的发射功率， P_{sum} 为S的发射总功率， h_{S,R_i} 为从S到 R_i 链路的信道系数， d_{SR_i} 为从S到 R_i 的距离， m 为路径损耗指数。

第二和第三阶段均为信息传输阶段，在第二阶段 $\frac{(1-\rho)T}{2}$ 时间内， R_i 从S处接收信息，在第三阶段 $\frac{(1-\rho)T}{2}$ 时间内，D从 R_i 处接收信息。令 $\varphi = \frac{2\eta\rho}{1-\rho}$ ，根据式(1)可得中继节点 R_i 的发射功率 P_{R_i} 为

$$P_{R_i} = \frac{2E_i}{(1-\rho)T} = \varphi \sum_{j=1}^{N_s} P_s |h_{S,R_i}|^2 d_{SR_i}^{-m} \quad (2)$$

中继 R_i 接收的信号 y_{R_i} 可描述为

$$y_{R_i} = \sum_{j=1}^{N_s} h_{S,R_i} x_s \sqrt{d_{SR_i}^{-m}} + n_{R_i} \quad (3)$$

其中， x_s 代表S的每根天线的发射信号且满足 $E[x_s^2] = P_s$ ， n_{R_i} 表示 R_i 处均值为0、方差为 N_0 的加性高斯白噪声。

中继节点 R_i 采用放大转发的方式转发接收的信号，即中继节点 R_i 发射的信号为接收的信号乘以放大系数，根据式(3)可将中继节点 R_i 发射信号 x_{R_i} 表示为

$$x_{R_i} = \Lambda y_{R_i} = \Lambda \left(\sum_{j=1}^{N_s} h_{S,R_i} x_s \sqrt{d_{SR_i}^{-m}} + n_{R_i} \right) \quad (4)$$

其中， Λ 为放大系数，由式(2)和式(3)可计算中继的放大系数 Λ 为

$$\Lambda = \sqrt{\frac{P_{R_i}}{y_{R_i}^2}} = \sqrt{\frac{\varphi \sum_{j=1}^{N_s} P_s |h_{S,R_i}|^2 d_{SR_i}^{-m}}{\sum_{j=1}^{N_s} |h_{S,R_i}|^2 P_s d_{SR_i}^{-m} + N_0}} \quad (5)$$

根据式(4)可计算D处接收的信号为

$$y_D = h_{R_i,D} x_{R_i} \sqrt{d_{R_i,D}^{-m}} + n_D = \Lambda h_{R_i,D} \sum_{j=1}^{N_s} h_{S,R_i} x_s \sqrt{d_{SR_i}^{-m}} \sqrt{d_{R_i,D}^{-m}} + \Lambda h_{R_i,D} n_{R_i} \sqrt{d_{R_i,D}^{-m}} + n_D \quad (6)$$

其中， n_D 是D处均值为0、方差为 N_0 的加性高斯白噪声， $\Lambda h_{R_i,D} n_{R_i} \sqrt{d_{R_i,D}^{-m}} + n_D$ 表示噪声，其余部分表示有效信号。根据式(6)可计算系统端到端信噪比为

$$\text{SNR} = \frac{A^2 |h_{R,D}|^2 \sum_{j=1}^{N_s} |h_{S,R_i}|^2 P_S d_{SR_i}^{-m} d_{R_i,D}^{-m}}{A^2 |h_{R,D}|^2 d_{R_i,D}^{-m} N_0 + N_0} = \frac{|h_{R,D}|^2 \sum_{j=1}^{N_s} |h_{S,R_i}|^2 P_S d_{SR_i}^{-m} d_{R_i,D}^{-m}}{|h_{R,D}|^2 d_{R_i,D}^{-m} N_0 + \frac{N_0 \left(\sum_{j=1}^{N_s} |h_{S,R_i}|^2 P_S d_{SR_i}^{-m} + N_0 \right)}{P_{R_i}}} \quad (7)$$

由于在实际中, 噪声功率 N_0 与中继节点 R_i 的发射功率 P_{R_i} 满足 $N_0 \ll P_{R_i}$ [13], 因此, 可忽略式(7)

分母中 $\frac{N_0 \left(\sum_{j=1}^{N_s} |h_{S,R_i}|^2 P_S d_{SR_i}^{-m} + N_0 \right)}{P_{R_i}}$ 括号中的 N_0 , 则式(7)系统端到端信噪比可近似表示为

$$\text{SNR} = \frac{|h_{R,D}|^2 \sum_{j=1}^{N_s} |h_{S,R_i}|^2 P_S d_{SR_i}^{-m} d_{R_i,D}^{-m}}{|h_{R,D}|^2 d_{R_i,D}^{-m} N_0 + \frac{N_0 \sum_{j=1}^{N_s} |h_{S,R_i}|^2 P_S d_{SR_i}^{-m}}{P_{R_i}}} = \frac{\varphi |h_{R,D}|^2 \sum_{j=1}^{N_s} |h_{S,R_i}|^2 P_S d_{SR_i}^{-m} \frac{d_{R_i,D}^{-m}}{N_0}}{\varphi |h_{R,D}|^2 d_{R_i,D}^{-m} + 1} \quad (8)$$

令 $X = |h_{R,D}|^2$, $Y = \sum_{j=1}^{N_s} |h_{S,R_i}|^2$, $\gamma_0 = \frac{P_S}{N_0}$ 为源节点每根天线发射功率与噪声功率的比值, 则式(8)可重新表示为

$$\text{SNR} = \frac{\varphi \gamma_0 X Y d_{S,R_i}^{-m} d_{R_i,D}^{-m}}{\varphi X d_{R_i,D}^{-m} + 1} \quad (9)$$

4 系统性能分析

4.1 莱斯累积分布函数和概率密度函数

1) 莱斯衰落信道累积分布函数

由参考文献[14]可得, $Y = \sum_{j=1}^{N_s} |h_{S,R_i}|^2$ 的累积分布函数为

$$F(x) = 1 - \sum_{f=0}^{C_1} \sum_{g=0}^{f+N_s-1} \frac{(N_s K)^f \left((1+K) \frac{x}{\lambda} \right)^g}{f! g! \exp \left(N_s K + \frac{(1+K)x}{\lambda} \right)} \quad (10)$$

其中, N_s 为源端天线数量, K 为莱斯因子, λ 为随机变量 x 的均值, C_1 理论取值为无穷大。

2) 莱斯衰落信道概率密度函数

由参考文献[15]可得, $X = |h_{R,D}|^2$ 的概率密度函数为

$$f(x) = a \sum_{l=0}^{C_2} \frac{(bK)^l x^l e^{-bx}}{(l!)^2} \quad (11)$$

令 $a \triangleq \frac{(1+K)e^{-K}}{\lambda}$, $b \triangleq \frac{(1+K)}{\lambda}$, C_2 理论取值为无穷大。

4.2 系统中断概率和吞吐量

当 R_i 收集的能量 E_i 小于电路门限值时, 中继无法工作, 此时系统发生中断。当 E_i 大于电路门限值时, 中继正常工作, 但受衰落影响, 信息速率也会小于需求阈值, 从而产生中断。综上所述, 系统的中断概率可描述为

$$P_{\text{out}} = P_{\text{lack}} + P_{\text{enough}} \times P_{\text{linkout}} \quad (12)$$

其中, P_{lack} 表示 R_i 收集的能量 E_i 小于电路门限值的概率, 即中继能量受限的概率。 P_{enough} 表示 E_i 大于电路门限值的概率, 即中继能量够用的概率, P_{linkout} 表示系统链路中断的概率。

假设系统最低所需的传输速率为 R_0 , 根据香农公式可得系统端到端信噪比阈值为 $\gamma_{\text{th}} = 2^{2R_0/(1-\rho)} - 1$ 。

由式(9)可得系统链路中断的概率为

$$P_{\text{linkout}} = P(\text{SNR} < \gamma_{\text{th}}) = P \left(Y < \frac{\gamma_{\text{th}}}{\gamma_0} \left(\frac{1}{d_{SR_i}^{-m}} + \frac{1}{\varphi X d_{SR_i}^{-m} d_{R_i,D}^{-m}} \right) \right) = \int_0^{\infty} F_Y \left(\frac{\gamma_{\text{th}}}{\gamma_0} \left(\frac{1}{d_{SR_i}^{-m}} + \frac{1}{\varphi X d_{SR_i}^{-m} d_{R_i,D}^{-m}} \right) \right) f_X(x) dx \quad (13)$$

由式(1)和式(10)可计算中继节点 R_i 能量受限的概率 P_{lack} 为

$$P_{\text{lack}} = (E_i < E_Q) = P_r \left\{ \sum_{j=1}^{N_s} |h_{S,R_i}|^2 < \frac{E_Q}{\eta P_S \rho T d_{SR_i}^{-m}} \right\} = 1 - \sum_{f=0}^{C_1} \sum_{g=0}^{f+N_s-1} \frac{(N_s K_{SR_i})^f D^g}{f! g! e^{N_s K_{SR_i} + D}} \quad (14)$$

其中, E_Q 表示中继电路的能量门限值, $D = \frac{(1+K_{SR_i})E_Q}{\lambda_{SR_i} \eta P_S \rho T d_{SR_i}^{-m}}$ 。根据式(14)可计算中继能量够

用的概率为

$$P_{\text{enough}} = 1 - P_{\text{lack}} = \sum_{f=0}^{C_1} \sum_{g=0}^{f+N_s-1} \frac{(N_s K_{\text{SR}_i})^f D^g}{f! g! e^{N_s K_{\text{SR}_i} + D}} \quad (15)$$

结合 $\int_0^\infty x^{\nu-1} e^{-\beta-\gamma x} dx = 2 \left(\frac{\beta}{\gamma} \right)^{\frac{\nu}{2}} K_\nu (2\sqrt{\beta\gamma})$ [16], 将

系统链路中断的概率式(13)、中继能量受限的概率式(14)和中继能量够用的概率式(15)代入系统中断概率式(12)中, 可计算出系统的中断概率式(16)。其中, $K_\nu(\cdot)$ 为第二类 ν 阶修正贝塞尔函数, $Z = \frac{(1 + K_{\text{SR}_i}) \gamma_{\text{th}}}{\lambda_{\text{SR}_i} \gamma_0}$ 。在式(16)的基础上, 可进一步计算系统的吞吐量为式(17)。

$$P_{\text{out}} = 1 - \frac{2a}{e^{N_s K_{\text{SR}_i} + \frac{Z}{d_{\text{SR}_i}^m}}} \times \left(\sum_{f=0}^{C_1} \sum_{g=0}^{f+N_s-1} \frac{(N_s K_{\text{SR}_i})^f D^g}{f! g! e^{N_s K_{\text{SR}_i} + D}} \right) \cdot \sum_{f=0}^{C_1} \sum_{g=0}^{f+N_s-1} \sum_{q=0}^g \sum_{l=0}^{C_2} \frac{(N_s K_{\text{SR}_i})^f Z^g (b K_{\text{R,D}})^l}{q! f! (g-q)! (l!)^2 \varphi^q (d_{\text{SR}_i}^{-m})^g (d_{\text{R,D}}^{-m})^q} \cdot (16)$$

$$\left(\frac{Z}{\varphi b d_{\text{SR}_i}^{-m} d_{\text{R,D}}^{-m}} \right)^{\frac{l-q+1}{2}} K_{l-q+1} \left(2 \sqrt{\frac{Zb}{\varphi d_{\text{SR}_i}^{-m} d_{\text{R,D}}^{-m}}} \right)$$

$$\text{TH} = R_0 (1 - P_{\text{out}}) (1 - \rho) / 2 =$$

$$\frac{a R_0 (1 - \rho)}{e^{N_s K_{\text{SR}_i} + \frac{Z}{d_{\text{SR}_i}^m}}} \times \left(\sum_{f=0}^{C_1} \sum_{g=0}^{f+N_s-1} \frac{(N_s K_{\text{SR}_i})^f D^g}{f! g! e^{N_s K_{\text{SR}_i} + D}} \right) \cdot \sum_{f=0}^{C_1} \sum_{g=0}^{f+N_s-1} \sum_{q=0}^g \sum_{l=0}^{C_2} \frac{(N_s K_{\text{SR}_i})^f Z^g (b K_{\text{R,D}})^l}{q! f! (g-q)! (l!)^2 \varphi^q (d_{\text{SR}_i}^{-m})^g (d_{\text{R,D}}^{-m})^q} \cdot \left(\frac{Z}{\varphi b d_{\text{SR}_i}^{-m} d_{\text{R,D}}^{-m}} \right)^{\frac{l-q+1}{2}} K_{l-q+1} \left(2 \sqrt{\frac{Zb}{\varphi d_{\text{SR}_i}^{-m} d_{\text{R,D}}^{-m}}} \right) \quad (17)$$

5 仿真实验结果

本节采用蒙特卡洛仿真验证推导出系统中断概率闭合表达式的正确性, 仿真参数如表 1 所示, $K_{\text{SR}_i} = K_{\text{R,D}} = 3$ 此处统一表示为 K , $\lambda_{\text{SR}_i} = \lambda_{\text{R,D}} = 1$ 此处统一表示为 λ 。 C_1 为外循环次数, C_2 为内循环次数, 系统中断概率随循环次数变化情况如图 3 所示, 从图 3 可以看出, 当外循环次数大于 20 且

内循环次数大于 10 时, 系统中断概率不再发生变化。因此, C_1 和 C_2 取一个较大值, 分别为 35 和 30。

在仿真实验中, 分别研究了两种中继选择策略下的系统性能。为了方便描述实验结果, 令 $d_1 = d_{\text{SR}_i}$, $d_2 = d_{\text{R,D}}$, 系统中断概率在不同莱斯因子下随时间分割因子变化情况如图 4 所示。图 4(a) 为选择两跳距离之和最短的中继 ($d_1 = d_2 = 5\text{m}$), 图 4(b) 为选择第一跳距离最短的中继 ($d_1 = 4\text{m}$, $d_2 = 7\text{m}$)。在图 4 的图例中, Ana 表示理论推导的数值结果, Sim 表示蒙特卡洛仿真结果。仿真图中数值结果与仿真结果匹配很好, 证明了理论分析的正确性。

表 1 仿真参数

参数	意义	默认取值
η	能量转化效率	0.6
λ	信道增益的均值	1
m	路径损耗系数	2
ρ	时间分割因子	0.4
P_{sum}	源节点总发射功率之比 P_b / N_0	30 dBm
K	莱斯因子	3
E_Q	中继电路能量门限值	$5 \times 10^{-5} \text{ J}$
N_s	源节点的天线数量	2
N_0	噪声功率	-25 dBm
R_0	系统最低传输速率	1 bit/s

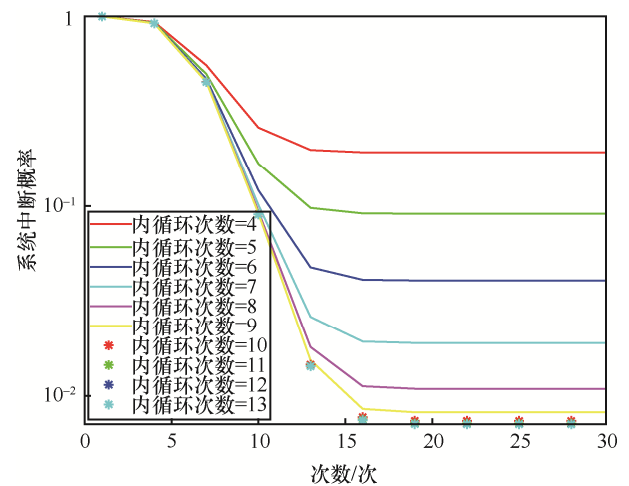


图 3 系统中断概率随循环次数变化情况

图 4(a)和图 4(b)中的横轴表示时间分割因子, 纵轴表示系统中断概率。由图 4 可以得出以下结论。1) 随着时间分割因子的增加, 系统的中断概率先减小后增大。当时间分割因子为 0.4 左右时, 系统的中断概率最低。因为当时间分割因子较小时, 即源

节点向中继传递能量的时间较短，则中继收集的能量未达到电路能量门限值的概率也就越大，所以发生中断的概率也就越大。当增大时间分割因子时，中继就有足够的时间收集能量用来传送信息，因此系统中断概率变小。但是，随着时间分割因子逐渐变大，源节点向中继传递能量的时间较长，而源节点和中继没有足够的时间传送数据，所以系统中断概率又会升高，因此，当增大时间分割因子时，系统中断概率会先减小后增大。2) 随着莱斯因子的增大，系统的中断概率减小。莱斯因子越大，代表系统中直射信号越多，中继的发射功率越大，系统的中断概率也就越小。3) 选择两跳距离之和最短的中继节点传输信息时，系统的中断概率略小于选择第一跳距离最短时的中断概率。

系统吞吐量在不同天线数量下随源节点总发射功率变化情况如图 5 所示，图 5(a)和图 5(b)中的横轴 P_{sum} 表示源节点总发射功率，纵轴表示系统吞吐量。由图 5 可以得出以下结论。1) 当固定源节点天线数量时，增大源节点总发射功率的值，系统的吞吐量也随之增加，最终趋于稳定。因为源节点总发射功率较大时，系统中断概率较小，此时时间分割因子是不变的，因此系统中断概率对吞吐量的影响很小，所以系统吞吐量的值最终趋于稳定。2) 当固定源节点总发射功率时，增加源节点天线数量，系统吞吐量不断增加最终趋于稳定。源节点天线数量越多，系统的信道增益也就越大，发生中断的可能性也就越小。3) 选择两跳距离之和最短时的系统吞吐量要略高于选择第一跳距离最短时的系统吞吐量。

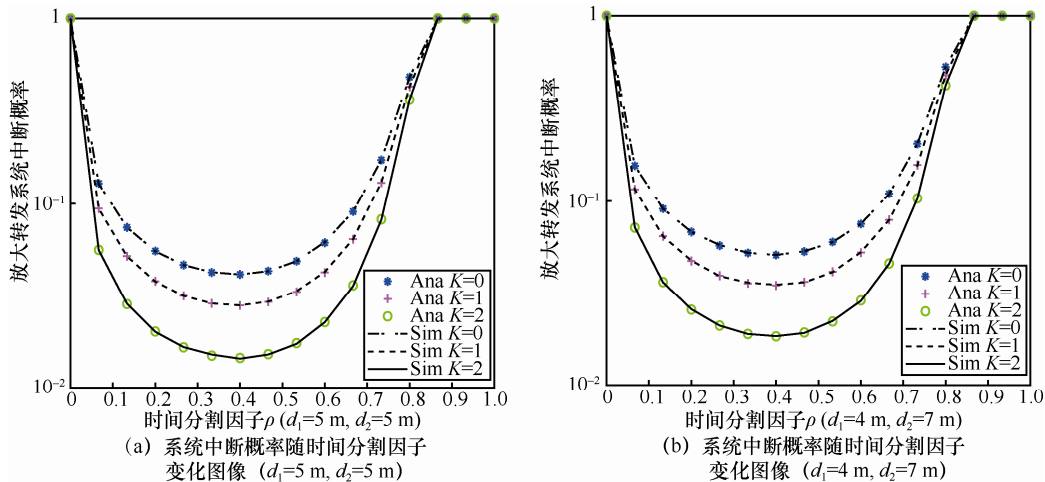


图 4 系统中断概率在不同莱斯因子下随时间分割因子变化情况

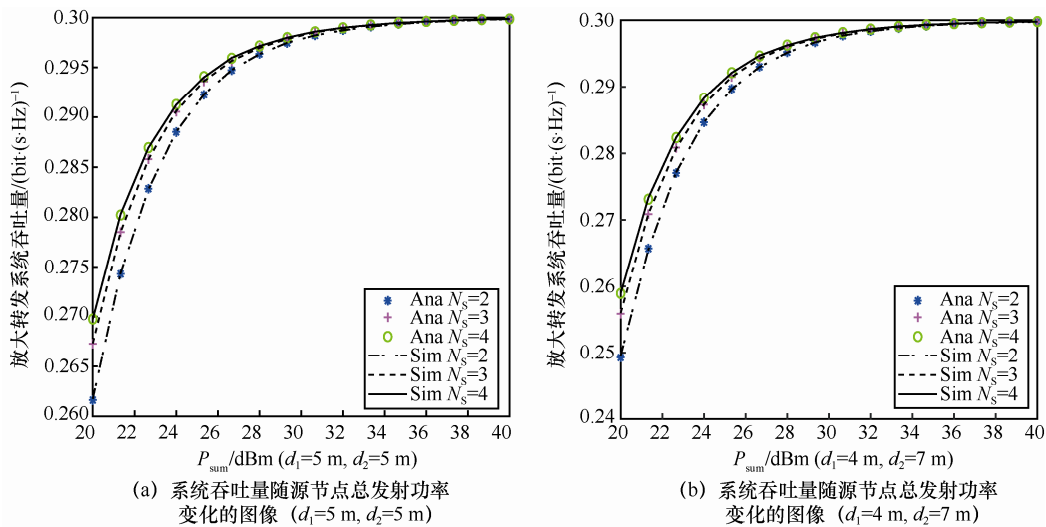


图 5 系统吞吐量在不同天线数量下随源节点总发射功率变化情况

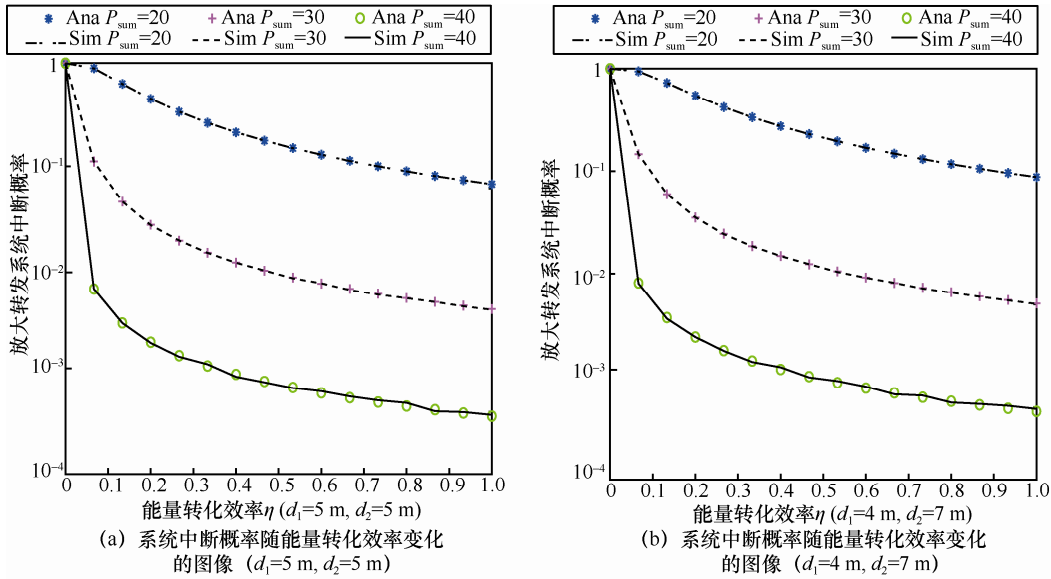


图6 系统中断概率在不同发射功率下随能量转化效率变化情况

系统中断概率在不同发射功率下随能量转化效率变化情况如图6所示。图6(a)和图6(b)的横轴表示能量转化效率，纵轴表示系统中断概率。由图6可以得出以下结论。1) 当固定源节点总发射功率时，增加能量转化效率，系统中断概率逐渐减少。因为能量转化效率越大，中继收集的能量也就越充足，所以系统中断概率也就越小。2) 当固定能量转化效率时，增加源节点总发射功率，系统中断概率也会随之减小。3) 选择两跳距离之和最短时的系统中断性能要略优于选择第一跳距离最短时的系统中断性能。

下面仿真列车移动情况下系统性能的变化情况。随着列车的移动，源节点和中继节点的距离也会发生变化。假设网络中有一个部署在列车上的源节点、3个中继节点和一个目的节点，列车位置动态变化模型如图7所示，仿真中各节点坐标如表2所示， R_{ix} 和 R_{iy} ($1 \leq i \leq 3$) 分别表示不同中继的横、纵坐标， D_x 和 D_y 分别表示目的节点的横、纵坐标。列车从坐标轴(0,0)的位置开始沿x轴移动，在列车移动过程中，源节点S和中继节点 R_i 的距离也随之变化，因此选择不同中继节点 R_i 转发信息的系统性能也不同，考虑两种基于距离的中继选择策略，一是根据列车的位置选择离列车最近的中继节点转发信息，若第一跳距离相等则选择第二跳距离最短的中继。二是根据列车的位置选择两跳距离之和最短的中继节点。

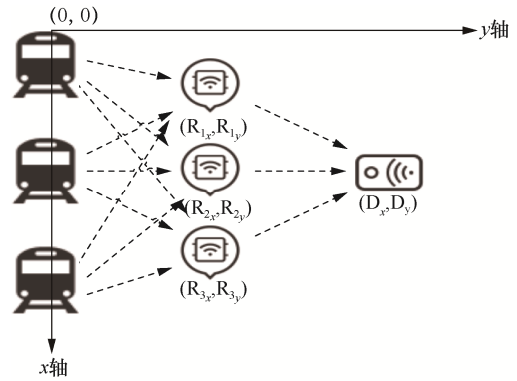


图7 列车位置动态变化模型

表2 各节点坐标

节点	坐标
源节点	(0,0) ~ (12,0)
(R_{1x}, R_{1y})	(3,4)
(R_{2x}, R_{2y})	(6,4)
(R_{3x}, R_{3y})	(9,4)
(D_x, D_y)	(6,8)

系统中断概率随列车位置变化情况如图8所示，系统吞吐量随列车位置变化情况如图9所示。从图8和图9可得出以下结论。1) 选择两跳距离之和最短的系统性能优于选择第一跳距离最短时的系统性能。2) 当列车从坐标(0,0)移动到(12,0)的过程中，系统的中断概率先减小后增大，系统吞吐量先增大后

减小。因为列车在位置(6,0)时, 列车离中继节点最近, 中继离目的节点也最近, 此时的中断概率也最低、吞吐量最高。

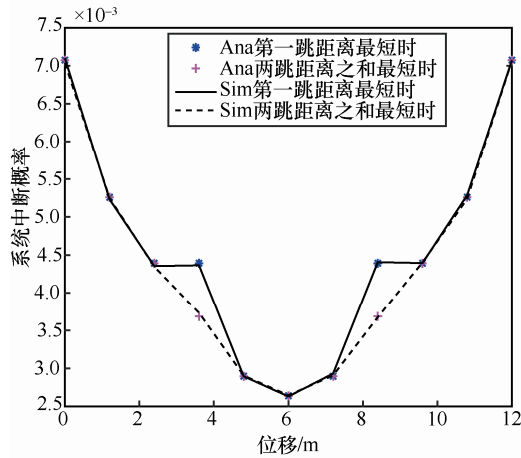


图8 系统中断概率随列车位置变化情况

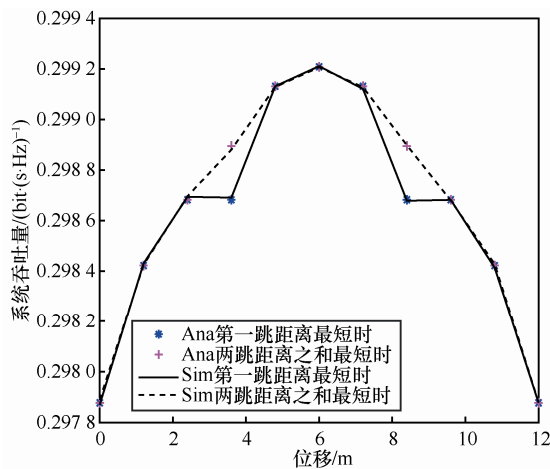


图9 系统吞吐量随列车位置变化情况

6 结束语

本文研究了莱斯衰落信道下两跳多中继半双工放大转发网络, 考虑中继电路门限值的影响, 对比分析了两种中继选择策略的系统性能, 推导出系统中断概率和吞吐量的闭合表达式, 并利用蒙特卡洛仿真验证了理论分析的正确性。研究结果表明: 1) 随着时间分割因子的增大, 系统中断概率先减小后增大; 2) 莱斯因子越大, 系统中断概率越小; 3) 源端发射总功率越大, 系统的吞吐量越大; 4) 当源节点天线数量越多时, 系统吞吐量越大; 5) 当列车先后经过各个中继时, 系统的中断概率先减小后增大, 吞吐量先增大后减小; 6) 选择两跳距离之和最短时的系统性能要优于选择第一

跳距离最短时的系统性能。

参考文献:

- [1] 陈娇. 无线携能通信系统中基于中继协作的传输方案研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019.
CHEN J. Research on transmission scheme based on relay cooperation in wireless energy carrying communication system[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [2] 蔡蓉琰. 协作通信中射频能量收集技术的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
CAI R T. Research on RF energy collection technology in cooperative communication[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [3] JU M, HWANG K S. Outage equivalence of opportunistic relaying and selection cooperation in presence of Co-channel interference[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(6): 2981-2991.
- [4] 刘语乔, 房瑾, 覃杨森. 一种中继选择机制的中断概率分析[J]. 中国科技信息, 2015(19): 21-23.
LIU Y Q, FANG J, QIN Y S. Outage probability analysis of a relay selection mechanism[J]. China Science and Technology Information, 2015(19): 21-23.
- [5] 闻鹏举, 易辉跃, 赵晓群, 等. 一种改进的协同中继节点选择算法[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(12): 3816-3818.
WEN P J, YI H Y, ZHAO X Q, et al. Improved algorithm of cooperative relay nodes selection[J]. Application Research of Computers, 2008, 25(12): 3816-3818.
- [6] DANG S P, CHEN G J, COON J P. Outage performance analysis of full-duplex relay-assisted device-to-device systems in uplink cellular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(5): 4506-4510.
- [7] XIA B, WANG J L, XIAO K X, et al. Outage performance analysis for the advanced SIC receiver in wireless NOMA systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(7): 6711-6715.
- [8] DJORDJEVIC G T, KANSANEN K, CVETKOVIC A M. Outage performance of decode-and-forward cooperative networks over Nakagami-m fading with node blockage[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(9): 5848-5860.
- [9] PAN G F, LEI H J, DENG Y S, et al. On secrecy outage of MISO SWIPT systems in the presence of imperfect CSI[C]//2016 24th European Signal Processing Conference (EUSIPCO). IEEE, 2016: 818-822.
- [10] LEE H, SONG C, CHOI S H, et al. Outage probability analysis and power splitter designs for SWIPT relaying systems with direct link[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(3): 648-651.
- [11] MALEKI M, HOSEINI A M D, MASJEDI M. Performance analysis of SWIPT relay systems over Nakagami-m fading channels with non-linear energy harvester and hybrid protocol[C]//Electrical Engineering. 2018: 610-615.
- [12] FENG Y Z, LEUNG V C M, JI F. Performance study for SWIPT cooperative communication systems in shadowed Nakagami fading channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018,

17(2): 1199-1211.

- [13] NGUYEN T N, VOZNAK M, QUANG M T H, et al. Outage probability analysis of power splitting power-beacon assisted energy harvesting relay wireless communication networks[C]//2018 IEEE/ACM 22nd International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT). IEEE, 2018: 1-5.
- [14] ANH P V T, BAO V N Q, LE K N. Performance of TAS/MRC wireless energy harvesting relaying networks over Rician fading channels[J]. Wireless Personal Communications, 2018, 103(2): 1859-1870.
- [15] NGUYEN T N, QUANG M T H, TRAN P T, et al. Adaptive energy harvesting relaying protocol for two-way half-duplex system network over Rician fading channels[J]. Wireless Communications & Mobile Computing, 2018: 1-10.
- [16] GRADSHTEYN I S, RYZHIK I M. Table of integrals, series and products[J]. Mathematics of Computation, 2007, 20(96): 1157-1160.

[作者简介]



李亚平（1996-），女，河南许昌人，北京交通大学计算机与信息技术学院硕士生，主要研究方向为无线传感器网络、能量收集等。



熊轲（1981-），男，陕西汉中，博士，北京交通大学计算机与信息技术学院副院长、教授，计算机工程系主任，主要研究方向为无线协作网络、无线移动网络、网络信息理论等。



张煜（1983-），男，广西桂林人，博士，国网能源研究院有限公司高级工程师，主要研究方向为泛在电力物联网、无线协作网络、电能替代等。



杨玺（1980-），女，江西樟树人，博士，北京物资学院副教授，计算机技术与物联网工程系主任，主要研究方向为物联网技术、机器学习。