

能量捕获协作中继网络多中继节点选择策略

田贤忠, 郭敏, 何佳存, 刘高, 祝驿楠

(浙江工业大学计算机科学系, 浙江 杭州 310023)

摘要: 研究了一种能量捕获协作中继网络, 与传统协作中继网络不同, 中继节点一般没有固定的能量供应但可以进行能量捕获。对于这种网络, 一个自然的问题就是如何决定中继节点是该进行能量捕获还是数据转发, 以及如何选择中继节点以协助信息在源节点与目的节点间的传输。基于这个问题, 提出一种多中继节点选择方案, 该方案根据中继节点当前时隙的能量来选择其操作。在每个时隙中, 满足电池阈值要求的中继节点会被选择进行协助传输。利用马尔可夫链对中继节点电池的充放电过程来进行建模, 得出该无线网络达到稳定状态时的中断概率以及吞吐率表达式, 并对使吞吐率最大, 即网络中断概率最小时的电池阈值的取值进行求解。最后, 通过数值实验验证方案的优点。

关键词: 无线网络; 能量捕获; 协作中继; 马尔可夫链

中图分类号: TN925

文献标识码: A

Multi relay node selection strategy for energy capture collaborative relay network

TIAN Xian-zhong, GUO Min, HE Jia-cun, LIU Gao, ZHU Yi-nan

(Department of Computer Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: An energy capture cooperative relay network was studied. Unlike traditional cooperative relay networks, the relay nodes generally did not have a fixed energy supply but could carry out energy capture. For this network, a natural question was how to determine whether the relay nodes perform energy capture or data forwarding, and how to select the relay node to assist the information transmission between the source node and the destination node. Based on this problem, a multi-relay node selection scheme was proposed, which select the operation according to the energy of the current time slot of the relay node. In each time slot, the relay node that meet the battery threshold requirements was selected to assist in transmission. The Markov chain was used to model the charging and discharging process of the relay node battery, and the probability of interruption and throughput of the wireless network was obtained. And the value of the battery threshold when the throughput was maximized, that is, when the probability of network breakage was minimum was solved. Finally, the advantages of this scheme were verified by numerical experiments.

Key words: wireless network, energy capture, collaborative relay, Markov chain

1 引言

在实践中, 需要定期补充能量的无线设备是影响无线通信网络性能的主要因素之一。近来, 下一代无线网络供电有了一种新的技术——射频 (RF,

radio frequency) 能量传输和收集技术, 该技术作为一种新解决方案, 能够在一定程度上延长能量受限的无线网络的寿命^[1]。无线设备能够从环境或专用能量源中捕获 RF 能量, 为电池充电, 并通过 RF 信号来进行信息传输^[2]。随着该技术发展的深入,

收稿日期: 2017-09-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61672465, No.61772472); 浙江省自然科学基金资助项目 (No.LY15F020027, No.LY17F020020)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61672465, No.61772472), The Natural Science Foundation of Zhejiang Province (No.LY15F020027, No. LY17F020020)

无线供电通信慢慢成为热门的研究课题^[3]。

近 10 年来, 协作通信由于其自身的各种特点, 在一定程度上提高了无线通信网络的性能, 并受到越来越多的关注和研究^[4]。具体来讲, 中继节点能够从环境 RF 信号中收集能量, 然后使用收集的能量来辅助源节点的信息传输。对于中继节点来说, 进行协作是很有利的, 因为这不需要消耗它自身的能量。Nasir 等^[5]研究了一种由一个源节点, 一个目的地节点和一个可以进行转发放大的中继节点组成的三节点协作通信网络模型, 提出并分析了 2 种中继协议, 分别是基于时间分配的中继协议和基于功率分配的中继协议。Baidas 等^[6]研究了一种多用户一多中继节点的能量分配与中继选择策略, 考虑到了中继节点之间的能量协作, 得到了在最大化目的地节点信噪比和最小化中继节点的总能量消耗条件下的中继选择策略。Krikidis 等^[7]研究了对于中继节点位置随机分布情况下的 3 种中继节点的选择策略; 在单对源—目的节点 (S-D), 多个 R 节点的情况下分析其中断概率和多元增益, 在多个 S-D 情况下, 把中继节点看成一种竞争资源, 基于不同的 payoff 函数提出 2 种分布式博弈论算法。

根据上述工作, 无线供电网络的中继节点一般会将其所接收到的信号分为互相独立的 2 部分: 不是用于能量收集, 就是用作信息处理, 如文献[8,9]。这是由于最新的电路技术仍然不能支持从 RF 信号中同时检索信息并收集能量。此外, 现有工作大多假设无线节点会耗尽当前时隙收集的能量用信息传输。这一假设可能会有一些实际的问题, 进而导致系统性能的次优。具体来说, 当信道状况不好时, 无线节点只能收获较少的能量, 可能导致就算耗尽当前能量也无法执行有效的信息传输。从这个角度看, 就需要为每个节点配备可充电电池, 使节点能够累积收获的能量, 然后在适当的时隙传输信息。考虑到以上因素, 本文提出一种多中继节点选择方案, 该方案根据中继节点当前时隙的能量来选择其操作。在每个时隙中, 满足电池阈值要求的中继节点会被选择协助传输。本文的主要贡献如下。

1) 提出一种多中继节点选择方案, 该方案根据中继节点当前时隙的能量来选择其操作。在每个时隙中, 满足电池阈值要求的中继节点会被选择协助传输。

2) 利用马尔可夫链对中继节点电池的充放电

过程来进行建模, 得出该无线网络达到稳定状态时的节点能量的稳定分布情况。

3) 求得网络稳定时的中断概率以及吞吐率表达式, 并分析了使吞吐率最大, 即网络中断概率最小时电池阈值的取值情况。

2 系统模型

本文研究的是如图 1 所示的无线供电协作网络, 它由一对源—目的节点和多个协作源节点传输信息的中继节点所组成。考虑现实情况, 由于距离太远, 会造成 2 个路径之间的路径损耗或其他障碍, 假设源节点与目的地节点之间不能直接通信。并且, 所有的节点都配有单发射天线, 以半双工模式来工作。源节点与目的节点有固定的能量供应, 中继节点没有固定的能量供应但配有能量收集电路和蓄电池以存储能量。中继节点收集的能量完全依赖于源节点的 RF 信号, 在每个传输时间块开始之前, 中继节点可以决定其下一阶段的传输模式。中继节点配有的蓄电池可以使其从多个不同的传输时间块收集能量。

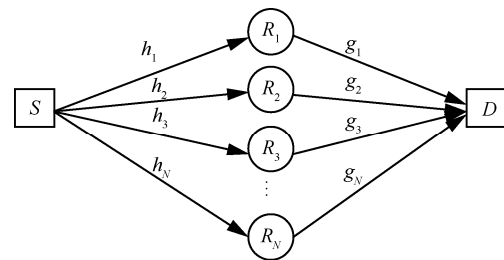


图 1 网络模型

在图 2 中, 假定每个单独传输块的持续时间为 T , 每个传输块可分成 2 个时隙, 各占 $\frac{T}{2}$ 。在上一个时隙中, 源节点将广播信号广播到所有中继节点。中继节点会根据自己当前能量来决定其操作模式, 在能量收集模式时将接收到的广播信号转化为能量储存到蓄电池中, 在信息接收模式时接收该信息。在下一个时隙中, 处于能量储存模式的中继节点保持静默状态, 处于信息接收模式的中继节点将其前一时隙所接收的信息转发至目的地节点。

用 S 和 D 分别代表源节点及目的节点, 用 R_u 代表第 u 个中继节点, u 属于集合 $\{1, 2, \dots, N\}$ 。对于 $S-R$ 与 $R-D$ 信道间的随机信道增益变化情况, 采用 Nakagami- m 的衰落分布^[10]来表示。此外, 假设所

考虑模型中的所有信道在每个传输时间块内的瞬时信道增益保持不变，且在不同时间块内相互独立。



图 2 中继节点的 2 种传输模式

设源节点以恒定功率 P_S 广播信号，用 x 表示其发射的信号。那么在第一个时隙中继节点收到的信号为

$$y_{r,u} = \sqrt{P_S} h_u x + n \quad (1)$$

其中， h_u 表示 S 节点与 R_u 之间的信道增益， n 表示高斯白噪声。

当 R_u 处于能量捕获模式时，在第一个时隙中所收集的能量为

$$E_u = \frac{T}{2} \eta P_S |h_u|^2 \quad (2)$$

其中， $0 < \eta < 1$ ，表示能量转化效率。

设 φ 表示被选择的中继节点的集合，在第二个时隙内，集合中的中继节点共同帮助源节点发送信息^[11]，对于集合 φ 中的单独一个中继节点 R_u ，其发送的信号为

$$x_u = \omega_u \sqrt{P_u} x \quad (3)$$

其中， ω_u 是中继节点 R_u 在集合 φ 的一个权值，可以通过 $\omega_u = \frac{g_u}{\sum_{i \in \varphi} |g_i|^2}$ 来计算得到， P_u 是第 u 个中继节点的发射功率。

因此，目的节点所接收到的信号可以表示为

$$y_d = \sum_{u: R_u \in \varphi} g_u \sqrt{P_u} x + n \quad (4)$$

目的节点所接收到的信号的信噪比为

$$r_\varphi = \frac{(\sum_{u: R_u \in \varphi} \sqrt{P_u} g_u)^2}{N_0} \quad (5)$$

3 中继节点选择策略

3.1 中继节点能量阈值

本文提出的中继节点选择方案是基于中继节点的能量阈值来对其进行选择。在每个时隙，中继节点会根据当前时隙自身的能量来选择其操作模式。具体来说，当中继节点的当前能量小于其给定的阈值时，只进行能量捕获而不转发信息。而当其当前能量大于其给定的阈值时，则会协助源节点来进行信息转发。

每个中继节点对阈值的选取可以不同。因为对于每个中继节点来讲，它们所能贮存的平均累计能量会随着中继节点与源节点间距离的减小而增大，这种变化是由于信号传播时的路径损耗引起的。一方面，距离源节点越近的中继节点受到的路径损耗越小，收集的能量也越多。另一方面，这些中继节点因为离源节点近，而离目的节点相对较远，所以在转发数据时必须使用较高的发射功率，以补偿因距离远而引起的严重信道损耗。这就意味着应该为它们设置较高的能量阈值。反之，对于那些离源节点远而离目的节点近的中继节点，应该设置较低的能量阈值。因为它们在第二跳中累积的能量更少和但具有更好的信道增益。

设 β_u 表示第 u 个中继节点的能量阈值

$$\beta_u = \frac{z}{\delta_{R_u, D}} \quad (6)$$

其中， z 是用来调整所有中继节点的平均发送功率的一个标量 (z 值的确定见第 4 节)， $\delta_{XY} = \frac{1}{1 + d_{XY}^\alpha}$ 用

于表示节点 X 、 Y 间信道增益， d 为节点 X 、 Y 间的距离， $\alpha \in [2, 4]$ 是路径损耗系数。从式(6)可以看出，能量阈值随离目的节点距离的增大而增大。

进一步可以得到第 u 个中继节点的发射功率 P_u

$$P_u = \frac{\beta}{T} = 2 \frac{\beta_u}{T} \quad (7)$$

令 C 表示所有中继节点电池的容量， L 表示把电池容量离散化为 L 份。则中继节点电池的的第 i 个能级可以表示为 $\varepsilon_i = \frac{iC}{L}, i \in \{0, 1, 2, \dots, L\}$ 。

$$\beta_u = \min \left(\varepsilon_1 \left[\frac{z}{\varepsilon_1 \delta_{R_u, D}} \right], C \right) \quad (8)$$

其中, $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整, 实际的阈值取离散化后的电池容量的某一个能级。

3.2 网络稳定状态

为了分析本文所提出方案的性能, 本节利用马尔可夫链来描述中继节点电池充放电行为。因为中继节点主要根据其电池状态来决定其操作模式, 各个中继节点间相互独立, 所以可以依靠无线网络达到稳定时的中继点能量分布来评估其性能。

令 $\theta_u[m] \in \{\theta_E, \theta_I\}, m=1, 2, 3, \dots$ 表示第 u 个中继节点在第 m 个时间块所选择的操作模式, 其中, θ_E 和 θ_I 分别代表能量捕获模式和信息转发模式。

$$\theta_u[m] = \begin{cases} \theta_E, & r_u[m] < \beta_u \\ \theta_I, & r_u[m] \geq \beta_u \end{cases} \quad (9)$$

用 $r_u[m]$ 表示中继 u 在第 m 个时块开始时其电池的剩余能量, 则

$$r_u[m+1] = \begin{cases} \min\{r_u[m] + E_u, C\}, & \theta_u[m] = \theta_E \\ r_u[m] - \beta_u, & \theta_u[m] = \theta_E \end{cases} \quad (10)$$

对于每个中继节点, 用 S_i 表示当前电池能量为 ε_i , $T_u^{i,j}$ 表示第 u 个中继节点从 S_i 变为 S_j 状态的转移概率。各中继的能量转移过程如图 3 所示。

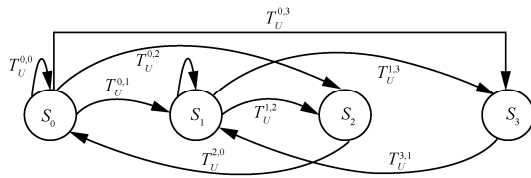


图 3 中继节点的能量状态转移示意 ($L=3$, 阈值为 S_2)

$$T_u^{i,i} = \Pr\{E_u = 0 \mid r_u[m] < \beta_u\} \quad (11)$$

其中, $\Pr\{E_u = 0\}$ 相当于要求 $E_u = \frac{1}{2} \eta P_s \mid h_u \mid^2 \varepsilon_1 = \frac{C}{L}$, 当中继节点在一个周期内收集的能量过少, 即少于 ε_1 , 便可以近似地认为在该周期内, 中继节点没有收集到能量。 $\mid h_u \mid^2$ 服从的分布函数^[12]为

$$f_{\mid h_u \mid^2}(x) = \frac{b_u^{m_u}}{\Gamma(m_u)} x^{m_u-1} \exp(-b_u x) \quad (12)$$

$$F_{\mid h_u \mid^2}(x) = \frac{r(m_u, b_u x)}{\Gamma(m_u)} \quad (13)$$

其中, $F(z) = \int_0^\infty t^{z-1} \exp(-t) dt$ 是伽马函数, $b_u = \frac{m_u}{\delta_{SR_u}}$,

$\gamma(v, x) = \int_0^x t^{v-1} \exp(-t) dt$ 。从而就可以求得

$$\Pr\{E_u = 0\} = F_{\mid h_u \mid^2} \left(\frac{2C}{\eta P_s L} \right) \quad (14)$$

$$T_u^{i,i} = \begin{cases} F_{\mid h_u \mid^2} \left(\frac{2C}{\eta P_s L} \right), & r_u[m] < \beta_u \\ 0, & r_u[m] \geq \beta_u \end{cases} \quad (15)$$

同理, 可以得到

$$T_u^{i,L} = \Pr\{E_u \geq \varepsilon_{L-i} \mid r_u[m] < \beta_u\} = \begin{cases} 1 - F_{\mid h_u \mid^2} \left(\frac{2(L-i)C}{\eta P_s L} \right), & r_u[m] < \beta_u \\ 0, & r_u[m] \geq \beta_u \end{cases} \quad (16)$$

$$T_u^{i,j} = \Pr\{E_u < \varepsilon_{L-i} \mid r_u[m] < \beta_u\} = \begin{cases} F_{\mid h_u \mid^2} \left(\frac{2(j-i+1)C}{\eta P_s L} \right) - F_{\mid h_u \mid^2} \left(\frac{2(j-i)C}{\eta P_s L} \right), & r_u[m] < \beta_u \\ 0, & r_u[m] \geq \beta_u \end{cases} \quad (17)$$

$$T_u^{j,j} = \Pr\{r_u[m] \geq \beta_u\} \quad (18)$$

用 $\mathbf{Z}_u = (T_u^{i,j}) = \begin{bmatrix} T_u^{0,0} & T_u^{0,1} & \dots & T_u^{0,L} \\ T_u^{1,0} & T_u^{1,1} & \dots & T_u^{1,L} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_u^{L,0} & T_u^{L,1} & \dots & T_u^{L,L} \end{bmatrix}$ 来表示中

继节点 R_u 的 $(L+1) \times (L+1)$ 状态转移矩阵, 对于每一个中继节点 R_u , 存在一个稳定的状态分布矩阵 π_u 满足

$$\pi_u = (\pi_{u,0}, \pi_{u,1}, \dots, \pi_{u,L})^T = (\mathbf{Z}_u)^T \pi_u \quad (19)$$

其中, $(\cdot)^T$ 表示矩阵转置, $\pi_{u,i}, i \in \{0, 1, \dots, L\}$ 表示状态分布矩阵 π_u 中对应中继节点 R_u 的第 i 个能级的概率, 从而可以得到当达到稳定状态时, 中继节点 R_u 池能量的稳定分布为

$$\pi_u = ((\mathbf{Z}_u)^T - \mathbf{I} + \mathbf{B})^{-1} \mathbf{b} \quad (20)$$

其中, $B_{i,j} = 1, \forall i, j; \mathbf{b} = (1, 1, \dots, 1)^T$ 。

4 系统分析

通过第 3 节, 得到了稳定状态时的节点能量分布情况。本节主要从中断概率以及吞吐率 2 个方面, 对本文所提出的中继节点选择方案进行分析, 并求得使网络中断概率及吞吐率达到最优的阈值。

网络的中断概率可以表示为

$$P_{\text{out}} = \sum_{\varphi \in \Lambda} \Pr\{\varphi\} \Pr\{O | \varphi\} \quad (21)$$

其中, O 代表中断事件, $\Lambda = \{R_1, R_2, \dots, R_N\}$ 表示所有中继节点的一个集合, φ 代表当前时隙所选择的中继节点的一个集合, 它是集合 Λ 的一个子集。用 $\varphi_{k,n}$ 表示集合 Λ 中含有 k 个中继节点的第 n 个子集, 那么

$$P_{\text{out}} = \Pr\{\emptyset\} + \sum_{k=1}^N \sum_{n=1}^{\binom{N}{k}} \Pr(\varphi_{k,n}) \Pr\{O | \varphi_{k,n}\} \quad (22)$$

其中, $\Pr\{\cdot\}$ 表示当前时隙中, 没有中继节点满足能量阈值要求, 即所有中继节点都处于能量捕获模式, 所选的中继节点集合为空集。

$$\Pr\{\emptyset\} = \prod_{u: R_u \in \Lambda} \Pr(\theta_u = \theta_E) = \prod_{u: R_u \in \Lambda} \sum_{i=0}^{\beta_u} \pi_{u,i} \quad (23)$$

同理, 可以计算出

$$\begin{aligned} \Pr\{\varphi_{k,n}\} &= \prod_{u: R_u \in \varphi_{k,n}} \Pr(\theta_u = \theta_I) \prod_{u: R_u \notin \varphi_{k,n}} \Pr(\theta_u = \theta_E) \\ &= \prod_{u: R_u \in \varphi_{k,n}} \left(\sum_{i=\beta_u/\varepsilon_1}^L \pi_{u,i} \right) \prod_{u: R_u \notin \varphi_{k,n}} \left(\sum_{i=0}^{\beta_u} \pi_{u,i} \right) \end{aligned} \quad (24)$$

对于式 (22) 中的 $\Pr\{O | \varphi_{k,n}\}$, 需要先得到关于选择中继节点集合 $\varphi_{k,n}$ 的信噪比 $\gamma_{\varphi_{k,n}}$ 其累积分布函数为

$$\begin{aligned} F_{\gamma_{\varphi_{k,n}}}(x) &\approx \frac{\gamma(k, \frac{N_0 x}{4 \sum_{u: R_u \in \varphi_{k,n}} \beta_u \sigma_u^2})}{\Gamma(k)} \\ &= \frac{\gamma(k, a_{k,n} x)}{\Gamma(k)} \\ &= 1 - \exp(-a_{k,n} x) \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(a_{k,n} x)^i}{i!} \end{aligned} \quad (25)$$

为了简化表达式, 令 $a_{k,n} = \frac{N_0}{4 \sum_{u: R_u \in \varphi_{k,n}} \beta_u \sigma_u^2}$, 其中,

$\sigma_u = \sqrt{\frac{\delta_{R_u D}}{1}}$ 是衡量 R_u 和 D 之间信道衰落的一个参数。同时也可以得到 $\gamma_{\varphi_{k,n}}$ 的概率密度函数

$$f_{\gamma_{\varphi_{k,n}}}(x) = \frac{dF_{\gamma_{\varphi_{k,n}}}(x)}{dx} \approx \frac{a_{k,n}^k}{\Gamma(k)} x^{k-1} \exp(-a_{k,n} x) \quad (26)$$

然后利用 $\gamma_{\varphi_{k,n}}$ 的分布函数, 可以得到

$$\begin{aligned} \Pr\{O | \varphi_{k,n}\} &= \Pr\{\gamma_{\varphi_{k,n}} < v\} = F_{\gamma_{\varphi_{k,n}}}(v) \\ &\approx 1 - \exp(-a_{k,n} v) \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(a_{k,n} v)^i}{i!} \end{aligned} \quad (27)$$

其中, $v = 2^{2R} - 1$ 表示该网络中断概率的信噪比阈值, R 为网络的数据传输率。

将前面得到的概率分别代入式(28), 可以得到整个网络的中断概率

$$P_{\text{out}} = \Pr\{\emptyset\} + \sum_{k=1}^N \sum_{n=1}^{\binom{N}{k}} \Pr(\varphi_{k,n}) \Pr\{O | \varphi_{k,n}\} \quad (28)$$

最后得到网络的吞吐率

$$\tau = (1 - P_{\text{out}}) \frac{T}{T} v_{P_s} = \frac{1}{2} (1 - P_{\text{out}}) v_{P_s} \quad (29)$$

其中, v_{P_s} 为在功率 P_s 下源节点可以达到的数据发送速率。

根据式(29), 可以计算出式(6)中的 z 值, τ 可以看作是与 z 值相关的一个函数。本文希望求得网络吞吐率最大的情况下的 z 的值, 即

$$\arg \max \tau(z),$$

$$\varepsilon_1 \leq \beta_u \leq C, u \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (30)$$

在 $\beta_u = \frac{z}{\delta_{R_u D}}$ 中, 变量 z 与中继节点的能量阈值

β_u 成正比, 因此, 可以推断出应该存在使网络吞吐率最大化的 z 的最优解。此外, τ 跟中断概率 P_{out} 有关, 要求最大化的网络的吞吐率等价于最小化 P_{out} , 而 P_{out} 又是与 z 相关的函数, 在定义域 $(\varepsilon_0 \delta, \varepsilon_L \delta]$ 上, 可以使用遗传算法来求解最优的 z 值, 来使中断概率 P_{out} 最小。而考虑到能量阈值 β_u 是离散化的变量, 那么最优的 z 就应该在集合 $(\varepsilon_1 \delta, \varepsilon_2 \delta, \dots, C \delta]$ 中取值。由于马氏链模型的复杂性, 导出用于求解最优 z 的算术表达式是非常困难的。但是, 对于一定的网络模型, 可以利用上述导出的中断概率表达式通过执行一维穷举搜索来找到最佳的 z 值。

5 数值模拟

本节用仿真实验结果来验证之前的理论分析。为了简化起见, 假设所有中继节点位于源节点和目的地节点之间的一条直线上 (不是指源节点和目的地节点相连的那条直线)。对于一些预设的变量值,

设 $d_{SD} = 20 \text{ m}$ ，路径损耗系数 $\alpha = 2, m_u = 2$ ，噪声功率 $N_0 = -80 \text{ dBm}$ ，能量转化效率 $\eta = 0.5$ 。

中断概率随源节点功率 P 的变化情况如图 4 所示，吞吐率随源节点功率 P 的变化情况如图 5 所示。可以发现，源节点功率 P 越大，对应的中断概率就越小；而当 P 一定， L 取值越大时，中断概率以及网络吞吐率就越好。这是由于电池容量一定的情况下， L 越大，则各能级的间隔越小，对于电池阈值的决定也就能更加精确。

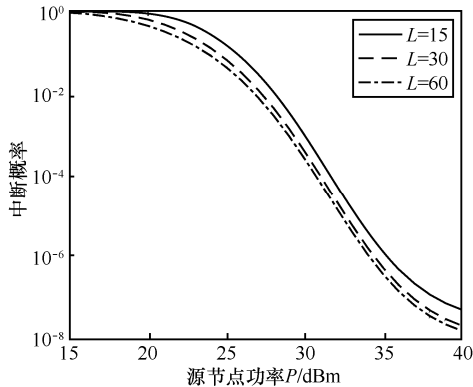


图 4 中断概率随源节点功率 P 的变化情况

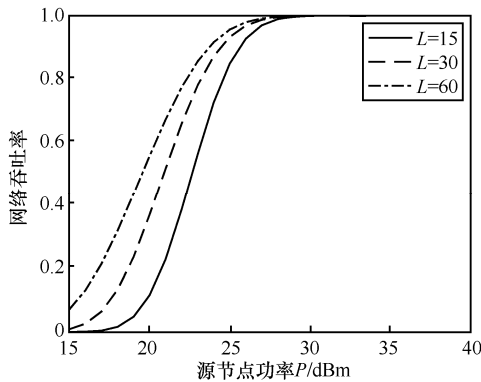


图 5 吞吐率随源节点功率 P 的变化情况

中断概率随变量 z 取值的变化情况如图 6 所示，网络吞吐率随变量 z 取值的变化情况如图 7 所示。从图 6 中可以看出，存在一个最佳的 z 值，能够最小化网络的中断概率。 z 与中继节点的能量阈值成正比， z 过小时，会导致选择的集合中出现很多中继节点，但它们的发送功率低。 z 较大时，会使解集中的中继节点较少，但它们的发送功率较高。

最后，本文所提出的方法与文献[8]方法的比较如图 8 和图 9 所示。从图 8 和图 9 中可以发现，在不同的中继节点个数和源节点发送功率条件下，本文方法可以实现更低的中断概率，以及更高的网络吞吐率。

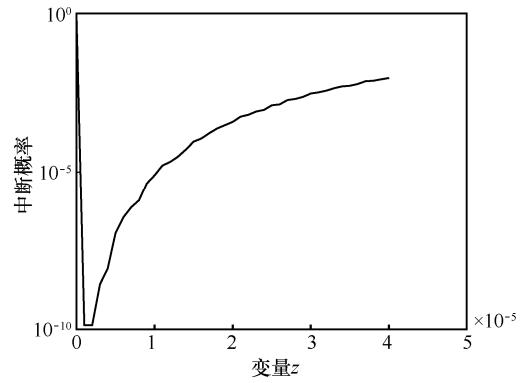


图 6 中断概率随着变量 z 取值的变化情况

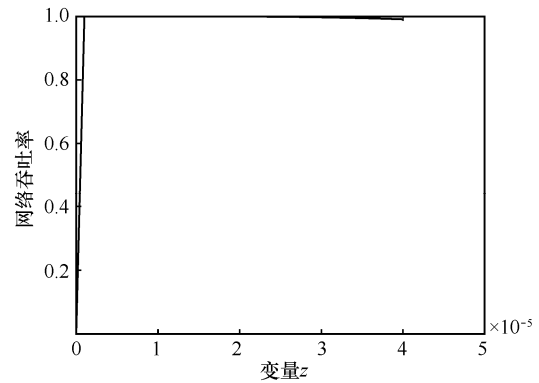


图 7 网络吞吐率随着变量 z 取值的变化情况

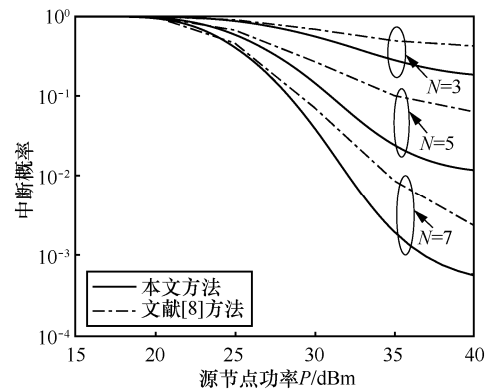


图 8 不同中继节点个数下的中断概率

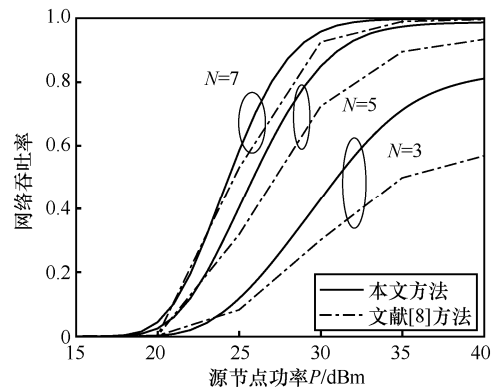


图 9 不同中继节点个数下的网络吞吐率

6 结束语

本文对于带有能量捕获的协作中继网络, 提出了一种多中继节点选择方案。该方案根据中继节点当前时隙的能量来选择其操作, 在每个时隙中, 满足电池阈值要求的中继节点会被选择协助传输。为了分析网络达到稳定状态时, 各中继节点能量的稳定分布情况, 利用马尔可夫链对中继节点电池的充放电过程进行建模。本文也求出了网络达到稳定时的中断概率以及吞吐率表达式, 并分析了使吞吐率最大, 即网络中断概率最小时的电池阈值的取值情况。最后通过数值实验分析了各个变量对中断概率以及吞吐率的影响, 并将本文方法与文献[8]方法进行了比较, 实验结果也表明了本文的方法能达到较好的效果。

参考文献:

- [1] LU X, WANG P, NIYATO D, et al. Wireless networks with rf energy harvesting: a contemporary survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 17(2):757-789.
- [2] ZANE R. Resistor emulation approach to low-power energy harvesting[C]//Power Electronics Specialists Conference. 2006:1-7.
- [3] BI S, HO C, ZHANG R. Wireless powered communication: opportunities and challenges[J]. Communications Magazine IEEE, 2015, 53(4):117-125.
- [4] DOHLER M, LI Y. Cooperative communications: hardware, channel and PHY[M]. Wiley Publishing, 2010.
- [5] NASIR A A, ZHOU X, DURRANI S, et al. Relaying protocols for wireless energy harvesting and information processing[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 12(7):3622-3636.
- [6] BAIDAS M W, ALSUSA E A. Power allocation, relay selection and energy cooperation strategies in energy harvesting cooperative wireless networks[J]. Wireless Communications & Mobile Computing, 2016.
- [7] DING Z, KRIKIDIS I, SHARIF B, et al. Wireless information and power transfer in cooperative networks with spatially random relays[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(8):4440-4453.
- [8] DO N T, BAO V N Q, AN B. A relay selection protocol for wireless energy harvesting relay networks[C]//International Conference on Advanced Technologies for Communications. IEEE, 2016:243-247.
- [9] KLAIQI B, CHU X, ZHANG J. Energy-efficient and low signalling overhead cooperative relaying with proactive relay subset selection[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016:1-1.
- [10] NAKAGAMI B M. The m-distribution, a general formula of intensity distribution of the rapid fading[C]//Statistical Methods In Radio Wave Propagation. 1960.
- [11] KIM J B, KIM D. Cooperative system with distributed beamforming and its outage probability[C]// Vehicular Technology Conference, 2007. Vtc2007-Spring. IEEE Explore, 2007:1638-1641.
- [12] SIMON M, ALOUINI M. Digital communication over fading channels, ser[C]//Wiley Series in Telecommunications and Signal Processing. Wiley, 2005.

作者简介:



田贤忠(1968-), 男, 浙江杭州人, 博士, 浙江工业大学教授, 主要研究方向为网络编码、移动计算和无线网络协议优化等。



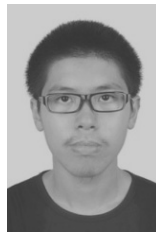
郭敏(1992-), 男, 浙江东阳人, 浙江工业大学硕士生, 主要研究方向为可充电传感器网络、无线协助中继网络等。



何佳存(1992-), 男, 浙江金华人, 浙江工业大学硕士生, 主要研究方向为可充电传感器网络、移动收集数据策略等。



刘高(1991-), 男, 湖北洪湖人, 浙江工业大学硕士生, 主要研究方向为可充电传感器网络、无源感知网络等。



祝驿楠(1997-), 男, 浙江杭州人, 主要研究方向为可充电传感器网络、无线自组织网络等。