

基于分组内时间切换的无线信息与功率中继传输

鲁聪聪¹ 刘洪武^{1,2}

(1. 山东交通学院信息科学与电气工程学院, 济南, 250357; 2. 仁荷大学信息与通信工程学, 仁川, 22212)

摘要: 研究了采用译码转发机制的无线供电中继网络的能量与信息传输。与常规译码转发中继网络不同, 本文在能量受限的中继节点上配置能量收集单元和可充电电池。在进行信息转发之前, 中继节点对收集到的能量进行累积。同时, 提出了一种基于分组内时间切换的收集—传输—存储模式, 在每一传输分组内进行基于时间切换的无线能量与信息传输。通过将有限容量电池的能量水平建模为具有两步状态转移的有限状态马尔科夫链, 给出了收集—传输—存储模式在 Nakagami- m 衰落信道下的中断概率闭式。仿真结果表明: 相比未采用分组内时间切换的收集—传输—存储模式, 本文所提机制极大地提高了中断性能和成传速率。

关键词: 能量收集; 无线功率传输; 译码转发中继; 马尔科夫链

中图分类号: TN911.21 **文献标志码:** A

Wireless Information and Power Relaying with In-Block Time Switching

Lu Congcong¹, Liu Hongwu^{1,2}

(1. School of Information Science and Electric Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan, 250357, China; 2. Department of Information and Communication Engineering, Inha University, Incheon, 22212, South Korea)

Abstract: This paper investigates a wireless-powered relay network, in which a source transmits its signal to a destination with the aid of a decode-and-forward (DF) relay. Contrary to conventional DF relay networks, we consider the scenario that the DF relay has no sufficient embedded energy supply, and it is equipped with an energy harvesting unit and rechargeable battery. As such, it can accumulate the energy harvested from the source's signals before help forwarding the information. A harvest—transmit—store (HTS) model with in-block time switching (TS) is developed such that TS can be implemented within one transmission block. By modeling the finite-capacity battery of the relay as a finite-state Markov Chain with a two-stage state transition, we derive the closed-form expression for the outage probability of the proposed HTS model with in-block TS over Nakagami- m fading channels. Numerical results validate our theoretical analysis and show that the proposed HTS model with in-block TS significantly outperforms the HTS model without in-block TS in terms of outage probability and successful rate.

Key words: energy harvesting; wireless power transfer; decode-and-forward relay; Markov chain

引 言

近年来,无线通信技术获得了长足的发展,多项关键技术的突破使大规模无线连接成为可能^[1-2]。无线供电通信已经成为无线网络中一种重要的使能技术。通过从环境周围或专属的射频信号中采集能量,具有能量受限特点的无线节点可进行无线充电来延长其生命周期。由于射频信号可以同时携带信息和能量,无线信息与功率同步传输(Simultaneous wireless information and power transfer, SWIPT)在点对点 and 点对多点网络中得到了广泛研究。最近,SWIPT技术还被拓展到无线中继网络^[3-5]。文献首先研究了针对放大转发中继网络的时间切换中继和功率切换中继这两种机制。接着,文献[4]将SWIPT技术应用到译码转发中继网络。针对多个中继协作的SWIPT网络,文献[5]研究了相应的功率分配机制。此外,SWIPT技术在多天线的中继协作网络^[6-8]和分布式的干扰受限中继网络^[9]中都得到了应用。可以预见,在以5G无线通信系统为互连支撑的物联网泛在应用中,作为重要使能技术之一的SWIPT将发挥重要作用。

在采用SWIPT的中继网络中,大多数现有研究工作设定中继节点将其在每一传输分组内收集的能量全部用于信息中继^[3-9]。这种操作方式可能导致系统只能获取次优性能,其原因包括:首先,当信源-中继信道受到深度衰落时,中继节点只能收集到数量非常有限的能量。其次,当中继-信宿信道受到深度衰落时,即使中继节点耗尽其收集的能量,也可能无法有效地实现信息中继。在另一方面,当中继-信宿信道处于良好状态时,中继节点应该部分地使用其收集的能量,并将剩余能量存储以备后续使用。因此,能量累积和优化调配使用成为无线供电中继网络提升性能的关键^[10-13]。

针对放大转发中继网络,文献[10]提出了一种收集—传输—存储(harvest—transmit—store, HTS)模式,考虑了在中继节点进行能量累积并采用马尔科夫链对系统性能进行了分析。在这种基于马尔科夫链的分析框架下,多种采用能量累积的点对点无线供电中继机制得到了研究^[11-13]。相比没有采用能量累积的收集-传输模式,HTS模式能够有效地提高中断性能。然而,在现有研究工作中,时间切换均采用跨分组方式进行,即一个传输分组只能进行能量收集或信息中继这两种模式中的一种。由于实际中具有小负载、低延迟和能量不足的特点,无线供电中继通常应用于短分组传输,这导致可用的分组时间远长于短分组信息传输所需的时间^[14]。为有效地利用分组时长,本文提出了一种基于分组内时间切换的HTS模式,可在每一分组内进行时间切换。在这种模式下,由于电池在一个分组内可工作于先充电后放电或先充电再充电的方式,现有基于马尔科夫链的分析方法不再适用于本文所提的分组内时间切换的HTS模式,需要采用新的方法来进行系统性能分析。

本文的主要贡献包括:(1)针对译码转发中继网络,提出了一种基于分组内时间切换的HTS模式。(2)将电池动态的充电—放电/充电—充电行为建模为具有两步状态转移的马尔科夫链,该模型可对现有HTS模式提供更具一般性的分析框架。(3)与现有瑞利衰落下的系统分析工作不同,本文在Nakagami- m 衰落信道下给出了系统的转移矩阵、稳态分布和成传速率的闭合式。仿真结果验证了所提HTS模式的性能和闭合表示式的正确性。相比未采用分组内时间切换的HTS模式^[10],本文所提HTS模式大幅度提高了中断性能和成传速率。

1 系统模型

考虑在两跳传输的半双工中继网络中,一个信源节点通过中继传输向信宿节点发送信息。假定信源与信宿之间存在物理障碍,信息传输需由一个能量受限的中继节点转发实现。由于能量受限,中继节点需要从信源节点发射的射频信号中收集能量,并利用其进行信息转发。将信源-中继信道和中

继-信宿信道分别记为 h_1 和 h_2 , 并假定其包含了大尺度和小尺度衰落效应。针对信道的幅度, $|h_i| (i=1, 2)$, 将其建模为 Nakagami- m 衰落, 则信道增益 $g_i = |h_i|^2$ 服从伽马分布。对具有正整数形状因子的 g_i , 其累积分布函数和互补累积分布函数可分别表示为

$$F_{g_i}(x) = 1 - e^{-\frac{x}{\theta_i}} \sum_{\ell=0}^{m_i-1} \frac{1}{\ell!} \left(\frac{x}{\theta_i}\right)^\ell \quad (1)$$

$$\bar{F}_{g_i}(x) = e^{-\frac{x}{\theta_i}} \sum_{\ell=0}^{m_i-1} \frac{1}{\ell!} \left(\frac{x}{\theta_i}\right)^\ell \quad (2)$$

式中: m_i 为形状因子, θ_i 为尺度因子。对能量受限节点组成的网络, 可以通过从能量采集单元开始的反向链路进行两阶段的导频训练来获取信道状态信息^[15]。因此, 本文假定中继节点能够获取正确的信道状态信息。

在文献[10]中, HTS 模式采用跨分组的时间切换, 在分组内并不进行时间切换。在本文所提的 HTS 模式中, 时间切换可在每一分组内进行, 从而提高传输的可靠性。本文所提 HTS 模式的帧结构如图 1 所示, 其每一分组被划分为两个时隙。对第一时隙, 其时长为 αT , 中继在该时隙内切换为能量收集模式 μ_h 。对第二时隙, 其时长为 $(1-\alpha)T$, 中继在该时隙内切换能量收集模式 μ_h 或信息转发模式 μ_r 。在第二时隙中, 中继具体切换于哪种模式, 取决于电池剩余能量水平和信道状态信息。如果中继在第二时隙切换到信息转发模式, 则第二时隙的前半阶段 $(1-\alpha)T/2$ 用于信源-中继传输, 后半阶段 $(1-\alpha)T/2$ 用于中继-信宿传输。当 $\alpha=0$ 时, 本文所提 HTS 模式的帧结构简化为跨分组时间切换的 HTS 模式的帧结构^[10]。

在第一时隙内, 中继节点收集到的能量可表示为

$$E_{h_1} = \eta_h p_s g_1 \alpha T \quad (3)$$

式中 $\eta_h (0 < \eta_h < 1)$ 为能量转换效率^[16]。如果中继节点在第二时隙切换到信息转发模式 η_r , 则中继节点在第二时隙前半阶段接收到的信号可表示为

$$y_r(t) = \sqrt{p_s} h_1 x_s(t) + n_r(k) \quad (4)$$

式中: t 为分组的时间标识; $x_s(t)$ 为信源发送的信号; $n_r(t)$ 为中继节点的加性噪声, 其均值为零, 方差为 σ_r^2 。假定中继节点正确译码, 则其转发的信号为 $x_r(t) = x_s(t - \tau)$, 其中 $\tau \geq 1$ 为中继处理延迟。在第二时隙后半阶段, 信宿接收到的信号为

$$y_d(t) = \sqrt{p_r} h_2 x_s(t - \tau) + n_d(t) \quad (5)$$

式中: p_r 为中继发射功率; $n_d(t)$ 为信宿的加性噪声, 其均值为零, 方差为 σ_d^2 。系统端到端的信噪比可以表示为

$$\gamma_{e2e} = \min\{\gamma_r, \gamma_d\} \quad (6)$$

式中 $\gamma_r = p_s g_1 / \sigma_r^2$ 和 $\gamma_d = p_r g_2 / \sigma_d^2$ 分别为中继节点和信宿节点的接收信噪比。为了保证信宿节点的正确译码, 要求其接收信噪比不小于目标门限 γ_{th} , 则可将能够保证接收译码所需的中继发射功率表示为

$$p_r = \begin{cases} \frac{\gamma_{th} \sigma_d^2}{g_2} & \gamma_r \geq \gamma_{th} \\ \text{不存在} & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

在另一方面, 如果中继节点在第二时隙切换到能量收集模式 μ_h , 将其收集的能量表示为

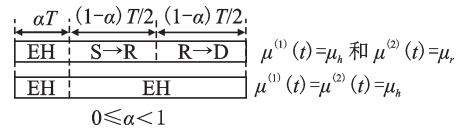


图1 每一传输分组的帧结构

Fig.1 Frame structure of each transmission block

$$E_{h_2} = \eta_h p_s g_1 (1 - \alpha) T \quad (8)$$

本文后续对每一分组传输时隙进行时长归一化处理,则可等效对待能量和功率。将电池容量表示为 $p_b = \rho p_s$ ($\rho > 0$),则电池容量可离散化为 $L + 2$ 个能量等级 $\varphi_i = ip_b / (L + 1)$,其中 $i = 0, 1, \dots, L + 1$ ^[10,17]。定义 $s_i, i = 0, 1, \dots, L + 1$ 为 $L + 2$ 个能量状态,即当电池在状态 s_i 时,其对应的电池能量为 φ_i 。基于这一离散的电池容量模型,可将中继节点在第一时隙内收集的能量表示为 $\varphi_{h_1} = \varphi_{i_{h_1}^*}$,其中

$$i_{h_1}^* = \arg \max_{i \in \{0, \dots, L+1\}} \{\varphi_i : \varphi_i < E_{h_1}\} \quad (9)$$

如果中继节点在第二时隙切换到能量收集模式 μ_h ,则其对应收集到的能量为 $\varphi_{h_2} = \varphi_{i_{h_2}^*}$,其中

$$i_{h_2}^* = \arg \max_{i \in \{0, \dots, L+1\}} \{\varphi_i : \varphi_i < E_{h_2}\} \quad (10)$$

如果中继节点在第二时隙切换到信息转发模式 μ_r ,则将会使用其储存的能量进行发射。对应于式(7)所示的中继发射功率,中继进行发射需要的能量状态为

$$\varphi_r = \begin{cases} \varphi_{i_r^*} & \frac{(1 - \alpha) p_r}{2\eta_r} \leq p_b \\ \infty & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $i_r^* = \arg \min_{i \in \{1, \dots, L+1\}} \{\varphi_i : \varphi_i \geq \frac{(1 - \alpha) p_r}{2\eta_r}\}$, η_r 为对应于电池放电的能量使用效率。

在一个传输分组内,当信宿节点不能正确译码时,发生一次中断事件。等效地,当中继节点在第二时隙切换为能量收集模式时,发生一次中断事件。因此,为减少中断事件,优化的目标等效为减少中继节点在第二时隙不进行信息转发的次数。为实现该目标,HTS模式优先使中继节点在第二时隙进行信息转发。在第二时隙开始时,当电池剩余能量可以支持所需的中继发射功率,则切换中继至信息转发模式,否则切换中继至能量收集模式。将电池在第一时隙和第二时隙的剩余能量分别表示为 $\varphi_1 \in \{\varphi_i : 0 \leq i \leq L + 1\}$ 和 $\varphi_2 \in \{\varphi_i : 0 \leq i \leq L + 1\}$,则可将本文所提 HTS 模式在第一时隙表示为 $\mu^{(1)}(t) = \mu_h$,在第二时隙表示为

$$\mu^{(2)}(t) = \begin{cases} \mu_r & (\varphi_2 \geq \varphi_r) \cap (\gamma_r \geq \gamma_{th}) \\ \mu_h & ((\varphi_2 < \varphi_r) \cap (\gamma_r \geq \gamma_{th})) \cup (\gamma_r < \gamma_{th}) \end{cases} \quad (12)$$

进一步,可将电池的剩余能量状态表示为

$$\begin{aligned} \varphi_1(t+1) &= \min\{p_b, \varphi_2(t) + w\varphi_{h_2} + (1-w)\varphi_r\} \\ \varphi_2(t) &= \min\{p_b, \varphi_1(t) + \varphi_{h_1}\} \end{aligned} \quad (13)$$

式中 $w = \begin{cases} 1 & \mu^{(2)}(t) = \mu_h \\ 0 & \mu^{(2)}(t) = \mu_r \end{cases}$ 。

2 马尔科夫链分析

对基于分组内时间切换的 HTS 模式,中继节点电池一个特定的充电-放电/充电-充电行为可用有限状态马尔科夫链的一个特定的状态转移来表示。由于基于分组内时间切换的 HTS 模式可在第一时隙和第二时隙可进行不同模式的切换,对应的马尔科夫链在每一传输分组内都包含两步状态转移。

假定在每一传输分组内,电池能量的初始状态、中间状态和结束状态分别为 s_i, s_k 和 s_j ,则第一时隙和第二时隙发生的状态转移为 $s_i \rightarrow s_k$ 和 $s_k \rightarrow s_j$,而在整个分组内发生的状态转移可表示为

$s_i \rightarrow s_k \rightarrow s_j$ 。在第一时隙内,由于能量收集操作,则有 $k \geq i$ 。在第二时隙内,如果中继处于信息转发模式 μ_r ,有 $k > j$;如果中继处于能量收集模式,则有 $k \leq j$ 。当中断事件发生时,对 $s_i \rightarrow s_k \rightarrow s_j$ 有 $k \leq j$;当非中断事件发生时,对 $s_i \rightarrow s_k \rightarrow s_j$ 有 $k > j$ 。将马尔科夫链的状态转移矩阵表示为 $P \in \mathbf{R}^{(L+2) \times (L+2)}$,其 i 行 j 列元素 $P_{i,j}$ 表示从状态 s_i 转移到状态 s_j 的概率。类似地,定义 $P_{i,k}^{(1)}$ 为第一时隙的转移概率;针对 $k \leq j$ 和 $k > j$ 这两种情况,定义 $\bar{P}_{k,j}^{(2)}$ 和 $\tilde{P}_{k,j}^{(2)}$ 为第二时隙的转移概率。对应于两步状态转移, $P_{i,j}$ 可表示为

$$P_{i,j} = \sum_{k \leq j} P_{i,k}^{(1)} \bar{P}_{k,j}^{(2)} + \sum_{k > j} P_{i,k}^{(1)} \tilde{P}_{k,j}^{(2)} = \bar{P}_{i,j} + \tilde{P}_{i,j} \quad (14)$$

式中 $\bar{P}_{i,j} = \sum_{k \leq j} P_{i,k}^{(1)} \bar{P}_{k,j}^{(2)}$ 和 $\tilde{P}_{i,j} = \sum_{k > j} P_{i,k}^{(1)} \tilde{P}_{k,j}^{(2)}$ 分别为对应于中断和非中断事件的转移概率。基于式(14),马尔科夫链的状态转移可分为8种类型,其对应的转移概率可确定如下。

(1) 电池保持空状态 ($s_0 \rightarrow s_k \rightarrow s_0$)

在这种类型下,对 $s_0 \rightarrow s_0 \rightarrow s_0$ 发生中断事件;对 $s_0 \rightarrow s_k \rightarrow s_0$ 发生非中断事件且有 $1 \leq k \leq L+1$ 。因此,对应于中断和非中断事件的转移概率分别为 $\bar{P}_{0,0} = P_{0,0}^{(1)} \bar{P}_{0,0}^{(2)}$ 和 $\tilde{P}_{0,0} = \sum_{k=1}^{L+1} P_{0,k}^{(1)} \tilde{P}_{k,0}^{(2)}$, 其中

$$P_{0,k}^{(1)} = \begin{cases} \Pr\{\varphi_{h_1} < \varphi_1\} & k=0 \\ \Pr\{\varphi_{h_1} \geq p_b\} & k=L+1 \\ \Pr\{\varphi_k \leq \varphi_{h_1} < \varphi_{k+1}\} & \text{其他} \end{cases} = \begin{cases} F_{g_1}\left(\frac{\varphi_1}{\alpha\eta_h p_s}\right) & k=0 \\ \bar{F}_{g_1}\left(\frac{p_b}{\alpha\eta_h p_s}\right) & k=L+1 \\ F_{g_1}\left(\frac{\varphi_{k+1}}{\alpha\eta_h p_s}\right) - F_{g_1}\left(\frac{\varphi_k}{\alpha\eta_h p_s}\right) & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

$$\bar{P}_{0,0}^{(2)} = \Pr\{\varphi_{h_2} < \varphi_1\} = F_{g_1}\left(\frac{\varphi_1}{(1-\alpha)\eta_h p_s}\right) \quad (16)$$

$$\tilde{P}_{k,0}^{(2)} = \Pr\{(\varphi_{k-1} < \varphi_r \leq \varphi_k) \cap (\gamma_r \geq \gamma_{th})\} = \bar{F}_{g_1}\left(\frac{\gamma_{th}\sigma_r^2}{p_s}\right) \left(F_{g_2}\left(\frac{(1-\alpha)\gamma_{th}\sigma_d^2}{2\eta_t\varphi_{k-1}}\right) - F_{g_2}\left(\frac{(1-\alpha)\gamma_{th}\sigma_d^2}{2\eta_t\varphi_k}\right) \right) \quad (17)$$

依据上述表示,这种类型的转移概率可表示为 $P_{0,0} = \bar{P}_{0,0} + \tilde{P}_{0,0}$ 。

(2) 空电池部分充电 ($s_0 \rightarrow s_k \rightarrow s_j; 0 < j < L+1$)

对此种类型,中断事件对应于 $0 \leq k \leq j$;非中断事件对应于 $j+1 \leq k \leq L+1$ 。相应的转移概率可分别表示为 $\bar{P}_{0,j} = \sum_{k=0}^j P_{0,k}^{(1)} \bar{P}_{k,j}^{(2)}$ 和 $\tilde{P}_{0,j} = \sum_{k=j+1}^{L+1} P_{0,k}^{(1)} \tilde{P}_{k,j}^{(2)}$, 其中 $P_{0,k}^{(1)}$ 由式(15)给出,且有

$$\begin{aligned} \bar{P}_{k,j}^{(2)} &= \Pr\{(\varphi_j - \varphi_k \leq \varphi_{j+1} - \varphi_k) \cap ((\varphi_k < \varphi_r) \cap (\gamma_r \geq \gamma_{th})) \cup (\gamma_r < \gamma_{th})\} = \\ &\left(F_{g_1}\left(\frac{\varphi_{j+1} - \varphi_k}{(1-\alpha)\eta_h p_s}\right) - F_{g_1}\left(\frac{\varphi_j - \varphi_k}{(1-\alpha)\eta_h p_s}\right) \right) \left(F_{g_2}\left(\frac{(1-\alpha)\gamma_{th}\sigma_d^2}{2\eta_t\varphi_k}\right) \bar{F}_{g_1}\left(\frac{\gamma_{th}\sigma_r^2}{p_s}\right) + F_{g_1}\left(\frac{\gamma_{th}\sigma_r^2}{p_s}\right) \right) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\tilde{P}_{k,j}^{(2)} = \Pr\{(\varphi_k - \varphi_{j+1} < \varphi_r \leq \varphi_k - \varphi_j) \cap (\tilde{\gamma}_R \geq \gamma_{th})\} = \bar{F}_{g_1}\left(\frac{\gamma_{th}\sigma_r^2}{p_s}\right) \left(F_{g_2}\left(\frac{(1-\alpha)\gamma_{th}\sigma_d^2}{2\eta_t(\varphi_k - \varphi_{j+1})}\right) - F_{g_2}\left(\frac{(1-\alpha)\gamma_{th}\sigma_d^2}{2\eta_t(\varphi_k - \varphi_j)}\right) \right) \quad (19)$$

依据上述表示,此种类型的转移概率可表示为 $P_{0,j} = \bar{P}_{0,j} + \tilde{P}_{0,j}$

(3)空电池完全充满 ($s_0 \rightarrow s_k \rightarrow s_{L+1}$)

对这种类型,空电池在分组结束时完全充满。对应于中断事件的转移概率为

$$\bar{P}_{0,L+1} = \sum_{k=0}^{L+1} P_{0,k}^{(1)} \bar{P}_{k,L+1}^{(2)} \quad (20)$$

式中 $P_{0,k}^{(1)}$ 由式(15)给出,且有

$$\begin{aligned} \bar{P}_{k,L+1}^{(2)} = & \Pr\left\{\left(\left(\varphi_k < \varphi_r\right) \cap \left(\gamma_r \geq \gamma_{th}\right)\right) \cup \left(\gamma_r < \gamma_{th}\right) \cap \left(\varphi_{h_2} \geq p_b - \varphi_k\right)\right\} = \\ & \left(F_{g_2}\left(\frac{(1-\alpha)\gamma_{th}\sigma_d^2}{2\eta_i\varphi_k}\right)\bar{F}_{g_1}\left(\frac{\gamma_{th}\sigma_r^2}{p_s}\right) + F_{g_1}\left(\frac{\gamma_{th}\sigma_r^2}{p_s}\right)\right)\bar{F}_{g_1}\left(\frac{p_b - \varphi_k}{(1-\alpha)\eta_h p_s}\right) \end{aligned} \quad (21)$$

由于在第二时隙没有放电,对应于非中断事件的转移概率为 $\tilde{P}_{0,L+1} = 0$ 。据此,这种类型的转移概率为 $P_{0,L+1} = \bar{P}_{0,L+1}$ 。

(4)电池保持满状态 ($s_{L+1} \rightarrow s_{L+1} \rightarrow s_{L+1}$)

对此种类型,电池在第一时隙开始时就处于满状态,从而不能在第一时隙进行能量收集。在第二时隙分为两种情况:(a)需求的发射能量高于电池能量且满足 $\gamma_r \geq \gamma_{th}$; (b) $\gamma_r < \gamma_{th}$ 。在这种类型中 $\bar{P}_{L+1,L+1} = P_{L+1,L+1}^{(1)} \bar{P}_{L+1,L+1}^{(2)}$,其中 $P_{L+1,L+1}^{(1)} = 1$,而对 $\bar{P}_{L+1,L+1}^{(2)}$ 可通过将 $k=L+1$ 和 $\varphi_{L+1} = p_b$ 代入式(21)获得。因此,有

$$\bar{P}_{L+1,L+1} = F_{g_2}\left(\frac{(1-\alpha)\gamma_{th}\sigma_d^2}{2\eta_i p_b}\right)\bar{F}_{g_1}\left(\frac{\gamma_{th}\sigma_r^2}{p_s}\right) + F_{g_1}\left(\frac{\gamma_{th}\sigma_r^2}{p_s}\right) \quad (22)$$

由于在第二时隙没有进行放电,有 $\tilde{P}_{L+1,L+1} = 0$ 。据此,该类型的转移概率可表示为 $P_{L+1,L+1} = \bar{P}_{L+1,L+1}^{(2)}$ 。

(5)非空非满的保持不变 ($s_i \rightarrow s_k \rightarrow s_i; 0 < i < L+1$)

在这种类型下,对应于中断事件的转移概率为 $\bar{P}_{i,i} = P_{i,i}^{(1)} \bar{P}_{i,i}^{(2)}$,其中

$$P_{i,i}^{(1)} = \Pr\{\varphi_{h_1} < \varphi_1\} = F_{g_1}\left(\frac{\varphi_1}{\alpha\eta_h p_s}\right) \quad (23)$$

而对 $\bar{P}_{i,i}^{(2)}$,可通过将 $k=j=i$ 代入式(18)获得,即

$$\bar{P}_{i,i}^{(2)} = F_{g_1}\left(\frac{\varphi_1}{(1-\alpha)\eta_h p_s}\right)\left(F_{g_2}\left(\frac{(1-\alpha)\gamma_{th}\sigma_d^2}{2\eta_i\varphi_1}\right)\bar{F}_{g_1}\left(\frac{\gamma_{th}\sigma_r^2}{p_s}\right) + F_{g_1}\left(\frac{\gamma_{th}\sigma_r^2}{p_s}\right)\right) \quad (24)$$

对应于非中断事件的转移概率为 $\tilde{P}_{i,i} = \sum_{k=i+1}^{L+1} P_{i,k}^{(1)} \tilde{P}_{k,i}^{(2)}$,其中

$$P_{i,k}^{(1)} = \begin{cases} \Pr\{\varphi_{h_1} \geq p_b - \varphi_i\} & k=L+1 \\ \Pr\{\varphi_k - \varphi_i \leq \varphi_{h_1} < \varphi_{k+1} - \varphi_i\} & \text{其他} \end{cases} = \begin{cases} \bar{F}_{g_1}\left(\frac{p_b - \varphi_i}{\alpha\eta_h p_s}\right) & k=L+1 \\ F_{g_1}\left(\frac{\varphi_{k+1} - \varphi_i}{\alpha\eta_h p_s}\right) - F_{g_1}\left(\frac{\varphi_k - \varphi_i}{\alpha\eta_h p_s}\right) & \text{其他} \end{cases} \quad (25)$$

而对 $\tilde{P}_{i,i}^{(2)}$,可通过将 $j=i$ 代入式(19)获得。据此,此种类型的转移概率为 $P_{i,i} = \bar{P}_{i,i} + \tilde{P}_{i,i}$ 。

(6)非空非满电池完全充满 ($s_i \rightarrow s_k \rightarrow s_{L+1}; 0 < i < L+1$)

在这种类型下,由于电池没有放电,有 $\tilde{P}_{i,L+1} = 0$ 。该类型的转移概率为

$$P_{i,L+1} = \bar{P}_{i,L+1} = \sum_{k=1}^{L+1} P_{i,k}^{(1)} \bar{P}_{k,L+1}^{(2)} \quad (26)$$

式中 $P_{i,k}^{(1)}$ 和 $\bar{P}_{k,L+1}^{(2)}$ 分别由式(25)和式(21)给出。

(7)非空非满电池部分充电 ($s_i \rightarrow s_k \rightarrow s_j; 0 < i < j < L + 1$)

在这种类型下,对应于中断和非中断事件的转移概率分别为

$$\bar{P}_{i,j} = \sum_{k=1}^j P_{i,k}^{(1)} \bar{P}_{k,j}^{(2)} \quad (27)$$

$$\tilde{P}_{i,j} = \sum_{k=j+1}^{L+1} P_{i,k}^{(1)} \tilde{P}_{k,j}^{(2)} \quad (28)$$

式中: $P_{i,k}^{(1)}$, $\bar{P}_{k,j}^{(2)}$ 和 $\tilde{P}_{k,j}^{(2)}$ 分别由式(25)、式(18)和式(19)给出。据此,此种类型的转移概率为 $P_{i,j} = \bar{P}_{i,j} + \tilde{P}_{i,j}$ 。

(8)非空电池放电 ($s_i \rightarrow s_k \rightarrow s_j; 0 \leq j < i \leq L + 1$)

在此类型下,由于 $j < i$,则电池始终放电,从而有 $\bar{P}_{i,j} = 0$ 。则该类型的转移概率可表示为

$$P_{i,j} = \tilde{P}_{i,j} = \sum_{k=1}^{L+1} P_{i,k}^{(1)} \tilde{P}_{k,j}^{(2)} \quad (29)$$

式中, $P_{i,k}^{(1)}$ 和 $\tilde{P}_{k,j}^{(2)}$ 分别由式(25)和式(19)给出。

由文献[10]的命题1可知,转移矩阵 P 为不可约且行统计。据此,马尔科夫链的稳态分布可按式(30)计算^[18]

$$\boldsymbol{\pi} = (\boldsymbol{P}^T - \boldsymbol{I} + \boldsymbol{B})^{-1} \boldsymbol{b} \quad (30)$$

式中: $(L + 2) \times (L + 2)$ 维的矩阵 B 的 i 行 j 列元素为 $B_{i,j} = 1$; $\boldsymbol{b} = [1, 1, \dots, 1]^T$ 为 $(L + 2) \times 1$ 维的矢量。与每一传输分组内的两步状态转移相对应,当第二时隙没发生电池放电行为时,中断事件发生,这使得电池的能量状态在第二时隙呈现非减的现象,即对 $s_i \rightarrow s_k \rightarrow s_j$ 有 $k \leq j$,且对应的转移概率为 $\bar{P}_{i,j}$ 。据此,基于分组内时间切换的HTS模式的中断概率可表示为

$$P_{\text{out}} = \sum_{i=0}^{L+1} \pi_i \sum_{j=i}^{L+1} \bar{P}_{i,j} \quad (31)$$

对服务质量(Quality of service, QoS)有约束的系统,其成传速率定义为满足中断概率门限时的平均吞吐量^[19],即

$$R_s = \begin{cases} (1 - \alpha)(1 - \epsilon)R & P_{\text{out}} \leq \epsilon \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (32)$$

式中: R 为延迟受限系统预先设定的固定传输速率, ϵ 为系统要求的中断概率门限^[20-21]。式(32)表明,中断概率对成传速率有着决定性的影响:只有当中断概率小于或等于系统要求的中断概率门限时,才可能取得非零的成传概率;当中断概率大于系统要求的中断概率门限时,对应的成传概率为零。

通过对比基于分组内时间切换和跨分组时间切换的HTS模式,可看出基于分组内时间切换的HTS模式在 $\alpha = 0$ 时简化为跨分组时间切换的HTS模式。因此,上述分析框架可直接应用于现有的跨分组时间切换的HTS模式,相应的中断概率可通过将 $\alpha = 0$ 代入式(31)计算得到。

3 仿真结果

本节对所提HTS模式的系统性能进行仿真验证。在仿真中,信道的平均增益设置为 $E\{g_1\} = E\{g_2\} = 10^{-4}$, Nagasaki- m 衰落的形状系数为 $m_1 = 3$ 和 $m_2 = 2$ 。电池容量设置为 $p_b = \rho p_s$, 其中 $\rho = m_1 \theta_1$ 。电池能量状态的实际数目设置为 $\tilde{L} + 2$, 其中 $\tilde{L} = \min\{L, dp_b / \varphi_{\min} t - 1\}$, $\varphi_{\min} = -27$ dBm 为能量收集单元的接收灵敏度^[16]。噪声功率为 $\sigma_r^2 = \sigma_d^2 = -90$ dBm, 能量转换系数和利用系数分别为 $\eta_b =$

0.4 和 $\eta_t = 0.7$ 。考虑实际的信道衰落和链路预算,延迟受限系统的固定传输速率设置为 $R=3 \text{ b/s/Hz}$ [20-21]。为方便对比,本节将文献[10]的常规 HTS 模式的仿真结果标注为“C-HTS”。

图 2 给出了中断概率随 α 变化的曲线。在图 2 的仿真中,设置 $p_s = 30 \text{ dBm}$ 。从图 2 可以看出,跨分组时间切换的 HTS 模式取得了最高的中断概率。当采用 C-HTS 模式 ($\alpha = 0$) 和 $L = 50$ 时,对应的中断概率为 0.05,这远高于现代无线通信系统要求的 $0.01^{[19]}$ 。当 α 从 0 增加到 0.99 时,由非零的 α 所取得的中断概率显著降低。即使是分配一小部分分组时段用于分组内时间切换,如 $\alpha = 0.15$,所取得的中断概率可以降低到 10^{-6} 以下。当 L 从 30 增加到 50 时,对应的中断概率降低。此外,图 2 的结果验证了本文所提分析方法的正确性。

图 3 给出了成传速率随 α 变化的结果。在图 3 的仿真中,设置 $p_s = 30 \text{ dBm}$ 和 $\epsilon = 0.01$ 。从图 3 可以看出,C-HTS 模式 ($\alpha = 0$) 在 $L = 30$ 和 50 时只取得了为零的成传速率。造成这一现象的原因是 C-HTS 模式在 $L = 30$ 和 50 时,系统取得的中断概率大于 ϵ (见图 2)。作为对比,基于分组内时间切换的 HTS 模式在很大的 α 范围内都取得了非零的成传速率。当 α 增加时,基于分组内时间切换的 HTS 模式所取得的成传速率降低。此外, $L = 50$ 的配置取得了比 $L = 30$ 的配置更宽的非零成传速率的 α 范围。由于成传速率相比平均吞吐量具有更重要的实际意义^[19],图 3 的结果表明基于分组内时间切换的 HTS 模式取得了远优于 C-HTS 模式的系统性能。图 3 的结果还表明,当 α 的数值小于某一门限值时,系统取得的成传速率为零。造成这一现象的原因在于过小的 α 导致收集的能量太少,不能保证接收译码所需的中继发射功率。

图 4 给出了中断概率随信源发射功率变化的曲线。由于式(31)表示的中断概率呈现出稳态分布元素和转移矩阵元素双重累加的形式,闭合形式的最优化 α 难以获得。受图 2 和图 3 结果的启发,为取得较小的中断概率, α 不应太小;为保证取得大的成传速率, α 的数值也不能太大。因此,在图 4 的仿真中,为基于分组内时间切换的 HTS 设置 $\alpha = 0.1$ 。对 C-HTS 模式 ($\alpha = 0$),当 $L = 30, 50$ 和 200 时,其取得的中断概率在 p_s 超过一个较大值时均出现了中断概率地板效应。同时,即使对 $L = 200$ 的情况,C-HTS 模式取得的中断概率也高于 0.01。图 4 的结果表明:基于分组内时间切换的 HTS 模式可以大幅度降低中断概率。例如,当 $L = 38$,其取得的中断概率在中高 p_s 范围内均低于 10^{-4} 。当 L 增加时,对应的中断概率可进一步降低。

图 5 研究了成传速率随 p_s 变化的趋势。在图 5 的仿真中,设置 $\epsilon = 0.015$ 和 $L = 50$ 。图 5 的结果表明:在整个 p_s 范围内,C-HTS 模式只取得了为零的成传速率。因此,C-HTS 模式的性能完全不能满足具有 QoS 约束的系统要求。另一方面,基于分组内时间切换的 HTS 模式在较宽的 p_s 范围内取得了非

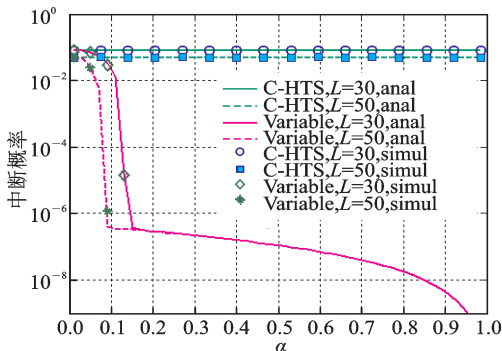


图 2 中断概率随 α 变化的关系
Fig.2 Outage probability versus α

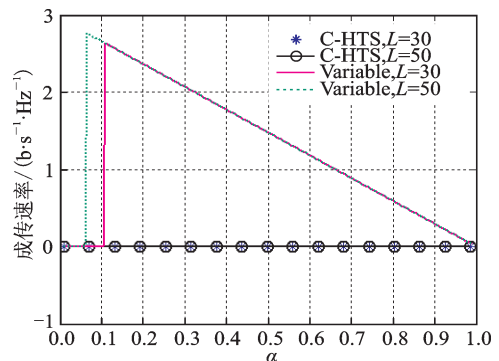
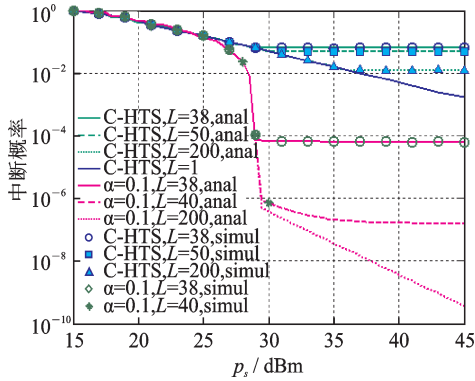
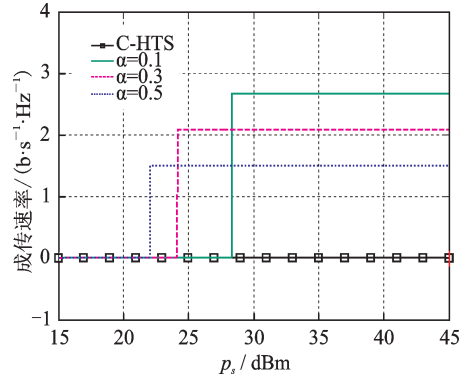


图 3 成传速率随 α 变化的关系
Fig.3 Successful rate versus α

零的成传速率。当 α 增加时,其取得的成传速率有所降低,但其非零成传速率对应的 p_s 范围变得更宽。此外,当 p_s 小于某一门限值时,系统所取得的成传速率为零。造成这一现象的原因在于过小的 p_s 导致过小的收集能量,不能保证接收译码所需的中继发射功率。图5的结果表明:基于分组内时间切换的HTS模式相比C-HTS模式具有重要的实际价值。

图4 中断概率随 p_s 变化的关系Fig.4 Outage probability versus p_s 图5 成传速率随 p_s 变化的关系Fig.5 Successful rate versus p_s

4 结束语

随着物联网泛在应用的普及,SWIPT已成为万物互连重要的使能手段之一。本文针对译码转发的无线中继网络提出了一种基于分组内时间切换的HTS模式,在每一传输分组中将部分时隙用于能量收集。针对电池动态的充电-放电/充电-充电行为,本文将建模为具有两步状态转移的有限状态的马尔科夫链。基于这一全新的分析框架,现有的跨分组时间切换的HTS模式可被看作是基于分组内时间切换的HTS模式的一种特例。最后本文给出了基于分组内时间切换的HTS模式在Nakagami- m 衰落信道下的中断概率和成传速率闭合式。仿真结果表明:本文所提基于分组内时间切换的HTS模式相比跨分组时间切换的HTS模式可大幅度提高中断性能和成传速率。

参考文献:

- [1] 杨绿溪,何世文,王毅,等.面向5G无线通信系统的关键技术综述[J].数据采集与处理,2015,30(3):469-485.
Yang Lüxi, He Shiwen, Wang Yi, et al. Key technologies for 5G wireless communication system[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2015, 30(3): 469-485.
- [2] 周一青,潘振岗,翟国伟.第五代移动通信系统5G标准化展望与关键技术研究[J].数据采集与处理,2015,30(4):714-724.
Zhou Yiqing, Pan Zhengang, Zhai Guowei. Standardization and key technologies for future fifth generation of mobile communication systems[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2015, 30(4): 714-724.
- [3] Nasir A, Zhou X, Durrani S, et al. Relaying protocols for wireless energy harvesting and information processing[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(7): 3622-3636.
- [4] Zhou X, Durrani S, Kennedy R. Throughput and ergodic capacity of wireless energy harvesting based DF relaying network[C]// Proc IEEE ICC 2014. Sydney, Australia: [s.n.], 2014: 4066-4071.
- [5] Ding Z, Perlaza S M, Esnaola I, et al. Power allocation strategies in energy harvesting wireless cooperative networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(2): 846-860.
- [6] Sasaki K S, Timotheou S, Ding Z. A low complexity antenna switching for joint wireless information and energy transfer in MIMO relay channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(5): 1577-1587.

- [7] Zhou Z, Peng M, Zhao Z, et al. Joint power splitting and antenna selection in energy harvesting relay channels[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 22(7): 823-827.
- [8] Ding Z, Zhong C, Ng D W K, et al. Application of smart antenna technologies in simultaneous wireless information and power transfer[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(4): 86-93.
- [9] Chen H, Li Y, Jiang Y, et al. Distributed power splitting for SWIPT in relay interference channels using game theory[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 14(1): 410-420.
- [10] Timotheou K S, Sasaki S. RF energy transfer for cooperative networks: Data relaying or energy harvesting[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(11): 1772-1775.
- [11] Gu Y, Chen H, Li Y, et al. A discrete time-switching protocol for wireless-powered communications with energy accumulation [C]//Proc IEEE GLOBECOM 2015. San Diego, USA: [s.n.], 2015: 1-6.
- [12] Krikidis S. Relay selection in wireless powered cooperative networks with energy storage[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(12): 2596-2610.
- [13] Gu Y, Chen H H, Li Y, et al. Distributed multi-relay selection in wireless-powered cooperative networks with energy accumulation[C]//Proc IEEE ICC 2016. London, UK:[s.n.], 2016: 1-6.
- [14] Khan T A, Heath R W, Popovski P. On wirelessly powered communications with short packets[C]//Proc IEEE GLOBECOM 2016. Washington, USA: [s.n.], 2016: 1-6.
- [15] Zeng Y, Zhang R. Optimized training design for wireless energy transfer[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63 (2): 536-550.
- [16] Stoopman M, Keyrouz S, Visser H J, et al. Co-design of a CMOS rectifier and small loop antenna for highly sensitive RF energy harvesters[J]. IEEE Journal on Solid-State Circuits, 2014, 49(3): 622-634.
- [17] Huang W J, Hong Y W P, Kuo C C J. Lifetime maximization for amplify-and-forward cooperative networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(5): 1800-1805.
- [18] Charalambous T, Thompson J S. Buffer-aided relay selection for cooperative diversity systems without delay constraints[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(5): 1957-1967.
- [19] Wu P, Jindal N. Performance of hybrid-ARQ in block-fading channels: A fixed outage probability analysis[J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(4): 1129-1141.
- [20] Liu H, Kim K J, Kwak K S, et al. Power splitting-based SWIPT with decode-and-forward full-duplex relaying[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(11): 7561-7577.
- [21] Liu H, Kim K J, Kwak K S, et al. QoS-constrained relay control for full-duplex relaying with SWIPT[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(5): 2936-2949.

作者简介:



鲁聪聪(1992-),女,硕士研究生,研究方向:无线信息与能量传输, E-mail: 1301279590@qq.com。



刘洪武(1975-),男,教授,研究方向:物理层安全通信、大规模MIMO技术、无线能量传输、无人机协作通信。

(编辑:夏道家)