

引用格式:张清宾,李世宝. 基于神经网络的 SWIPT 接收机资源分配策略[J]. 微电子学与计算机, 2020, 37(3): 76-82.
[ZHANG Q B, LI S B. SWIPT receiver resource allocation strategy based on neural network [J]. Microelectronics & Computer, 2020, 37(3): 76-82.]

基于神经网络的 SWIPT 接收机资源分配策略

张清宾, 李世宝

(中国石油大学(华东) 计算机与通信工程学院, 山东 青岛 266580)

摘 要: 无线携能通信 (Simultaneously Wireless Information and Power Transfer, SWIPT) 作为一种新兴的用于能量受限网络的技术近来受到广泛关注, 但现有 SWIPT 接收机资源分配策略只考虑实现当前时刻内网络最佳性能, 没有考虑未来时刻内的网络性能优劣, 无法满足服务质量要求高的网络. 针对此问题提出了一种基于神经网络的接收机资源分配策略, 首先从能量和时间的角度分别考虑延迟受限 (Delay-Limited, DL) 传输模式下的网络中断概率及其相应的中断区域, 推导出理论上实现最大吞吐量的资源分配策略, 然后利用神经网络预测未来时隙信道状态信息动态调整此策略. 实验结果表明在不同信道状态下, 所提策略能够实现更为稳定的网络性能.

关键词: 无线携能通信; 资源分配策略; 中断概率; 神经网络; 吞吐量

中图分类号: TN925

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2020)03—0076—07

SWIPT receiver resource allocation strategy based on neural network

ZHANG Qing-bin, LI Shi-bao

(School of Computer and Communication Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: Simultaneously Wireless Information and Power Transfer (SWIPT) has been widely used as an emerging technology for energy-constrained networks. The existing SWIPT receiver resource allocation strategy only considers the optimal performance of the network at the current time. The network performance in the future is not considered, and the network with high quality of service requirements cannot be met. Aiming at this problem, a receiver resource allocation strategy based on neural network is proposed. The outage probability and its corresponding interrupt region in Delay-Limited (DL) transmission mode are considered from the perspective of energy and time. The resource allocation strategy that achieves the maximum throughput theoretically uses the neural network to predict the future time slot channel state information to dynamically adjust this strategy. The experimental results show that the proposed strategy can achieve more stable network performance under different channel conditions.

Key words: simultaneously wireless information and power transfer; resource allocation strategy; outage probability; neural network; throughput

收稿日期: 2019—05—30; 修回日期: 2019—06—21

基金项目: 国家自然科学基金青年资金资助项目 (61601519, 61872385); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (18CX02134A, 18CX02137A, 18CX02133A)

1 引言

SWIPT 网络能够同时进行能量收集 (Energy-Harvesting, EH) 和信息传输 (Information Transfer, IT), 由于能量和时间资源有限, 一方占用更多资源会导致用于另一方的资源减少, 所以 SWIPT 网络存在速率-能量权衡, 这种权衡即为 SWIPT 接收机所采取的资源分配策略。

文献[1-10]的研究大多是在假设接收机处已知信道状态信息的前提下进行, 并把实现当前时刻网络性能最优作为主要目的, 未考虑未来时刻网络的性能, 在不考虑信道估计的能耗时, 这种策略能够较为准确的分配有限的资源, 但实际上信道估计获得信道状态信息的过程会消耗能量, 这大大降低了 SWIPT 网络的性能。由于环境射频信号的多样性与不确定性, 环境射频能量收集过程在存在多个环境射频源的情况下, 一些文献将射频源建模为点过程进行分析, 包括泊松点过程 (PPP)^[11], Ginbre 点过程 (GPP)^[12], 但建模为点过程会将系统变得更加复杂。

基于马尔可夫决策过程 (Markov Decided Processing, MDP) 的资源分配通过提前确定网络的状态空间, 利用当前时隙网络的状态信息预测下一时隙的网络状态^[13-15], 但是此策略同样未考虑未来时隙内的网络性能。

为了实现在未来时隙内 SWIPT 网络性能的稳定, 在上述讨论的推动下, 部署放大转发 (AF) SWIPT 中继网络模型, 在 TS 架构下研究了延迟受限传输, 从能量和时间角度推导出确切的能量中断区域和信息传输中断区域, 并确定出不同信道条件下终端节点实现最大吞吐量的资源分配策略。利用 ANN 预测未来时隙内的信道状态信息 (CSI), 并根据下一时隙的信道状态动态调整该时隙资源分配策略以实现未来时隙内整体网络性能的稳定, 为了便于计算, 本文将 CSI 进行了归一化处理。

2 系统模型与分析

考虑网络模型如图 1 所示, 由多个射频源 (表示为集合 K , 满足 PPP)、一个中继节点 R 以及一个终端节点 D 组成, 射频源发送的信息流通过带有能量收集功能的中继节点传输到终端节点, 网络的信道类型为瑞利衰落信道, 从射频源到中继节点以及从中继节点到信息接收机的信道增益分别由 h 和 g 表示, 平均值则分别用 H 和 G 来表示。从射频源到中

继节点以及从中继节点到信息接收机的距离分别由 d_1 和 d_2 表示。本文考虑了 N 个射频源, 故射频源到中继节点之间的不同参数都存在 N 个值, 用 i 表示 ($i = 1:N$)。假设环境噪声为一定值, 在一个时隙内各参数保持不变。TS 架构基于时隙工作, 其接收机仅配备一根天线, 在任意时隙内的某个时间仅能执行 EH 和 IT 中的一个, 中继节点首先利用一个时隙的 α ($0 \leq \alpha \leq 1$) 部分收集能量, 收集的能量会优先用于电路的正常工作, 然后将剩余的能量存储在有限容量的电池中, 在接下来的 $1 - \alpha$ 部分时间内, 中继节点利用存储在电池中的能量将信息发送给终端节点, 在这 $1 - \alpha$ 部分时间内执行信息接收和信息发送两个过程, 假设两者各占 $1/2$ 。此外, 对于 TS 接收机, 时间切换系数 α 就代表资源分配策略。

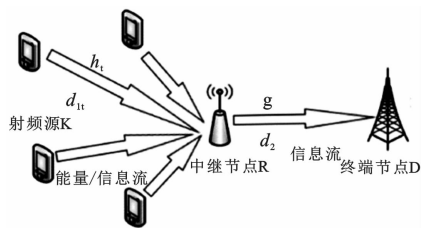


图 1 网络模型

2.1 能量收集

中继节点的接收信号 $S_r(t)$ 可由下式给出:

$$S_r(t) = \sum_{i \in K} \frac{1}{\sqrt{d_{1i}^m}} \sqrt{P_s} h_i u(t) + n_a^r(t) \quad (1)$$

式中, P_s 表示射频源的发射功率, 这里假设所有的射频源拥有相同的发射功率; h_i 表示射频源到收集节点的信道增益系数; d_{1i} 表示射频源到中继节点的距离; m 表示路径损失系数; $u(t)$ 表示是来自射频源的归一化信息信号, $n_a^r(t)$ 表示中继节点处的窄带高斯噪声。

中继节点在瑞利衰落信道下某个时隙内从射频源收集的总能量 P_H 可表示为:

$$P_H = \sum_{i \in K} \eta P_s |h_i|^2 d^{-m} \alpha T \quad (2)$$

式中, η 表示能量收集电路将射频信号转换为直流电能的转换效率; α 表示时间切换系数; T 表示时隙长度。为了便于计算, 本文取 $T = 1$, 维持电路的正常工作需要一个基本电路功率, 定义为 P_C 。假设在由能量收集转换为信息传输过程中没有功率损失, 在任意时隙内的中继节点发射功率可表示为:

$$P_T = \frac{P_H - P_C}{(1 - \alpha)T/2} \quad (3)$$

2.2 信息传输

中继节点接收到来自射频源的信息信号后会对其进行处理再发送给终端节点,具体来说,中继节点将射频信号下变频到基带信号并传送给终端节点,下变频之后的采样基带信号 $S_r(k)$ 可由下式表示:

$$S_r(k) = \sum_{i \in K} \frac{1}{\sqrt{d_{1i}^m}} \sqrt{P_s} h_i u(k) + n_a^r(k) + n_c^r(k) \quad (4)$$

式中, k 表示符号索引; $u(k)$ 表示来自射频源的采样和归一化信息信号; $n_a^r(k)$ 表示由中继节点处的接收天线引起的基带加性高斯白噪声(AWGN); $n_c^r(k)$ 表示由射频信号转换为基带信号引起的抽样AWGN.中继节点放大收到的信号并发送给终端节点,表达式由下式给出:

$$x_r(k) = \frac{S_r(k) \sqrt{P_T}}{\sum_{i \in K} \sqrt{\frac{P_s |h_i|^2}{d_{1i}^m}} + \sigma_{n_a}^2 + \sigma_{n_c}^2} \quad (5)$$

分母部分表示中继节点处的能量约束因子,记为 ϵ ,其可以从接收信号功率获得, $\sigma_{n_a}^2$ 和 $\sigma_{n_c}^2$ 分别表示 $n_a^r(k)$ 和 $n_c^r(k)$ 的方差,终端节点接收到的信号 $S_d(k)$ 可以由下式表示:

$$S_d(k) = \frac{1}{\sqrt{d_{2i}^m}} g x_r(k) + n_a^d(k) + n_c^d(k) \quad (6)$$

$n_a^d(k)$ 和 $n_c^d(k)$ 分别是终端节点处由天线造成的AWGN和由转换造成的AWGN,将公式(3)~(5)代入式(6)可以得到终端节点处接收信号的具体表达式:

$$S_d(k) = \sum_{i \in K} \left[\left(\frac{P_s h_i g u(k) \sqrt{2\eta} |h_i|^2 \alpha}{\sqrt{P_s |h_i|^2 + d_{1i}^m (\sigma_{n_a}^2 + \sigma_{n_c}^2)} \sqrt{(1-\alpha) d_{1i}^m d_{2i}^m}} \right) \rightarrow S + \left(\frac{g(n_a^r(k) + n_c^r(k)) \sqrt{\alpha}}{\sqrt{(1-\alpha) d_{2i}^m \sqrt{P_s |h_i|^2 + d_{1i}^m (\sigma_{n_a}^2 + \sigma_{n_c}^2)}}} + n_a^d(k) + n_c^d(k) \right) \rightarrow N \right] \quad (7)$$

公式(7)中第一部分为信号部分,用 S 表示;第二部分为噪声部分,用 N 表示,终端节点处的信噪比可以用 $\gamma = S/N$ 表示.在不考虑其他因素的情况下,终端节点处可实现的吞吐量可表示为:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (8)$$

式中, B 为传输带宽.

2.3 延迟受限传输

在延迟受限传输模式中,通过固定传输速率评估传输中断概率 P_{to} 来确定终端节点的吞吐量,假设终端节点要求的最小吞吐量为 C_0 bits/slot, $C_0 = B \log_2(1 + \gamma_0)$, γ_0 表示能够实现要求的最小吞吐量的

信噪比.

下面考虑能量中断概率 P_{po} 和信息中断概率 P_{to} ,对于能量中断概率,表示收集到的能量不足以支持电路的正常工作,即 $P(P_H < P_C)$,令 $P_H/(aP_C) = Z$,表示单位时隙内收集到的总能量与电路消耗的能量之比,在 $Z < 1$ 时收集到的能量小于电路消耗,将此视为特殊情况单独考虑,在 $Z > 1$ 时的能量中断概率可由下式表示:

$$\begin{aligned} P_{po} &= P(P_H < P_C) = P\left(\frac{P_H}{aP_C} < \frac{P_C}{aP_C}\right) \\ &= P\left(Z < \frac{1}{\alpha}\right) = \int_1^{Z_{\max}} f_{|h_i|^2}(Z) P\left(Z < \frac{1}{\alpha}\right) \\ &= \int_1^{Z_{\max}} f_{|h_i|^2}(Z) (1 - e^{-Z(\alpha\lambda_{h_i})^{-1}}) dZ (Z > 1) \end{aligned} \quad (9)$$

$Z_{\max}$ 表示单位时隙内所能收集到的最大能量与电路消耗之比, $f_{|h_i|^2}(Z)$ 表示变量 $|h_i|^2$ 的概率密度函数(PDF), λ_{h_i} 表示变量 $|h_i|^2$ 的平均值.

信息中断概率表示终端节点实现的吞吐量小于最小要求的吞吐量的概率,即 $P(C < C_0)$,更具体地说是中继节点到终端节点之间的信噪比小于要求的最小信噪比,即 $P(\gamma < \gamma_0)$.在噪声等外部条件恒定时,信噪比的大小与中继节点处的资源分配策略有着直接的关系,下面从两个角度考虑造成信噪比减小的原因:

(1) 能量受限:包含 $P_H < P_C$ 的情况,具体来说,中继节点用来传输信息的能量不足,使得传输的信息比特数减小,使终端节点处的噪声增大了分量.

(2) 时间受限:在这种情况下,能量不再是限制传输的主要因素,在一个时隙中,当用来收集能量的时间过大时,用来放大传输信息的时间就会减少,这也使得终端节点处的噪声增大了分量.

为了分析这两个因素,定义成功传输一个比特所消耗的能量为 e_0 ,基准传输时间为 t_0 ,由能量受限条件决定的传输中断概率可由 $P(P_H - P_C < e_0 C_0)$ 表示,由时间受限条件决定的传输中断概率由 $P((1-\alpha)T < \beta_0 C_0)$ 表示,其中 $\beta = 1/g$,表示延迟系数, β_0 理解为信道条件越好,成功传输一个比特所耗的时间越少.

$$\begin{aligned} P_{\text{toi}} &= P(P_H - P_C < e_0 C_0) \\ &= P(P_H < e_0 C_0 + P_C) \\ &= P\left(\frac{P_H}{aP_C} < \frac{e_0 C_0}{aP_C} + 1\right) \\ &= \int_1^{Z_{\max}} f_{|h_i|^2}(Z) [1 - e^{-\frac{Z_0 C_0}{aP_C} (1+Z)}] dZ (Z > 1) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
P_{\text{tod}} &= P((1-\alpha)T < \beta_0^t C_0) \\
&= P(\alpha - 1 > -\beta_0^t C_0) \\
&= P(\alpha > -\beta_0^t C_0 + 1) \\
&= \int_0^1 f_{|h_i|^2}(Z) [1 - e^{-(\frac{\alpha}{\beta_0^t C_0 \lambda_g} + 1)}] d\alpha (Z > 1)
\end{aligned} \quad (11)$$

$P_{\text{tou}}, P_{\text{tod}}$ 分别表示由能量受限和时间受限造成的信息传输中断概率,也可表述为信息中断概率的上限和下限,式中 λ_g 表示变量 $|g|^2$ 的平均值。

图2显示了位于中继节点处的接收机在不同能量收集水平下的中断区域,无中断区域为 P_{tou} 与 P_{tod} 所包围的区域。 $Z < 1$ 时同样看作特殊情况,此时网络性能与分配策略无关。 $Z > 1$ 时能量限制中断区域由两部分组成,一是收集的能量小于电路运行消耗能量的区域,二是除去电路消耗的收集能量不足以传输要求最小吞吐量的区域。随着 Z 的增大,曲线趋向于一条与横轴平行的直线,这是由网络的工作阈值引起的,在大于工作阈值时,网络性能保持不变。

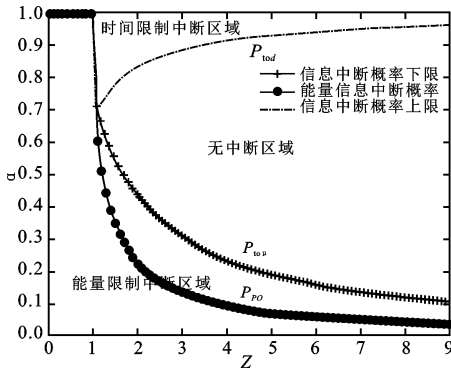


图2 在不同能量收集水平下对应的中断区域

下面从信噪比的角度考虑 P_{to} , 令 $\gamma_0 = 2^{C_0} - 1$.

$$\begin{aligned}
P_{\text{to}} &= P(\gamma < \gamma_0) \\
&= 1 - \frac{1}{\lambda_{h_i}} \int_{d/c}^{\infty} e^{-\left(\frac{z}{\lambda_{h_i}} + \frac{\alpha z + b}{(c_z^2 - dz)\lambda_g}\right)} dz
\end{aligned} \quad (12)$$

$$a = \sum_{i \in K} P_s d_{1i}^m d_2^m (\sigma_{nd_a}^2 + \sigma_{nd_c}^2) \gamma_0 (1 - \alpha) \quad (13)$$

$$b = \sum_{i \in K} d_{1i}^{2m} d_2^m (\sigma_{n_a}^2 + \sigma_{n_c}^2) (\sigma_{n_a}^2 + \sigma_{n_c}^2) \gamma_0 (1 - \alpha) \quad (14)$$

$$c = 2\eta P_s^2 \alpha \quad (15)$$

$$d = \sum_{i \in K} 2\eta P_s d_{1i}^m (\sigma_{n_a}^2 + \sigma_{n_c}^2) \gamma_0 \alpha \quad (16)$$

假设中继节点传送信息的速率为 C bits/s ($C > C_0$), $(1-\alpha)T/2$ 是一个时隙内中继节点向终端节点发送信息的时间,终端节点处考虑中断概率实现的吞吐量可由下式表示:

$$\tau = (1 - P_{\text{to}}) C \frac{(1-\alpha)T/2}{T} \quad (17)$$

如图3所示,终端节点所能实现的吞吐量随时间切换系数先增大后减小,在不同信噪比下都存在一个实现最大吞吐量的最佳时间切换系数,并随着信道条件的提升而减小,这是因为信道条件越好收集能量速度越快,可以剩余更多的时间来传输信息。此外直线 C_0 与曲线相交的左右两点外侧区域对应于图2所表示的中断区域。

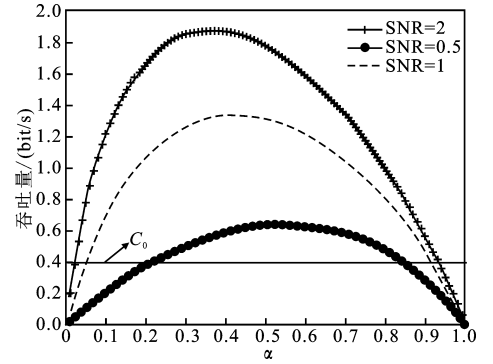


图3 不同信噪比下终端节点实现的吞吐量

3 基于神经网络的 SWIPT 接收机资源分配策略

由于环境噪声等为一定值,网络性能只与信道增益系数和时间切换系数 α 有关,对公式(13)中的 α 求导得出在当前时隙内实现最大吞吐量的资源分配策略 α_{optimal} .

定理1 α_{optimal} 使得 $\frac{\partial \tau}{\partial \alpha} = 0, 0 \leq \alpha_{\text{optimal}} \leq 1$,

$\forall H, G$

由定理1可得 SWIPT 接收机在不同信道增益条件下所实现最大吞吐量的资源分配策略 α_{optimal} , 如图4所示。

图4表示射频源到中继节点的信道增益系数 h_i 的平均值 H 以及中继节点到终端节点信道增益系数 g 的平均值 G 与 α_{optimal} 之间的关系,可以看出信道条件越好对应的 α_{optimal} 越小,并逐渐趋于一个定值, G 与 H 相比下降的更快,说明 G 对于终端节点吞吐量有着更大的影响,这是因为 G 直接影响着终端节点的信息接收。

在上述分析的基础上部署基于神经网络的 SWIPT 接收机资源分配策略,应用 BP 神经网络训练模型。信道状态的好坏除了噪声还与天气,气温,以及地形(遮蔽物)有一定的关系,称为环境因子。为了增加神经网络预测结果的准确性,将这三个环

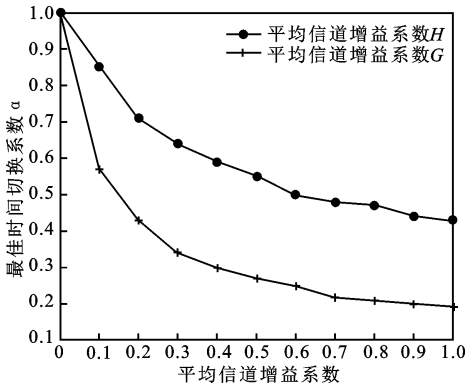


图4 在不同平均信道增益条件下实现最大吞吐量的时间切换系数

境因子也作为网络输入变量,用0表示晴天,1表示雨天,无遮蔽记为0,存在遮蔽记为1.信道状态信息样本采用组内实际测量得到的信道数据,对数据按公式(18)进行归一化处理:

$$\hat{x} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (18)$$

由于存在13个输入向量,所以输入层的神经元有13个,根据Kolmogorov定理可知,网络中间层的神经元可以取27个,假设输出未来10个时隙内的信道状态信息,则输出向量为10,所以输出层的神经元个数也为10.

图5所示为经过ANN预测后对原资源分配策略进行再分配的时隙,阴影区域与空白区域表示原资源分配策略 α_{optimal} ,为了便于表示,图中将 α_{optimal} 标注为 α ,EH和IT标注部分是经过ANN预测再次分配后的资源分配策略.所示的四个时隙中只有slot2是信道状态较差的时隙($C < C_0, \forall \alpha$),为了让该时隙内不出现中断,与之相邻的slot1增加了能量收集时间以提供剩余能量供给信道状态较差的slot2,减少了原本用于传输信息的时间,增加的时间定义为 δ ($\delta < 1$),即 $\alpha = \alpha_{\text{optimal}} + \delta$, δ 的大小取决于较差时隙内的信道增益系数,用于传输信息的时间减小为 $1 - \alpha_{\text{optimal}} - \delta$.同理,slot2增大了用于信息传输的时间,减小了原本用于能量收集的时间,变化的幅度也为 δ ,其余时隙仍以原资源分配策略运行,令 $\delta =$

$\frac{1}{2[1 - (H'_x + G'_x)]}$,此处 H'_x 和 G'_x 表示ANN预测得到的信道状态差的时隙内的平均信道增益系数.传输中断存在于 α 无论为多少都不能满足最小要求吞吐量的时隙,此时存在实现 C_0 的最小平均信道增益系数 $H_{\min}$ 和 $G_{\min}$,又因为 G 对于终端节点吞吐量有着更大的影响,所以此处用 $G_{\min}$ 来判断策略

是否运行.归一化的两个信道的信道状态信息分别记为 M, Q ,三个环境因子分别记为 W_1, W_2, W_3 ,ANN预测得到的两个信道的信道状态信息,分别记为 $M', Q', \alpha_{\text{optimal}}$ 记为 A .

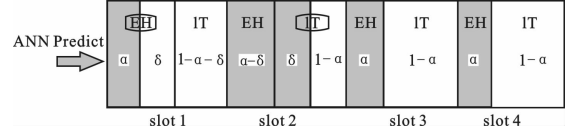


图5 基于神经网络的资源分配策略

基于神经网络的资源分配策略可表示如下:

$$\text{Input } M = (H_1 H_2 \cdots H_n, W_1, W_2, W_3);$$

$$Q = (G_1 G_2 \cdots G_n, W_1, W_2, W_3);$$

Use ANN Predict

$$\text{Output } M' = (H'_1 H'_2 \cdots H'_{10}); \quad Q' = (G'_1 G'_2 \cdots G'_{10})$$

$$\text{Calculate } A = (\alpha_{\text{optimal } 1} \alpha_{\text{optimal } 2} \cdots \alpha_{\text{optimal } 10})$$

$$\text{If } \exists G'_x \in Q' < G_{\min} (x \leq 10)$$

$$\alpha_x = \alpha_{\text{optimal } x} - \frac{1}{2[1 - (H'_x + G'_x)]};$$

$$\alpha_{x-1} = \alpha_{\text{optimal } x-1} + \frac{1}{2[1 - (H'_x + G'_x)]};$$

Else

$$\alpha = \alpha_{\text{optimal}};$$

End

4 结果及分析

本节验证基于神经网络的SWIPT资源分配策略,并与阈值切换(Threshold Switching)资源分配策略以及基于马尔可夫决策过程预测的资源分配策略进行比较.在阈值切换策略内,中继节点处的时间切换系数 α 与公式中(5)中的能量约束因子有关,时

$$\text{间切换系数 } \alpha \text{ 可表示为 } \alpha = \begin{cases} 1 & (P_H < \epsilon) \\ \frac{\epsilon}{P_H} & (P_H > \epsilon) \end{cases}, \text{即在收}$$

集的总能量小于能量约束因子时,该时隙全部时间都用于EH;在MDP预测切换策略中,网络下一时刻的运行策略仅与当前时隙的状态信息有关,假设存在 n 个时隙,策略如下:

(1) 初始化网络状态 S_0 ,并初始化时隙参数 $i = 0$;

(2) 设置时隙 $i = i + 1$;

(3) 中继节点获取网络状态 S_i ;

(4) 计算期望能量收集率 P_H ;

(5) 计算最优功率分配系数 α_i ;

(6) 如果 $i \neq n$, 跳转到步骤 2, 否则结束循环;

图 6 为在高信噪比, 即平均信道增益系数较高的情况下三种接收机资源分配策略的性能, 以在未来各个时隙中所实现的吞吐量作为衡量标准。阈值切换策略在观察时隙内始终保持较为稳定的状态, ANN 预测切换和 MDP 预测切换两种策略在大多数时隙内比阈值切换策略有着更高的吞吐量, 这是因为阈值切换策略需要预先设定一个切换的阈值, 在信道状态好的情况下, 所能实现的吞吐量较为稳定。ANN 预测切换与 MDP 预测切换相比更为稳定, 这是因为所提策略动态调整了较差时隙和其相邻的前一个时隙的最佳时间切换系数, 使得不同时隙内的吞吐量整体更加稳定。MDP 切换策略在之前的时隙性能变化较大是因为定义的第一个时隙的工作状态与最佳的切换策略之间有一定的差距。

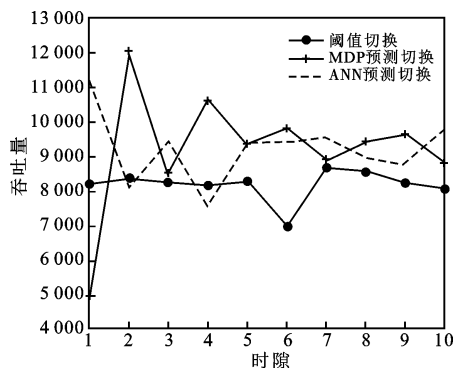


图6 高信噪比条件下的网络性能

图 7 显示了在低信噪比下三种接收机资源分配策略在未来时隙内实现的吞吐量, 在此情况下阈值切换策略出现了吞吐量为 0 的情况, 这是因为在此时隙中无论用多少时间来收集能量仍然不足以用来支持电路的正常工作, 此时网络不能正常工作。ANN 预测切换策略仍然能在各个时隙中保持较高的吞吐量, 但 MDP 预测切换策略在此情况下出现了吞吐量较小的情况。所提策略在两种信道状态下均能保持较为稳定的网络性能, 适用于服务质量要求高的网络。

5 结束语

针对包含多个射频源的放大转发 SWIPT 中继网络, 分别从能量和时间的角度分析网络信息传输中断的原因, 推导出在不同信道增益条件下实现最大吞吐量的接收机资源分配策略, 并据此提出基于神经网络的方法优化此策略, 所提策略根据预测到的信道状态信息对资源分配策略进行再分配。仿真

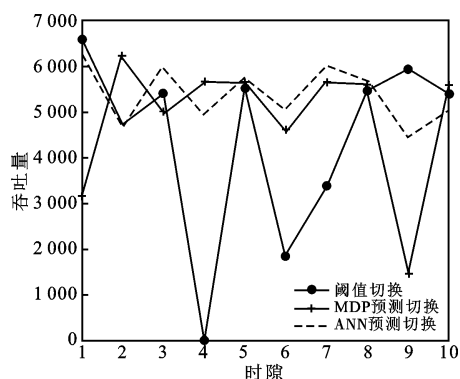


图7 低信噪比条件下的网络性能

结果表明, 所提策略能够在不同信道条件下有效利用有限的能量和时间资源实现网络性能的稳定。下一步的工作将研究使用例如深度学习的方法网络在环境变化情况下的性能。

参考文献:

- [1] ZHANG R, HO C K. MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(5):1989-2001.
- [2] 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.
- [3] NI Z, MOTANI M. Performance of energy-harvesting receivers with time-switching architecture[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(11): 7252-7263.
- [4] LIU L, ZHANG R, CHUA K C. Wireless information transfer with opportunistic energy harvesting[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(1):288-300.
- [5] JU H, ZHANG R. A novel mode switching scheme utilizing random beamforming for opportunistic energy harvesting[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(4):2150-2162.
- [6] KONG H B, FLINT I, WANG P, et al. Exact performance analysis of ambient RF energy harvesting wireless sensor networks with ginibre point process[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016: 1-1. DOI: 10. 1109/GLOCOM. 2014. 7037012
- [7] CHEN H, JIANG Y, LI Y, et al. A game-theoretical model for wireless information and power transfer in relay interference channels[EB/OL]. [http://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid =](http://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=)

- a598e26fe0411ceb07fbc0d98eb609d8&site=xueshu_se . 2014. DOI:10.1109/ISIT.2014.6875015
- [8] ZHOU X, ZHANG R, HO C K . Wireless information and power transfer: architecture design and rate-energy Tradeoff[J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 61(11):4754-4767.
- [9] HU L, ZHANG C, XU J Z . Simultaneous wireless information and power transfer with co-channel, interference [EB/OL]. http://xueshu.baidu.com/user-center/paper/show?paperid=508c287ea7427ee2e3abaaf0a9b5dc90&site=xueshu_se . 2014. DOI:10.1109/PIMRC.2014.7136523
- [10] YANG G, HO C K, ZHANG R, et al. Throughput optimization for massive mimo systems powered by wireless energy transfer[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(8):1.
- [11] SAKR A, HOSSAIN E . Analysis of K-tier uplink cellular networks with ambient RF energy harvesting [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015. DOI:10.1109/JSAC.2015.2435358
- [12] KONG H B, FLINT I, WANG P, et al. Exact Performance Analysis of Ambient RF Energy Harvesting Wireless Sensor Networks With Ginibre Point Process [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016. DOI:10.1109/GLOCOM.2014.7037012
- [13] 杨健, 张晶, 霍彦奇. 具有能量收集功能的无线中继网络资源分配[J]. 无线电通信技术, 2017(6):20-23.
- [14] LU X, WANG P, NIYATO D, et al. Resource allocation in wireless networks with rf energy harvesting and transfer[J]. IEEE Network, 2014, 29(6): 68-75.
- [15] LI W, KU M L, CHEN Y, et al. On outage probability for stochastic energy harvesting communications in fading channels[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2015, 22(11):1893-1897.
- [16] TUAN P V, KOO I. Optimal multiuser MISO beamforming for power-splitting swipt cognitive radio networks[J]. IEEE Access, 2017(5):14141-14153.

作者简介:

张清宾 男,(1995-),硕士研究生.研究方向为无线移动通信. E-mail:m17071002@s.upc.edu.cn.

李世宝 男,(1978-),硕士,副教授.研究方向为移动计算、无线传感网络、干扰对齐.

(上接第 75 页)

- [4] DEMIR A. Computing timing jitter from phase noise spectra for oscillators and phase-locked loops with white and 1/f noise[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems I, 2006, 53(9):1869-1884.
- [5] 吴义华. 利用 ADC 测量时钟技术的研究[D]. 合肥: 中国科技大学, 2007.
- [6] HEYDARI P. Analysis of the PLL jitter due to power/ground and substrate noise[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems I, 2004, 51(12):2404-2416.
- [7] WALT KESTER. Converting Oscillator Phase Noise to Time Jitter[EB/OL]. IEEE Trans on Circuits and Systems I, Application Note MT-008, Analog Devices. <http://www.analog.com>.
- [8] 曹鹏, 王明飞, 费元春. 估算高稳时钟抖动的幂律积分下限研究[J]. 电子学报, 2010, 38(12):2876-2849.
- [9] 吴义华, 杨俊峰, 邓美彩. 几种利用 ADC 采样测量时钟抖动的方法比较[J]. 电子测量与仪器学报, 2007, 21(2):70-76.

- [10] 曹鹏, 费元春. 孔径抖动对中频采样系统信噪比影响的研究[J]. 电子学报, 2004, 32(3):381-383.

作者简介:

刘洁 女,(1987-),硕士,工程师.研究方向为高速高精信号采集技术、卫星数字通信技术、数模混合集成电路设计技术等. E-mail: liujie4213@126.com.

王轩 男,(1986-),硕士,工程师.研究方向为数模混合集成电路设计、抗辐射加固技术、ASIC/SoC 设计技术.

龚科 男,(1982-),硕士,高级工程师.研究方向为卫星数字通信技术、高速数模混合电路设计、抗辐射加固技术等.

马伟 男,(1986-),硕士,工程师.研究方向为卫星数字通信技术、高速数模混合电路设计技术等.

周国昌 男,(1978-),博士,研究员.研究方向为卫星通信技术、抗辐射加固技术、大规模集成电路设计、SOC 设计技术等.

袁雅婧 女,(1983-),博士,副教授.研究方向为抗辐射加固技术、ASIC/SOC 设计技术等.