

能量收集中继安全传输网络的在线功率控制算法

雷维嘉^{①②} 付安琦^{①②} 雷宏江^{*①③} 谢显中^④

^①(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

^②(移动通信技术重庆市重点实验室 重庆 400065)

^③(西安邮电大学陕西省信息通信网络及安全重点实验室 西安 710121)

^④(重庆邮电大学光电工程学院 重庆 400065)

摘要: 针对源节点和中继节点均采用收集能量供电的放大转发中继网络, 考虑两个目的节点之间信息相互保密的场景, 该文提出最大化长期时间平均保密速率的源节点和中继节点发送功率联合优化算法。由于能量到达和信道状态是随机过程, 该问题是一个随机优化问题。利用Lyapunov优化框架将电池操作和能量使用约束下的长期优化问题转化为每时隙的“虚队列漂移加惩罚”最小化问题, 并求解。仿真结果显示该文提出的算法在长期平均保密速率上相较于对比算法具有显著的优势, 同时算法仅依赖于当前的电池状态和信道状态信息做出决策, 是一种实用的、低复杂度的算法。

关键词: 物理层安全; 功率控制; 中继网络; 能量收集; Lyapunov框架

中图分类号: TN918

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)05-1306-09

DOI: 10.11999/JEIT200104

Online Power Control Algorithm for Secure Relay Transmission Network with Energy Harvesting

LEI Weijia^{①②} FU Anqi^{①②} LEI Hongjiang^{①③} XIE Xianzhong^④

^①(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

^②(Chongqing Key Laboratory of Mobile Communications Technology, Chongqing 400065, China)

^③(Shaanxi Key Laboratory of Information Communication Network and Security, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

^④(School of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: For amplify-and-forward relay networks where both the source node and the relay node are powered by the harvested energy and the information for the two destination nodes are required to keep secrecy each other, an algorithm is proposed to maximize the long-term average secrecy rate by jointly optimizing the transmission power of the source node and the relay node. Since the energy arrivals and channel states are stochastic processes, the problem is a stochastic optimization problem. The Lyapunov optimization framework is used to transform the long-term optimization problem into a “virtual queue drift plus penalty” minimization problem per time slot under the constraints of battery operation and energy using. The transformed optimization problem is solved. The simulation results show that the proposed algorithm has significant advantages over the comparison algorithms in the long-term average secrecy rate. Furthermore, the proposed algorithm only depends on the current battery state and channel state to make the decision, which is a practical and low-complexity algorithm.

收稿日期: 2020-02-14; 改回日期: 2020-11-27; 网络出版: 2020-12-05

*通信作者: 雷宏江 leihj@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61971080, 61471076); 重庆市教委科学技术研究重点项目(KJZD-K201800603, KJZD-M201900602); 陕西省信息通信网络及安全重点实验室开放课题基金(ICNS201807)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61971080, 61471076), The Key Project of Science and Technology Research of Chongqing Education Commission (KJZD-K201800603, KJZD-M201900602), The Open Fund of the Shaanxi Key Laboratory of Information Communication Network and Security (ICNS201807)

Key words: Physical layer security; Power control; Relay networks; Energy harvesting; Lyapunov framework

1 引言

从周边环境收集能量, 并将其转化为电能支持通信网络的运行, 是一种减少传统能量消耗、减轻环境污染的绿色通信技术^[1]。能量收集(Energy Harvesting, EH)技术是解决物联网(Internet of Things, IoT)这种节点众多的网络中, 节点供电问题的有效手段。由于环境中的能量源具有较大的波动性, 虽然一般都配备有充电电池对能量进行缓冲, 但收集能量节点的电量供应仍然存在较大的不稳定性 and 不确定性。而无线通信系统中还存在信道的随机衰落, 如何根据收集能量的情况和信道的衰落状态, 对能量使用进行合理的调度是影响EH系统性能的重要因素, 其中发送机的发送功率控制是目前研究较多的问题。相关文献中提出的功率控制策略可分为离线控制策略和在线控制策略两类。离线控制策略需要提前获得整个通信过程中信道衰落状态和能量到达过程的信息, 实际上是一种不可实用的策略, 但其一般具有较好的性能, 常作为相同系统模型下在线策略研究时的性能参考。在能量到达时间和数量事先已知的条件下, 文献[2]研究源节点由EH装置供电且配备容量无限大电池时, 采用离线功率控制策略时加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)信道的容量。文献[3]针对源节点和中继具有EH装置的三节点正交中继信道, 在能量到达时间和数量事先已知的前提下, 对源和中继的发送功率进行优化控制, 最大化吞吐量。在线控制策略不要求事先获得能量收集和信道衰落情况, 是可能实用的策略。在可获得能量到达和信道衰落的统计信息的情况下, 将功率控制问题建模为马尔科夫决策过程(Markov Decision Process, MDP)并应用动态规划(Dynamic Programming, DP)求解是相关文献中研究较多的在线功率控制解决方案。如文献[4]研究有限时间范围内点对点系统时间选择性衰落信道上的在线功率控制问题, 以平均系统速率最大化为目标, 将能量到达和信道衰落建模为1阶马尔可夫过程, 并通过DP得到功率控制策略。若可将能量到达和信道状态建模为马尔科夫过程, 但不知道状态转移概率时, 利用机器学习获得功率控制的优化解也是目前研究较多的在线解决方案^[5]。Lyapunov优化技术^[6]是一种在控制论中使用较为广泛的优化方法, 其根据当前的系统状态进行决策, 最初用于求解排队问题, 但非排队问题也可以求解。将优化问题中约束转化为虚队列, 通过保持虚队列的稳定来间接地满足约束条件

是Lyapunov优化框架求解约束优化问题的基本思路。将要优化的目标作为惩罚项, 与反映队列稳定情况的队列漂移一起构造“漂移加惩罚”, 通过使瞬时“漂移加惩罚”最小化实现优化目标。由于Lyapunov优化框架不需要知道未来的系统状态, 也不需要获得系统状态的统计信息, 因此是一种非常具有实用性的优化方法, 近年来已有文献用其来解决通信网络中的资源分配问题^[7], 也有少量文献用其求解能量收集通信系统中的功率控制问题。文献[8]研究源节点由EH装置供电的点对点通信系统, 在仅知当前电池状态和信道衰落状态条件下, 提出利用Lyapunov优化框架最大化长期平均速率的算法。算法中, 将加偏移的电池电量作为虚队列, 待最大化的速率的负数作为惩罚项, 构建“漂移加惩罚”项, 通过最小化其上界, 在保持电池电量稳定的同时最大化传输速率。文献[9]进一步研究EH两跳放大转发中继网络中的传输速率最大化问题, 利用Lyapunov优化框架将长期平均速率最大化问题转化为单时隙的源节点和中继的发送功率联合优化问题。

由于无线信道的开放性, 无线通信系统中的信息传输过程易遭受攻击, 安全问题是一个重要的问题。物理层安全采用物理层技术, 利用无线信道随机时变衰落特性实现信息的安全传输。目前研究较多的物理层安全技术包括安全波束赋形技术^[10]、人工噪声技术^[11]、协作通信技术^[12]等。近年来有文献针对能量收集通信系统中的物理层安全技术进行了研究, 如文献[13]针对多中继携能传输网络, 研究了转发中继节点和协作干扰节点的选择问题与优化方案。

本文研究能量收集中继通信系统中以优化物理层安全传输能量效率为目标的功率控制问题。系统模型中包括1个源节点、1个中继节点和2个目的节点, 2个目的节点的信息需要相互保密。每个时隙, 源节点选择向其中一个目的节点传输保密信息。源节点和目的节点之间没有直连链路, 信息的传输需要经过中继节点转发。中继采用放大转发协议。源节点和中继节点处均配备有能量收集装置和可充电电池, 它们发送信号的能量来自从周围环境中收集的能量。在能量到达过程随机、信道为时变衰落信道, 且电池容量受限条件下, 利用Lyapunov框架解决源节点和中继节点发送功率的联合控制问题, 最大化长期时间平均保密速率, 同时兼顾两个目的节点不同的数据传输服务需求。相比较基

于MDP的算法，本文算法不需要能量到达和信道衰落的统计信息，而且复杂度更低，是一种实用的算法。

2 系统模型

本文系统模型如图1所示，为中继传输系统，包括1个源节点S、1个中继节点R和2个目的节点 $D_k(k=1, 2)$ 。源节点和中继节点配备能量收集设备和容量有限的充电电池，从周围环境中收集能量并存储在电池中，用于信息的传输。源节点配备数据缓冲器用于缓存发送给2个目的节点的数据。所有节点工作在半双工模式，中继采用放大转发协议。记源节点到中继节点、中继到2个目的节点之间的信道系数分别为 $h_R(t), h_k(t)(k=1, 2)$ 。1个信息的传输过程为1个时隙，分为等长的两个阶段，先由源节点发送信息给中继，中继再转发给目的节点。信道系数在1个时隙内保持不变。考虑2个用户信息需要相互保密的安全传输场景，即每次传输时其中一个目的节点为合法接收者，另一个目的节点视为窃听器。

记源节点发送的单位功率信号为 $x(t)$ ，中继和2个目的节点的接收信号为

$$y_R(t) = \sqrt{P_S(t)}h_R(t)x(t) + n_R(t) \quad (1)$$

$$y_{D_k}(t) = \beta h_k(t)y_R(t) + n_{D_k}(t), \quad k=1, 2 \quad (2)$$

其中， $n_R(t), n_{D_k}(t)(k=1, 2)$ 分别是中继和2个目的节点处的AWGN，其方差分别为 $\sigma_R^2, \sigma_1^2, \sigma_2^2$ ； $P_S(t)$ 是源节点的发送功率； β 是中继节点发送功率为 $P_R(t)$ 时的放大转发系数， $\beta = \sqrt{P_R(t)/(P_S(t)|h_R(t)|^2 + \sigma_R^2)}$ 。

记时隙 t 开始时源和中继处电池电量为 $E_b^S(t)$ 和 $E_b^R(t)$ ，在时隙 t 内两节点收集的能量分别为 $E_a^S(t)$ 和 $E_a^R(t)$ ，存储到电池中的电能分别为 $E_h^S(t)$ 和 $E_h^R(t)$ 。电池电量满足

$$E_{\min} \leq E_b^i(t) \leq E_{\max}, \quad i = S, R \quad (3)$$

其中， E_{\max}, E_{\min} 分别为电池存储电量的最大值和最小值。设电池最大充电和放电速率为 $P_{c,\max}$ 和 P_{\max} ，节点的信号发送功率需满足电池最大放电速率约束，即

$$0 \leq P_i(t) \leq P_{\max}, \quad i = S, R \quad (4)$$

其中，下标 i 为S和R，表示源节点和中继节点。1个时隙的时长为 $\Delta t = 2T_1$ 。在电池存储电量的限制条件式(3)下，发送功率还应满足

$$0 \leq T_1 P_i(t) \leq E_b^i(t) - E_{\min}, \quad i = S, R \quad (5)$$

1个时隙后，源和中继节点的电池电量为

$$E_b^i(t+1) = E_b^i(t) - T_1 P_i(t) + E_h^i(t), \quad i = S, R \quad (6)$$

其中，存储进电池的电量为 $0 \leq E_h^i(t) \leq \min(E_a^i(t), 2T_1 P_{c,\max}, E_{\max} - E_b^i(t) + T_1 P_i(t))$ ， $i = S, R$ ，第1项为收集的能量，第2项为最大充电速率限制，第3项为电池存储容量限制。本文考虑收集能量的使用受因果性约束，即只能使用时隙开始前收集的能量。

记 $g_j(t) = |h_j(t)|^2/\sigma_j^2, j \in \{R, 1, 2\}$ ，两个目的节点处的信噪比为 $\gamma_k(t) = g_R(t)g_k(t)P_S(t)P_R(t)/(1 + g_R(t)P_S(t) + g_k(t)P_R(t))$ ，瞬时可达速率为

$$R_k(t) = \frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_k(t)), \quad k = 1, 2 \quad (7)$$

其中，系数1/2是因为采用了两跳中继传输。系统可达的保密传输速率为 $R_s(t) = [C_d(t) - C_e(t)]^+$ ，其中 $C_d(t)$ 为合法信道容量， $C_e(t)$ 为窃听信道容量， $[x]^+ = \max\{0, x\}$ 。本文系统模型下，每一时隙源节点应向可达速率更高的目的节点发送保密信息，可达保密速率可表示为

$$R_s(t) = \begin{cases} [\log_2(1 + \gamma_1(t)) - \log_2(1 + \gamma_2(t))]/2, & g_1(t) > g_2(t) \\ [\log_2(1 + \gamma_2(t)) - \log_2(1 + \gamma_1(t))]/2, & g_1(t) < g_2(t) \end{cases} \quad (8a)$$

$$R_s(t) = \begin{cases} [\log_2(1 + \gamma_1(t)) - \log_2(1 + \gamma_2(t))]/2, & g_1(t) > g_2(t) \\ [\log_2(1 + \gamma_2(t)) - \log_2(1 + \gamma_1(t))]/2, & g_1(t) < g_2(t) \end{cases} \quad (8b)$$

记源节点中缓存发送给两个目的节点的数据队列为 $Q_k(t)$ ，时隙 t 到达的数据量分别为 $W_k(t), k=1, 2$ ，数据队列的更新公式为

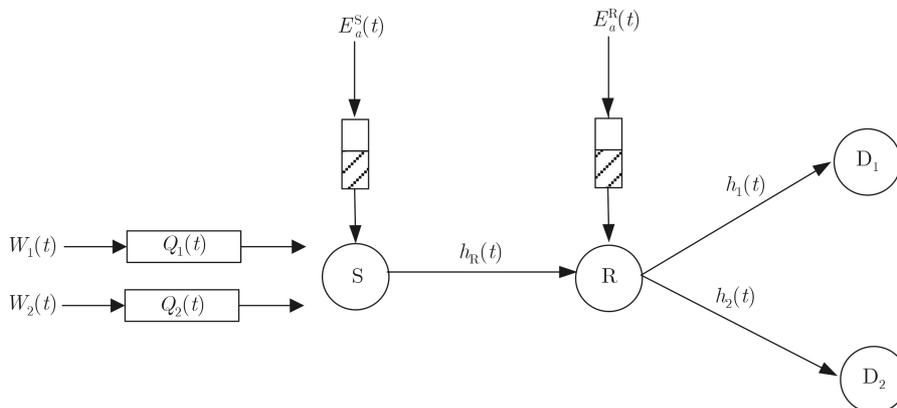


图1 具有能量收集装置的两跳传输模型

$$Q_k(t+1) = \begin{cases} [Q_k(t) - R_s(t)]^+ + W_k(t), & g_k(t) > \bar{g}_k(t) \\ Q_k(t) + W_k(t), & g_k(t) < \bar{g}_k(t) \end{cases} \quad (9)$$

其中，当 $k=1$ 时， $\bar{k}=2$ ；当 $k=2$ 时， $\bar{k}=1$ 。

3 优化问题的构造和求解

保密速率与各信道的衰落情况、源节点和中继节点的发送功率有关，而可用发送功率受到电池电量的约束，保密速率最大化问题是在能量约束下源和中继节点发送功率的联合优化问题。

3.1 优化问题构造和转换

记时隙 t 系统的状态为 $\mathbf{S}(t) \triangleq [g_R(t) g_1(t) g_2(t) E_a^S(t) E_a^R(t) E_b^S(t) E_b^R(t)]$ ，优化目标是通过联合优化源节点和中继节点处的发送功率，在可用能量的约束下，最大化长期时间平均保密速率。优化问题可表示为

$$\text{P1: } \left. \begin{aligned} & \max_{\{P_S(t), P_R(t)\}} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} E[R_s(t)] \\ & \text{s.t. 式(4)、式(5)、式(6)} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中， $E[\cdot]$ 表示期望运算。收集能量、信道状态是随机过程，因此P1是一个随机优化问题。将式(6)改写为

$$E_b^i(t+1) - E_b^i(t) = E_h^i(t) - T_1 P_i(t), \quad i = S, R \quad (11)$$

t 从0到 T 对应的各式左右两端进行叠加，并求期望可得 $E[E_b^i(T)] - E[E_b^i(0)] = \sum_{t=0}^{T-1} E[E_h^i(t) - T_1 P_i(t)]$ ，再左右两端同时除以 T ，并求 $T \rightarrow \infty$ 的极限，得到一个长期时间平均的关系

$$\bar{E}_h^i(T) - T_1 \bar{P}_i(T) = 0 \quad (12)$$

其中， $\bar{E}_h^i(T) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} E[E_h^i(t)]$ ， $\bar{P}_i(T) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} E[P_i(t)]$ ， $i = S, R$ 。式(12)表示，从长期看来，应将收集的能量全部用于信息发送。将原约束问题中的单时隙的电池电量约束放松为长期时间电量约束，优化问题转换为

$$\text{P2: } \left. \begin{aligned} & \max_{\{P_S(t), P_R(t)\}} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} E[R_s(t)] \\ & \text{s.t. 式(4) 式(5) 式(12)} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

问题P2可采用Lyapunov优化框架来解决。Lyapunov优化从队列的稳定性出发，将约束条件的满足用保持队列稳定来实现，而优化目标作为惩罚项，构建“漂移加惩罚”，通过最小化“漂移加惩罚”来实现满足约束条件下的性能优化。本文优化的对象是长期时间保密速率，优化过程中应该保持电池电量的稳定性。将源节点和中继节点的电池电量加一个偏移量后作为能量虚队列：

$$X_i(t) = E_b^i(t) - A_i, \quad i = S, R \quad (14)$$

其中， A_S 和 A_R 分别为偏移量，正常数。定义二次Lyapunov函数

$$L(\mathbf{X}(t)) \triangleq \frac{1}{2}(X_S^2(t) + X_R^2(t)) \quad (15)$$

其中， $\mathbf{X}(t) \triangleq [X_S(t), X_R(t)]$ 。Lyapunov漂移为

$$\Delta(\mathbf{X}(t)) \triangleq E[L(\mathbf{X}(t+1)) - L(\mathbf{X}(t)) | \mathbf{X}(t)] \quad (16)$$

构造漂移加惩罚项

$$\Delta(\mathbf{X}(t)) - V_0 E[R_s(t) | \mathbf{X}(t)] \quad (17)$$

其中， $E[R_s(t)]$ 是优化的目标——平均保密速率，将其负值作为惩罚项， V_0 是漂移和惩罚项之间的权重，为正常数，用于在队列稳定性和保密速率最大之间取得平衡。通过最小化漂移加惩罚项在满足队列，即电池电量稳定的同时最大化保密速率。由于虚队列是在电池队列后添加偏移量得到的，类似式(11)有

$$X_i(t+1) - X_i(t) = E_h^i(t) - T_1 P_i(t) \quad (18)$$

显然，若该虚队列保持稳定，即 $X_i(t)$ 不会随时间无限增长，则一定可以满足优化问题P2中约束条件式(12)。

引理1 基于任何功率控制策略以及任意长度的队列 $X_S(t)$ ， $X_R(t)$ ，漂移加惩罚式(17)都有上界

$$\begin{aligned} \Delta(\mathbf{X}(t)) - V_0 E[R_s(t) | \mathbf{X}(t)] & \leq B + X_S(t) E[E_h^S(t) \\ & - T_1 P_S(t) | \mathbf{X}(t)] + X_R(t) E[E_h^R(t) - T_1 P_R(t) | \mathbf{X}(t)] \\ & - V_0 E[R_s(t) | \mathbf{X}(t)] \end{aligned} \quad (19)$$

其中， B 为满足 $B \geq \frac{1}{2} \{E[(E_h^S(t) - T_1 P_S(t))^2 | \mathbf{X}(t)] + E[(E_h^R(t) - T_1 P_R(t))^2 | \mathbf{X}(t)]\}$ 的正常数。

证明：

由式(15)和式(18)得

$$\begin{aligned} L(\mathbf{X}(t+1)) - L(\mathbf{X}(t)) & = \frac{1}{2}(X_S^2(t+1) - X_S^2(t)) \\ & + \frac{1}{2}(X_R^2(t+1) - X_R^2(t)) \\ & = \frac{1}{2}(E_h^S(t) - T_1 P_S(t))^2 \\ & + X_S(t)(E_h^S(t) - T_1 P_S(t)) \\ & + \frac{1}{2}(E_h^R(t) - T_1 P_R(t))^2 \\ & + X_R(t)(E_h^R(t) - T_1 P_R(t)) \end{aligned} \quad (20)$$

由于 $P_S(t)$ ， $P_R(t)$ ， $E_h^S(t)$ ， $E_h^R(t)$ 为有限值，则 $(E_h^S(t) - T_1 P_S(t))^2$ 和 $(E_h^R(t) - T_1 P_R(t))^2$ 必为非负有限值，一定存在正常数 B 满足

$$\begin{aligned} B \geq \frac{1}{2} \{ & E[(E_h^S(t) - T_1 P_S(t))^2 | \mathbf{X}(t)] \\ & + E[(E_h^R(t) - T_1 P_R(t))^2 | \mathbf{X}(t)] \} \end{aligned} \quad (21)$$

于是

$$\Delta(\mathbf{X}(t)) \leq B + X_S(t)E[E_h^S(t) - T_1 P_S(t) | \mathbf{X}(t)] + X_R(t)E[E_h^R(t) - T_1 P_R(t) | \mathbf{X}(t)] \quad (22)$$

在式(22)左右两端同时加上惩罚项即可得到式(19)。

证毕

由于直接最小化漂移加惩罚项较为困难,因此我们改为最小化它的上界。由于已将约束条件式(12)通过保持队列稳定满足,因此将其从优化约束条件中移除。去除上界中与 $P_S(t)$, $P_R(t)$ 无关的项,再乘以-1,相应将最小化改为最大化,同时由于当前的信道状态和电池状态已知,上界中的均值运算可以去掉,优化问题重新表示为

$$\begin{aligned} \text{P3: } & \max_{\{P_S(t), P_R(t)\}} P_S(t)X_S(t) + P_R(t)X_R(t) + VR_s(t) \\ \text{s.t. } & 0 \leq P_i(t) \leq \min(P_{\max}, (E_b^i(t) - E_{\min})/T_1), \\ & i = S, R \end{aligned} \quad (23)$$

注意式(23)中已经改写了约束条件式(4)、式(5)的表示形式, $V = V_0/T_1$ 。

两个目的节点的数据到达量具有随机性,且两个目的节点的数据传输需求可能不相同,为了避免出现数据队列差过大的情况,应根据两队列的状态对发送功率进行适当的调整。当 $g_1(t) > g_2(t)$ 时,向目的节点D₁传输保密信息,若 $Q_1(t) > Q_2(t)$,表示目的节点D₁的数据队列积压更大,可适当加大权重 V 来增大保密传输速率,以减小数据队列差值;若 $Q_1(t) < Q_2(t)$,可通过减小权重 V 适当降低发送功率,为后面时隙向目的节点D₂传输信息保留更多的能量。当 $g_1(t) < g_2(t)$ 时同理。通过数据队列差调节权重的公式为

$$V_1(t+1) = \begin{cases} V + U(Q_1(t) - Q_2(t)), & g_1(t) > g_2(t) \\ V + U(Q_2(t) - Q_1(t)), & g_1(t) < g_2(t) \end{cases} \quad (24)$$

其中,正常数 U 为根据数据队列差对权重 V 的调节系数, $V_1(t)$ 为调整后的权重。调整后的优化问题为

$$\begin{aligned} \text{P4: } & \max_{\{P_S(t), P_R(t)\}} P_S(t)X_S(t) + P_R(t)X_R(t) + V_1(t)R_s(t) \\ \text{s.t. } & 0 \leq P_i(t) \leq \min(P_{\max}, (E_b^i(t) - E_{\min})/T_1), \\ & i = S, R \end{aligned} \quad (25)$$

3.2 优化问题的求解

优化问题P4中含有发送功率的不等式约束条件,采用KKT条件求解。

当 $g_1(t) > g_2(t)$ 时,向D₁传输保密信息, $R_s(t)$ 为式(8a),优化目标函数为

$$J(P_S(t), P_R(t)) = P_S(t)X_S(t) + P_R(t)X_R(t) + V_1(t)R_s(t) \quad (26)$$

定义拉格朗日函数为

$$\begin{aligned} L(P_S(t), P_R(t), \lambda_1, \lambda_2, \mu_1, \mu_2) = & J(P_S(t), P_R(t)) \\ & - \lambda_1 P_S(t) - \lambda_2 P_R(t) + \mu_1 (P_S(t) \\ & - \min(P_{\max}, (E_b^S(t) - E_{\min})/T_1)) \\ & + \mu_2 (P_R(t) - \min(P_{\max}, (E_b^R(t) - E_{\min})/T_1)) \end{aligned} \quad (27)$$

KKT条件为

$$\left. \begin{aligned} J_{P_S}(t) - \lambda_1 + \mu_1 &= 0 \\ J_{P_R}(t) - \lambda_2 + \mu_2 &= 0 \\ \lambda_1 &= 0 \text{ 或 } P_S(t) = 0 \\ \lambda_2 &= 0 \text{ 或 } P_R(t) = 0 \\ \mu_1 &= 0 \text{ 或 } P_S(t) = \min(P_{\max}, (E_b^S(t) - E_{\min})/T_1) \\ \mu_2 &= 0 \text{ 或 } P_R(t) = \min(P_{\max}, (E_b^R(t) - E_{\min})/T_1) \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

其中

$$J_{P_S}(t) = \frac{\partial J(P_S(t), P_R(t))}{\partial P_S(t)}, \quad J_{P_R}(t) = \frac{\partial J(P_S(t), P_R(t))}{\partial P_R(t)}。$$

满足KKT条件的 $P_S(t)$ 的解为

- (1) 当 $\lambda_1=0$, $\mu_1=0$ 时为方程 $J_{P_S}(t) = 0$ 的根;
- (2) 当 $\lambda_1=0$, $\mu_1 \neq 0$ 时为 $\min(P_{\max}, (E_b^S(t) - E_{\min})/T_1)$;
- (3) 当 $\lambda_1 \neq 0$, $\mu_1=0$ 时为0;
- (4) 当 $\lambda_1 \neq 0$, $\mu_1 \neq 0$ 时,需同时满足 $P_S(t) = \min(P_{\max}, (E_b^S(t) - E_{\min})/T_1)$ 和 $P_S(t) = 0$ 。此时无满足KKT条件的 $P_S(t)$ 的解。

满足KKT条件的 $P_R(t)$ 的解的分析与 $P_S(t)$ 类似,可能的解为0, $\min(P_{\max}, (E_b^R(t) - E_{\min})/T_1)$ 和方程 $J_{P_R}(t)=0$ 的根 $P_R^*(t)$ 。

满足KKT条件的源和中继最优发送功率组合共有9组,但当 $P_S(t)$ 和 $P_R(t)$ 其中之一为0时,不能传输信息,即使满足KKT条件的另一个节点的功率值不为0,也应置为0。因此最优的功率组合 $\{P_S(t), P_R(t)\}$ 应为下列5种之一: $\{0, 0\}$, $\{P_S^*(t), P_R^*(t)\}$, $\{\min(P_{\max}, (E_b^S(t) - E_{\min})/T_1), \min(P_{\max}, (E_b^R(t) - E_{\min})/T_1)\}$, $\{P_S^*(t), \min(P_{\max}, (E_b^R(t) - E_{\min})/T_1)\}$, $\{\min(P_{\max}, (E_b^S(t) - E_{\min})/T_1), P_R^*(t)\}$ 。这5种功率组合代入目标函数式(26)进行计算,其中最大函数值对应的组合为最优解。下面讨论如何计算目标函数值。

(1) 对于 $\{0, 0\}$, $\{\min(P_{\max}, (E_b^S(t) - E_{\min})/T_1), \min(P_{\max}, (E_b^R(t) - E_{\min})/T_1)\}$ 两种功率组合,由于两个功率均为具体值,直接将 $P_S(t)$ 和 $P_R(t)$ 的值代入式(26)中就可得到目标函数值。

(2) 当功率组合为 $\{P_S^*(t), \min(P_{\max}, (E_b^R(t) - E_{\min})/T_1)\}$ 时,将 $P_R(t) = \min(P_{\max}, (E_b^R(t) - E_{\min})/T_1)$ 的值代入式 $J_{P_S}(t) = 0$ 中得到一个一元二次方程,求解该方程,将在功率范围内的解代入式(26)中求得函数值。

(3) 当功率组合为 $\{\min(P_{\max}, (E_b^S(t) - E_{\min})/T_1), P_R^*(t)\}$ 时, 将 $P_S(t) = \min(P_{\max}, (E_b^S(t) - E_{\min})/T_1)$ 代入式 $J_{P_R}(t) = 0$, 得到一个一元四次方程, 可采用文献[14]的方法求解。将在功率范围内的解代入式(26)求得相应的函数值, 取其中使目标函数值最大的功率组合为此时的解。

(4) 当功率组合为 $\{P_S^*(t), P_R^*(t)\}$ 时, 需要先求解由 $J_{P_S}(t) = 0$ 和 $J_{P_R}(t) = 0$ 组成的方程组得到 $P_S^*(t)$ 和 $P_R^*(t)$ 。先将 $J_{P_S}(t) = 0$ 中的 $P_R(t)$ 看作常数, 将其视为一个一元二次方程, 求解该方程得到一个包含 $P_R(t)$ 的解的表达式, 将其再代入 $J_{P_R}(t) = 0$ 中, 得到一个仅包含 $P_R(t)$ 一个未知数的一元八次方程。此方程没有解析解, 只能采用数值法[15]求解。可能找到多个满足功率限制的功率组合 $\{P_S^*(t), P_R^*(t)\}$, 将其代入式(26)中得到对应的函数值, 其中最大的目标函数值对应的功率组合即为此时的解。

选择5种可能的功率组合中使目标函数值最大的功率组合作为最优解。

当 $g_1(t) < g_2(t)$ 时, 向 D_2 传输保密信息, 此时优化目标函数式(26)中的 $R_s(t)$ 为式8(b), 优化问题求解过程与向 D_1 传输保密信息时完全类似, 这里不再赘述。

4 仿真结果

仿真中, 时隙长设置为 $\Delta t = 1$ s, 如无特别说明, 其他仿真的参数设置如下。源和中继节点的电池电量最大和最小值为 $E_{\max} = 10$ J, $E_{\min} = 0$ J; 能量到达过程服从复合泊松分布, 源和中继节点的能量到达率为 $\eta_1 = \eta_2 = 1$ 单位/时隙, 每个单位能量服从 $[0, 0.4]$ J的均匀分布; 每时隙源节点的数据到达量 $W_1(t)$ 和 $W_2(t)$ 分别服从到达率为0.07 bit/时隙和0.05 bit/时隙的泊松分布; 源和中继节点电池最大充电速率和放电速率均设为1 W; 两跳的信道均为瑞利衰落信道, 各信道系数均为服从均值为0、方差为1的复高斯分布随机变量; 电池的初始能量为10 J; 偏移量 $A_S = A_R = 5$; $V = 6$, $U = 10$ 。

为了比较本文算法的性能, 与4种算法进行对比。(1) 全功率贪婪算法: 在最大功率的限制条件下, 每个时隙源和中继节点均根据电池中可用电量的最大值设置发送功率。(2) 半功率算法: 在最大功率的限制条件下, 每个时隙源和中继节点均以电池中可用电量的一半设置发送功率。(3) 随机功率算法: 每个时隙源和中继节点在电池可用电量范围内等概随机选取功率值。(4) 离线注水算法: 发送端在传输前就已知整个传输过程中信道的变化情况

和能量收集的情况, 根据收集到的总能量得到传输过程中的信号平均发送功率。在此平均功率的约束下, 采用注水原理根据信道状态确定各时隙的发送功率。此算法不考虑数据和能量的因果性, 也不考虑电池溢出以及数据缓冲器的溢出, 实际应用是不可实现的, 但具有最优的性能, 可用于评估本文算法的性能。

图2是几种算法平均保密速率随着时间变化的轨迹图。每时隙的平均保密速率为仿真开始到当前各时隙保密速率的平均值。从图2可知本文提出的算法性能略低于离线注水算法, 但明显优于其他几种算法。几种算法中, 贪婪算法性能最差, 随机功率算法仅略好于贪婪算法。全功率、半功率和随机功率算法都没有根据能量收集情况和信道状态对功率进行控制, 其中全功率贪婪算法完全根据前一时隙所收集能量来决定当前时隙的发送功率, 性能最差。半功率算法虽然考虑保留部分能量供后面的时隙使用, 但也只是简单地将能量一分为二, 当前时隙使用1/2, 也没有考虑信道状态。本文算法根据信道状态和电池电量联合优化源节点与中继节点的发送功率, 因此具有较好的性能。注水算法在传输前就已知信道状态和能量收集情况, 根据信道状态进行全局功率分配, 且不受能量和数据达到因果性限制, 因此性能最优。

图3—图6给出了系统参数对系统性能的影响情况, 所给出的结果都是整个 $T = 10^5$ s的仿真过程中的平均值。图3(a)为电量虚队列偏移量变化时保密速率的变化情况。当偏移量较小时, 保密速率随着偏移量的增大而增加, 但当偏移量增加到一定数值时, 保密速率反而随其增大而下降。这是因为偏移量较小时, 源节点和中继节点的电池中保留的电量较少, 可支持的最大发送功率也较小。根据注水定理, 当信道条件较好时, 应使用较高的功率传输信息, 可获得更高的能量效率。由于此时可支持的最大功率较小, 限制了信道条件较好时的传输速率, 导致平均保密速率较低。随着偏移量增加, 电池保

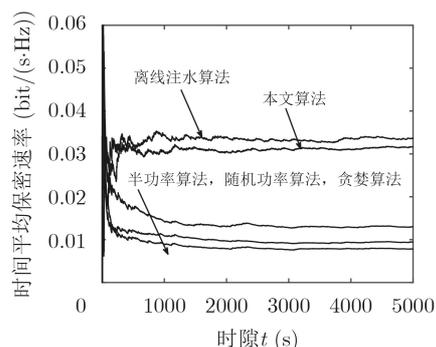


图2 与对比算法平均保密速率的比较

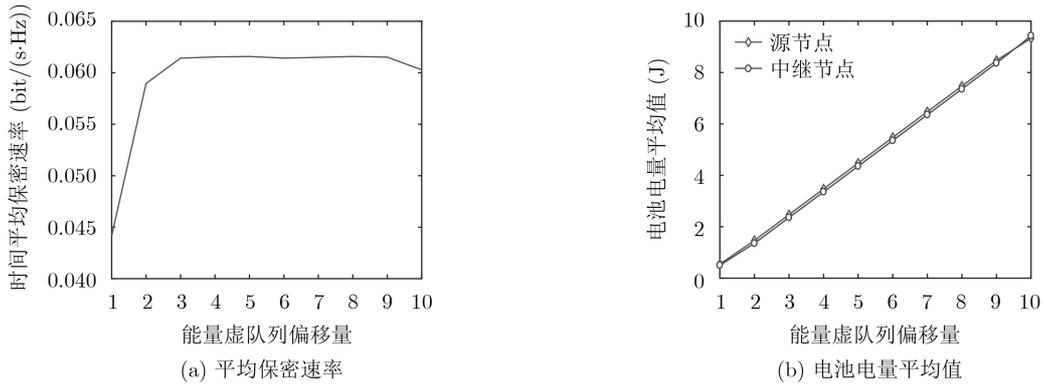


图3 能量虚队列偏移量对系统性能的影响

留的电量增加,如图3(b)所示,可支持的最大功率也在增加,对能量的利用效率也在提高,故平均保密速率增大。而当偏移量增大到一定程度时,发送功率受限于最大放电速率而不再增大,而电池的剩余存储空间减小,出现收集的能量不能全部存入电池,即电池发生溢出、部分收集能量丢弃的概率增大,反而会导致保密速率的下降。

图4给出了能量到达率对系统性能的影响情况。随着能量到达率 η_1 和 η_2 的增大,每个时隙到达能量的平均值增加,相应平均发送功率增大,平均保密速率增大。能量到达率增加到一定值后,平均保密速率不再随其增大而继续增大,这是因为发送功率

有最大值限制,收集能量的数量也受到电池容量、电池充电速率的限制。

图5、图6给出了漂移加惩罚项中权重 V 、调整系数 U 对系统性能的影响情况。用整个仿真期间两个数据队列长度差的均方根值(时间平均)来反映算法对两目的节点数据传输需求的适应情况,该值越小,适应情况越好。电池电量的稳定性用整个仿真期间电池电量的标准差(时间平均)来衡量,标准差越小,电池电量的稳定性越好。从图5(a)的仿真结果可以看到,在 $V < 40$ 时,保密速率随着 V 的增大而提高,而电池电量的标准差增大(意味着电池电量的波动增大),与设计时的预期相符。 V 增大,优化时更偏重于保密速率最大化,而电池电量的稳定性会降低。但 V 增大到40以后, V 继续增大时系统平均速率反而下降。这是因为 V 过大时,优化过程中过度关注最大化保密速率,倾向于使用更高的发送功率,导致电池存储的电量水平有较大的波动,且平均电量减少,如图6所示,出现在信道条件较好时有没有足够的电量支持更高信息传输速率的概率增大,从而导致平均保密速率反而有所下降。在 V 保持不变时, U 增大时系统更加关注缩小两个目的节点的数据队列差,因此数据队列长度差均方根值减小,但相应保密传输性能会略有下降。

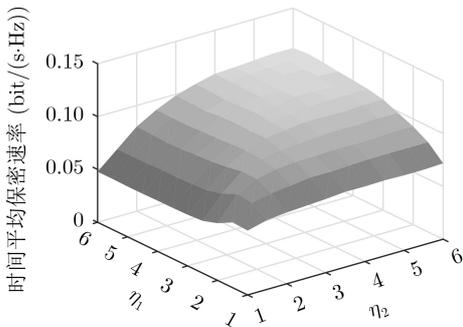


图4 能量到达率对长期平均保密速率的影响

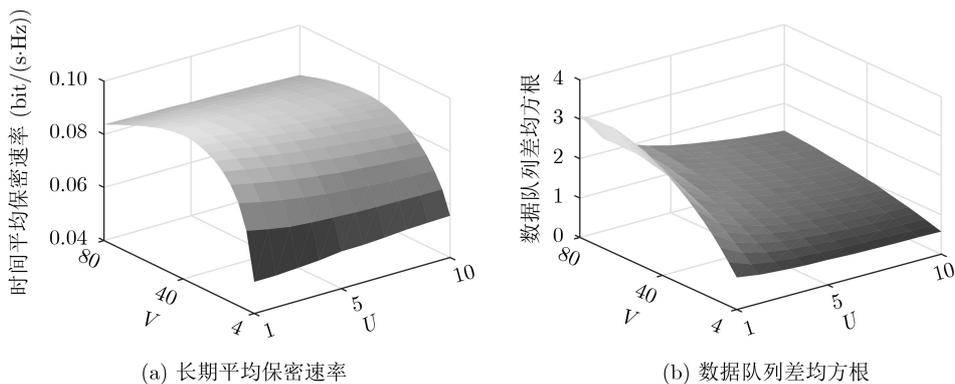
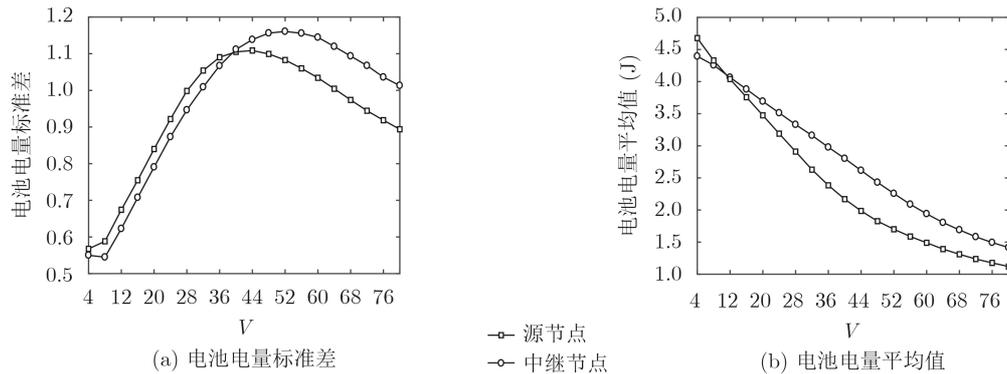


图5 权重 V 、 U 对系统性能的影响

图6 电池电量与权重 V 的关系, $U=10$

5 结论

本文针对能量收集中继安全通信系统,对提高系统保密传输能量效率的在线功率控制算法进行研究。源和中继节点发送信号的能量来自收集的能量。考虑两个目的节点间信息需要相互保密的场景,联合控制源节点和中继节点的发送功率,在能量收集和电池使用约束下最大化长期时间平均保密速率。采用Lyapunov优化框架,将长期时间平均保密速率的优化问题转化为每个时隙的优化问题,而将能量收集和使用的约束转化为虚队列的稳定要求。优化目标作为惩罚项,将原优化问题转换为每时隙的“虚队列漂移加惩罚”最小化问题。同时,为适应两目的节点传输数据量需求的变化,增加了一个根据数据队列长度差对权重进行调整的调节项。进一步将优化问题简化为最小化该上界。在时变衰落信道下对算法的性能进行了仿真,仿真结果表明,本文所提算法性能明显优于贪婪算法、半功率算法和随机功率算法,仅略低于最优的离线注水算法。本文所提算法仅依赖于当前电池的状态和信道状态,是一种低复杂度的、易于实用的算法。

参考文献

- [1] ALTINEL D and KURT G K. Modeling of hybrid energy harvesting communication systems[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2019, 3(2): 523–534. doi: [10.1109/TGCN.2019.2908086](https://doi.org/10.1109/TGCN.2019.2908086).
- [2] OZEL O and ULUKUS S. Achieving AWGN capacity under stochastic energy harvesting[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2012, 58(10): 6471–6483. doi: [10.1109/TIT.2012.2204389](https://doi.org/10.1109/TIT.2012.2204389).
- [3] HUANG Chuan, ZHANG Rui, and CUI Shuguang. Throughput maximization for the Gaussian relay channel with energy harvesting constraints[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013, 31(8): 1469–1479. doi: [10.1109/JSAC.2013.130811](https://doi.org/10.1109/JSAC.2013.130811).
- [4] HO C K and ZHANG Rui. Optimal energy allocation for wireless communications with energy harvesting constraints[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, 60(9): 4808–4818. doi: [10.1109/TSP.2012.2199984](https://doi.org/10.1109/TSP.2012.2199984).
- [5] 李云, 唐英, 刘涵霄. 基于Q-Learning算法的毫微微小区功率控制算法[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(11): 2557–2564. doi: [10.11999/JEIT181191](https://doi.org/10.11999/JEIT181191).
LI Yun, TANG Ying, and LIU Hanxiao. Power control algorithm based on Q-Learning in femtocell[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(11): 2557–2564. doi: [10.11999/JEIT181191](https://doi.org/10.11999/JEIT181191).
- [6] NEELY M J. Stochastic Network Optimization with Application to Communication and Queueing Systems[M]. Williston, USA: Morgan & Claypool, 2010: 45–62.
- [7] LI Yun, XIA Shichao, ZHENG Mengyan, et al. Lyapunov optimization based trade-off policy for mobile cloud offloading in heterogeneous wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, To be published. doi: [10.1109/TCC.2019.2938504](https://doi.org/10.1109/TCC.2019.2938504).
- [8] AMIRNAVAEI F and DONG Min. Online power control optimization for wireless transmission with energy harvesting and storage[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(7): 4888–4901. doi: [10.1109/TWC.2016.2548459](https://doi.org/10.1109/TWC.2016.2548459).
- [9] DONG Min, LI Wen, and AMIRNAVAEI F. Online joint power control for two-hop wireless relay networks with energy harvesting[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, 66(2): 463–478. doi: [10.1109/TSP.2017.2768040](https://doi.org/10.1109/TSP.2017.2768040).
- [10] ZHU Fengchao and YAO Minli. Improving physical-layer security for CRNs using SINR-based cooperative beamforming[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(3): 1835–1841. doi: [10.1109/TVT.2015.2412152](https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2412152).
- [11] 张波, 黄开枝. 异构携能通信网络中基于人工噪声辅助的鲁棒安全传输方案[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(1): 1–8. doi: [10.11999/JEIT180269](https://doi.org/10.11999/JEIT180269).
ZHANG Bo and HUANG Kaizhi. Robust secure transmission scheme based on artificial noise-aided for

- heterogeneous networks with simultaneous wireless information and power transfer[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(1): 1–8. doi: [10.11999/JEIT180269](https://doi.org/10.11999/JEIT180269).
- [12] JAMEEL F, WYNE S, KADDOUM G, *et al.* A comprehensive survey on cooperative relaying and jamming strategies for physical layer security[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, 21(3): 2734–2771. doi: [10.1109/COMST.2018.2865607](https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2865607).
- [13] HOANG T M, DUONG T Q, VO N S, *et al.* Physical layer security in cooperative energy harvesting networks with a friendly jammer[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2017, 6(2): 174–177. doi: [10.1109/LWC.2017.2650224](https://doi.org/10.1109/LWC.2017.2650224).
- [14] 谢国芳. 一般实系数四次方程的谢国芳求根公式[EB/OL]. <https://wenku.baidu.com/view/2ac910223169a4517723a39a.html>, 2013.
- XIE Guofang. Formula for finding roots of quartic equations with general real coefficients[EB/OL]. <https://wenku.baidu.com/view/2ac910223169a4517723a39a.html>, 2013.
- [15] BENNER P and BYERS R. An exact line search method for solving generalized continuous-time algebraic Riccati equations[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1998, 43(1): 101–107. doi: [10.1109/9.654908](https://doi.org/10.1109/9.654908).
- 雷维嘉: 男, 1969年生, 博士, 教授, 主要研究方向为无线通信和移动通信技术.
- 付安琦: 女, 1996年生, 硕士生, 研究方向为无线通信和物理层安全.

责任编辑: 马秀强