能量收集安全传输系统中的在线功率控制算法

雷维嘉, 王紫薇*

重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065

* 通信作者. E-mail: wangziwei0309@163.com

收稿日期: 2018-12-19; 修回日期: 2019-03-22; 接受日期: 2019-04-15; 网络出版日期: 2019-10-15

国家自然科学基金 (批准号: 61471076) 和重庆市基础研究与前沿探索项目 (批准号: cstc2018jcyjAX0432, cstc2017jcyjAX0204) 资助

摘要 针对能量收集无线通信系统信息安全传输过程中保密速率的优化问题, 提出一种基于 Lyapunov 框架优化的在线功率控制策略. 系统模型为无线衰落信道下的一发二收的保密通信模型, 包含一个由能量收集设备供电的源节点和两个目的节点, 两目的节点间的信息相互保密. 每时隙源节点根据两目的节点的信道状态, 选择向信道状态较好的目的节点传输保密信息, 根据当前电池电量和信道状态在线设置发送功率和保密速率. 将电池电量约束转换为虚队列, 而将优化目标转换为惩罚, 通过优化发送功率最小化瞬时队列漂移加惩罚函数, 在满足约束条件的前提下最大化长期时间平均保密速率. 优化过程中兼顾了两目的节点的传输公平性. 仿真结果表明本文提出的方案能够高效地利用收集的能量, 有效提高系统的长期时间平均保密速率.

关键词 能量收集, 物理层安全, 保密传输, 在线功率控制, Lyapunov 框架

1 引言

随着信息产业的不断发展, 用于信息传输和处理的能源消耗越来越大, 而传统能源消耗过程中产生的碳排放会导致气候变暖等环境问题. 作为一种绿色通信方式, 从环境中收集能量用于信息的传输和处理成为通信系统研究的重要课题. 环境中的能量来源广泛, 可以是太阳能、动能、热能、环境噪声或电磁辐射等^[1]. 近年来, 通信学术界对能量收集 (energy harvesting, EH) 技术在通信系统中的运用进行了大量的研究, 研究的主要方向包括环境中的能量来源、EH 通信模型、能量的使用协议、能量调度和优化方法等. 文献 [2] 对当前通信系统中的 EH 技术的发展情况进行了较全面的介绍, 并讨论了不同能源的特点, 以及能源调度的问题. 文献 [3] 介绍了生态友好型蜂窝网络以及从环境中收集能量在减少能源消耗和降低利润方面的作用.

在由收集的能量供电的无线通信系统中, 由于 EH 设备收集到的能量是随机变化的, 具有系统能量供应不稳定的特性, 同时无线衰落信道的随机衰落特性, 使得 EH 无线通信系统中能量的使用和传

引用格式: 雷维嘉, 王紫薇. 能量收集安全传输系统中的在线功率控制算法. 中国科学: 信息科学, 2019, 49: 1353–1368, doi: 10.1360/N112018-00330
Lei W J, Wang Z W. An online power-control algorithm for energy harvesting and secure transmission systems (in Chinese). Sci Sin Inform, 2019, 49: 1353–1368, doi: 10.1360/N112018-00330

传输率的控制问题相当复杂. 在已有的相关文献中, 根据传输过程中收集的能量、信道状态和数据到达率是否可提前获知, EH 通信系统中的功率控制算法可分为离线功率控制和在线功率控制两大类. 离线控制算法应用于事先知道收集的能量、信道特性和数据到达率等的情况下. 一些文献对不同系统模型下的离线功率控制算法进行了研究. 文献 [4] 考虑不连续的能量到达模型, 分别给出了系统短期吞吐量最大化和一定数据量下传输时间最小化的离线功率控制算法. 文献 [5] 针对源节点和中继节点都由 EH 设备供电的两跳中继系统, 将最大化端到端网络吞吐量的离线优化控制问题分解为功率控制和中继选择两个子问题, 并依据子问题的凸性求得最优解. 文献 [6] 针对点对点通信系统的吞吐量最大化和传输完成时间最短化问题, 在今后一段时间内收集能量和信道状态已知的情况下, 利用注水算法对发送信号的功率进行调度. 但在实际的系统中, 能量收集量、数据流量和信道特性都是随机变化的, 事先能获得收集的能量、信道特性和数据到达量并不现实, 因此在线功率控制算法才是可实际应用的算法. 由于未来的能量收集量、信道状态和数据量等未知, 在线算法的复杂度要高于离线算法. Markov 决策过程是在线功率控制算法中常用的方法, 如文献 [7] 将无线发射机在随机信道条件下的最优功率分配问题构造成一个 Markov 决策过程, 在知道能量、信道、到达数据等统计特性的条件下, 利用动态规划求解优化问题, 实现信息传输速率的最大化. Lyapunov 框架是一种在控制工程被广泛应用的控制方法, 该方法在应用中不需要知道系统状态的统计特性, 而是根据当前的状态做出决策, 优化系统的长期平均性能. 由于 Lyapunov 框架的这一特点, 也是解决 EH 通信系统中在线功率调度问题的有力工具. Lyapunov 优化算法^[8]的基本思想是保持数据队列长期时间意义上稳定, 把优化的性能目标作为惩罚项, 将队列长度漂移与惩罚项的和作为目标函数, 通过最小化该目标函数达到长期时间平均意义下队列的稳定和性能目标的优化. 原优化问题中的限制和约束条件则通过构造相应的虚队列并保持其稳定来满足. Lyapunov 优化把长期时间平均的优化问题转化成瞬时优化问题, 简化了优化问题的求解. 目前已有一些文献对利用 Lyapunov 优化框架优化 EH 通信系统的性能进行了研究. 文献 [9] 研究 EH 无线通信系统在电池容量受限和误比特率约束的条件下, 采用 Lyapunov 优化框架, 构造能量和误比特率虚队列, 求解发送功率和调制方式的联合优化问题, 提高系统吞吐量的长期时间平均值. 文献 [10] 针对可充电电池能量受限的 EH 点对点通信系统, 以长期时间平均数据速率作为优化目标, 设计了一种基于 Lyapunov 优化框架在线功率控制算法. 文献 [11] 针对两跳放大转发中继网络中, 中继 EH 节点由收集的能量提供转发所需能量的场景, 利用 Lyapunov 框架设计了源节点和中继节点联合在线功率控制算法, 提高长期时间平均传输速率.

无线通信的广播特性使得发送机发出的信号在被合法接收端接收的同时, 也可被非期望接收端窃听. 传统上采用在高层对信息进行加密的方式来保护信息的安全, 其实现信息安全的基础是在无密钥情况下解密的高计算复杂度. 从物理层上实现信息的保密是解决信息安全的另一途径. Wyner^[12]在 1975 年首次提出窃听信道模型, 指出可以利用信道的物理特性来保证信息在传输过程中的安全, 当合法信道质量优于窃听信道时, 可在窃听用户无法获知保密信息的前提下进行信息的安全传输. 文献 [13] 介绍了物理层安全的基本理论, 以及物理层安全技术的研究情况和未来的研究方向. 目前关于物理层安全的相关研究主要集中在利用信号处理技术制造和增大合法信道与窃听信道的质量差异上, 常用的技术包括多天线波束赋型技术^[14]、人工噪声技术、协作通信技术^[15]等.

本文研究 EH 无线通信系统信息安全传输过程中的功率调度问题. 系统模型中包括一个发送端和两个接收端. 发送端由能量收集设备供电, 两个接收端的信息相互保密. 在不知道信道和收集能量的统计特性的情况下, 利用 Lyapunov 优化框架设计在线功率控制算法, 对发送功率进行调度, 高效利用收集的能量, 实现长期时间平均保密速率的最大化. 而且在优化保密传输速率的同时兼顾了两接收端保密信息传输的公平性. 虽然研究模型中的节点为单天线节点, 但本文的方法很容易推广到多天线

图 1 系统模型

Figure 1 System model

节点场景. 据我们所知, 目前还没有文献采用 Lyapunov 框架对能量收集系统中保密速率的优化进行研究.

论文内容安排如下: 第 2 部分介绍系统模型, 第 3 部分构造优化问题, 第 4 部分基于 Lyapunov 框架求解优化问题, 第 5 部分对优化算法进行仿真, 最后对全文进行总结.

2 系统模型

考虑图 1 所示的无线通信系统. 系统由源节点、目的节点 D1、目的节点 D2 组成, 每个节点均配备单根天线. 源节点内含 EH 设备、电池和数据缓冲器. EH 设备用于从环境中收集能量并转换为电能; 电池用于储存收集的电能, 供数据传输所用; 数据缓冲器用于暂存发给两个目的节点的数据, 缓存器中缓冲的数据为数据队列. 传输过程中, 数据、能量到达量和信道状态随机变化. 源节点向两目的节点传输信息, 每个时隙根据信道状态选择向其中一个目的节点发送信息, 该信息需要对另一个目的节点保密. 源节点需根据能量状态、队列状态和信道状态选择适当的发送功率和保密信息传输速率.

2.1 能量收集模型和电池充放电模型

假设电池最大容量为 $E_{\max}$ (电量单位: J, 焦耳), 当前电池存储的电量为 $E_b(t)$, $0 \leq E_b(t) \leq E_{\max}$. 设能量收集设备每时隙从环境中收集的能量经过转换后得到的电能为 $E_a(t)$, 该电能通过充电环节后存储在电池中的能量设为 $E_s(t)$, $E_s(t) \leq E_a(t)$. 当前时隙收集的能量只能在后面的时隙使用, 当前时隙只能使用过去时隙收集的能量. 设发送端的发送功率为 $P(t)$, 则每时隙消耗的能量为 $\Delta t P(t)$, Δt 为一个时隙的时长. 受电池存储容量的限制, 实际一个时隙的充电量不超过 $E_{\max} - (E_b(t) - \Delta t P(t))$. 另外, 受电池物理特性的限制, 其充电的速率是有限的, 设一个时隙电池的最大充电量为 $E_{c,\max}$. 这样, 一个时隙内, 电池的充电量 $E_s(t)$ 为

$$E_s(t) = \min\{E_{\max} - (E_b(t) - \Delta t P(t)), E_a(t), E_{c,\max}\}, \quad (1)$$

其中, 最小值运算中的第 1 项为电池容量的限制, 第 2 项为到达的能量, 第 3 项是充电速率的限制.

发送功率 $P(t)$ 受到电池最大放电功率 $P_{\max}$ 的限制, 应有

$$0 \leq P(t) \leq P_{\max}, \quad (2)$$

且一个时隙内传输消耗的能量不能超过当前电池中存储的能量, 即

$$0 \leq \Delta t P(t) < E_b(t), \quad (3)$$

这样, 一个时隙的充电和放电过程后, 下一时隙电池电量为

$$E_b(t+1) = E_b(t) - P(t)\Delta t + E_s(t). \quad (4)$$

2.2 无线保密信道模型

源节点到两目的节点的信道为时变衰落信道, 其信道系数分别记为 $h_1(t)$, $h_2(t)$, 在一个时隙内保持不变. 信道噪声是方差为 σ_n^2 的加性 Gauss 白噪声. 根据 Shannon 公式, 可得两信道的瞬时信道容量为

$$C_i(t) = \log_2 \left(1 + \frac{P(t)|h_i(t)|^2}{\sigma_n^2} \right) \quad (i = 1, 2). \quad (5)$$

当源节点向其中某一目的节点传输信息时, 要求对于另一目的节点保密. 根据物理层安全的相关理论, 当合法信道容量大于窃听信道容量时, 通过采用物理层安全信道编码, 在以不高于可达保密速率的速率传输保密信息时, 合法接收端能正确译出保密信息, 而窃听者不能获得任何有意义的信息^[12]. 系统的可达保密速率定义为合法信道与窃听信道的容量之差:

$$R_s(t) = [C_d(t) - C_e(t)]^+, \quad (6)$$

其中 $[x]^+ = \max\{0, x\}$, $C_d(t)$ 为合法信道容量, $C_e(t)$ 为窃听信道容量. 因此, 对于本文的模型, 任一时刻, 源节点应向瞬时信道状态更好的目的节点发送保密信息, 相应的可达保密速率为

$$R_s(t) = \begin{cases} \log_2 \left(1 + \frac{P(t)|h_1(t)|^2}{\sigma_n^2} \right) - \log_2 \left(1 + \frac{P(t)|h_2(t)|^2}{\sigma_n^2} \right), & |h_1(t)| > |h_2(t)|, \\ \log_2 \left(1 + \frac{P(t)|h_2(t)|^2}{\sigma_n^2} \right) - \log_2 \left(1 + \frac{P(t)|h_1(t)|^2}{\sigma_n^2} \right), & |h_1(t)| < |h_2(t)|. \end{cases} \quad (7)$$

2.3 数据队列模型

假设每时隙到达源节点的、需发送给两个目的节点的数据量为 $D_i(t)$ ($i = 1, 2$), 数据队列 $Q_i(t)$ ($i = 1, 2$) 的长度由数据到达率和保密数据传输速率共同决定, 每时隙数据队列长度的更新公式为

$$Q_1(t+1) = \begin{cases} Q_1(t) - R_s(t) + D_1(t), & |h_1(t)| > |h_2(t)|, \\ Q_1(t) + D_1(t), & |h_1(t)| < |h_2(t)|; \end{cases} \quad (8)$$

$$Q_2(t+1) = \begin{cases} Q_2(t) + D_2(t), & |h_1(t)| > |h_2(t)|, \\ Q_2(t) - R_s(t) + D_2(t), & |h_1(t)| < |h_2(t)|. \end{cases} \quad (9)$$

数据队列长度在优化过程中用来调整优化目标函数中的权重, 保证两目的节点数据传输的公平性.

3 优化问题构造

每一时隙源节点向信道质量更好的目的节点传输保密数据, 为高效地利用收集的能量, 需要依据当前的状态 $E_a(t)$, $E_b(t)$ 和 $h_1(t)$, $h_2(t)$, 在满足发送功率限制、电池所存储电量限制和电池电量稳定的条件下, 设计功率调度方案, 最大化两个目的节点的长期时间平均保密速率, 即求解优化问题

$$\text{P1: } \max_{P(t)} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \mathbb{E}[R_s(t)] \quad \text{s.t. (2), (3), (4),} \quad (10)$$

其中 $\mathbb{E}[x]$ 表示期望运算.

将式 (4) 改写为

$$E_b(t+1) - E_b(t) = E_s(t) - \Delta t P(t), \quad (11)$$

易得时隙 t 从 0 到 T 有

$$\begin{aligned} E_b(T) - E_b(T-1) &= E_s(T-1) - \Delta t P(T-1), \\ &\vdots \\ E_b(2) - E_b(1) &= E_s(1) - \Delta t P(1), \\ E_b(1) - E_b(0) &= E_s(0) - \Delta t P(0), \end{aligned} \quad (12)$$

左右两端叠加后求期望有

$$\mathbb{E}[E_b(T)] - \mathbb{E}[E_b(0)] = \sum_{t=0}^{T-1} \mathbb{E}[E_s(t) - \Delta t P(t)], \quad (13)$$

令 $T \rightarrow \infty$, 再将上式两端同时除以 T 得

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \mathbb{E}[E_b(T)] - \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \mathbb{E}[E_b(0)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \mathbb{E}[E_s(t) - \Delta t P(t)], \quad (14)$$

由于电池的有限存储能力, 知 $0 \leq E_b(t) \leq E_{\max}$, $E_b(t)$ 是一个有限值, 故上式等号左边为 0. 记 $\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \mathbb{E}[E_s(t)] = \bar{E}_s$, $\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \mathbb{E}[P(t)] = \bar{P}$, 式 (14) 可改写为

$$\bar{E}_s - \Delta t \bar{P} = 0, \quad (15)$$

式 (15) 表示, 从长期的角度上来看, 应将全部到达电池的能量都用于传输数据.

上面的推导将式 (4) 的瞬时约束放松为式 (15) 的长期时间平均约束. Lyapunov 优化框架中长期时间平均约束可以通过保持队列稳定来满足. 定义能量虚队列 $X(t)$ 为

$$X(t) \triangleq E_b(t) - \delta, \quad (16)$$

其中 δ 为一正常数, 通过给能量队列增加一个偏移, 可以保证在经过 Lyapunov 优化后每时隙电池中有适当的能量去适应收集能量和信道特性的随机变化, 提高电池能量的利用效率. δ 越大, 则每时隙结束时电池保留的能量越多. 由 $E_b(t)$ 的更新公式 (4) 易得 $X(t)$ 的更新公式为

$$X(t+1) = X(t) - \Delta t P(t) + E_s(t), \quad (17)$$

易知, 只要满足虚队列 $\{X(t)\}$ 在长期时间平均上的稳定性

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{E[X(t)]}{t} = 0, \quad (18)$$

即可满足能量约束条件 $\bar{E}_s - \Delta t \bar{P} = 0$. 由于收集能量和信道的随机变化, 在满足长期时间平均虚队列稳定的情况下, 瞬时电池状态 $E_b(t)$ 可能在偏移量 δ 上下变化, 也即虚队列 $X(t)$ 在 0 附近上下波动, $X(t)$ 的值可为正数, 也可为负数. 将优化问题 P1 中的约束条件 (4) 替换为式 (18), 优化问题可重新构造为

$$\text{P2: } \max_{P(t)} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} E[R_s(t)] \quad \text{s.t. (2), (3), (18)}. \quad (19)$$

4 基于 Lyapunov 框架的优化算法

4.1 基于 Lyapunov 框架的优化问题求解

为求解上述优化问题, 可以使用一些传统的离线功率控制策略, 如注水算法, 但需要提前知道完整的信道状态信息和能量到达量. 但是在实际系统中, 这些信息的获取并不容易, 同时离线策略的计算复杂度也较高. 本文采用不需要信道和收集能量的完整信息, 仅依靠当前状态的在线优化方法——Lyapunov 算法^[8]来求解优化问题.

通过上面的分析, 可以知道优化目标是在保持电池电量 (即能量虚队列) 稳定的条件下, 最大化保密速率长期时间平均值, 而优化的对象是发送功率. 该优化可通过利用 Lyapunov 优化框架中队列漂移加惩罚最小化来实现.

定义 Lyapunov 函数为

$$L(X(t)) \triangleq \frac{X^2(t)}{2}, \quad (20)$$

定义 Lyapunov 漂移为

$$\Delta X(t) \triangleq E[L(X(t+1)) - L(X(t)) | X(t)], \quad (21)$$

漂移越小就意味着队列越稳定. 为了保证队列稳定的同时最大化保密速率, 可以将保密速率负值的均值作为惩罚项, 构造漂移加惩罚函数

$$\Delta X(t) - VE[R_s(t) | X(t)], \quad (22)$$

优化问题 P2 转化为求漂移加惩罚函数 (22) 的最小值. 式 (22) 中的 V 为惩罚项权重, 为大于 0 的常数, 用于在优化过程中在速率最大化与队列稳定上进行权衡. 要直接获得使式 (22) 最小的发送功率并不容易, 但其存在一个上界, 可以通过最小化这个上界间接地最小化式 (22).

引理1 式 (22) 存在上限

$$\Delta X(t) - VE[R_s(t) | X(t)] \leq B + X(t)E[E_s(t) - \Delta t P(t) | X(t)] - VE[R_s(t) | X(t)], \quad (23)$$

其中 B 为不小于 $E[\frac{(E_s(t) - \Delta t P(t))^2}{2} | X(t)]$ 的任意常数.

证明 以 $|h_1(t)| > |h_2(t)|$ 的情况进行证明, $|h_1(t)| < |h_2(t)|$ 时完全类似.

$$\Delta X(t) = E[L(X(t+1)) - L(X(t)) | X(t)] = E\left[\frac{X^2(t+1) - X^2(t)}{2} \middle| X(t)\right], \quad (24)$$

将 $X(t)$ 的更新公式 (17) 代入上式最后一个等式右边, 得

$$\mathbb{E} \left[\frac{X^2(t+1) - X^2(t)}{2} \middle| X(t) \right] = \mathbb{E} \left[\frac{(E_s(t) - \Delta t P(t))^2}{2} \middle| X(t) \right] + X(t) \mathbb{E}[E_s(t) - \Delta t P(t) | X(t)], \quad (25)$$

$E_s(t)$, $P(t)$ 都是有限值, 且 $\mathbb{E}[\frac{(E_s(t) - \Delta t P(t))^2}{2} | X(t)]$ 恒大于或等于 0, 因此必存在大于或等于 0 的常数 B 满足

$$B \geq \mathbb{E} \left[\frac{(E_s(t) - \Delta t P(t))^2}{2} \middle| X(t) \right], \quad (26)$$

联合式 (24)~(26) 就有

$$\Delta X(t) \leq B + X(t) \mathbb{E}[E_s(t) - \Delta t P(t) | X(t)], \quad (27)$$

于是漂移加惩罚式 (22) 存在上限

$$\Delta X(t) - V \mathbb{E}[R_s(t) | X(t)] \leq B + X(t) \mathbb{E}[E_s(t) - \Delta t P(t) | X(t)] - V \mathbb{E}[R_s(t) | X(t)]. \quad (28)$$

当前信道和各队列状态已知的条件下, 可将最小化漂移加惩罚式 (22) 改为在每时隙去最小化它的上界. 由于队列稳定的条件 (18) 已由漂移加惩罚式中的漂移来表示, 故去掉条件 (18), 将优化问题重构为

$$\text{P3: } \min_{P(t)} X(t) (E_s(t) - \Delta t P(t)) - V R_s(t) \quad \text{s.t. (2), (3)}. \quad (29)$$

能量到达率在每时隙初可知, 当时隙间隔足够小时, 可认为能量到达率在一个时隙内保持不变, 一个时隙中的充电量 $E_s(t)$ 在时隙初就可确定, 是一个确定量, 因此优化问题 P3 不再是一个随机优化问题.

在传输过程中, 由于两个数据队列数据到达量和信道特性的随机性, 以及能量收集的不确定性, 有可能出现两个数据队列长度差异过大的情况, 因此在设计能量的调度策略时除考虑高的能量效率外, 还需要考虑两个目的节点保密数据传输的公平性. 在调度中, 兼顾公平性的思路如下: 在目的节点 1 的信道质量优于目的节点 2, 即 $|h_1(t)| > |h_2(t)|$ 时, 源节点向目的节点 1 传送保密数据. 此时若 $Q_1(t) > Q_2(t)$, 表明目的节点 1 的数据队列更长, 需要适当增加发送功率, 采用更大的保密速率传输目的节点 1 的信息, 减小 $Q_1(t)$, $Q_2(t)$ 的差值, 应适当提高优化问题中惩罚项的权重, 也即增大式 (29) 中的 V 值, 使优化问题更倾向于优化保密速率 R_s ; 相反, 若 $Q_1(t) < Q_2(t)$, 应适当减小发送功率, 保留更多的电量用于后面的时隙中传输目的节点 2 的信息, 此时应减小优化问题中惩罚项的性能权重 V . 在 $|h_1(t)| < |h_2(t)|$ 时类似.

根据上述思路, 在式 (29) 的优化函数中增加一个根据两数据队列长度差值调节惩罚项权重因子的调节项, 将优化问题调整为

$$\text{P4: } \min_{P(t)} X(t) (E_s(t) - \Delta t P(t)) - \tilde{V}(t) R_s(t) \quad \text{s.t. (2), (3)}, \quad (30)$$

其中 $\tilde{V}(t)$ 为调整后的权重:

$$\tilde{V}(t) = \begin{cases} V^*(t), & V_{\min} < V^*(t) < V_{\max}, \\ V_{\max}, & V^*(t) \geq V_{\max}, \\ V_{\min}, & V^*(t) \leq V_{\min}, \end{cases} \quad (31)$$

且

$$V^*(t) = \begin{cases} V + U(Q_1(t) - Q_2(t)), & |h_1(t)| > |h_2(t)|, \\ V + U(Q_2(t) - Q_1(t)), & |h_1(t)| < |h_2(t)|, \end{cases} \quad (32)$$

式中正常数 U 是数据队列长度差值对速率性能权重的调整系数, 而 $V_{\max}, V_{\min}$ 为设定的权重的最大和最小值, 是为了避免调整后的权重过分偏大或偏小, 在电池电量稳定和保密速率性能优化间保持必要的平衡. 权重 $\tilde{V}(t)$ 可取值范围 $[V_{\min}, V_{\max}]$ 越大, 数据队列差值对权重的调控效果越好, 越能保证传输公平性, 但会影响保密速率的优化, 故 $V_{\max}, V_{\min}$ 的设定需要在传输公平性和保密传输速率优化间进行权衡.

命题1 优化问题 P4 的目标函数在 $P(t) \geq 0$ 时是关于 $P(t)$ 处处可导的凸函数. $X(t) \leq -\frac{\Delta\gamma(t)\tilde{V}(t)}{\ln 2 \cdot \Delta t}$ 时, 问题 P4 的解为 $P^{\text{opt}}(t) = 0$; $-\frac{\Delta\gamma(t)\tilde{V}(t)}{\ln 2 \cdot \Delta t} < X(t) < 0$ 时, 存在最优的功率值 $P^{\text{opt}}(t) = \min(P^*(t), P_{\max}, \frac{E_b(t)}{\Delta t})$; $X(t) \geq 0$ 时, 问题 P4 的解为 $P^{\text{opt}}(t) = \min(P_{\max}, \frac{E_b(t)}{\Delta t})$. 式中, $\Delta\gamma(t) = \frac{||h_1(t)|^2 - |h_2(t)|^2|}{\sigma_n^2}$.

证明 下面给出 $|h_1(t)| > |h_2(t)|$ 时的证明, $|h_1(t)| < |h_2(t)|$ 时类似.

记 $\frac{|h_i(t)|^2}{\sigma_n^2} = \gamma_i(t)$ ($i = 1, 2$),

$$\begin{aligned} J_1(t) &= X(t) (E_s(t) - \Delta t P(t)) - \tilde{V}(t) R_s(t) \\ &= X(t) (E_s(t) - \Delta t P(t)) - \tilde{V}(t) (\log_2(1 + P(t)\gamma_1(t)) - \log_2(1 + P(t)\gamma_2(t))), \end{aligned} \quad (33)$$

有

$$\frac{\partial J_1(t)}{\partial P(t)} = -\frac{\tilde{V}(t)}{\ln 2} \left(\frac{\gamma_1(t)}{1 + P(t)\gamma_1(t)} - \frac{\gamma_2(t)}{1 + P(t)\gamma_2(t)} \right) - \Delta t X(t), \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial J_1^2(t)}{\partial P(t)^2} &= \frac{\tilde{V}(t)}{\ln 2} \cdot \left(\frac{\gamma_1^2(t)}{(1 + P(t)\gamma_1(t))^2} - \frac{\gamma_2^2(t)}{(1 + P(t)\gamma_2(t))^2} \right) \\ &= \frac{\tilde{V}(t)}{\ln 2} \cdot \left(\frac{(\gamma_1^2(t) - \gamma_2^2(t)) + 2\gamma_1(t)\gamma_2(t)P(t)(\gamma_1(t) - \gamma_2(t))}{(1 + P(t)\gamma_1(t))^2(1 + P(t)\gamma_2(t))^2} \right), \end{aligned} \quad (35)$$

分析式 (35) 可知, 由于 $\gamma_1(t) > \gamma_2(t)$, $P(t) \geq 0$, 有 $\frac{\partial J_1^2(t)}{\partial P(t)^2} \geq 0$ 恒成立, 此时 $J_1(t)$ 为关于 $P(t)$ 处处可导的下凸函数, 故可以通过求 $\frac{\partial J_1(t)}{\partial P(t)}$ 的根来求得 $J_1(t)$ 的极小值点, 并联合边界点 0, $P_{\max}$, 以及电池存储电量约束 (即式 (3)) 的最大功率 $\frac{E_b(t)}{\Delta t}$ 确定最小值点.

令 $\frac{\partial J_1(t)}{\partial P(t)} = 0$, 通过一系列变换可得到一元二次方程

$$\frac{\ln 2 \cdot X(t) \Delta t}{\tilde{V}(t)} \gamma_1(t) \gamma_2(t) P^2(t) + \frac{\ln 2 \cdot X(t) \Delta t}{\tilde{V}(t)} (\gamma_1(t) + \gamma_2(t)) P(t) + \frac{\ln 2 \cdot X(t) \Delta t}{\tilde{V}(t)} + \gamma_1(t) - \gamma_2(t) = 0, \quad (36)$$

解得 $P(t) = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac_1}}{2a}$, 其中 $P: a = \frac{\ln 2 \cdot X(t) \Delta t}{\tilde{V}(t)} \gamma_1(t) \gamma_2(t)$, $b = \frac{\ln 2 \cdot X(t) \Delta t}{\tilde{V}(t)} (\gamma_1(t) + \gamma_2(t))$, $c_1 = \frac{\ln 2 \cdot X(t) \Delta t}{\tilde{V}(t)} + \gamma_1(t) - \gamma_2(t)$.

考虑 3 种情况:

(1) $X(t) \leq -\frac{\Delta\gamma(t)\tilde{V}(t)}{\ln 2 \cdot \Delta t}$ 时, $X(t) \leq 0$, $4ac_1 \geq 0$, $0 \leq \sqrt{b^2 - 4ac_1} \leq |b| = -b$, $-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac_1} \geq 0$, $c = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac_1}}{2a} \leq 0$, 那么 $P(t)$ 的两个解都小于或等于 0. 由于此时 $\frac{\partial J_1(t)}{\partial P(t)}$ 恒为正, 故目标函数是 $P(t)$ 的单调递增函数, 且应有 $P(t) \geq 0$, 所以最优功率值为 $P^{\text{opt}}(t) = 0$.

(2) $-\frac{\Delta\gamma(t)\tilde{V}(t)}{\ln 2 \cdot \Delta t} < X(t) < 0$ 时, $4ac_1 < 0$, $\sqrt{b^2 - 4ac_1} > |b| = -b$, $-b + \sqrt{b^2 - 4ac_1} > 0$, $-b - \sqrt{b^2 - 4ac_1} < 0$, $\frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac_1}}{2a} < 0$, $\frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac_1}}{2a} > 0$, 此时有非负解

$$P^*(t) = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac_1}}{2a}, \quad (37)$$

由于目标函数是下凸函数, 该解若在最大功率和电池存储电量支持的最大发送功率范围内, 则其就是最优功率值, 否则就取允许的最大功率作为最优功率值, 即

$$P^{\text{opt}}(t) = \min \left(P^*(t), P_{\max}, \frac{E_b(t)}{\Delta t} \right). \quad (38)$$

(3) $X(t) \geq 0$ 时, $\frac{\partial J_1(t)}{\partial P(t)}$ 的值始终为负, 故 $J_1(t)$ 为关于 $P(t)$ 单调递减的下凸函数, 此时使得 $J_1(t)$ 最小的功率值为 $P^{\text{opt}}(t) = \min(P_{\max}, \frac{E_b(t)}{\Delta t})$.

在 $|h_1(t)| < |h_2(t)|$ 时, 进行类似的分析, 可得到最优的功率值为:

(1) 当 $X(t) \leq -\frac{\Delta\gamma(t)\tilde{V}(t)}{\ln 2 \cdot \Delta t}$ 时, 最优的功率值为 $P^{\text{opt}}(t) = 0$.

(2) 若 $-\frac{\Delta\gamma(t)\tilde{V}(t)}{\ln 2 \cdot \Delta t} < X(t) < 0$,

$$P^*(t) = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac_2}}{2a}, \quad (39)$$

这里, $c_2 = \frac{\ln 2 \cdot X(t) \Delta t}{\tilde{V}(t)} + \gamma_2(t) - \gamma_1(t)$, 最优发送功率 $P^{\text{opt}}(t) = \min(P^*(t), P_{\max}, \frac{E_b(t)}{\Delta t})$.

(3) 当 $X(t) \geq 0$ 时, 最优功率 $P^{\text{opt}}(t) = \min(P_{\max}, \frac{E_b(t)}{\Delta t})$.

总结上述优化过程, 给出优化算法 (算法 1).

Algorithm 1 Online power control algorithm based on Lyapunov

Set weights V ($V \geq 0$), U ($U \geq 0$), weight limits $V_{\max}$, $V_{\min}$, initial battery energy $E_b(0)$, and time-independent constant δ .

At time slot t :

1: Observe system status $E_a(t)$, $h_1(t)$, $h_2(t)$, $Q_1(t)$, $Q_2(t)$, and $X(t)$.

2: Observe channel states of two users:

(1) if $|h_1(t)| > |h_2(t)|$, send confidential information to destination node 1.

(i) if $X(t) \leq -\frac{\Delta\gamma(t)\tilde{V}(t)}{\ln 2 \cdot \Delta t}$, the optimal transmission power is $P^{\text{opt}}(t) = 0$.

(ii) if $-\frac{\Delta\gamma(t)\tilde{V}(t)}{\ln 2 \cdot \Delta t} < X(t) < 0$, the optimal transmission power is $P^{\text{opt}}(t) = \min(P^*(t), P_{\max}, \frac{E_b(t)}{\Delta t})$, $P^*(t)$ in it can be obtained by Eq. (37).

(iii) if $X(t) \geq 0$, the optimal transmission power is $P^{\text{opt}}(t) = \min(P_{\max}, \frac{E_b(t)}{\Delta t})$.

(2) if $|h_1(t)| < |h_2(t)|$, send confidential information to destination node 2.

(i) if $X(t) \leq -\frac{\Delta\gamma(t)\tilde{V}(t)}{\ln 2 \cdot \Delta t}$, the optimal transmission power is $P^{\text{opt}}(t) = 0$.

(ii) if $-\frac{\Delta\gamma(t)\tilde{V}(t)}{\ln 2 \cdot \Delta t} < X(t) < 0$, the optimal transmission power is $P^{\text{opt}}(t) = \min(P^*(t), P_{\max}, \frac{E_b(t)}{\Delta t})$, $P^*(t)$ in it can obtain by Eq. (39).

(iii) if $X(t) \geq 0$, the optimal transmission power is $P^{\text{opt}}(t) = \min(P_{\max}, \frac{E_b(t)}{\Delta t})$.

3: Calculate the secrecy rate $R_s(t)$ according to Eq. (7). Update data queue $Q_1(t)$, $Q_2(t)$ and energy virtual queue $X(t)$ according to Eqs. (8), (9) and (17).

4.2 优化性能分析

通过前面的分析, 我们采用 Lyapunov 优化算法将最大化长期时间平均保密速率问题 P1 转化成了单时隙优化问题 P4, 根据文献 [8] 的分析, 如果实现了单时隙的性能优化, 那么也可以近似实现长期时间平均的性能优化. 本文算法 1 达到的保密速率与满足所有限制条件下的最大保密速率的关系为

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \sup \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \mathbb{E}[R_s(t)] \geq \bar{R}_s^{\text{opt}} - \mathcal{O}\left(\frac{1}{\bar{V}}\right), \quad (40)$$

其中 $\bar{R}_s^{\text{opt}}$ 表示通过其他可能的算法解决优化问题, 优化问题 (10) 能达到的最大保密速率; $\mathcal{O}(x)$ 表示 x 的高阶无穷小; $\bar{V}$ 表示整个传输过程中惩罚项权重 $\tilde{V}(t)$ 的均值.

从式 (31) 和 (32) 可知, $\hat{V}(t)$ 与权值 V, U 相关. 理论上 V 增大或 U 减小均能获得更好的目标保密速率, 但随着性能权重增加, 优化过程中队列的稳定性变差; 若权重过小, 则保密速率的优化结果不佳. 因此在利用两队列长度差调节权重时, 设置权值上下限 $V_{\max}, V_{\min}$.

5 仿真结果

本节中, 我们通过仿真来验证本文算法的性能. 除非特别指明, 仿真中的参数设置如下: 每时隙到达能量收集装置的能量 $E_a(t)$ 为均匀分布的复合 Poisson 过程, 到达率为 $\lambda = 0.5$ unit/slot, 每单位所含能量服从 $[0, 0.4]$ 之间均值为 0.2 J/unit 的均匀分布; 每时隙发往两个目的节点的数据量 $D_i(t) (i = 1, 2)$ 服从到达率为 0.8 bit/slot 的 Poisson 分布¹⁾; 电池最大容量 $E_{\max} = 50$ J; 电池的最大充电速率 $E_{c, \max} = 0.3$ J; 最大放电速率为 $P_{\max} = 0.5$ W; 信道为 Rayleigh 衰落信道, 信道系数服从均值为 0 , 方差为 1 的复 Gauss 分布, 即 $h_i(t) (i = 1, 2) \sim \mathcal{CN}(0, 1)$, 信道系数在一个时隙内保持不变; 信道噪声方差为 $\sigma_n^2 = 1$ W; 时隙长度 $\Delta t = 1$ s; $V = 5$; $U = 1$; $\delta = 40$ J; $V_{\min} = 2$; $V_{\max} = 15$; 电池初始电量都设为 50 J, 数据队列初始长度都为 10 bit.

5.1 与对照算法的性能对比

仿真时长设为 $T = 1 \times 10^5$ s. 为验证本文算法的性能, 我们将其与贪婪算法^[10]、半功率算法进行平均保密速率的对比. 电池初始电量分别为 $50, 35, 20$ J. 贪婪算法在每时隙源节点都将电池中所有可以用于传输的功率用来给信道状态更好的目的节点传输信息, 即 $P_g(t) = \min(E_b(t)/\Delta t, P_{\max})$; 半功率算法是每时隙源节点都将电池中的电量的一半用来给信道状态更好的用户节点传输信息, 即 $P_h(t) = \frac{1}{2} \min(E_b(t)/\Delta t, P_{\max})$.

图 2 给出了平均保密速率随时间变化的仿真结果. 每一时隙的平均保密速率为从仿真开始到当前时刻各时隙保密速率的平均值. 可以清楚地看到, 本文算法与两种对比算法的长期时间平均保密速率最终都收敛, 且通过本文算法得到的收敛的保密速率不受电池初始条件影响, 稳定性较好. 综合来看, 本文算法的性能最优, 贪婪算法性能最差.

图 3 给出了 3 种算法在电池初始电量分别为 $50, 35, 20$ J 时的电池电量 $E_b(t)$ 的时间轨迹图. 从图中可以看出, 即使初始电量不同, 但 3 种算法的电池电量最终都会收敛到相同的一个范围内. 本文算法的电池能量基本保持在 $25 \sim 35$ J 之间, 长期时间内保持稳定; 另外两种算法在短时间内将电池的初始能量耗光, 接下来的时隙中的传输功率依赖于上一时隙到达电池的能量. 由于电池电量过低, 所以不能很好地利用信道的传输能力, 导致保密速率较低.

图 4 给出 3 种算法的两数据队列长度差 $Q_1(t) - Q_2(t)$ 的时间轨迹图. 本文算法两队列长度差在 0 值处的一个较小范围内上下波动, 说明两用户队列长度基本相同, 系统很好地兼顾了两用户的公平性. 半功率算法和贪婪算法的两队列长度差会出现较大波动, 说明两用户的传输公平性不佳. 仿真结果说明本文算法优化过程中通过用队列长度差来调整速率权重以兼顾传输公平性的效果明显.

5.2 参数变化对保密速率的影响

设 $T = 10^6$ s. 图 5 给出了能量到达率 λ 对平算法性能的影响.

从图 5(a) 可以看出, 随着能量到达率增加, 3 种算法的保密速率都随之增大, 这是因为每时隙到达的能量越多, 可用于传输信号的能量也就越多, 传输速率越高. 图 5(b) 给出了电池存储的电量均值

1) 此时可以满足数据队列中总有足够的数据用于传输.

图 2 (网络版彩图) 算法性能比较

Figure 2 (Color online) Algorithm performance comparison

图 3 (网络版彩图) 电池电量时间轨迹

Figure 3 (Color online) Battery power time track

图 4 (网络版彩图) 数据队列积压差时间轨迹

Figure 4 (Color online) Data queue backlog difference time track

随变化的情况. 能量到达率越大, 本文算法的电池平均电量越大; 贪婪算法和半功率算法在短时间内将所有可用的能量耗光, 所以电池电量始终保持在 0 左右. 图 5(c) 则给出了 3 种算法的两数据队列长度差均方根值 $\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} (Q_1(t) - Q_2(t))^2}$ 的仿真结果, 两种对比算法的队列差值有很大的波动, 不具规律性, 且每次仿真都会有较大的不同, 说明 λ 的变化对队列差没有明显的影响. 本文算法的队列差值始终保持在较低的水平上, 尽管可用能量有明显的变化, 但仍能保持两用户的公平性, 说明在优化过程中, 通过用队列差控制速率权重因子, 实现了两用户服务公平的目标.

图 6 给出了能量虚队列偏移量 δ 对系统性能的影响. 偏移量的设置是为了在电池中保留适当的电量, 以适应收集能量和信道质量的随机变化. 从图 6(a) 看出, 随着偏移量 δ 增加, 每时隙结束时电池的平均电量水平增加, 因此算法能在更宽的范围内根据信道条件调控发送功率. 图 6(b) 则给出了偏

图 5 (网络版彩图) 系统性能与能量到达率的关系

Figure 5 (Color online) Relationship between system performance and energy arrival rate. (a) Average security rate vs. energy arrival rate; (b) average battery power vs. energy arrival rate; (c) RMS value of data queue difference vs. energy arrival rate

移量 δ 对平均保密速率的影响. 可见在 δ 较小时, 平均保密速率随偏移量增加而增加, 在 $\delta = 15$ 以后基本不再随其增加而增加. 这是因为在 δ 较小时, 每时隙结束电池中保留电量较少, 当能量达到量和信道质量出现较大波动时, 不能高效地利用能量 (即应在信道条件较好时分配更多的能量), 因此性能较差; δ 增大之后, 算法能在更宽的范围内根据信道条件调控发送功率, 因此性能有明显改善. δ 增大到一定程度之后, 性能不再有明显的改善, 这是因为传输可用的平均功率还受到上一时隙收集能量的限制. 图 6(c) 给出偏移量 δ 变化时, 两队列长度差均方根值的变化情况. 可见, δ 较小时, 其增大时队列差值明显减小, 其原因在于 δ 增大, 电池保留的电量增大, 每一时隙根据两目的节点信道条件和队列情况调节发送功率的范围增大明显, 因此队列长度差有明显下降. 而在 δ 较大时, 由于受到其他因素的制约, 其继续增大对两队列差减小的影响不再明显.

图 7 给出了权值 U, V 对系统性能影响的仿真结果. 图 7(a) 显示, 平均保密速率随着 V 增大, 这是因为 V 增大时保密速率在优化问题中所占的比重增大. 而在 V 保持不变时, U 增大时保密速率有轻微的下降. 这是由于 U 是在 V 的基础上为提高两目的节点数据传输公平性而增加的自适应调节项权重,

图 6 (网络版彩图) δ 对系统性能的影响

Figure 6 (Color online) The effect of δ on system performance. (a) Average battery power vs. δ ; (b) average security rate vs. δ ; (c) RMS value of data queue difference vs. δ

U 增大, 则优化时会更多地考虑两数据队列差的情况, 因此会在一定程度上会影响传输速率. 图 7(b) 清楚地显示两数据队列长度差的均方根值随 U 的增大而减小. 在同一个 U 值下, V 增大时平均保密速率值也增大, 每一时隙数据队列长度值的变化也会增大, 因此两数据队列长度差相应增大.

图 8 给出了速率权重值的最大值 $V_{\max}$ 和最小值 $V_{\min}$ 的设置对保密速率和队列长度差的影响. 联合图 8(a) 和 (b) 显示, $V_{\max}$ 增大或 $V_{\min}$ 减小使得保密速率权重的调节范围扩大, 对两队列长度差的减小有利, 但相应会降低保密速率的平均值.

6 结论

本文研究了能量收集无线通信系统中信息安全传输过程中通过对发送功率进行合理的调度, 提高保密传输速率的问题, 设计了基于 Lyapunov 优化框架的在线功率控制方案. 系统模型中包含一个能量收集源节点和两个同等地位的节点, 两目的节点间信息相互保密. 为实现信息的安全传输, 每时隙源节点观察两目的节点信道的信道状态, 向信道状态更好的目的节点发送信息. 为高效地利用收集

图 7 (网络版彩图) 系统性能与权重 U , V 的关系

Figure 7 (Color online) Relationship between system performance and weight U and V . (a) Average security rate vs. U and V ; (b) RMS value of data queue difference vs. U and V

图 8 (网络版彩图) 权值上下限对系统性能的影响

Figure 8 (Color online) The influence of the upper and lower limits of weight on system performance. (a) Average security rate vs. $V_{\max}$ and $V_{\min}$; (b) RMS value of data queue difference vs. $V_{\max}$ and $V_{\min}$

的能量, 采用 Lyapunov 优化框架. 优化每时隙的发送功率. 优化过程中, 在不需要提前知道信道状态和收集能量统计特性的前提下, 将电池能量限制问题转换为能量虚队列稳定问题, 再进一步将长期时间平均的优化问题转化为单时隙的优化题, 最后求解得到每时隙的最优发送功率. 另外, 优化过程中还考虑了两用户数据传输的公平性问题, 利用两数据队列长度差值对优化问题中保密速率的权重因子进行调控, 保证了传输的公平性, 其中权重因子的取值范围与系统性能关系的理论分析可以作为下一步深入的工作. 与对比算法比较的仿真结果显示本文所提算法能够在兼顾传输公平性的同时, 更高效地利用收集的能量和信道条件, 实现保密信息的安全传输.

参考文献

- 1 He Y J, Cheng X D, Peng W, et al. A survey of energy harvesting communications: models and offline optimal policies. *IEEE Commun Mag*, 2015, 53: 79–85
- 2 Ku M L, Li W, Chen Y, et al. Advances in energy harvesting communications: past, present, and future challenges. *IEEE Commun Surv Tut*, 2016, 18: 1384–1412

- 3 Zordan D, Miozzo M, Dini P, et al. When telecommunications networks meet energy grids: cellular networks with energy harvesting and trading capabilities. *IEEE Commun Mag*, 2015, 53: 117–123
- 4 Tutuncuoglu K, Yener A. Optimum transmission policies for battery limited energy harvesting nodes. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2012, 11: 1180–1189
- 5 Wu Y, Qian L P, Huang L, et al. Optimal relay selection and power control for energy-harvesting wireless relay networks. *IEEE Trans Green Commun Netw*, 2018, 2: 471–481
- 6 Ozel O, Tutuncuoglu K, Yang J, et al. Transmission with energy harvesting nodes in fading wireless channels: optimal policies. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2011, 29: 1732–1743
- 7 Sinha A, Chaporkar P. Optimal power allocation for a renewable energy source. In: *Proceedings of National Conference on Communications (NCC)*, Kharagpur, 2012
- 8 Neely M J. *Stochastic Network Optimization with Application to Communication and Queueing Systems*. San Rafael: Morgan & Claypool, 2010
- 9 Qiu C R, Hu Y, Chen Y, et al. Lyapunov optimization for energy harvesting wireless sensor communications. *IEEE Int Thing J*, 2018, 5: 1947–1956
- 10 Amirnavaei F, Dong M. Online power control strategy for wireless transmission with energy harvesting. In: *Proceedings of the 16th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, Stockholm, 2015
- 11 Dong M, Li W, Amirnavaei F. Online joint power control for two-hop wireless relay networks with energy harvesting. *IEEE Trans Signal Process*, 2018, 66: 463–478
- 12 Wyner A D. The wire-tap channel. *Bell Syst Tech J*, 1975, 54: 1355–1387
- 13 Liu Y L, Chen H H, Wang L M. Physical layer security for next generation wireless networks: theories, technologies, and challenges. *IEEE Commun Surv Tut*, 2017, 19: 347–376
- 14 Chen X M, Ng D W K, Gerstacker W H, et al. A survey on multiple-antenna techniques for physical layer security. *IEEE Commun Surv Tut*, 2017, 19: 1027–1053
- 15 Wang H M, Xia X G. Enhancing wireless secrecy via cooperation: signal design and optimization. *IEEE Commun Mag*, 2015, 53: 47–53

An online power-control algorithm for energy harvesting and secure transmission systems

Weijia LEI & Ziwei WANG*

School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

* Corresponding author. E-mail: wangziwei0309@163.com

Abstract Here, we propose an online power-control strategy based on a Lyapunov optimization framework to optimize secrecy rate during the process of secure transmission in wireless communication systems with energy harvesting. We developed a system comprising one transmitter and two receivers that allow secure communication over a wireless fading channel. Additionally, this system includes an energy harvesting source node and two destination nodes that allow maintenance of information security between the two destination nodes. In each slot, the source node selects the destination node with the optimal channel state as the receiver of secret information, whereas the other destination node acts as an "eavesdropper." Transmission power and the rate of information transfer are established according to current battery power and channel status, with constraints related to battery power converted into a virtual queue and the optimization target converted into a penalty. By optimizing the transmission power to minimize the instantaneous drift plus penalty function, the long-term average secrecy rate is maximized under the constraint condition. Furthermore, the transmission fairness of the two destination nodes is evaluated during the optimization process. Simulation results show that the proposed scheme effectively improved the long-term average secrecy rate of the system.

Keywords energy harvesting, physical-layer security, secure transmission, online power control, Lyapunov frame

Weijia LEI was born in 1969. He received his Ph.D. degree in signal and information processing from the University of Electronic Science and Technology, Chengdu, China, in 2010, his M.S. degree in communication and electronic system from Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing, China, in 1999, and his B.S. degree in communication engineering from Chongqing University of Posts and Telecommunications (CQUPT), Chongqing, China, in 1992. He is currently

a professor at the School of Communication and Information Engineering, CQUPT. His research interests include channel coding and modulation, cooperation relay, and physical-layer security.

Ziwei WANG was born in 1995. She received her B.S. degree at Huaqiao University, Xiamen, China, in 2017. She is currently an M.S. candidate at Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing, China. Her research interests include wireless communication and physical-layer security.