

文章编号: 2095-4980(2020)03-0397-07

基于射频能量采集的 Underlay CRN 的能效优化

田 杰¹, 程永生¹, 肖 何², 侯 冬³, 解 楠¹

(1.中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999; 2.西华师范大学 计算机学院, 四川 南充 637009;
3.电子科技大学 自动化工程学院, 四川 成都 611731)

摘要: 提出一种基于射频(RF)能量采集的认知无线网络(CRN)架构。次用户(SU)消耗的总能量必须等于或小于采集的总能量,以保护主用户(PU)不受干扰。在满足次用户的服务质量前提下,确定在射频能量采集认知无线网络中最大化能效的最优传输时间和功率分配。在能效最大化过程中,引入吞吐量约束,找到服务质量和能源消耗之间的平衡。能效优化是一个非线性分式规划问题,使用坐标上升将其分成2个子问题,即给定传输时间下的功率分配与给定功率分配下的传输时间选择,然后使用Charnes-Cooper变形方法将非凸问题转化为一个等价凹问题。仿真结果表明,该方案能够实现有效的能效优化。

关键词: 能效; 认知无线电; 能量采集; 能量因果关系; 吞吐量约束

中图分类号: TN393

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019021

Energy efficiency optimization for Underlay Cognitive Radio Networks with RF energy harvesting

TIAN Jie¹, CHENG Yongsheng¹, XIAO He², HOU Dong³, XIE Nan¹

(1.Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China;

2.Computer School, China West Normal University, Nanchong Sichuan 637009, China;

3.School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: A Radio Frequency(RF) energy harvesting based Cognitive Radio Network(CRN) is proposed, where a Secondary User(SU) first harvests energy from the RF signals of Primary User(PU) and then transmits data using the harvested energy in one slot. The total consumed energy by the SU must be no more than the total harvested energy, in order to protect the PU from interference. Under the satisfaction of Quality-of-Service(QoS) of SU, the goal is to determine the optimal transmitting time and power allocation that maximizes its Energy Efficiency(EE) in the RF Energy Harvesting CRN(EH-CRN). In the process of maximizing energy efficiency, a balance is found between QoS and energy consumption. Less energy consumption allows the cognitive energy harvesting system to run more steadily and continuously, which is important while throughput constraint ensures the QoS of the system. To solve EE optimization as a nonlinear fractional optimization problem, it is firstly decomposed into two sub-problems by using Coordinate Ascendant, and then the nonconvex problem is transformed into an equivalent concave problem by using Charnes-Cooper Transformation method. Simulation results show the proposed scheme achieves effective EE.

Keywords: Energy Efficiency; cognitive radio; energy harvesting; underlay energy causality; throughput constraint

能量采集认知无线网络(EH-CRN)极具发展前景,可在解决频谱资源短缺和能效(EE)问题的同时符合绿色通信的要求,在国内外已有较为广泛的研究^[1-6]。如果采用射频能量采集技术,无线节点可采集周围环境射频源所发出的电磁波并转换为能量进行数据传输。由于发射机所辐射的射频信号具有持续可用性,因此相比其他能

收稿日期: 2019-01-16; 修回日期: 2019-03-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61771410; 61871084; 61601084)

作者简介: 田 杰(1982-),男,在读博士研究生,副研究员,主要从事无线网络优化及高精度同步系统等研究。email:22862745@qq.com

量采集,如热能和光能等,射频能量采集更具灵活性和持续性^[7-8]。在周围射频认知无线网络中,次用户(SU)可采用 3 种运行模式:交织(Interweave)、覆盖(Overlay)和重叠(Underlay)^[8],本文讨论在 Underlay 模式下,只要主用户(PU)接收机所受干扰处于可接受范围内,次用户可同主用户进行数据的并发传输。

射频能量源主要分为专用射频和环境射频。由于是按需供应和定向传输,专用射频可为节点提供能量直至达到预测能量值,如有线供电通信网络(Wire Powered Communication Network, WPCN)^[9-14]和无线信息与能量的同时传输网络(Simultaneous Power Transfer Networks, SWIPT)(信息和能量均属于射频信号^[15-17])。然而,上述 WPCNs 或 SWIPTs 的工作均基于系统可在给定频段内进行专用假设,无需考虑与其他系统在同频段下的相互干扰。

环境射频信号包括附近如基站、主授权网络和其他射频源等环境射频源所辐射信号。主网络辐射的射频信号可作为认知用户进行能量采集的绿色能量源,主要为低能耗网络(如传感器网络)提供能量。目前研究主要集中在射频能量采集认知无线网络(RF EH-CRNs)中, SUs 首先从 PUs 的信号中获取能量,然后与 PUs 共用频谱进行传输。文献[18]重点研究了收集-感知-吞吐量的权衡以及感知时间、感知阈值以及融合规则的联合优化,在保证 PU 服务得到充分保障下,最大化 SU 预期可达吞吐量。文献[19]中, PU 不仅能够在信道空闲时在授权给主要用户的信道上传输数据包,还能够在信道繁忙时从主要用户传输中获取射频能量。文献[20]提出一种基于能量采集的两跳认知中继网络。文献[21]分析了一种具有射频能量采集功能的多跳认知无线网络,该网络中所有 SU 都是由所接收 PU 信号的能量进行自供电。上述关于 RF EH-CRN 的工作主要集中在可达吞吐量和能量收集之间的性能权衡上。同时,传输数据量越大,能耗越大。为降低硬件设计复杂性,节点能量收集效率通常较低。在环境中采用 RF EH-CRNs 以节能方式实现数据传输非常重要,可避免过度能源消耗和系统中断^[2]。

能量效率定义为平均传输的数据量与平均能耗之间的比值,是节能传输无线通信的重要指标,但目前针对 QoS 等复杂约束下的 Underlay RF EH-CRN 相关研究较少^[22]。本文目标是在能量因果约束、干扰约束下和保证 SU 的服务质量前提下,最大限度提高射频认知无线网络能量效率。

1 系统模型

如图 1 所示,考虑带有一个主用户发射机(PT)-接收机(PR)传输对和一个次用户发射机(ST)-接收机(SR)对的时隙 RF EH-CRN。在 RF EH-CRN 中有以下几种链路:a) PT 和 ST 之间的链路称为能量收集链路;b) PT(ST)和 SR(PR)之间的链路称为干扰链路;c) PT(PR)和 ST(SR)之间的链路称为数据传输链路。PT 总处于活动状态,可在授权频谱中为 PR 服务,并在给定的干扰功率约束下与 SU 共享频谱资源。假设所有信道遵循块衰落,即在每个时隙各分块的信道衰落状态维持不变,但分块之间会发生变化。

假设 CRN 系统中, SR 拥有一个固定电源供电(根据应用场景的不同,也可给 SR 端配置能量收集功能,系统模型会进行相应修改), ST 从 PT 的 RF 信号中收集能量进行自供电。为降低硬件设计和系统复杂性,让 ST 在一个时刻只能进行能量采集或数据传输,即 ST 以先采集后传输的方式工作。系统考虑一个持续时间为 T 的帧,该帧被分割为两部分并分配给 ST,分别进行能量采集和数据传输,如图 1 和图 2 所示。

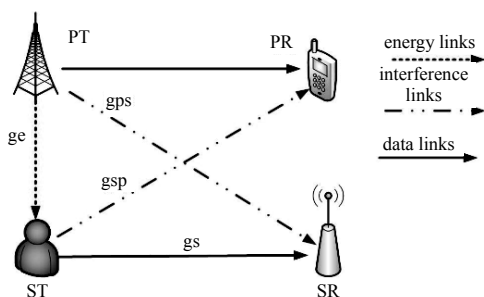


Fig.1 System model
图 1 系统模型

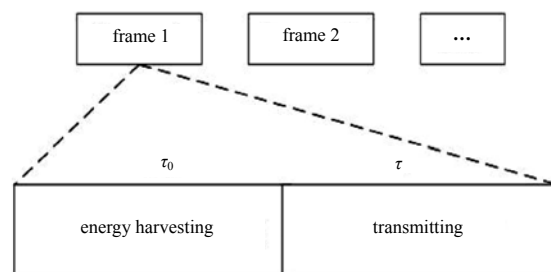


Fig.2 Time slot structure of RF EH-CRN
图 2 系统时隙结构

1.1 能量收集阶段

假设 PT 持续保持通信工作状态。目前已有的干扰消除技术已能将干扰信号强度削减至底噪级别,假设 PT 端的数据传输不会对 SR 的数据接收造成干扰。类似文献[21],将 ST 收集到的能量保存在一个超级电容中,这种超级电容具有可满足小型化要求、且理论上可以无限次充放电周期等优点。经过了持续时间为 τ_0 的能量采集,ST 能收集到的能量可根据式(1)进行计算:

$$E_H = \eta g_e P_T \tau_0 \quad (1)$$

式中: η 为能量收集效率; g_e 为能量收集增益; P_T 为 PT 传输功率。

1.2 数据传输阶段

在数据传输阶段, ST 消耗收集到的能量进行数据传输。由于超级电容的泄漏以及储能或管理方法的缺乏, 假设该系统在进行一帧数据传输后, 剩余的能量可能无法在下一帧数据传输阶段使用。显然, ST 的总消耗能量必须等于或小于 E_H , 即能量因果关系约束为:

$$(Pg_s + P_c)\tau \leq E_H \quad (2)$$

式中: P 为 ST 传输功率; P_c 为 ST 发射电路能量损耗; g_s 为次用户数据传输链路增益。

ST 与 PU 在 CRN 的 Underlay 工作模式下共享频谱, 为保护主用户不受干扰, 必须对 ST 的发射功率进行限制, 以进行干涉碰撞约束。

$$Pg_{sp} \leq P_1 \quad (3)$$

式中: P_1 为 PR 所允许的干扰峰值门限; g_{sp} 为次用户干扰信道增益。计算 SU 在一帧中可实现的吞吐量:

$$R(\tau, P) = \tau \log_2 \left(1 + \frac{Pg_s}{P_T g_{ps} + \sigma^2} \right) \quad (4)$$

式中: g_{ps} 为主用户干扰信道增益; σ^2 为 SR 处的噪声功率。

无线网络中, 节点以高效能的方式传输数据时, 为节省能量, 总是以尽可能小的吞吐量传输数据。然而, 在许多场景中, 如无线传感器网络执行数据收集、事件监视和其他应用程序, 为满足传输 QoS 而对无线节点提出最小吞吐量要求是必不可少的。为满足 SU 的 QoS, 为 SU 设置一个最小所需速率, 即吞吐量约束。

$$R(\tau, P) \geq R_{out} \quad (5)$$

1.3 系统问题描述

网络能量效率被定义为传输的比特数与消耗能量的比值。在一个时隙中, RF EH-CRNs 的总能耗 E_C 由两部分组成: a) 能量采集阶段中, 能量采集电路所消耗的能量 P_H ; b) 传输阶段所消耗能量。 E_C 表达式如下:

$$E_C = P_H \tau_0 + (Pg_s + P_c)\tau \quad (6)$$

将式(2)~式(6)进行整合, 可以构建 RF EH-CRNs 的能量效率问题:

$$\begin{cases} \text{OP1: } \max_{\tau_0, \tau, P} EE(\tau_0, \tau, P) = \frac{\tau \log_2 \left(1 + \frac{Pg_s}{P_T g_{ps} + \sigma^2} \right)}{P_H \tau_0 + (Pg_s + P_c)\tau} \\ \text{s.t. } \begin{cases} \text{C1: } (Pg_s + P_c)\tau \leq \eta g_e P_T \tau_0; & \text{C2: } Pg_{sp} \leq P_1 \\ \text{C3: } R(\tau, P) \geq R_{out}; & \text{C4: } 0 \leq \tau \leq T; & \text{C5: } 0 \leq P \leq P_{max} \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

式中: C1 表示在当前分配的时间和传输功率下, 数据传输能耗不能高于系统所收集的能量; C2 表示 ST 的传输功率不能超过 PR 可承受的干扰功率门限, 本系统通过该机制保护 PR 免于干扰影响; C3 表示本系统的吞吐量约束, 为系统的 QoS 保证; C4 表示被 ST 消耗的总时间不能多于一个帧周期; C5 表示 ST 的最大功率约束。

2 问题求解

优化问题 OP1 是一个非线性分式规划问题, 很明显这个问题关于变量是非凸的, 一般为 NP-Hard 问题。在解决优化问题 OP1 之前, 对以下引理进行证明。

引理 1: 优化问题 OP1 的最大能量效率总是在 $\tau_0 + \tau = T$ 处取得。

证明: 可将 EE 问题转化为下述形式:

$$EE(\tau_0, \tau, P) = \frac{\log_2 \left(1 + \frac{Pg_s}{P_T g_{ps} + \sigma^2} \right)}{(P_T - \eta g_e P_T) \frac{\tau_0}{T} + (Pg_s + P_c)} \quad (8)$$

假设当 $\tau_0 + \tau < T$ 时, 可得到问题 OP1 的最大值 $EE(\tau_0, \tau, P)$ 。由于能量守恒定律, 实际情况下增量 $\Delta = P_T - \eta g_e P_T$ 必为正数。给定 (τ_0, P) , 显然函数 $EE(\tau_0, \tau, P)$ 将关于变量 τ 递增。因此, 总能找到 $\tau' (\tau' > \tau)$ 满足 $EE(\tau_0, \tau, P)$, 这与最大化结果产生矛盾。因此, 引理得证。接下来, 根据引理 1 的结论, 通过消除变量 τ_0 将 OP1 问题变形为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{OP2: } \max_{\tau, P} EE(\tau, P) = \frac{\tau \log_2 \left(1 + \frac{Pg_s}{P_T g_{ps} + \sigma^2} \right)}{P_H(T - \tau) + (Pg_s + P_c)\tau} \\ \text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} \text{C1: } (Pg_s + P_c)\tau \leq \eta g_e P_T (T - \tau); \quad \text{C2: } Pg_{sp} \leq P_I \\ \text{C3: } R(\tau, P) \geq R_{out}; \quad \text{C4: } 0 \leq \tau \leq T; \quad \text{C5: } 0 \leq P \leq P_{max} \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (9)$$

式中约束条件 C2, C3, C4, C5 分别与问题 OP1 中的约束条件 C2, C3, C4, C5 等价。对于非线性分数规划问题，用低复杂度算法求解 OP2 问题的封闭形式解是困难的。本文采用坐标上升法求解 OP2。具体来说，OP2 可被分解为 2 个子问题，即：给定时间 τ 下的功率分配子问题 OP3，与给定发射功率 P 分配策略下的传输时间选择问题 OP4。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{OP3: } \max_P EE_3(P) = \frac{\tau' \log_2 \left(1 + \frac{Pg_s}{P_T g_{ps} + \sigma^2} \right)}{P_H(T - \tau') + (Pg_s + P_c)\tau'} \\ \text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} \text{C1: } (Pg_s + P_c)\tau' \leq \eta g_e P_T (T - \tau'); \quad \text{C2: } Pg_{sp} \leq P_I \\ \text{C3: } R(P) \geq R_{out}; \quad \text{C4: } 0 \leq P \leq P_{max} \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (10)$$

式中： τ' 为给定的时间分配约束；C1 和 C3 分别为功率分配需要满足的能量约束条件和吞吐量约束条件；C2 和 C4 分别与 OP2 中的 C2 和 C5 约束条件相同。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{OP4: } \max_{\tau} EE_4(\tau) = \frac{\tau \log_2 \left(1 + \frac{P'g_s}{P_T g_{ps} + \sigma^2} \right)}{P_H(T - \tau) + (P'g_s + P_c)\tau} \\ \text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} \text{C1: } (P'g_s + P_c)\tau \leq \eta g_e P_T (T - \tau) \\ \text{C2: } R(\tau) \geq R_{out}; \quad \text{C3: } 0 \leq \tau \leq T \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (11)$$

式中： P' 为给定功率分配策略；C1 和 C2 为传输时间分配需要满足的能量和吞吐量约束条件；C3 约束与 OP2 中的 C3 相同。

引理 2: 基于 Charnes-Cooper 变换(Charnes-Cooper Transformation, CCT)，使 $P=y/v, v=1/E_c(p)$ ，OP3 可变形为：

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{OP5: } \max_{\substack{y \in R^+, v > 0}} EE_5(\tau) = v\tau' \log_2 \left[1 + \frac{yg_s}{v(P_T g_{ps} + \sigma^2)} \right] \\ \text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} \text{C1: } vE_c \left(\frac{y}{v} \right) = 1; \quad \text{C2: } \left(\frac{y}{v} g_s + P_c \right) \tau' \leq \eta g_e P_T (T - \tau') \\ \text{C3: } \frac{y}{v} g_{sp} \leq P_I; \quad \text{C4: } R \left(\frac{y}{v} \right) \geq R_{out}; \quad \text{C5: } 0 \leq \frac{y}{v} \leq P_{max} \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (12)$$

式中：C1 为具有相互关系的 y 和 v 两个解，C2~C4 为 OP3 中 C2~C4 相应的转换形式。若 (y^*, v^*) 为 OP5 的一个最优解，则 y^*/v^* 为 OP3 的最优解。由于 OP3 中的 $R(P)$ 是凹的，OP5 是能被凸优化技术求解的等效凹规划问题。

证明: 引理 2 的证明必须引入分式规划的概念。首先，当某优化问题的目标函数可被表示为 2 个函数比值时，该优化问题被称为分式规划(Fractional Program, FP)。一个 FP 问题可被描述为：

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_{x \in X} f(x)/g(x) \\ \text{s.t. } h_i(x) \leq 0, \forall i = 1, 2, \dots, N \end{array} \right. \quad (13)$$

式中： $f(x)$, $g(x)$ 和 $h_i(x)$ 均为实值函数； $X \in R^N$ 。

式(13)所表示的 FP 问题若满足以下条件，则可称为凹分式规划问题(Concave Fractional Program, CFP)：

- 1) $f(x)$ 是凹函数，且 $g(x)$ 在 X 上是凸函数；
- 2) 若 $g(x)$ 为非仿射函数， $f(x)$ 在 S 上函数值为正，其中 $S = \{x \in X : h_i(x) \leq 0, \forall i = 1, 2, \dots, N\}$ 。

一个具有仿射函数作为分母的 CFP 可通过使用 CCT 方法转换目标函数为凹函数的优化问题^[23]。因此，使用 CCT 方法，可得到式(13)等效的凹规划问题：

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_{\substack{y \in X, t > 0}} t f \left(\frac{y}{t} \right) \\ \text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} t h_i \left(\frac{y}{t} \right) \leq 0, \forall i = 1, 2, \dots, N \\ \tan \frac{y}{t} = 1 \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (14)$$

若式(13)所描述问题具有最优解,当且仅当式(14)具有最优解。2个解通过关系式 $y=tx$ 和 $t=1/g(x)$ 联系在一起。对 OP3 来说,因为 \log 对数函数是凹函数,则 $R(P)$ 关于 P 是凹的^[24]。此外, $E_c(P)$ 在 P 上是仿射函数。与式(14)相同,基于 CCT 方法,使 $P=y/v$ 及 $v=1/E_c(P)$,可将优化问题 OP3 等效变换为凹规划问题 OP5。因此引理 2 得证。等效优化问题 OP5 描述的系统总能量效率最大化的最优功率:

$$P^* = \left(\frac{y^*}{v^*} \right) = \min \left(\psi, \frac{P_1}{g_{sp}}, P_{\max} \right) \tag{15}$$

式中: $\psi = \left(\frac{w[P_H(T-\tau') + P_c - \ln 2g_s] - \lambda \ln 2g_s}{(\lambda + u) \ln 2g_s - wg_s \tau'} \right)^+$, λ, u 和 w 为拉格朗日乘子,可在算法中进行确定。

对于最优传输时间分配,优化问题 OP4 系统总能量效率最大化的最优时间分配可求解如下:

$$\tau^* = \frac{\eta g_c P_T T}{P' g_s + P_c + \eta g_c P_T} \tag{16}$$

综上所述,算法对求解方法进行了总结,步骤如下: a) 初始化参数。以下步骤循环: b) 基于 CCT 方法针对给定 τ 解决凹问题 OP3; c) 针对式(12)寻找最优解 P^* ; d) 针对给定 P 求解模型 OP4; e) 根据式(13)寻找最优解 τ^* ; f) $\tau = \tau + \Delta\tau$; $P = P + \Delta P$; g) 直到 $|EE(\tau_i, P_i) - EE(\tau_{i+1}, P_{i+1})| \leq \varepsilon$; h) 获得能量采集时间 τ^* 和能量分配 P^* 。

在算法中,基于给定 $[\tau, P]$ 分量,ST 迭代地寻找最优策略。特别的,在给定 τ 值时找到最优值 P^* ,然后基于给定 P 值得到最优值 τ^* 。同时, $\Delta\tau, \Delta P$ 应该足够小。如果满足 $|EE(\tau_i, P_i) - EE(\tau_{i+1}, P_{i+1})| \leq \varepsilon$,算法将达到收敛。

3 仿真结果和讨论

进行仿真验证所提方法的有效性和性能。网络参数设置如下:能量收集效率 $\eta=0.7$,时隙长度 $T=1$,能量收集增益 $g_c=0.9$,主用户干扰信道增益 $g_{ps}=0.3$,次用户干扰信道增益 $g_{sp}=0.2$,次用户数据传输链路增益 $g_s=0.9$,噪声功率 $\sigma^2=-65$ dBm,电路损耗 $P_c=0.02$ W,ST 的最大传输功率 $P_{\max}=6$ W。

RF EH-CRN 系统中 EE 和吞吐量关于 τ 和 P 典型变化如图 3~图 4 所示,其中 P_T 和 P_1 分别设置为 10 W 和 2 W。从图 3 和图 4 中可看出,当 $\tau=0.97, P=0.2$ W 时,EE 达到最大值 0.25,而当 $\tau=0.53, P=P_{\max}=6$ W 时,吞吐量达到最大值 0.75。最佳 EE 解决方案并不意味着同时也是最佳吞吐量解决方案。因为 EE 是关于传输时间和功率的非增函数,吞吐量是关于传输时间和功率的非减函数。

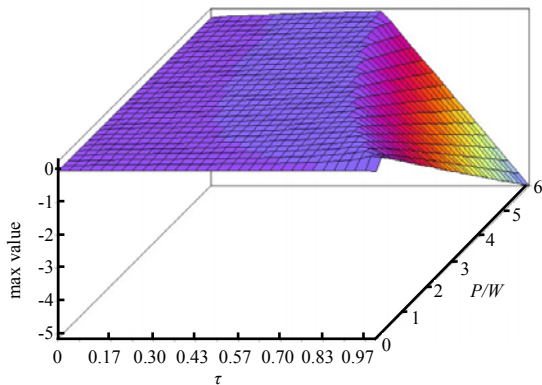


Fig.3 The EE of RF-CRNs with respect to τ and P
图 3 RF EH-CRNs 关于 τ 和 P 的能量效率

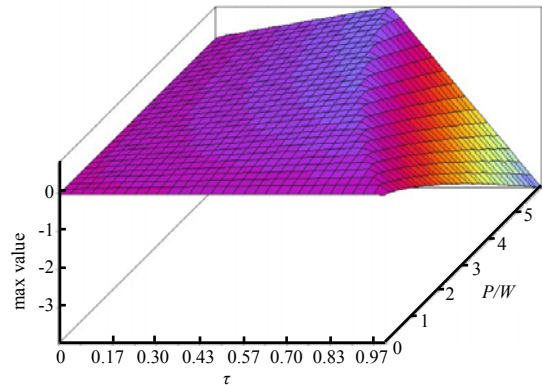


Fig.4 Throughput of RF-CRNs with respect to τ and P
图 4 RF EH-CRNs 关于 τ 和 P 的吞吐量

图 5 为在给定每个 SU 的最小吞吐量门限 R_{out} 下,不同 P_T 和 P_1 值下 RF-CRNs 的 EE。从图 5 可以看出,相同 P_T 、不同 P_1 下,可达到的最大 EE 值是相同的。在能源效率优化过程中,ST 总是以相同的最小吞吐量($R_{out}=0.4$)传输数据,以节约能源。 P_T 相同,能耗相同,因此最优能源效率相同。从图 5 中还可以明显看出,随着 P_T 的增加,EE 呈下降趋势。因为 P_T 越大,对 SR 的干扰就越大,进而导致吞吐量下降。为满足最小数据速率约束 R_{out} ,增加发射时间 τ 和提高发射功率 P ,但将导致更多能耗。同时, P_T 越大,在能量收集阶段能量损失越多,最终将导致能量效率性能下降。当干扰足够大且 P_1 较高时,次用户不能满足 OP2 中 $C1\sim C5$ 任何一个约束条件,EE 急剧下降到接近于零,将导致系统中断。

图 6 为最小速率需求 R_{out} 下, PU 接收机在不同峰值允许干扰阈值下可达到的最大 EE。当峰值允许干扰阈值 P_1 非常小时, SU 的发射功率必须足够小, 这违反吞吐量约束, 导致系统中断。在 P_T 相同的情况下, 随着 P_1 的增大, 可达到的最大能效保持不变。通过 SU 的传输功率 P 可以随 P_1 的增加而增加, 传输功率越大, 吞吐量越大, 需要能量越多, 不利于 EE 优化。因此, 在能效优化过程中, SU 的传输功率不会随 P_1 的增大而增大, 吞吐量和能耗也会保持不变。

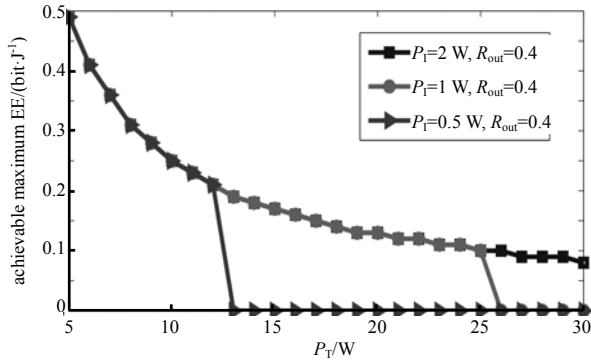


Fig.5 Achievable EE analysis versus P_T
图 5 可实现能量效率和 P_T 对比分析

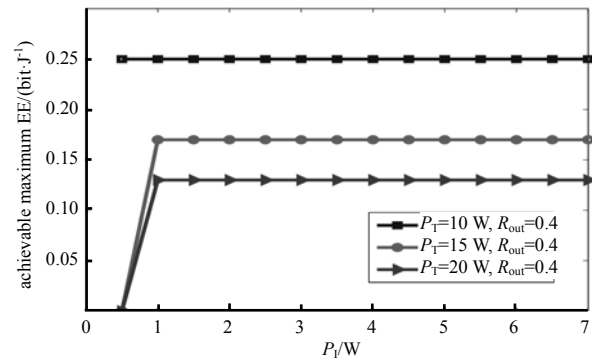


Fig.6 Achievable EE analysis versus P_1
图 6 可实现能量效率和 P_1 结果对比分析

为进一步证明能效优化和吞吐量优化之间的区别, 图 7 和图 8 为不同 P_T 和 P_1 下的吞吐量优化。从图 7 可以看出, 吞吐量随 P_1 的增加而增加, 这是由于增加的 P_1 扩大了次用户发射机 ST 传输功率 P 的可行域, 并可进一步提高 $R(\tau, P)$ 。与能量效率 EE 一样, $R(\tau, P)$ 也会随 P_T 的增加而减少。 P_T 越大, 则 SU 收集的能量越多, 对 SR 的干扰也越大。因此, 当干扰足够大或 P_1 为紧致集时, SU 不能满足规定的最小吞吐量阈值, 吞吐量急剧下降到接近于零, 系统中断。

图 8 为 P_1 与吞吐量之间的关系, 随着 P 和 P_1 的增大, $R(\tau, P)$ 和能量消耗对应增加, 但 $R(\tau, P)$ 不能进一步提高。由于收获能量有限和最大传输功率的约束, P 不可能是无限的。

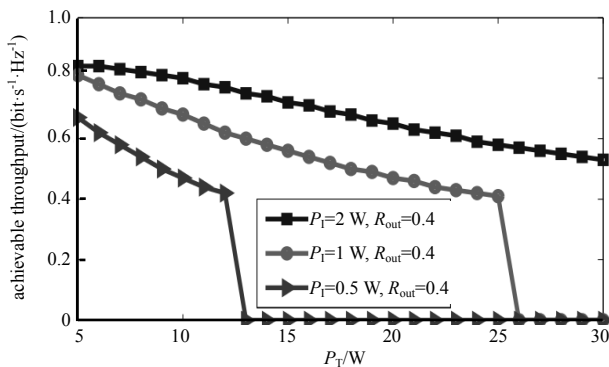


Fig.7 Throughput optimization versus P_T .
图 7 P_T 变化与吞吐量优化

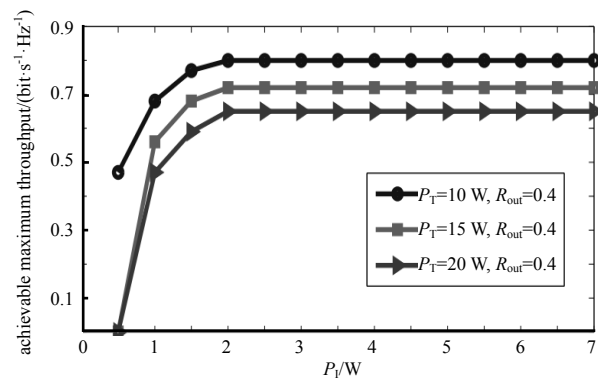


Fig.8 Throughput optimization versus P_1
图 8 P_1 变化与吞吐量优化

4 结论

本文研究了 Underlay 模式下 RF EH-CRNs 的 EE 最大化问题。通过对可达吞吐量和能量损耗的分析, 将该问题表示为凹/仿射分式规划问题, 利用坐标上升和 CCT 法将其转化为等效凹问题。在保证系统通信服务质量的前提下, 通过限制最小速率, 获得最优 EE。另外, 分析了最小速率传输需求对输出功率的影响。仿真结果验证了相关算法的有效性。未来的工作将考虑多 SU 场景和储能管理, 进一步提高 EE。此外, 应对先进的能量管理方法进行研究来处理基于 PU 动态模型下的能量收集问题, 以满足 RF EH-CRN 在不同模式下高效工作的需求。

参考文献:

- [1] PARK S, HONG D. Achievable throughput of energy harvesting cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(2): 1010-1022.

- [2] MOHJAZI L,DIANATI M,KARAGIANNIDIS G K,et al. RF-powered cognitive radio networks:technical challenges and limitations[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015,53(4):94–100.
- [3] LU X,WANG P,NIYATO D,et al. Wireless networks with RF energy harvesting:a contemporary survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014,17(2):757–789.
- [4] 庄陵,马龙. 考虑频谱感知错误的多载波认知无线电资源分配算法[J]. *计算机工程*, 2017,43(2):171–175. (ZHUANG Ling,MA Long. Resource allocation algorithm of multicarrier cognitive radio considering spectrum sensing error[J]. *Computer Engineering*, 2017,43(2):171–175.)
- [5] 冯刚,覃锡忠,贾振红,等. 认知无线电环境下无线能量通信网的能效研究[J]. *计算机工程*, 2019,45(3):142–147. (FENG Gang,QIN Xizhong,JIA Zhenhong,et al. Research on energy efficiency of wireless powered communication network in cognitive radio environment[J]. *Computer Engineering*, 2019,45(3):142–147.)
- [6] 谢振威,朱琦. 基于能量协作的认知能量采集网络功率分配算法[J]. *通信学报*, 2017,38(9):176–184. (XIE Zhenwei,ZHU Qi. Power allocation algorithm for cognitive radio energy harvesting networks based on energy cooperation[J]. *Journal on Communications*, 2017,38(9):176–184.)
- [7] FENG D,JIANG C,LIM G,et al. A survey of energy-efficient wireless communications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013,15(1):167–178.
- [8] THAI H D,NIYATO D,WANG P,et al. Opportunistic channel access and RF energy harvesting in cognitive radio networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014,32(11):2039–2052.
- [9] JU H,ZHANG R. Throughput maximization in wireless powered communication networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014,13(1):418–428.
- [10] CHEN H,LI Y,REBELATTO J L,et al. Harvest-then-cooperate:wireless-powered cooperative communications[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2015,63(7):1700–1711.
- [11] YAO Q,HUANG A,SHAN H,et al. Delay-aware wireless powered communication networks—energy balancing and optimization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016,15(8):5272–5286.
- [12] WU Q,TAO M,NG D W K,et al. Energy-efficient resource allocation for wireless powered communication networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016,15(3):2312–2327.
- [13] LIN X,HUANG L,GUO C,et al. Energy-efficient resource allocation in tdms based wireless powered communication networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017,21(4):861–864.
- [14] MIN S,MENG Z. Energy efficiency optimization for wireless powered sensor networks with non-orthogonal multiple access[J]. *IEEE Sensors Letters*, 2018,2(1):1–4.
- [15] XU J,LIU L,ZHANG R. Multiuser mimo beamforming for simultaneous wireless information and power transfer[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014,62(18):4798–4810.
- [16] LEE S,LIU L,ZHANG R. Collaborative wireless energy and information transfer in interference channel[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015,14(1):545–557.
- [17] DING Z,KRIKIDIS I,SHARIF B,et al. Wireless information and power transfer in cooperative networks with spatially random relays[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014,13(8):4440–4453.
- [18] YIN S,QU Z,LI S. Achievable throughput optimization in energy harvesting cognitive radio systems[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015,33(3):407–422.
- [19] HOANG D T,NIYATO D,WANG P,et al. Performance optimization for cooperative multiuser cognitive radio networks with RF energy harvesting capability[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015,14(7):3614–3629.
- [20] JANGHEL K,PRAKRIYA S. Throughput of underlay cognitive energy harvesting relay networks with an improved time-switching protocol[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications & Networking*, 2017,4(1):66–81.
- [21] XU C,ZHENG M,LIANG W,et al. End-to-end throughput maximization for underlay multi-hop cognitive radio networks with RF energy harvesting[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017,16(6):3561–3572.
- [22] ZHOU F,BEAULIEU N C,LI Z,et al. Energy-efficient optimal power allocation for fading cognitive radio channels:ergodic capacity,outage capacity,and minimum-rate capacity[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016,15(4):2741–2755.
- [23] BOYD S,VANDENBERGHE L,FAYBUSOVICH L. Convex optimization[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, 51(11):1859.
- [24] SCHAIBLE S,SHI J. Recent developments in fractional programming:single-ratio and max-min case[C]// *Proceedings of the 3rd international conference on Nonlinear Analysis and Convex Analysis*. Tokyo,Japan:[s.n.], 2003:493–506.