

基于能量收集的全双工认知中继网络功率分配算法

张士兵, 韩刘可, 张美娟

(南通大学信息科学技术学院, 江苏 南通 226019)

摘 要: 为了缓解频谱资源匮乏、提高认知无线网络的功率利用率, 提出了一种基于能量收集的全双工认知中继网络功率分配算法。所提算法在保证对主用户干扰以及中继端收集能量满足一定条件的情况下, 优化能量受限的认知中继节点功率分配系数及次用户发射功率, 实现了次用户系统吞吐量的最大化, 提高了频谱效率。由于所提算法的优化问题是非凸的, 因此将其转化为针对功率分配系数和次用户发射功率的 2 个可解凸优化子问题, 通过收敛迭代算法求得原问题的最终解。仿真结果表明, 采用所提算法的次用户系统吞吐量, 与采用半双工功率分配算法的系统吞吐量相比提升了一倍, 与采用全双工时分算法的系统吞吐量相比提升了 0.5 倍。

关键词: 无线通信; 认知网络; 能量收集; 全双工; 吞吐量

中图分类号: TN925

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2020168

Power allocation algorithm of full duplex cognitive relay network based on energy harvesting

ZHANG Shibing, HAN Liuke, ZHANG Meijuan

School of Information Science and Technology, Nantong University, Nantong 226019, China

Abstract: To alleviate the shortage of spectrum resources and improve the power utilization of cognitive radio networks, a resource allocation algorithm of full duplex cognitive relay networks with energy harvesting was proposed. In the algorithm, the coefficient for power splitting of the relay and the transmit power of the secondary users were jointly optimized to maximize the throughput of the secondary users under the interference to primary users and energy harvesting constraints. Since the optimization of the algorithm was non-convex, it was transformed into two sub-optimizations, the sub-optimization of the coefficient for power splitting and the sub-optimization of the power transmitted of secondary users, which were the solvable convex sub-optimizations. Then, the final solution of the original optimization was obtained with the iterative algorithm. Simulation results show that the throughput of the proposed algorithm, can obtain 2 times throughput of the networks with half-duplex power splitting algorithm and 1.5 times throughput of the networks with full-duplex time switching algorithm.

Key words: wireless communication, cognitive network, energy harvesting, full duplex, throughput

1 引言

随着社会经济和新兴技术的快速发展, 无线通信业务需求急剧增长, 这对无线通信提出了更高的要求, 采用电池供电的便携式无线通信设备数量剧增, 无线频谱资源的短缺与便携式设备能量的受限

已成为制约无线通信的重要因素。因此, 如何在提高无线网络频谱利用率的同时解决设备能量供应的问题尤其重要。近几年, 将无线射频信号能量转化为设备能量的能量收集技术已成为延长能量受限网络生存时间的有效手段, 受到学者的广泛关注^[1-5]。

在认知无线中继网络中, 认知节点, 特别是认

收稿日期: 2020-02-26; 修回日期: 2020-06-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61871241, No.61771263)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61871241, No.61771263)

知中继节点大多是由能量有限的电池供电的。因此，能量收集技术对于这类能量受限的认知无线网络具有特别重要的意义^[6-10]。结合能量收集技术的认知无线网络在解决频谱资源匮乏的同时，能解决节点能量不足的问题，实现无线网络的持续有效工作，得到人们的广泛重视^[6-9]。文献[6]对现有认知无线网络中的能量收集技术进行了系统的归纳和总结。文献[7]提出了一种用于能量采集的认知无线网络的分布式传输功率控制机制，其主要思想是根据网络状况动态调整节点的传输功率，以保持网络的连通性。文献[8]结合能量收集技术，提出了一种改进型的基于射频能量收集的认知网络信道选择方案，提高了认知无线网络次用户系统吞吐量。文献[9]研究了一种频谱重叠共享（underlay）模式下带有能量收集的认知无线网络，主用户在每个时隙中以恒定的功率传输，而次用户要么从主用户传输中获取能量，要么传输其数据，提高了网络的有效性。

协作中继技术能有效提高认知网络的吞吐量，扩大通信范围。针对能量收集认知无线网络次用户间的协作策略，文献[10]提出了一种基于次用户意愿的中继协作方案，在一定程度上满足了次用户需求。文献[11]分析了在频谱感知和协作传输模式组成的帧结构下，能量捕获协作认知无线网络的能量效率与频谱效率的权衡问题。文献[12]为提高认知中继网络在物理层上的安全性能，结合能量采集技术与人工噪声干扰技术，提出了一种具有能量收集功能的认知中继网络模型。文献[13]提出了一个基于能量收集的解码转发认知传感器网络的联合资源优化方案，中继传感器节点采用功率分配的能量收集协议从信号中获取能量^[14]，用于次用户信息的解码转发。文献[15]研究了基于能量收集的认知网络资源分配问题。然而，这些文献主要是在半双工模式展开研究的。由于全双工模式能够成倍地提高频谱利用率，文献[16]提出了一种 underlay 协作认知网络，收集到的能量用于辅助次用户信源将数据转发到次用户目的地。但该全双工中继能量收集时采用的是时分（TS, time switching）接收机结构，能量收集效率不够高。目前鲜有针对能量受限的全双工认知无线中继系统的研究。

为了提高认知无线中继网络的频谱利用率及其能效，本文研究了 underlay 频谱接入方式的能量受限全双工协作认知网络，与文献[16]相比，本文采用功分（PS, power splitting）接收机结构，能够

同时实现信息接收与能量收集，进一步提高次用户系统吞吐量。该方案在保证对主用户干扰以及中继收集能量满足一定条件的情况下，探索不同功率分配及次用户发射功率对认知网络次用户系统吞吐量的影响，最大化次用户系统吞吐量，实现认知网络频谱的高效利用。本文提出了一种基于能量收集的全双工认知中继系统的功率分配与次用户发射功率的联合设计方案。由于该方案的优化问题在数学上是非凸的，因此本文通过分别优化系统功率分配系数和次用户发射功率，利用收敛迭代算法求得原问题的最终解。最后，仿真结果验证了所提方法的有效性。

2 系统描述及问题建模

2.1 系统模型

考虑一个能量收集的全双工认知无线中继系统，包含一对主用户收发者、一对次用户收发者和一个能量受限的中继节点，如图 1 所示。假设采用 underlay 频谱接入方式，在一个周期 T 内，主用户发射端（PU_Tx）向主用户接收端（PU_Rx）发送信息，同时次用户发射端（SU_Tx）通过全双工中继（R）向目的端（SU_Rx）传输信号。由于中继是能量受限的，故其在传输前需从主用户和次用户发射端收集的信号中收集能量。在此过程中，中继在保证对主用户干扰以及中继端收集能量满足一定条件的情况下，通过优化功率分配系数最大化次用户系统吞吐量，实现频谱的高效利用。

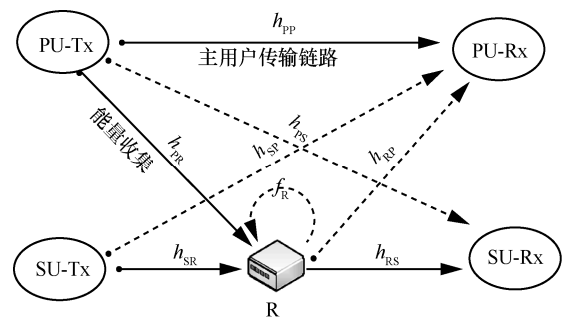


图 1 基于能量收集的全双工认知中继系统

R 采用文献[1]中的共用接收器功率分配架构（power-splitting architecture），功率分配系数为 ρ ，即 R 接收到的信号功率中， ρ 倍的功率用于中继的能量采集， $(1-\rho)$ 倍的功率用于中继的信息接收， $\rho \in (0,1)$ 。定义 PU_Tx 到 PU_Rx、R、SU_Rx 的信道衰减因子分别为 h_{pp} 、 h_{pr} 、 h_{ps} ，SU_Tx 到 PU_Rx、

R 的信道衰减因子分别为 h_{SP} 、 h_{SR} ，R 到 PU_RX、SU_RX 的信道衰减因子分别为 h_{RP} 、 h_{RS} ，中继端的自干扰信道衰减因子为 f_R 。假设 SU_TX、SU_RX 之间由于路径损耗和阴影效应不能直接通信，只能通过 R 进行信息交换。除此之外，本文还假设所有的节点都可以得到准确的信道状态信息。

由于采用的是 underlay 频谱接入方式，在保证对主用户干扰小于一定门限的情况下，主、次用户可以同时接入频谱，即主用户发射端向主用户接收端发射信号的同时，次用户发射端通过全双工中继向次用户接收端发射信号^[17]。在此过程中，能量受限的中继通过功率分配的能量收集协议，从主、次用户发射端发射的信号中采集能量，同时将接收到的信号转发给次用户接收端。中继接收到的信号为

$$y_R[k] = \sqrt{P_{PT}} h_{PR} x_{PT}[k] + \sqrt{P_{ST}} h_{SR} x_{ST}[k] + f_R \tilde{x}_R[k] + n_R[k] \quad (1)$$

其中， x_{PT} 、 x_{ST} 分别表示主、次用户发射端的发射信号， P_{PT} 、 P_{ST} 分别表示主、次用户发射端的功率， $n_R[k] \sim \text{CN}(0, \sigma_R^2)$ 表示中继接收端的噪声， $\tilde{x}_R[k]$ 表示经过自干扰消除技术后的剩余自干扰信号，且可等效为噪声信号，即 $\tilde{x}_R[k] \sim \text{CN}(0, Q_{SI})$ 。

考虑采用功率分配的能量收集协议， $\sqrt{\rho} y_R[k]$ 用于中继的能量采集， $\sqrt{1-\rho} y_R[k]$ 用于中继的信息接收， $\rho \in (0,1)$ 为中继的功率分配系数。则中继节点的接收信干噪比为

$$\gamma_R = \frac{(1-\rho)P_{ST} |h_{SR}|^2}{(1-\rho)(P_{PT} |h_{PR}|^2 + Q_{SI} |f_R|^2 + \sigma_R^2) + \sigma_D^2} \quad (2)$$

在一个周期 T 内，中继收集的能量为

$$E_R = T\eta\rho(P_{PT} |h_{PR}|^2 + P_{ST} |h_{SR}|^2 + Q_{SI} |f_R|^2 + \sigma_R^2) \quad (3)$$

其中， $n_D[k] \sim \text{CN}(0, \sigma_D^2)$ 为能量采集时产生的射频噪声， $\eta \in (0,1)$ 为能量收集效率^[18-19]。因此，中继的发射功率为

$$P_R = \frac{E_R}{T} = \eta\rho(P_{PT} |h_{PR}|^2 + P_{ST} |h_{SR}|^2 + Q_{SI} |f_R|^2 + \sigma_R^2) \quad (4)$$

经过中继解码转发，次用户接收端信号为

$$y_{SR}[k] = \sqrt{P_R} h_{RS} x_{ST}[k] + \sqrt{P_{PT}} h_{PS} x_{PT}[k] + n_{SR}[k] \quad (5)$$

其中， $n_{SR}[k] \sim \text{CN}(0, \sigma_{SR}^2)$ 为次用户接收端的噪声。此时，次用户接收端的信干噪比为

$$\gamma_{SR} = \frac{\eta\rho(P_{PT} |h_{PR}|^2 + P_{ST} |h_{SR}|^2 + Q_{SI} |f_R|^2 + \sigma_R^2) |h_{RS}|^2}{P_{PT} |h_{PS}|^2 + \sigma_{SR}^2} \quad (6)$$

因此，次用户接收端的吞吐量为

$$R = \min\{\text{lb}(1 + \gamma_{SR}), \text{lb}(1 + \gamma_R)\} \quad (7)$$

2.2 问题建模

功率分配系数 ρ 越大，分配给中继能量收集的功率越多，则中继传输的功率就越大，因而整个系统的信息传输速率则增大。但同时，若 ρ 很大，分配给中继信息解码的信号则较少，从而导致系统的传输速率降低。另一方面，次用户发射端功率越大，中继的发射功率越大，次用户的吞吐量越高。而次用户系统对主用户产生的干扰是有限的，即两者产生的干扰之和不能过大，这限制了次用户和中继的发射功率。因此，为了最大化次用户系统吞吐量，本文在保证系统满足主用户发射约束的条件下，需要对功率分配系数 ρ 和次用户发射端功率 P_{ST} 进行联合优化，即

$$\begin{aligned} & \max_{P_{ST}, \rho} \min\{\text{lb}(1 + \gamma_{SR}), \text{lb}(1 + \gamma_R)\} \\ & \text{s.t. } P_{ST} |h_{SP}|^2 + P_R |h_{RP}|^2 \leq I_{th}, \\ & \quad 0 < P_{ST} \leq P_{S,\max} \\ & \quad 0 < \rho < 1 \end{aligned} \quad (8)$$

其中， $P_{S,\max}$ 为次用户发射端的最大发射功率， I_{th} 为主用户允许的最大干扰门限。由于对数函数为单调增函数，该优化问题可进一步等效为

$$\begin{aligned} & \max_{P_{ST}, \rho} \min\{\gamma_{SR}, \gamma_R\} \\ & \text{s.t. } P_{ST} |h_{SP}|^2 + P_R |h_{RP}|^2 \leq I_{th}, \\ & \quad 0 < P_{ST} \leq P_{S,\max}, \\ & \quad 0 < \rho < 1 \end{aligned} \quad (9)$$

进一步地，将 γ_R 、 γ_{SR} 化简为关于 ρ 和 P_{ST} 的函数，即

$$\gamma_R = \frac{-A\rho + A}{-B\rho + C} P_{ST} \quad (10)$$

$$\gamma_{SR} = \frac{\rho(DP_{ST} + E)}{F} \quad (11)$$

其中， $A = |h_{SR}|^2$ ， $B = P_{PT} |h_{PR}|^2 + Q_{SI} |f_R|^2 + \sigma_R^2$ ， $C = P_{PT} |h_{PR}|^2 + Q_{SI} |f_R|^2 + \sigma_R^2 + \sigma_D^2$ ， $D = \eta |h_{RS}|^2 |h_{SR}|^2$ ， $E = \eta |h_{RS}|^2 (P_{PT} |h_{PR}|^2 + Q_{SI} |f_R|^2 + \sigma_R^2)$ ， $F = P_{PT} |h_{PS}|^2 + \sigma_{SR}^2$ 。

3 功率分配系数和次用户发射端功率的联合优化

显然, 式(8)或式(9)中的联合优化问题是一个非凸优化问题, 很难直接求得最优解。为此, 本文首先分别优化功率分配系数 ρ 和次用户发射端功率 P_{ST} , 将其转化为可解的凸优化问题, 然后利用收敛迭代算法求得原问题的最优解。

3.1 优化功率分配系数

当固定次用户发射端功率 P_{ST} 时, 优化问题(9)可等效为

$$\begin{aligned} & \max_{\rho} \min\{\gamma_{SR}, \gamma_R\} \\ & \text{s.t. } P_{ST} |h_{SP}|^2 + P_R |h_{RP}|^2 \leq I_{th}, \\ & 0 < \rho < 1 \end{aligned} \quad (12)$$

此时, 需要分析 γ_R 和 γ_{SR} 关于功率分配系数 ρ 的函数关系。

由于 $\frac{d\gamma_R}{d\rho} = \frac{A(B-C)}{(-B\rho+C)^2} P_{ST} < 0$, $\frac{d\gamma_{SR}}{d\rho} = \frac{(DP_{ST}+E)}{F} > 0$, 因此 γ_R 是关于 ρ 的单调减函数,

γ_{SR} 是关于 ρ 的单调增函数; 而 $\gamma_R(0) = \frac{AP_{ST}}{C} > 0$,

$\gamma_R(1) = 0$, $\gamma_{SR}(0) = 0$, $\gamma_{SR}(1) = \frac{DP_{ST}+E}{F} > 0$, 因此,

当次用户发射端功率 P_{ST} 固定时, γ_R 、 γ_{SR} 关于 ρ 的函数有并且只有一个交点, 当且仅当 ρ 满足

$\frac{-A\rho+A}{-B+C} P_{ST} = \frac{\rho(DP_{ST}+E)}{F}$ 时, $\gamma = \min\{\gamma_{SR}, \gamma_R\}$ 取得

最大值。将 $\frac{-A\rho+A}{-B+C} P_{ST} = \frac{\rho(DP_{ST}+E)}{F}$ 转化为标准一

元二次方程 $(BDP_{ST}+BE)\rho^2 - (CDP_{ST}+CE+AFP_{ST})\rho + AFP_{ST} = 0$ 。由于功率分配系数具有约束条件 $\rho \in (0,1)$, 将方程负根舍去, 得到功率分配系

数 $\rho = \rho_1 = \frac{-b_1 + \sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}}{2a_1}$, 其中, $a_1 = BDP_{ST} + BE$,

$b_1 = -(CDP_{ST} + CE + AFP_{ST})$, $c_1 = AFP_{ST}$ 。因此, 可以得到结论 1。

结论 1 当且仅当 ρ 满足 $\frac{-A\rho+A}{-B+C} P_{ST} = \frac{\rho(DP_{ST}+E)}{F}$ 时, $\gamma = \min\{\gamma_{SR}, \gamma_R\}$ 取得最大值, 此时

$$\rho = \rho_1 = \frac{-b_1 + \sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}}{2a_1} \quad (13)$$

对于约束 $P_{ST} |h_{SP}|^2 + P_R |h_{RP}|^2 \leq I_{th}$, 可转为约束 $MP_{ST} + (GP_{ST} + H)\rho \leq I_{th}$, 其中 $G = \eta |h_{SR}|^2 |h_{RP}|^2$,

$H = \eta |h_{RP}|^2 (P_{PT} |h_{PR}|^2 + Q_{SI} |f_R|^2 + \sigma_R^2)$, $M = |h_{SP}|^2$ 。

由此得出, $\rho \leq \rho_{th} = \frac{I_{th} - MP_{ST}}{GP_{ST} + H}$, ρ_{th} 为 ρ 在约束条件下能取得的最大值。因此, 功率分配系数 ρ 的最优解为 $\rho^* = \min\{\rho_1, \rho_{th}\}$ 。当 $\rho_1 = \rho_{th}$ 时, 有

$$\frac{-b_1 + \sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}}{2a_1} = \frac{I_{th} - MP_{ST}}{GP_{ST} + H}$$

将其转化为关于 P_{ST} 的一元二次方程, 同理可得

$$P_{ST} = P_{th} = \frac{-b_2 + \sqrt{b_2^2 - 4a_2c_2}}{2a_2} \quad (14)$$

其中, P_{th} 为 P_{ST} 在主用户门限约束下能取得的最大值,

$a_2 = K^2 M^2 + 2KM(CD + AF) + 4ABDF$,

$b_2 = -2[K^2 I_{th} M + KI_{th}(CD + AF) - KMCE - 2ABEF]$,

$c_2 = K^2 I_{th} M - 2KI_{th} CE$, $K = \frac{2B|h_{RS}|^2}{|h_{RP}|^2}$ 。由此, 将

$\rho^* = \min\{\rho_1, \rho_{th}\}$ 转化为关于 P_{ST} 的函数, 即

$$\rho^* = \begin{cases} \rho_1, & P_{ST} < P_{th} \\ \rho_{th}, & P_{ST} \geq P_{th} \end{cases} \quad (15)$$

3.2 优化次用户发射端功率

由于 ρ^* 有 2 种情况, 因此本文对于不同的 P_{ST} 分别进行讨论。

1) 当 $P_{ST} < P_{th}$ 时, 有 $\rho^* = \rho_1$, $\gamma = \gamma_{SR} = \gamma_R$ 。此时, 将 $\rho = \rho_1$ 代入 γ_{SR} , 得

$$\gamma_{SR} = \frac{(DP_{ST} + E)[(CDP_{ST} + CE + AFP_{ST}) - \sqrt{f(P_{ST})}]}{2(BDP_{ST} + BE)F} \quad (16)$$

其中, $f(P_{ST}) = b_1^2 - 4a_1c_1$ 。接下来, 对函数 $\gamma_{SR}(P_{ST})$ 进行单调性分析。

对 $\gamma_{SR}(P_{ST})$ 求导, 得

$$\frac{d\gamma_{SR}}{dP_{ST}} = \frac{(DP_{ST} + E)[(CDP_{ST} + AFP_{ST})\sqrt{f(P_{ST})} - g(P_{ST})]}{2(BDP_{ST} + BE)F\sqrt{f(P_{ST})}} \quad (17)$$

其中, $g(P_{ST}) = (CDP_{ST} + CE + AFP_{ST})(CD + AF) - 2(2ABDFP_{ST} + ABEF)$ 。显然 $\frac{d\gamma_{SR}}{dP_{ST}}$ 的正负性只取决于

$(CDP_{ST} + AFP_{ST})\sqrt{f(P_{ST})} - g(P_{ST})$ 。令

$$q(P_{ST}) = (CDP_{ST} + AFP_{ST})\sqrt{f(P_{ST})} - g(P_{ST}) \quad (18)$$

如果 $g(P_{ST}) \leq 0$, 则 $q(P_{ST}) > 0$; 如果 $g(P_{ST}) > 0$, 令

$$h(P_{ST}) = [(CDP_{ST} + AFP_{ST})\sqrt{f(P_{ST})}]^2 - [g(P_{ST})]^2 \quad (19)$$

将式(19)展开成关于 P_{ST} 的二次函数, 即

$$\begin{aligned} h(P_{ST}) = & ABDF[(CD + AF)^2 - 4ABDF]P_{ST}^2 + \\ & 2ABDF[CE(CD + AF) - 2ABEF]P_{ST} + \\ & ABEF[CE(CD + AF) - ABEF] = \\ & a_3P_{ST}^2 + b_3P_{ST} + c_3 \end{aligned} \quad (20)$$

其中, $a_3 = ABDF[(CD + AF)^2 - 4ABDF]$, $b_3 = 2ABDF \cdot [CE(CD + AF) - 2ABEF]$, $c_3 = ABEF[CE(CD + AF) - ABEF]$ 。

由于 $B < C$, 得 $a_3 > ABDF[(CD + AF)^2 - 4ACDF]$, 判别式为

$$\begin{aligned} b_3^2 - 4a_3c_3 = \\ 4A^2B^2DEF^2(CD + AF)^2(ABEF - ACEF) < 0 \end{aligned} \quad (21)$$

故函数 $h(P_{ST})$ 开口向上且没有零点, $h(P_{ST})$ 恒大于零, 从而 $q(P_{ST})$ 恒大于零。

因此, 可以得到 $\frac{d\gamma_{SR}}{dP_{ST}} > 0$, 即 $\gamma_{SR}(P_{ST})$ 是关于 P_{ST} 的单调增函数。

2) 当 $P_{ST} \geq P_{th}$ 时, 有 $\rho^* = \rho_{th}$, $\gamma = \gamma_{SR}(\gamma_R > \gamma_{SR})$ 。此时, 将 $\rho = \rho_{th}$ 代入 γ_{SR} , 得

$$\gamma_{SR} = \frac{(DP_{ST} + E) \frac{I_{th} - MP_{ST}}{GP_{ST} + H}}{F} = \frac{|h_{RS}|^2 (I_{th} - MP_{ST})}{|h_{RP}|^2 F} \quad (22)$$

此时, $\frac{d\gamma_{SR}}{dP_{ST}} = \frac{-|h_{RS}|^2 M}{|h_{RP}|^2 F} < 0$, 故函数 $\gamma_{SR}(P_{ST})$

是关于 P_{ST} 的单调减函数。

考虑到关于 P_{ST} 的最大值约束, $P_{ST} \leq P_{S,max}$, 可以得到

$$\begin{cases} P_{ST}^* = P_{th}, \rho^* = \rho_{th}, P_{th} \leq P_{S,max} \\ P_{ST}^* = P_{S,max}, \rho^* = \rho_1, P_{th} > P_{S,max} \end{cases} \quad (23)$$

3.3 迭代优化算法

依次优化功率分配系数 ρ 和次用户发射端功率 P_{ST} 后, 本文利用迭代算法来得到所求问题的最优解, 迭代算法如下。

1) 设置优化迭代参数: 迭代最大次数 l_{max} , 收敛容限 ε ;

2) 根据式(14)计算主用户门限约束下次用户

发射端功率能达到的最大值 P_{th} ;

3) 将 P_{th} 与次用户发射端的最大发射功率 $P_{S,max}$ 比较, 当 $P_{th} \leq P_{S,max}$ 时, $P_{ST}^* = P_{th}$, $\rho^* = \rho_{th}$; 否则 $P_{ST}^* = P_{S,max}$, $\rho^* = \rho_1$;

4) 根据式(7)计算吞吐量 $R^l = \min\{1b(1 + \gamma_{SR}), 1b(1 + \gamma_R)\}$;

5) 计算吞吐量迭代差值 $R_{diff}^l = |R_0^l - R^l|$, 其中吞吐量初值 $R_0^l = 0$;

6) $R_0^{l+1} = R^l$, $l = l + 1$, 其中 l 的初值为零;

7) 当 $R_{diff}^l > \varepsilon$ 或 $l < l_{max}$ 时执行步骤 2);

8) 迭代结束。

4 仿真实验

4.1 仿真参数设置

本文利用 MATLAB 仿真来验证所提方案的有效性。假设信道模型为路径损耗模型, 所有信道衰减因子均为均值为 0、方差为 $|d_{i,j}|^2$ 的独立同分布的瑞利衰落^[17-18], 其中 n 是路径损耗指数, 设 $n=3$; $d_{i,j}$ 为节点 i 与节点 j 之间的距离。假设所有节点噪声大小相同, 即 $\sigma_R^2 = \sigma_{SR}^2 = \sigma_D^2 = 10$ dBm。除此之外, 若没有特殊说明, 周期 $T=1$ s, 能量收集效率 $\eta = 0.8$ ^[13,20]。仿真结果为 50 000 次蒙特卡洛仿真实现的平均值, 仿真迭代次数最大值 $l_{max} = 1000$, 收敛容限 $\varepsilon = 10^{-5}$, 吞吐量迭代差初值 $R_{diff}^l = 10$ 。

4.2 仿真结果

图 2 给出了不同干扰门限情况下采用本文所提全双工 PS 算法、全双工 TS 算法^[16]以及半双工 PS 算法^[13]中的次用户系统吞吐量性能比较。从仿真结果可以看出, 3 种算法的次用户系统吞吐量都随着源点发射功率的增大而增加, 但本文所提算法的性能要明显优于其他 2 种算法。对于采用半双工 PS 算法的网络, 次用户发射端在第一个 $\frac{T}{2}$ 时间内向中继发送信号, 半双工中继在此阶段进行能量收集与信息解码, 然后在剩下的 $\frac{T}{2}$ 时间内, 中继利用收集的能量将解码出的信号转发给次用户接收端。对于采用全双工 PS 算法的能量受限的认知全双工中继通信系统, 由于中继工作在全双工模式下, 中继节点可以同时进行收发工作, 能够更好地利用时隙和频谱资源。因此, 次用户系统吞吐量提高了一倍左

右。但对于采用全双工 TS 算法能量受限的认知全双工中继通信系统，由于中继节点的能量有限，且此时中继节点与次用户发射端同时对主用户产生干扰，限制了中继节点的发射功率，严重影响了次用户系统吞吐量。而本文所提全双工 PS 算法优化了中继节点功率分配系数及次用户发射功率，从而使能量受限的全双工认知无线中继系统的吞吐量接近理论值（提升近一倍的吞吐量）。与全双工 TS 算法相比，本文所提全双工 PS 算法能够实现中继同时进行信息收发与能量收集，能量收集效率更高，同时次用户传输时间相对更长，次用户系统吞吐量提升了 0.5 倍左右。

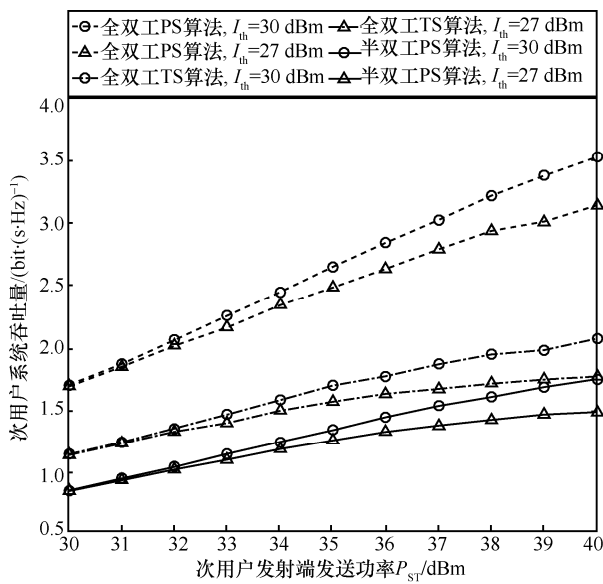


图 2 不同算法的次用户系统吞吐量性能比较

图 3 示意了当次用户发射功率 $P_{ST} = 35$ dBm 和 $I_{th} = 30$ dBm 时本文所提全双工 PS 算法的迭代收敛性。为了凸显算法的收敛性，本文在仿真时取消了算法中的迭代结束条件 $R'_{diff} > \epsilon$ ，即无论吞吐量迭代差值 R'_{diff} 多大，算法都迭代 1 000 次。从图 3 中可以看出，当算法迭代次数为 300 时，算法已经接近收敛；当迭代 550 次后，次用户系统吞吐量达到稳定。

图 4 和图 5 示意了不同功率分配系数及次用户发射功率对次用户系统吞吐量的影响。本文所提全双工 PS 算法中考虑了功率分配系数及次用户发射功率对次用户系统吞吐量的影响，通过求解最优的功率分配系数 ρ 以及次用户发射功率 P_{ST} ，有效地提升系统的性能。从图 4 的仿真结果可知，随着 ρ

的增大，3 种不同次用户最大发射功率下的系统吞吐量都是先增大后减小。这主要是因为当 ρ 较小时，系统收集的能量较少，导致中继节点的发射功率减小。此时对应的信噪比也会随之减小，从而导致次用户系统吞吐量的降低。同时，随着次用户最大发射功率的增加，系统的吞吐量也随之增大。这是因为随着次用户最大发射功率的变大，次用户的最优发射功率也提高了，故次用户系统吞吐量有所提高。图 5 给出了本文所提全双工 PS 算法与 3 种次用户发射功率 P_{ST} 固定（与本文所提的联合优化方案相比，这里仅优化功率分配系数 ρ ）算法的性能比较。从图 5 中可以看出，随着主用户干扰门限的增大，次用户的系统吞吐量都有所增加，但发射功率较低的次用户系统吞吐量比较容易趋于饱和。这是因为主用户门限是次用户发射端及中继端允许对主用户的干扰量，随着主用户门限的提高，在次用户发射功率一定的情况下，中继对主用户的干扰可以适当增加，即中继的发送功率会有所提高，故次用户系统吞吐量有所提高，但其收集的能量是一定的，所以中继的发送功率增大至能量约束的发射功率就不再增加了，次用户系统吞吐量趋于饱和。本文的最优次用户发射功率 P_{ST}^* 始终优于固定 P_{ST} 的算法。这主要是因为本文所提全双工 PS 算法同时利用了功率分配系数 ρ 以及次用户发射功率 P_{ST} 的自由度，从而使其性能达到全局最优。

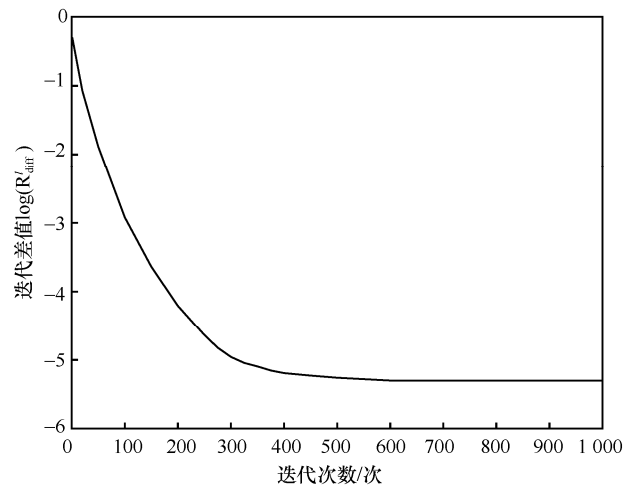


图 3 本文所提全双工 PS 算法的迭代收敛性

图 6 仿真了不同中继位置下主用户发射功率对次用户系统吞吐量的影响。随着主用户发射功率的增加，主用户对中继及次用户接收端的干扰增加，次用户系统吞吐量随之减小。同时，中继端离次用户发射

端距离越近，次用户系统吞吐量越大。这主要是由于随着中继端同次用户发射端的距离的减小，距离产生的损耗降低，中继收集的能量有所增加，因此次用户系统吞吐量有所提高。

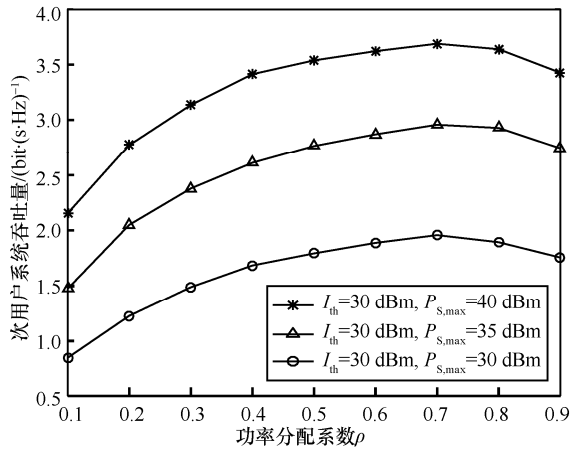


图 4 功率分配系数与次用户系统吞吐量的关系

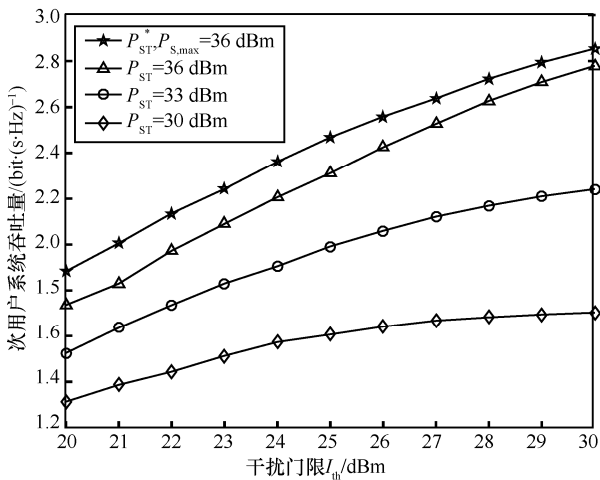


图 5 不同次用户发射功率对次用户系统吞吐量的影响

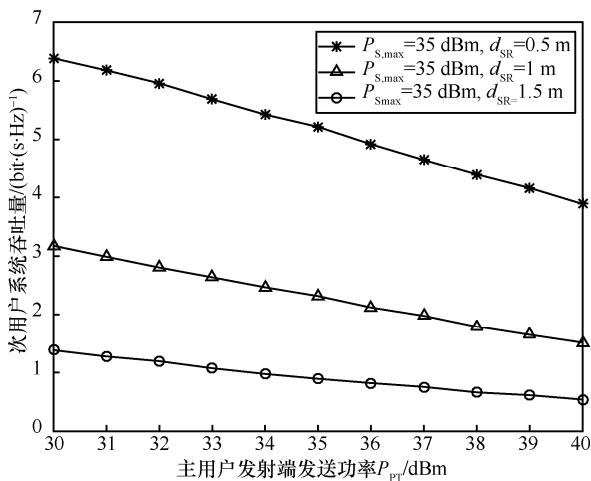


图 6 主用户发射功率与次用户系统吞吐量的关系

图 7 仿真了不同剩余自干扰对次用户系统吞吐量的影响。随着剩余自干扰的增大，次用户系统吞吐量会有所降低。这主要是因为随着自干扰的增大，系统的信干噪比会降低，因此系统性能有所降低。

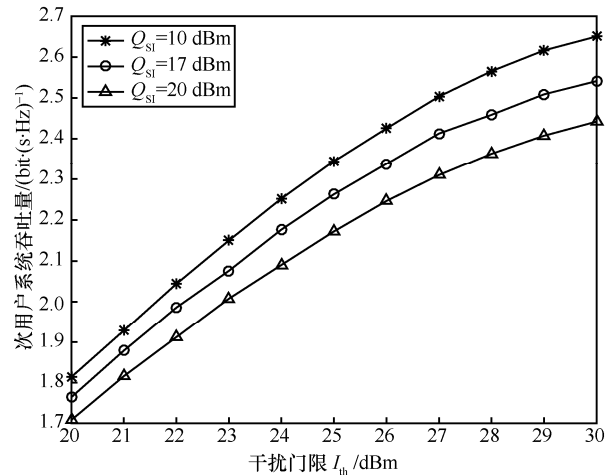


图 7 不同剩余自干扰对次用户系统吞吐量的影响

5 结束语

本文提出了一种基于能量收集的全双工认知中继系统的设计方案。在该方案中，全双工中继节点在协助网络节点传输信号的同时，通过能量收集从主、次用户发射端传输的信号中得到能量，不仅能有效实现频谱资源共享，还能充分再利用无线环境中的能量资源，解决了中继节点自身能量受限问题。为了最大化次用户系统吞吐量，实现频谱的高效利用，本文采用分步优化法，将其转化为可解的凸优化问题，通过收敛迭代算法求得原问题的最终解。仿真结果表明，与半双工 PS 算法及全双工 TS 算法相比，本文所提全双工 PS 算法能有效提升次用户系统吞吐量性能。

参考文献：

[1] LU X, WANG P, NIYATO D, et al. Wireless networks with RF energy harvesting: a contemporary survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(2): 757-789.

[2] SHAN F, LUO J, WU W, et al. Throughput maximization for the wireless powered communication in green cities[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(6): 2560-2569.

[3] 闫怡菲, 张顺外. 基于 SWIPT 的全双工中继协作系统能效研究[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2019, 39(4): 55-62.

YAN Y F, ZHANG S W. Energy efficiency of SWIPT-based full-duplex relay cooperative system[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2019,

- 39(4): 55-62.
- [4] NIYATO D, KIM D I, MASO M, et al. Wireless powered communication networks: research directions and technological approaches[J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(6): 88-97.
- [5] 雷维嘉, 董明昊. 基于无率码的信息与能量同传中继信道传输速率的优化与实现[J]. 通信学报, 2019, 40(5): 98-107.
LEI W J, DONG M H. Optimization and realization of SWIPT relay channel transmission rate based on rateless code[J]. Journal on Communications, 2019, 40(5): 98-107.
- [6] SINGLA J, MAHAJAN R, BAGAI D. A survey on energy harvesting cognitive radio networks[C]/2018 6th Edition of International Conference on Wireless Networks & Embedded Systems (WECON). Piscataway: IEEE Press, 2018: 6-10.
- [7] ZAREEI M, VARGAS-ROSALES C, HERNANDEZ R V, et al. Efficient transmission power control for energy-harvesting cognitive radio sensor network[C]/2019 IEEE 30th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [8] RONGHE S B, KULKARNI V P. Modelling and performance analysis of RF energy harvesting cognitive radio networks[C]/2016 International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [9] PATHAK K, BANERJEE A. Optimal harvest-or-transmit strategy for energy harvesting underlay cognitive radio network[C]/2018 International Conference on Signal Processing and Communications (SPCOM). Piscataway: IEEE Press, 2018: 129-133.
- [10] 谢显中, 罗莹, 陈九九, 等. 能量收集认知网络中基于次用户意愿和吞吐量的中继协作方案[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2019, 31(1): 1-10.
XIE X Z, LUO Y, CHEN J J, et al. Optimal relay scheme for cooperation and throughput requirements of secondary users in energy harvesting cognitive networks[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2019, 31(1): 1-10.
- [11] CHATTERJEE S, MAITY S P, ACHARYA T. Energy-spectrum efficiency trade-off in energy harvesting cooperative cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2019, 5(2): 295-303.
- [12] 徐欣健, 仇润鹤, 蒋学芹. 具有能量收集功能的认知中继网络安全性能分析[J]. 计算机工程, 2019, 45(12): 147-152.
XU X J, QIU R H, JIANG X Q. Security performance analysis of cognitive relay networks with energy collection function[J]. Computer Engineering, 2019, 45(12): 147-152.
- [13] PENG H, LIN Y R, LU W D, et al. Joint resource optimization for DF relaying SWIPT based cognitive sensor networks[J]. Physical Communication, 2018, 27: 93-98.
- [14] ZHAO N, ZHANG S, YU R, et al. Exploiting interference for energy harvesting: a survey research issues and challenges[J]. IEEE Access, 2017, 5: 10403-10421.
- [15] XU D, LI Q. Resource allocation in cognitive wireless powered communication networks with wirelessly powered secondary users and primary users[J]. Science China (Information Sciences), 2019, 62(2): 224-229.
- [16] SON P N, DUY T T. Performance analysis of underlay cooperative cognitive full-duplex networks with energy-harvesting relay[J]. Computer Communications, 2018, 122: 9-19.
- [17] ZHANG S B, HU Y D, ZHANG L, et al. Novel spectrum sensing and access in cognitive radio networks[J]. Science China (Information Sciences), 2018, 61(8): 089302.
- [18] WANG W, WANG R, DUAN W, et al. Optimal transceiver designs for wireless-powered full-duplex two-way relay networks with SWIPT[J]. IEEE Access, 2017, 5: 22329-22343.
- [19] WANG R, TAO M, LIU Y. Optimal linear transceiver designs for cognitive two-way relay networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(4): 992-1005.
- [20] LI Y, LI N, PENG M, et al. Relay power control for two-way full-duplex amplify and forward relay networks[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2016, 23(2): 292-296.

[作者简介]



张士兵 (1962-), 男, 江苏南通人, 博士, 南通大学教授、博士生导师, 主要研究方向为通信信号处理、智能信息处理、认知无线电、超宽带、物理层安全等。



韩刘可 (1992-), 男, 安徽阜阳人, 南通大学硕士生, 主要研究方向为认知无线电、能量收集。



张美娟 (1994-), 女, 江苏淮安人, 南通大学硕士生, 主要研究方向为无线携能通信、认知无线网络。