

基于 SWIPT 混合协议及联合解码的能量效率研究^①

何继爱^② 王志文^③ 王倩宇 李志鑫

(兰州理工大学计算机与通信学院 兰州 730050)

摘 要 针对无线通信网络中小区边缘用户通信质量问题,采用传感中继进行协作通信,为解决引入传感中继所引起的能耗问题,提出了基于无线携能通信(SWIPT)混合协议及联合最大比解码(MRC)方式的能量优化方法。将以最大化主用户信号遍历链路能量效率(EE)为目标的分式规划问题,转化为易求解的非分式规划问题;从功率控制、功率/时间分割因子2个角度分析EE;利用Dinkelbach迭代算法优化基站发射功率,并结合遗传算法联合优化功率分配因子和时间分割因子,以实现遍历链路EE最大化。仿真实验结果表明,该方法在无线认知传感中继网络中能够更好地提升能量效率。

关键词 能量效率(EE);无线携能通信(SWIPT);协作中继;认知无线电(CR);小区边缘用户

0 引言

近些年来,蜂窝网络中的小区边缘用户受到障碍物和信道环境的影响,造成用户接收信息不完整、通信质量差,极大影响了用户通信服务质量。而协作中继通信技术(cooperative relay communication technology, CRCT)作为一种提高网络容量和网络小区覆盖面的有效方法^[1],对提高小区边缘用户的通信质量有着重要的作用,且传感器因其具有部署广泛和灵活性等特点,经常被用作网络场景中的中继节点。但由于传感器多为一些能量受限的硬件设备,引用传感中继需要获取主用户的授权频段进行通信。对此,Varshney^[2]和Mitola^[3]分别提出无线携能通信(simultaneous wireless information and power transfer, SWIPT)和认知无线电(cognitive radio, CR)技术以解决传感中继能量受限的问题,并在提高频谱利用率上作出了巨大贡献。

关于中继协作通信,研究学者们在中继的选取

和中继位置对网络性能分析方面已经开展了大量研究^[4-5]。文献[6,7]比较分析了双向中继和单向中继对网络性能的影响,发现双向中继协助通信能够显著地提升频谱效率和能量效率(energy efficiency, EE)。文献[8]在无线传感网络(wireless sensor networks, WSN)中提出了基于深度学习的中继选择方案,分析了该方案的中断概率和系统容量。由于协作中继技术可以提高认知网络的多样性,文献[9,10]通过合理选择中继并进行频谱划分,有效地提高了系统的频谱效率。文献[11,12]则是在中继处引用非正交多址(non orthogonal multiple access, NOMA)技术来实现多用户的协作通信,并利用SWIPT技术为中继收集能量,进一步提高了中继网络系统的能量效率。

但是使用SWIPT技术需要同时兼顾实际运用场景,故文献[13-15]针对实际的SWIPT接收器设计提出了时间分割(time switching, TS)和功率分配(power splitting, PS)方案,以实现信息和能量的同时接收,并分析了不同方案在WSN中的中断概率。文

① 国家自然科学基金(61561031,62061024)资助项目。

② 男,1969年生,硕士,教授;研究方向:无线信号处理与分析,无线通信网络资源分配与优化;E-mail: Hejia@lut.cn。

③ 通信作者,E-mail: 13893045285@163.com。

(收稿日期:2023-01-18)

献[16-18]在功率控制、波束成形、传输策略等资源分配领域研究了 SWIPT 技术,发现同时传输信息与能量会增加信息泄露的可能性,故有学者对 SWIPT 技术的保密性能进行了相关研究^[19-21]。而文献[22]在结合 SWIPT 与 CR 技术的同时研究其保密中断性能,这对频谱资源管理的验证效果有着重要意义。

认知无线电采取动态频谱管理的方式,即它能够在不影响授权用户(主用户)的前提下给未授权用户(次用户)提供动态频谱接入机会,故不受网络场景限制。而在无线传感网络中,传感节点可作为非授权用户,但是无法获得授权频段,因此文献[23]提出了一种基于认知无线电的频谱交易思想,即传感节点充当中继以协助授权用户与基站之间的通信,中继节点从而获得授权频段,发送自身信息给其他未授权用户。

本文的具体工作内容如下。

(1) 假设了一种基于 SWIPT 混合协议的中继协作通信模型。其中无主动供电的传感设备充当中继,并从基站发射的信号中收集能量以协助小区边缘主用户进行信息传输。该模型旨在不消耗中继自身能量的同时获取主用户授权频段并发射自身信号。

(2) 基于上述模型,在确保用户所需目标速率最小化的同时构建能量效率最大化函数。但由于发射功率、功率分配因子和时间分割因子之间具有耦合性,导致能量效率的求解问题相当复杂,故将该问题分解为功率控制、联合功率/时间分配因子优化的 2 个子问题。采用丁克尔巴赫方法优化基站发射功率,并通过遗传算法对功率分配因子和时间分割因子进行联合优化以实现最大化能效。

(3) 为了处理主用户处的多重信息,采用了联合解码的方式,对主用户处 2 次接收到的信息进行叠加处理。联合解码不同于普通的单解码方式,可以有效提高信噪比,增大传输速率,提高中继的能量收集水平,进而可以降低发射功率并提高主用户信号遍历链路的能量效率。

1 系统模型

假设在无线认知传感网络中,接收端有 2 个认

知用户,由于主用户距离基站较远,基站未能向主用户发送完整信息,需要借助传感中继进行协作通信,传感器中继在获取授权频段后将自己的信息数据发送给次用户,传感器中继采用解码转发(decode and forward, DF)方式进行辅助传输。系统模型如图 1 所示,考虑主用户和次用户复用同一个下行链路频谱资源。表 1 列举出了系统模型使用符号及其意义。

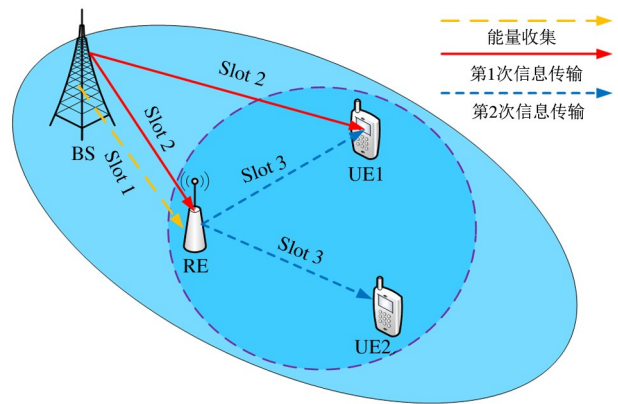


图 1 系统模型图

表 1 符号对照表

符号	表示含义
BS	基站
RE	传感中继
UE1	主用户(边缘用户)
UE2	次用户
PS	SWIPT 技术 PS 协议
TS	SWIPT 技术 TS 协议
IT	SWIPT 技术信息传输阶段
EH	SWIPT 技术能量传输收集阶段
GA	遗传算法

为了提高系统传输的可靠性,中继采用 SWIPT 技术并结合网络编码技术分 3 个时隙进行信息交换,并使用 SWIPT 混合时间功率协议模型,如图 2 所示。假设完成总的传输时间为 T ,表 2 介绍了每个时隙的工作任务。第 1、2 时隙,基站分别向主用户和传感中继发送信息,其中一部分能量 εP_B 被用作能量收集,剩余部分的能量 $(1 - \varepsilon)P_B$ 用作基站到中继和主用户的信息传输, $\alpha(0 < \alpha < 1)$ 表示时间切换因子, $\varepsilon(0 < \varepsilon < 1)$ 为功率分割因子。在第 3 时隙,传感中继首先将从基站收到的信号 x_2 进

行译码,然后将基站发送的信号 x_1 和自身要发送的信号 x_2 进行重新编码,再将编码后的信号广播给主用户和次用户,主用户将收到的信号进行解码并采用串行干扰消除技术(successive interference cancellation, SIC)消除信号 x_2 的干扰。表中 P_B 为基站发射功率, P_R 为中继发射功率。

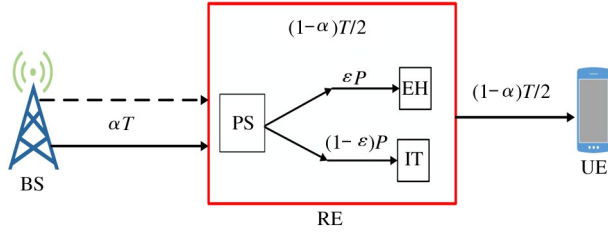


图2 SWIPT 混合协议模型

表2 SWIPT 混合协议时隙分配表

时隙 T	阶段	功率 P
第1时隙 $\{\alpha T\}$	BS→RE (TS 协议)	BS 发送功率为 P_B
第2时隙 $\{(1-\alpha)T/2\}$	BS→UE ₁ BS→RE (PS 协议)	BS 发送功率为 P_B IT: $(1-\varepsilon)P_B$ EH: εP_B RE 发送功率 P_R
第3时隙 $\{(1-\alpha)T/2\}$	RE→UE ₁ RE→UE ₂	UE ₁ 分配功率 $a_1 P_R$ UE ₂ 发送功率 $a_2 P_R$ ($a_1 < a_2$)

2 问题分析

2.1 信号模型

根据表2的时隙分配分析得出,在第1时隙基站广播信息,其基站发送的信号为

$$x_B = \sqrt{P_B} x_1 \quad (1)$$

传感器中继收集一部分能量,第1时隙末传感器中继接收到的能量信号表示为

$$y_{RE,EH} = \sqrt{\varepsilon P_B} h_2 x_1 + N_{h_2} \quad (2)$$

式中, x_1 表示基站发送给主用户的信号, $N_{h_1,2}$ 是信道中服从复高斯分布的噪声。

在第1个时隙内采用 TS 协议中继收集的能量可以表示为

$$E_{TS} = \xi \alpha T P_B |h_2|^2 \quad (3)$$

式中, $\xi (0 < \xi < 1)$ 为能量效率转换系数, $h_{1,2} \sim$

$CN(0, \lambda_{h_{1,2}} = d_{1,2}^{-\nu_h})$ 是均方误差为0的瑞利平坦衰落信道。

第2时隙基站向传感器中继和主用户发送信号,传感器中继和主用户第1次接收到的信息信号表示为

$$y_{RE,IP} = \sqrt{(1-\varepsilon)P_B} h_2 x_1 + N_{h_2} \quad (4)$$

$$y_{UE_1}^I = \sqrt{P_B} h_1 x_1 + N_{h_1} \quad (5)$$

式中, $N_{h_{1,2}}$ 是信道中服从复高斯分布的噪声, $h_{1,2} \sim CN(0, \lambda_{h_{1,2}} = d_{1,2}^{-\nu_h})$ 是均方误差为0的瑞利平坦衰落信道。

其中信号 x_1 在主用户和传感中继处的信噪比分别表示为

$$\gamma_{UE_1}^{I,x_1} = \frac{P_B |h_1|^2}{N_{h_1}} \quad (6)$$

$$\gamma_{RE}^{x_1} = \frac{(1-\varepsilon)P_B |h_2|^2}{N_{h_2}} \quad (7)$$

在第1次信号传输阶段,只发送一个信号 x_1 ,因此并未考虑链路间干扰以及链路内干扰,只考虑链路内噪声。

在第2时隙内采用 PS 协议中继收集的能量可以表示为

$$E_{PS} = \frac{1}{2} \xi (1-\alpha) T \varepsilon P_B |h_2|^2 \quad (8)$$

综合2部分收集的能量,因此采用 SWIPT 混合协议所收集的能量可以表示为

$$\begin{aligned} E_H &= E_{TS} + E_{PS} \\ &= \xi \alpha T P_B |h_2|^2 + \frac{1}{2} \xi (1-\alpha) T \varepsilon P_B |h_2|^2 \end{aligned} \quad (9)$$

传感器中继将收到的信号进行译码,并将自身要发送的信号和接收到的信号重新编码组合,然后将编码后的信号广播给主用户和次用户,因此第3时隙内,传感器中继的发射功率为

$$P_R = \frac{E_H}{(1-\alpha)T/2} = \xi P_B |h_2|^2 \left(\frac{2\alpha}{1-\alpha} + \varepsilon \right) \quad (10)$$

第3时隙,传感器中继发送的信号表示为

$$x_R = \sqrt{a_1 P_R} x_1 + \sqrt{a_2 P_R} x_2 \quad (11)$$

式中, a_1, a_2 表示中继功率分配因子,并且 $a_1 + a_2 = 1$, $a_1 < a_2$ 。

主用户和次用户分别接收到的信号分别表示为

$$y_{\text{UE}_1}^{\Pi} = (\sqrt{a_1 P_R} x_1 + \sqrt{a_2 P_R} x_2) g_1 + N_{g_1} \quad (12)$$

$$y_{\text{UE}_2} = (\sqrt{a_1 P_R} x_1 + \sqrt{a_2 P_R} x_2) g_2 + N_{g_2} \quad (13)$$

式中, $N_{g_{1,2}}$ 是信道中服从复高斯分布的噪声, $g_{1,2} \sim CN(0, \lambda_{g_{1,2}} = d_{1,2}^{-\nu_g})$ 是均方误差为 0 的瑞利平坦衰落信道。

次用户首先对信号 x_2 进行解码, 故次用户的信噪比为

$$\gamma_{\text{UE}_2}^{x_2} = \frac{a_2 P_R |g_2|^2}{a_1 P_R |g_2|^2 + N_{g_2}} \quad (14)$$

主用户先解码 x_2 , 然后采用 SIC 技术消除 x_2 后, 再对 x_1 进行解码, 则主用户的信噪比为

$$\gamma_{\text{UE}_1}^{\Pi, x_1} = \frac{a_1 P_R |g_1|^2}{N_{g_1}} \quad (15)$$

2.2 能量效率模型

因为链路的传输速率一般取决于速率低的传输链路, 故整个时隙的主用户信息遍历传输速率可以表示为

$$R = (1 - \alpha) TW \log_2(1 + \min(\gamma)) \quad (16)$$

式中, γ 表示用户的信噪比。

在主用户处针对 2 次接收的信息所采取的解码方式有 2 种。第 1 种为单信号解码 (single signal decoding, SSD), 即每个用户收到信号后立即解码, 此时主用户信号遍历链路的传输速率可以表示为

$$R_{\text{SSD}}^{x_1} = (1 - \alpha) TW \log_2(1 + \min(\gamma_{\text{RE}}^{x_1}, \gamma_{\text{UE}_1}^{I, x_1}, \gamma_{\text{UE}_2}^{\Pi, x_1})) \quad (17)$$

式中, $\gamma_{\text{RE}}^{x_1}$ 表示传感器中继处的第 2 时隙的信噪比, $\gamma_{\text{UE}_1}^{I, x_1}$ 、 $\gamma_{\text{UE}_2}^{\Pi, x_1}$ 分别表示为主用户第 2 时隙和第 3 时隙的信噪比。

第 2 种为联合最大比解码 (maximal ratio combining decoding, MRC)。由于信号传输速率受信道的影 响, 主用户在第 1 阶段不会对接收到的信号进行解码, 对其进行保存处理; 第 2 阶段收到来自传感中继转发的信号后, 将 2 次信号进行叠加处理, 此时主用户的联合信噪比以及遍历链路传输速率表示为

$$\gamma_{\text{MRC}, \text{UE}_1}^{x_1} = \gamma_{\text{UE}_1}^{I, x_1} + \gamma_{\text{UE}_1}^{\Pi, x_1} \quad (18)$$

$$R_{\text{MRC}}^{x_1} = (1 - \alpha) TW \log_2(1 + \min(\gamma_{\text{RE}}^{x_1}, \gamma_{\text{MRC}, \text{UE}_1}^{x_1})) \quad (19)$$

系统传输信号消耗的总功率为

$$P_{\text{tot}} = \alpha T \mu P_B + TP_C \quad (20)$$

式中, μ 为电路放大效率倒数, P_C 为电路功率功耗。

定义能量效率为传输速率与功率消耗的比值, 单位为 bit/J。其含义是在移动通信系统中单位能量所能传输的比特数, 可以表示为

$$\eta_{\text{EE}} = \frac{R}{P_{\text{tot}}} \quad (21)$$

式中, η_{EE} 为能量效率, R 为传输速率, P_{tot} 为传输信号消耗的总功率。

分别分析 2 种不同解码情况下信号 x_1 遍历链路的能量效率:

$$\begin{aligned} \eta_{\text{EE}, \text{SSD}} &= \frac{R_{\text{SSD}}^{x_1}}{P_{\text{tot}}} \\ &= \frac{(1 - \alpha) W \log_2(1 + \min(\gamma_{\text{RE}}^{x_1}, \gamma_{\text{UE}_1}^{I, x_1}, \gamma_{\text{UE}_2}^{\Pi, x_1}))}{\alpha \mu P_B + P_C} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \eta_{\text{EE}, \text{MRC}} &= \frac{R_{\text{MRC}}^{x_1}}{P_{\text{tot}}} \\ &= \frac{(1 - \alpha) W \log_2(1 + \min(\gamma_{\text{RE}}^{x_1}, \gamma_{\text{MRC}, \text{UE}_1}^{x_1}))}{\alpha \mu P_B + P_C} \end{aligned} \quad (23)$$

为了使主用户能效最大化, 并满足其传输速率的门限值。求解能效最大时的基站发射功率, 数学模型如下式所示:

$$\begin{aligned} \max_{\varepsilon, \alpha, a_1, a_2, P_B} \eta_{\text{EE}, \text{MRC}} &= \frac{R_{\text{MRC}}^{x_1}}{P_{\text{tot}}} \\ &= \frac{(1 - \alpha) W \log_2(1 + \min(\gamma_{\text{RE}}^{x_1}, \gamma_{\text{MRC}, \text{UE}_1}^{x_1}))}{\alpha \mu P_B + P_C} \end{aligned} \quad (24)$$

s. t.

$$C1: 0 < \alpha < 1$$

$$C2: 0 < \varepsilon < 1$$

$$C3: 0 < a_1 < a_2 < 1$$

$$C4: R_{\min} < R_{\text{MRC}}^{x_1}$$

$$C5: 0 < P_B < P_{\max}$$

式中, C1 表示时间分配因子的取值范围, C2 和 C3 分别表示基站功率分割因子和传感中继分割因子的取值范围, C4 表示认知用户要求达到的最低传输速率阈值, C5 表示基站发射功率的取值范围。

3 能量效率优化

在目标函数式(24)中,由于 $\eta_{EE,MRC}$ 是关于 ε 、 α 、 a_1 、 a_2 、 P_B 的五元变量函数,计算量巨大。为了简化该问题求解,可以采用一种迭代优化的算法来求得 $\eta_{EE,MRC}$ 的最大值。首先将 ε 、 α 、 a_1 、 a_2 作为定值, P_B 作为优化变量来优化目标函数;再将优化得到的 P_B 作为定值,将 ε 、 α 、 a_1 、 a_2 作为优化变量来优化目标函数,如此反复迭代优化,直到最后的优化结果趋于收敛,优化完成。

3.1 发射功率优化

当 ε 、 α 、 a_1 、 a_2 为定值时,优化问题变为

$$Q1: \max_{P_B} \eta_{EE,MRC} = \frac{R_{MRC}^{x_1}}{P_{tot}} = \frac{(1-\alpha)W \log_2(1 + \min(\gamma_{RE}^{x_1}, \gamma_{MRC,UE_1}^{x_1}))}{\alpha\mu P_B + P_C} \quad (25)$$

s. t. $C4 \sim C5$

目标函数是关于 P_B 的非线性分式函数,为方便判断凹凸性,将该式转化为非分式问题。令 q^* 表示 $Q1$ 所能达到的最大能量效率,定义函数:

$$F(\eta_{EE,MRC}) = \max_{P_B} [R_{MRC}^{x_1} - q \times P_{tot}] \quad (26)$$

根据文献[24]的结论,对于信号 x_1 遍历链路的最大能量效率 q^* ,可以计算得到其相应的最优发射功率,当且仅当:

$$Q2: F(\eta_{EE,MRC}) = \max_{P_B} [R_{MRC}^{x_1} - q^* \times P_{tot}] = 0 \quad (27)$$

通过海森矩阵^[25]可以证明 $Q2$ 属于凸优化问题,可以在 Matlab 中使用 CVX 工具箱进行优化^[26]。综上所述,本文提出了基于 Dinkelbach 的迭代算法,具体步骤如算法 1 所示。

算法 1 基于 Dinkelbach 的迭代算法最大化能效

- 1: 初始化最大迭代次数 L_{max} 和最大公差 ζ
 - 2: 设置最大能量效率 $q = 0$ 和迭代次数变量 $l = 1$
 - 3: repeat
 - 4: 利用 CVX 工具箱和给出的 q 求解 $Q1$, 并获得发射功率的最优解 P_B'
-

5: if $R_{MRC}^{x_1} - q \times [\alpha\mu P_B' + P_C] < \zeta$, 则

6: 设置 $P_B^* = P_B'$, $q^* = \frac{R_{MRC}^{x_1}}{\alpha\mu P_B' + P_C}$, Flag = 1 并返回

7: else

8: 设置 $q = \frac{R_{MRC}^{x_1}}{\alpha\mu P_B' + P_C}$, $l = l + 1$, Flag = 0

9: end if

10: 直到 Flag = 1 或者 $l = L_{max}$

3.2 功率分配因子与时间分割因子优化

当 P_B 为定值时,由于 $\eta_{EE,MRC}$ 是关于 ε 、 α 、 a_1 、 a_2 的凹函数,因此优化问题变为

$$Q3: \max_{\varepsilon, \alpha, a_1, a_2} \eta_{EE,MRC} = \frac{R_{MRC}^{x_1}}{P_{tot}} = \frac{R_{MRC}^{x_1}}{\alpha\mu P_B + P_C} \quad (28)$$

s. t. $C1 \sim C3$

针对 $Q3$, 利用 Matlab 遗传算法工具箱求得 ε 、 α 、 a_1 、 a_2 最优解。具体过程如下:基站发射功率 P_B 和中继发射功率 P_R 分别有对应的分配因子 ε 、 a_1 、 a_2 且 $a_1 < a_2$, $a_1 + a_2 = 1$, 因此将问题转化为获得最优的发射功率所对应分配因子 ε 、 a_2 。为方便求解最佳能量效率,将功率分配因子 ε 、 a_2 和时间分割因子 α 逐个进行优化。首先将获得最优的基站发射功率和时间分割因子作为固定值,优化发射功率 P_B 、 P_R 所对应的功率分配因子 ε 、 a_2 ; 然后根据获得的最优功率分配因子优化时间分割因子,反复迭代;重复以上步骤,直到获得最优的 ε 、 α 、 a_1 、 a_2 使得获得能量效率最大,具体步骤如算法 2 所示。

算法 2 基于 GA 的迭代算法最大化能效

- 1: 生成初始随机种群 f
 - 2: 生成初始随机 α 、 ε 、 a_2
 - 3: repeat
 - 4: for $l = 1:1$: 种群数量 do
 - 5: 计算群体 $f(x_i)$ 中各个体的适应度
 - 6: 选择亲代个体进行繁殖
 - 8: 执行变异选择
 - 9: 计算每个子代的适应度
 - 10: 选择最适合子代个体
 - 11: for $j = 1:1$: 迭代数目 do
 - 12: for 每个粒子 i do
 - 13: 计算适应度
 - 14: if $f(x_i) > f(l_i)$ then
 - 15: $l_i \leftarrow x_i$
-

```
16:      end if
17:      if  $f(x_i) > f(g)$  then
18:           $g \leftarrow x_i$ 
19:      end if
20:      根据一下规则更新标准:
21:       $v_i = v_i + c1 \times r1^i \times (l_i - x_i) + c2 \times r2 \times (g - x_i)$ 
22:       $x_i = x_i + v_i$ 
23:  end for
24:  end for
25:  end for
26: until 满足终止标准
27: Output:  $\alpha, \varepsilon, a_2$ 
```

4 仿真实验及结果分析

本节提供了数值结果来评估所提出最佳方案的能量效率。重复执行 10 000 次蒙特卡洛实验,并对结果取平均值。为了验证所提方案的优越性,首先验证了算法收敛性,然后在主用户处分别采取 2 种解码模式以及对不同 SWIPT 协议模型下的能量效率进行仿真,最后分析了发射功率、时间分割因子以及功率分割因子对能量效率的影响,探究了混合协议模型下时间分割因子和功率分配因子相互协同对能量效率的影响。为了简化模拟,各个终端位置都是确定的。主要仿真参数如表 3 所示。

表 3 实验仿真参数

参数	取值
电路功率功耗 P_c	500 mW
系统带宽 W	10 MHz
噪声频谱密度 $N_{h,g1,2}$	-174 dBm/Hz
认知链路最小传输速率 $R_{\min}$	3 Mbit/s/Hz
路径损耗指数 $\nu_{h_1} = \nu_{h_2}$	4
路径损耗指数 $\nu_{g_1} = \nu_{g_2}$	2
电路转换效率 ξ	0.6

图 3 为采用 SWIPT 混合协议模型和联合解码方式迭代次数与能量效率的关系图。由该图可以得出以下结论:(1)迭代 3 次之后,算法已基本收敛,因此本文提出的算法具有较快的收敛性;(2)在混合协议和联合解码方式下,发射功率在 45 mW 且 α

$= 0.3, \varepsilon = 0.5$ 时获得最大能效 190 Mbit/J。

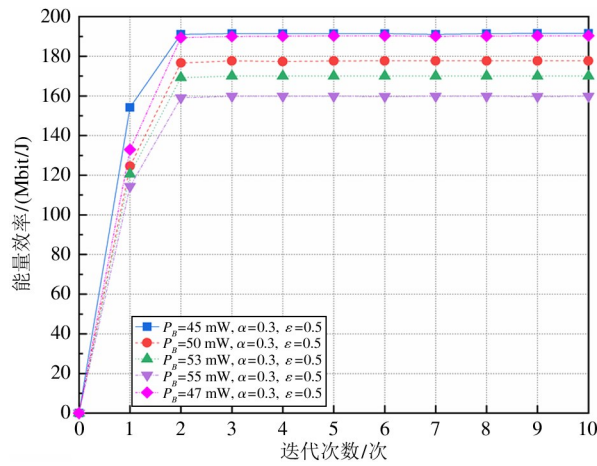


图 3 迭代次数与能量效率关系图

由于本文采用了 SWIPT 混合协议模型和联合解码方式,使得信号 x_1 遍历链路的能效最大。因此,分别对比单解码和联合解码对能量效率的影响,能效和功率的关系如图 4 所示。采用混合协议时,分别固定功率分配因子 ε 和时间分割因子 α ,绘制了主用户不同解码方式下迭代次数和能量效率图,发射功率在 40 mW 时取得能效最大值。由图 4 可知:(1)随着发射功率的增大,能量效率逐渐降低;(2)相同的发射功率下主用户采取联合解码的方式的能量效率优于单解码情况。联合解码相较于单解码的能量效率提升了 4.28%。其主要原因是,高发射信噪比情况下,中继节点可以获得更多的能量,因而提高了系统的能效。

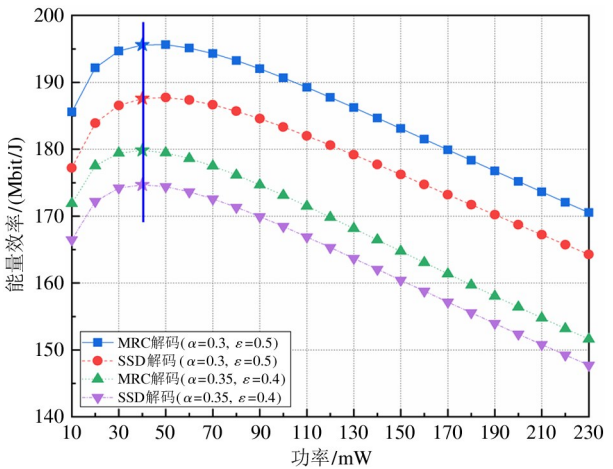


图 4 不同解码方式功率与能量效率关系图

此外,主用户采用联合解码的方式,对比分析了不同的 SWIPT 协议模型的能量效率,如图 5 所示。若系统采用的是 SWIPT 的单 PS 协议,则考虑对系统进行等间隔时隙任务划分,中继进行能量收集,同时考虑功率分配因子 ε 的优化;若系统采用的是 SWIPT 的单 TS 协议,通过对时间分割因子 α 的分析优化确定系统时隙分割,发射功率不再依据 PS 协议进行分配。

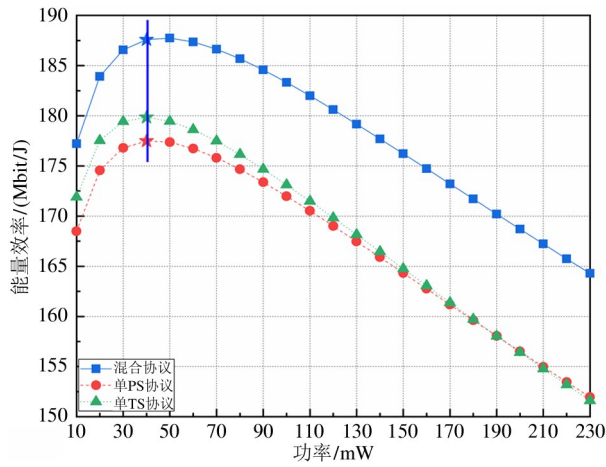


图5 不同 SWIPT 协议功率与能量效率关系图

经过比较分析不同协议对能量效率的影响,可以得出:(1)混合协议的能量效率较单个协议提升了4.07%左右;(2)单个协议的最优发射功率小于混合协议,因为混合协议增加了系统的复杂度,增加了功耗,但随之也带来了能效的提升;(3)单个协议随着发射功率的增大,能效衰落速度较快,即多协议相互协同可以降低衰落速度。

图6分别选取了几组不同的时间分割因子 α 和功率分配因子 ε 组合在主用户处进行联合解码方式,分析了不同组合情况下发射功率和能量效率的关系。由图可以得出:(1)随着发射功率的增加,能量效率逐渐降低。其原因是根据对数函数的特性,当发射功率增大到一定程度,由于发射功率的提升无法带来足够频谱效率的提升,即能量效率数学表达式中的分母项的增长远高于分子项的增长,系统的能量效率会不断下降;(2)随着时间分割因子 α 的逐渐增大,最优的发射功率逐渐减小,并且能量效率的衰落程度加快;(3)功率分配因子 ε 的变换对能量效率和最优发射功率影响较小。

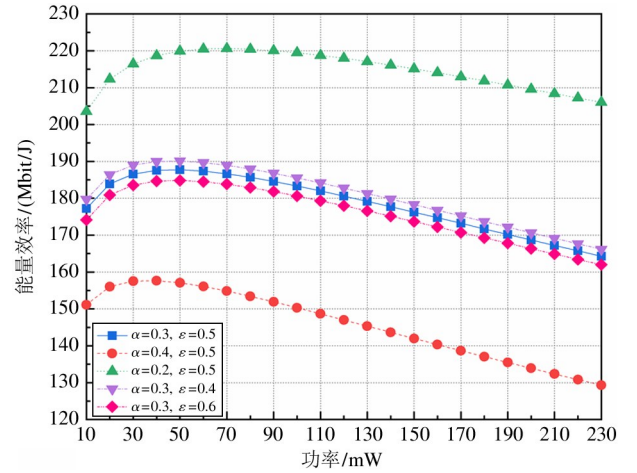


图6 不同因子组合功率与能量效率关系图

图7和图8分别分析了功率分配因子 ε 和时间分割因子 α 与能量效率的关系图。其中黑线分别是

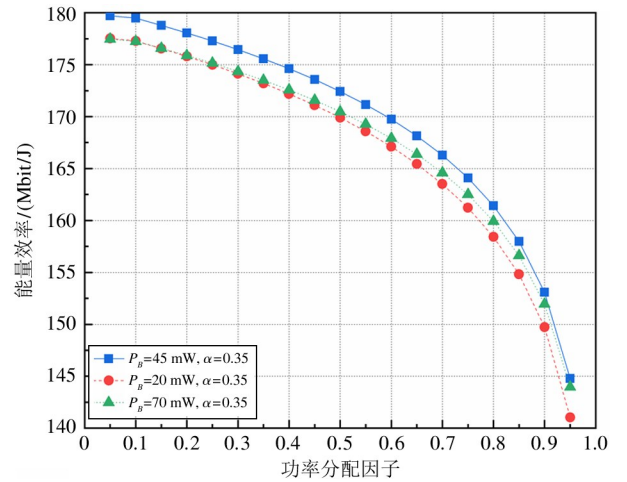


图7 功率分配因子 ε 与能量效率关系图

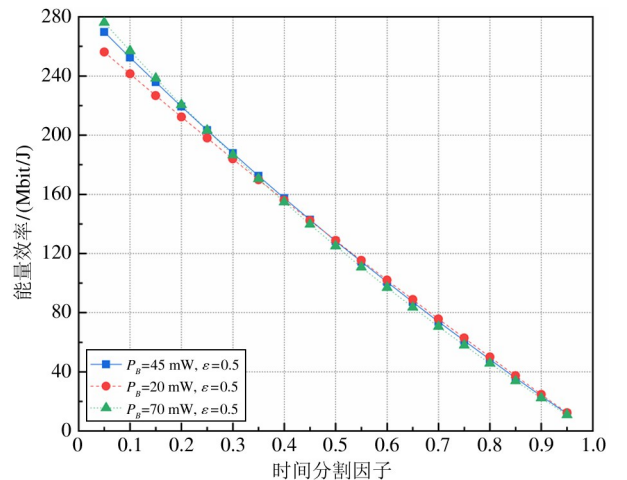


图8 时间分割因子 α 与能量效率关系图

基站最优发射功率,分别取大于和小于最优发射功率的数值比较能量效率,可以得出:(1) ε 越大能量效率越小,即信息译码所占比例越高,主用户的遍历链路能量效率越大;(2)随着功率分配因子的变化,能量效率的取值受到了影响,并非在最优发射功率下一直保持最优;(3) α 越大能量效率越小,在 $\alpha = 0.35$ 时,不同的发射功率获得相同的能效;(4)通过遗传算法验证 $\alpha = 0.35$ 和 $\varepsilon = 0.5$ 分别为最优时间分割因子和功率分配因子。

5 结 论

在本文中,无线通信网络中小区边缘用户通过直连和中继的方式相互协作通信,联合解码和 SWIPT 技术解决了引入传感中继所引发的能耗问题。通过实验对比单 PS 协议、单 TS 协议与 SWIPT 混合协议模型,以及主用户处单解码与联合解码模式下的能量效率,验证混合 SWIPT 协议和联合解码方式将主用户信号遍历链路能量效率提升了 17.42%,且获悉了最优发射功率为 45 mW,功率分配因子 $\varepsilon = 0.5$ 及时间分割因子 $\alpha = 0.35$ 。结果充分证明提出的解决方案可以有效地解决边缘用户通信问题。

下一阶段工作将会全面研究整个系统多用户的能量效率及频谱效率,并且进一步研究系统的频谱效率,使其理论方法及考察角度更加合理有效。

参考文献

- [1] TAO X, XU X, CUI Q. An overview of cooperative communications[J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(6):65-71.
- [2] VARSHNEY L R. Transporting information and energy simultaneously[C] // IEEE International Symposium on Information Theory. Toronto: IEEE, 2008:1612-1616.
- [3] MITOLA J, MAGUIRE G Q. Cognitive radio: making software radios more personal[J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4):13-18.
- [4] GAO Y, XIAO Y, WU M, et al. Dynamic social-aware peer selection for cooperative relay management with D2D communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(5):3124-3139.
- [5] XING F, YIN H, JI X, et al. Joint relay selection and

power allocation for underwater cooperative optical wireless networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 19(1):251-264.

- [6] SUN H, HAN F, ZHAO S, et al. Optimal energy-harvesting design for AF and DF two-way relay beamforming in 6G[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2022(1):73.
- [7] GHOSH S. On spectrally-efficient device-to-device communication with wireless information and power transfer[J]. Telecommunication Systems, 2021, 76(4):569-578.
- [8] SU Y, LU X, ZHAO Y, et al. Cooperative communications with relay selection based on deep reinforcement learning in wireless sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(20):9561-9569.
- [9] LV L, CHEN J, NI Q, et al. Cognitive non-orthogonal multiple access with cooperative relaying: a new wireless frontier for 5G spectrum sharing[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(4):188-195.
- [10] MOBINI Z. Secure cooperative spectrum sharing in full-duplex multi-antenna cognitive radio networks with jamming[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2021, 128:153495.
- [11] ZHOU N, HU J, HOU J. Research on energy efficiency of NOMA-SWIPT cooperative relay network using GS-DinkelBach algorithm[J]. Sensors, 2021, 21(17):5720.
- [12] RAUNIYAR A, ENGELSTAD P, ØSTERBØ O N. Ergodic capacity performance of D2D IoT relay NOMA-SWIPT systems with direct links[C] // 2020 43rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing. Milan: IEEE, 2020:117-123.
- [13] PAN C, REN H, WANG K, et al. Intelligent reflecting surface aided MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(8):1719-1734.
- [14] JAISWAL A, KUMAR S, KAIWARTYA O, et al. Green computing in IoT: time slotted simultaneous wireless information and power transfer[J]. Computer Communications, 2021, 168:155-169.
- [15] NGUYEN H S, SEVCIK L, VAN H P. Performance analysis on low-power energy harvesting wireless sensors eco-friendly networks with a novel relay selection scheme[J]. Electronics, 2022, 11(13):1978.
- [16] HUANG J, XING C, GUIZANI M. Power allocation for D2D communications with SWIPT[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(4):2308-2320.
- [17] JANG H H, CHOI K W, KIM D I. Novel frequency-split-

- ting SWIPT for overcoming amplifier nonlinearity [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(6): 826-829.
- [18] BUCKLEY R F, HEATH R W. System and design for selective OFDM SWIPT transmission [J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2020, 5(1): 335-347.
- [19] THAKUR A, KUMAR A, GUPTA N, et al. Secrecy analysis of reconfigurable underlay cognitive radio networks with SWIPT and imperfect CSI [J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2020, 9(1): 89-97.
- [20] LEI H, LUO H, PARK K H, et al. On secure mixed RF-FSO systems with TAS and imperfect CSI [J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(7): 4461-4475.
- [21] HOU W, TANG Q. Secrecy outage analysis of imperfect MRC in SWIPT systems with a random eavesdropper [J]. Physical Communication, 2020, 42: 101127.
- [22] MA Y, LV T, LIU H, et al. Secrecy outage analysis of CR-SWIPT networks with artificial noise and spatially random secondary terminals [J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2021, 8(2): 931-945.
- [23] TALUKDAR B, KUMAR D, ARIF W. Performance analysis of a SWIPT enabled cognitive radio sensor network using TS protocol [C] // 2020 Advanced Communication Technologies and Signal Processing. Silchar: IEEE, 2020: 1-5.
- [24] DINKELBACH W. On nonlinear fractional programming [J]. Management Science, 1967, 13(7): 492-498.
- [25] FANG F, CHENG J, DING Z. Joint energy efficient sub-channel and power optimization for a downlink NOMA heterogeneous network [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 68(2): 1351-1364.
- [26] GRANT M, BOYD S, YE Y. CVX users' guide [EB/OL]. [2022-12-05]. <http://www.stanford.edu/~boyd/software>.

Efficiency research based on SWIPT hybrid protocol and joint decoding

HE Jiai, WANG Zhiwen, WANG Qianyu, LI Zhixin

(College of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050)

Abstract

Aiming at the communication quality problem of cell edge users in wireless communication networks, the sensing relay is used for cooperative communication. To solve the problem of energy consumption caused by the introduction of sensing relay, an energy optimization method based on simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) hybrid protocol and maximal ratio combining decoding (MRC) method is proposed. The fractional planning problem with the objective of maximising the energy efficiency (EE) of the primary user signal traversal link is transformed into an easily solvable non-fractional planning problem; EE is analysed from the perspectives of power control and power/time splitting factor; the transmit power of the base station is optimised by using the Dinkelbach iterative algorithm, and the power allocation is jointly optimised with the genetic algorithm factor and time splitting factor to maximize EE of the traversing link. The experimental simulation results show that the method can better improve energy efficiency in wireless cognitive radio sensing relay networks.

Key words: energy efficiency (EE), simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT), cooperative relay, cognitive radio (CR), cell edge user