

基于 WIPT 的两路中继协作 underlay 认知无线电的性能分析

徐纪胜¹, 曾凡仔¹, 李康¹, 李勇峰²

(1. 湖南大学信息科学与工程学院, 湖南 长沙 810012; 2. 西藏大学工学院, 西藏 拉萨 850000)

摘 要: 首先提出基于 WIPT 的两路中继协作 underlay 认知无线网络, 其中次用户系统采用两路协作中继传输, 中继采取功率分裂协议进行能量采集和信息解码, 利用所采集的能量转发信息。然后通过数学推导得出系统用户的中断概率精确表达式和次用户系统遍历容量以及能量效应。最后数值仿真探讨了次用户发射功率对系统性能的影响, 结果表明两路中继协作有效地降低了数据传输的中断概率, 且当功率分配系数取 0.5 时, 系统的容量和能量效应达到最优。

关键词: 认知无线网络; 两路中继; 协作通信; 无线信息和功率转发; 中断概率

中图分类号: TN925

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2019041

Performance analysis of two-way relay cooperation underlay cognitive radio networks based on WIPT

XU Jisheng¹, ZENG Fanzi¹, LI Kang¹, LI Yongfeng²

1. College of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha 810012, China

2. School of Engineering, Tibet University, Lhasa 850000, China

Abstract: The two-way relay cooperation for underlay cognitive radio networks based on WIPT was presented, where secondary system adopted the two-way relay cooperative transmission. First, the relay adopted a power splitting protocol to harvest energy and to decode information transmitted by secondary users, then the relay forwarded information to two secondary users by using the harvested energy. Subsequently the exact expression of the outage probability, the ergodic capacity and energy efficiency of the secondary user system were derived. Finally, numerical simulation discusses the impact on the system performance with regard to secondary transmission power. The results reveal that the two-way relay cooperation effectively reduces the outage probability of data transmission. The capacity and energy efficiency of the system reaches optimal level when the power allocation coefficient is 0.5.

Key words: cognitive radio networks, two-way relay, cooperation communication, wireless information and power transfer, outage probability

1 引言

在无线通信中, 为了应对日益严峻的环境问题和不断增加的无线设备需求, 能量效应和频谱效应

成了 2 个迫切需要解决的问题, 也是当下的研究热点。这些年的研究表明无线信息和能量转换 (WIPT, wireless information and energy transfer) 技术使设备可以从周围的无线电频谱信号中同时采

收稿日期: 2018-01-29; 修回日期: 2018-03-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61370096, No.61772184); 西藏自治区自然科学基金资助项目 (No.2016ZR-TU-02); 西藏大学青年科研培育基金资助项目 (No.ZDPJZK1606); 西藏大学珠峰学者人才支持计划——杰出青年基金资助项目 (No. [2016]141)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61370096, No.61772184), The Natural Science Foundation of Tibet Autonomous Region (No.2016ZR-TU-02), The Youth Research cultivation Foundation of Tibet University (No.ZDPJZK1606), The Program for Everest Scholar Talents Development of Tibet University(No.[2016]141)

集能量和处理信息^[1-4]。文献[1]首次提出无线信息和功率同时转发技术,假设接收机能从相同的信号中解码信息和采集能量。由于认知无线网络(CRN, cognitive radio networks)能够增加频谱接入机会且能显著地改进整个网络性能,因此认知无线网络已经引起了学者们的广泛关注^[2]。许多文献主要研究认知无线网络的频谱效率和能量效用^[3-4],因为频谱效用和能量效用是 2 个主要的测度,学者们广泛地用这 2 种测度来估计系统性能。频谱效用的定义是指单位带宽上传输数据速率,提高频谱效用是无线通信设计的主要目标之一。同样地,能量效用相应地定义为每单位能量传输的比特数目,且已经受到广泛关注。由于绿色通信的能量效应受到极大的关注,因此能量消耗成为需要优化的基本目标。

在很多危险环境中,通信设备电池的更换是难以实现的,因此无线能量采集往往成为一种有效的选择。近些年有许多关于无线信息和功率转发技术的研究,由于当前电路回路的实际局限性,时间切换和功率分裂已经被视为一种可行的替代方案^[5]。

因为能量采集认知无线网络既可以解决频谱稀缺的问题,也能够实现绿色通信。所以带有能量采集节点的认知无线网络研究在各方面都受到了强烈的推进,且近些年已经得到研究收益。文献[5]中研究了认知能量采集节点从主用户的无线射频信号中采集能量,然而文献研究了认知节点从次用户传输的信号中采集能量。认知无线网络主要包括 3 种运行模式: interweave 模式、overlay 模式和 underlay 模式。

在 interweave 模式中,次用户寻找主用户信道的空闲频带且适时地接入主用户信道。文献[6]研究了在 interweave 认知无线网络中不同协作感知策略下频谱感知错误的影响,其中主用户节点和次用户节点在圆环内随机部署。文献[7]研究了认知无线网络的混合 interweave-underlay 频谱接入系统,整合了扩大转发中继。在混合频谱接入模型里,次用户的状态灵活地在 2 种模式下切换。文献[8]提出了一种关于多信道 interweave 认知无线网络中的信道感知意识的信道接入策略,其中多个次用户为了获得一个普通接入点传输机会而竞争。

在 overlay 模式中,次用户知道主用户传输序列和编码方案。一方面,往往利用此信号信息消除在次用户接收端的主用户干扰,另一方面次用户能利用中继主用户数据帮助主用户信息传递。文献[9]

提出了一种 overlay 认知无线网络的两路频谱共享协议,其中包括 2 个主用户和 2 个次用户,一个的次用户作为中继协助主用户的数据传输,同时允许和另一个次用户进行两路通信。文献[10]考虑了在主用户和次用户协作信息传输和能量采集情况下,处理分析基于能量采集的正交平分多址接入(OFDMA, orthogonal frequency-division multiple access)协作 overlay 认知无线网络的资源分配问题。文献[11]调查了在一种新的协作认知无线网络的 overlay 频谱接入,把博弈论应用于主用户和次用户之间的利益之争。

在 underlay 模式的认知无线电中,underlay 认知无线网络允许一个未授权用户(次用户)共享授权用户(主用户)的频谱,因此可以增加频谱利用效率。在这种基础框架下,允许次用户与主用户同时在同频下传输数据,但必须保证主用户网络传输不受干扰,也就是说传输功率要在干扰温度下(ITL, interference temperature level),即只要次用户对主用户的干扰在一个可接受的阈值范围内,次用户能随着主用户传输而传输。文献[12]考虑了一种随机几何模型,其中把主用户和能量采集的次用户发射机建模为独立齐次泊松点过程,这样以主用户发射机为中心就存在 2 种同心区,即保护区和采集区。如果落在采集区,次用户发射机从主用户发射机传输中采集能量。对于已存在的中断限制下的网络,文献[12]得到了次用户最大化空间吞吐量。文献[13]考虑了一种时隙 underlay 系统。在每个时隙内,次用户首先利用一些时间从主用户传输信号中采集能量,然后在考虑不对主用户产生干扰下传输自己的数据。在能量采集阶段和信息转发阶段得到最优时间共享,也就是说服从对于主用户系统 ε -百分比的保护标准下,最大化平均可达率。

近些年,因为中继协作能降低传输距离而提高信道增益,所以中继协作技术也得到了广泛的关注。一路中继提高了信道增益同时也减少了传输时间,然而两路中继则能有效地克服这个问题。因此,本文结合能量采集技术和认知无线电技术以及中继协作技术,提出了一种基于能量采集技术的两路中继协作的 underlay 认知无线网络模型,其中在主用户系统性能得到保障的情况下,主用户网络与次用户网络共存。次用户通过中继协作降低传输距离,增加信道增益,从而可以降低传输功率,实现主用户和次用户同时传输。然而次用户中继能利用

无线信息和功率转发技术，使得频谱效率提高的同时不会增加能量消耗，达到绿色通信的目的。

2 系统模型

本文考虑 underlay 认知无线网络，如图 1 所示，其中，主用户网络和次用户网络共存，即次用户在不干扰主用户传输的情况下，能利用主用户信道传输数据；主用户网络包含一个发射机和一个接收机，他们之间通过信道连接而互相通信。次用户网络考虑一种典型的三节点两路中继网络且中继能从无线信号中采集能量，这 3 个节点分别是 2 个次用户节点和一个中继协作节点，2 个次用户之间没有直接链路，或者链路信道状态差，需要通过中继协作通信，而且中继协作能缩短传输距离和改进传输速率。因为 underlay 认知无线网络中次用户传输给主用户传输产生的干扰影响必须在一个阈值范围内，所以次用户的传输功率需要限制在某个门限值以内，因此将会降低次用户的传输速率从而降低系统容量。为克服此问题，本文引入中继协作节点，这是因为中继协作能减少链路传输距离和提高信道增益，从而提高速率。但是单向中继会使传输时间压缩为原来的一半。那么引入能量采集限制的双向中继协议，既能有效地改进频谱效率，又能提高能量效用，实现绿色通信。

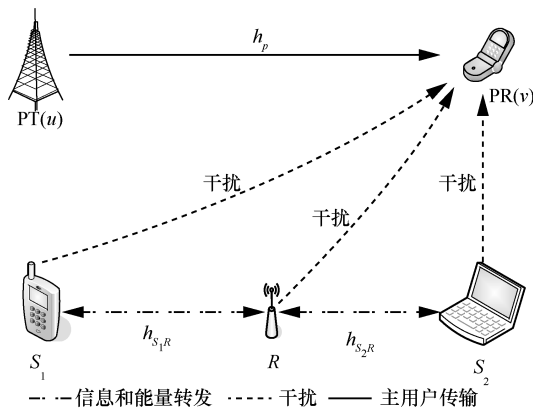


图 1 underlay 认知无线网络系统模型

假设除了中继协作节点之外所有终端都有固定的能量供应，但是中继协作节点没有固定能量供给，故需要通过接收到的无线信号采集能量。然而中继协作节点将采集到的能量使用扩大转发模式 (AF, amplify and forward) 执行数据转发。同时假设中继利用采集的能量处理信息的时候，信号处理能量消耗是可以忽略的，传输能量消耗是唯一的消耗。

本文考虑基于能量采集的时间切换中继协议和信息传输，且在主用户和次用户之间以 underlay 模式实现频谱共享，次用户网络运行在 underlay 模式且满足功率限制；主用户通过某个导频信道传输最大可容忍干扰限制值 Q_p 到次用户。假设信道状态系数是相互的和时隙的，也就是说，在一个时隙内用户端 μ 和用户端 ν 之间的信道状态和用户端 ν 和用户端 μ 之间的信道状态是相等的，但在下一个时隙可能会改变，且考虑半双工中继信道。考虑一个时隙内，理论上中继协作节点往往在 2 个传输阶段运行，即多址接入阶段 (MA, multiple-access phase) 和广播阶段 (BC, broadcasting phase)。假设中继节点采取 AF 方案进行信号处理，因此 2 个阶段的时隙可以标准化为 $\frac{1}{2}$ 。

接下来具体分析整个网络传输过程。在第一阶段，终端 S_1 和 S_2 同时都传输他们的数据到中继协作节点 R 。那么在中继协作节点 R 和主用户接收端 PR 收到的信号 y_{SR} 分别可以表示为

$$y_{SR} = \sqrt{P_1}g_1x_1 + \sqrt{P_2}g_2x_2 + n_R \quad (1)$$

$$y_{PR}^{MA} = \sqrt{P_0}g_0x_0 + \sqrt{P_1}g_1x_1 + \sqrt{P_2}g_2x_2 + n_{PR} \quad (2)$$

其中， x_0 、 x_1 和 x_2 分别表示主用户 PT、次用户 S_1 和 S_2 的传输单位信号， P_0 、 P_1 和 P_2 分别指的是主用户 PT、次用户 S_1 和 S_2 的传输功率， g_1 和 g_2 分别表示为 S_1 与 R 之间和 S_2 与 R 之间的信道增益， h_1 和 h_2 分别表示为 S_1 与 PR 之间和 S_2 与 PR 之间的信道增益， n_R 和 n_{PR} 代表中继协作节点 R 端和主用户接收端的高斯白噪声， $n_R \sim N(0, \sigma_R^2)$ ， $n_{PR} \sim N(0, \sigma_{PR}^2)$ 。那么在第一阶段 (即 MA 阶段) 主用户接收端 PR 的信噪比 (SNR) 可以表示为

$$\gamma_{PR}^{MA} = \frac{P_0 |h_0|^2}{P_1 |h_1|^2 + P_2 |h_2|^2 + \sigma_{PR}^2} \quad (3)$$

如文献[14-15]所述，能量受限制的中继协作节点采用功率分裂模式。如图 2 所示，中继协作节点 R 接收到信号之后分裂一部分用于无线能量采集，而另一部分作为信息处理。能量采集的信号可以表示为

$$\sqrt{\beta}y_{SR} = \sqrt{\beta P_1}g_1x_1 + \sqrt{\beta P_2}g_2x_2 + \sqrt{\beta}n_R \quad (4)$$

其中， β 代表采集能量的信号功率部分。那么中继

节点 R 的最大传输功率可以表示为

$$P_R^{\max} = \alpha\beta(P_1|g_1|^2 + P_2|g_2|^2) \quad (5)$$

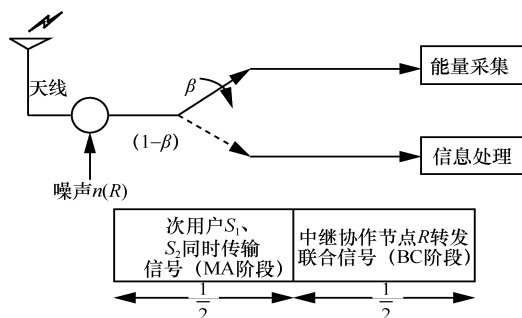


图 2 中继接收信号和传输时间的框架

其中, α 表示能量转换效率。做如下假设: 假设在采集能量时, 噪声功率相对于信号功率可以忽略不计; 假设发送剩下的接收信号功率来做信息处理假设所有用户端的链路之间信道状态信息都是已知的。本文假设模拟所有信道为准静态瑞利衰落信道, 那么 $g_i \sim \text{CN}(0, \Phi_i), i=1, 2$, 且 $h_i \sim \text{CN}(0, \Omega_i), i=1, 2, 3$ 。因为在 underlay 认知无线网络中, 对于次用户网络的传输功率必须满足一个干扰限制, 所以考虑到干扰限制的功率分配策略可以表示为

$$P_1|h_1|^2 + P_2|h_2|^2 \leq Q_p \quad (6)$$

其中, Q_p 为主用户网络的最大可容忍干扰限制。同时在第二阶段 (即 BC 阶段), 中继协作节点 R 转发功率也需要满足干扰限制, 假设中继传输功率为 P_R , 那么中继协作节点 R 转发功率满足如式(7)所示的条件。

$$P_R|h_R|^2 \leq Q_p \quad (7)$$

为了最大化系统性能且简化分析情况, 本文把不等式都假定为相等情形, 即

$$P_1|h_1|^2 + P_2|h_2|^2 = Q_p, \tilde{P}_R|h_R|^2 = Q_p \quad (8)$$

那么, 为了同时满足中继协作节点 R 转发信号时不影响主用户传输, 所以中继 R 的传输功率应该为

$$P_R = \min \left\{ P_R^{\max}, \frac{Q_p}{|h_R|^2} \right\} \quad (9)$$

在第二阶段, 中继协作节点 R 广播混合信号 y_{SR} , 为便于计算, 本文考虑理想型扩大转发信道

增益因子 $\xi_R = \frac{1}{\sqrt{(1-\beta)(P_1|g_1|^2 + P_2|g_2|^2)}}$ 且忽略中

继信号转换时的噪声。这种信道增益因子广泛地被应用且其在整个信噪比范围内是已知可行的。

因为信道条件是相互的, 且次用户 S_1 和 S_2 能够消除自干扰信号, 所以 S_1 和 S_2 接收到的信号分别表示为

$$y_{S_1} = \xi_R \sqrt{(1-\beta)P_2P_R} g_1 g_2 x_1 + \xi_R \sqrt{(1-\beta)P_R} g_1 n_R + n_1 \quad (10)$$

$$y_{S_2} = \xi_R \sqrt{(1-\beta)P_1P_R} g_1 g_2 x_1 + \xi_R \sqrt{(1-\beta)P_R} g_2 n_R + n_2 \quad (11)$$

$$y'_{PR} = \sqrt{P_0} h_0 x_0 + \sqrt{P_R} h_3 x_R + n_{PR} \quad (12)$$

其中, n_1 和 n_2 分别表示在相应的节点上的加性高斯白噪声, $n_i \sim N(0, \sigma_i^2), i=1, 2$, x_R 表示中继转发信号, h_3 指的是中继协作节点 R 与主用户接收机之间的信道增益。不失一般性, 本文假设 $\sigma_R^2 = \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_{PR}^2 = \sigma^2$ 。那么考虑 AF 中继, 在次用户 S_1 和 S_2 以及主用户接收端的信噪比(SNR)分别可以表示为

$$\gamma_1 = \frac{P_2 \alpha\beta (g_1 g_2)^2}{\sigma^2 \alpha\beta (g_1)^2 + 1} \quad (13)$$

$$\gamma_2 = \frac{P_1 \alpha\beta |g_1 g_2|^2}{\sigma^2 \alpha\beta |g_2|^2 + 1} \quad (14)$$

$$\gamma_{PR}^{BC} = \frac{P_0 |h_0|^2}{P_R |h_3|^2 + \sigma^2} \quad (15)$$

因为协作转发使整个时隙中分为 MA 阶段和 BC 阶段, 那么假设这 2 个阶段所占时间相等, 即各自运行时间为整个时隙的一半。因此, 次用户网络中每个用户对应的数据传输速率分别表示为

$$R_1 = \frac{1}{2} \text{lb}(1 + \gamma_1) \quad (16)$$

$$R_2 = \frac{1}{2} \text{lb}(1 + \gamma_2) \quad (17)$$

所以, 单位时隙次用户系统的吞吐量表示为 $C = R_1 + R_2$ 。

3 性能分析

在 underlay 认知无线网络中, 次用户必须在严格的功率分配策略情况下运行。本节分析每个用户的中断概率, 且得到精确的闭式中中断概率表达式。

3.1 次用户系统中中断概率

按照定义, 中断概率指的是端对端信噪比瞬时小于某一个给定的目标阈值 γ^{th} 情况下发生的概率。在数学上, 次用户 S_1 和 S_2 的中断概率分别记为

$$P_{S_1}^{\text{out}} = \Pr(\gamma_1 < \gamma_1^{\text{th}}) \quad (18)$$

$$P_{S_2}^{\text{out}} = \Pr(\gamma_2 < \gamma_2^{\text{th}}) \quad (19)$$

推论 1 令 $\alpha\beta = m$, $\frac{P_1}{\sigma^2} = \frac{P_2}{\sigma^2} = n$, 则在次用户网络中次用户 S_1 和 S_2 的中断概率分别表示为

$$P_{S_1}^{\text{out}} = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma_1^{\text{th}}}{\Phi_2 n}\right) + \left\{ \exp\left(-\frac{\gamma_1^{\text{th}}}{\Phi_2 n}\right) \right\}^2 - \frac{1}{\Phi_2} \exp\left(-\frac{\gamma_1^{\text{th}}}{n\Phi_2}\right) \sqrt{\frac{4\gamma_1^{\text{th}} n \Phi_2}{\Phi_1 m}} K_1\left(\sqrt{\frac{4\gamma_1^{\text{th}}}{\Phi_1 m n \Phi_2}}\right) \quad (20)$$

$$P_{S_2}^{\text{out}} = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma_2^{\text{th}}}{\Phi_1 n}\right) + \left\{ \exp\left(-\frac{\gamma_2^{\text{th}}}{\Phi_1 n}\right) \right\}^2 - \frac{1}{\Phi_1} \exp\left(-\frac{\gamma_2^{\text{th}}}{n\Phi_1}\right) \sqrt{\frac{4\gamma_2^{\text{th}} n \Phi_1}{\Phi_2 m}} K_1\left(\sqrt{\frac{4\gamma_2^{\text{th}}}{\Phi_2 m n \Phi_1}}\right) \quad (21)$$

证明 令 $X = |g_1|^2$, 且定义

$$\Upsilon = \frac{P_2}{\sigma^2} \frac{\alpha\beta |g_1|^2 |g_2|^2}{\alpha\beta |g_1|^2 + 1} = \frac{P_2}{\sigma^2} \frac{\alpha\beta XY}{\alpha\beta X + 1} \quad (22)$$

根据定义, Υ 的累积分布函数为

$$P_{S_1}^{\text{out}} = F_{\Upsilon}(\gamma) = \Pr\left(\frac{P_2}{\sigma^2} \frac{\alpha\beta XY}{\alpha\beta X + 1} < \gamma_1^{\text{th}}\right) = \Pr\left(n \frac{mXY}{mX + 1} < \gamma_1^{\text{th}}\right) \quad (23)$$

那么

$$F_{\Upsilon}(\gamma) = \Pr\left(n \frac{mXY}{mX + 1} < \gamma_1^{\text{th}}\right) = \Pr[nmXY < \gamma_1^{\text{th}}(mX + 1)] = \Pr[nmXY < \gamma_1^{\text{th}}mX + \gamma_1^{\text{th}}] = \Pr[mX(nY - \gamma_1^{\text{th}}) < \gamma_1^{\text{th}}] \quad (24)$$

所以有

$$P_{S_1}^{\text{out}} = \Pr\left[X < \frac{\gamma_1^{\text{th}}}{(nY - \gamma_1^{\text{th}})m} \middle| Y > \frac{\gamma_1^{\text{th}}}{n}\right] \Pr\left[Y > \frac{\gamma_1^{\text{th}}}{n}\right] + \Pr\left[X > \frac{\gamma_1^{\text{th}}}{(nY - \gamma_1^{\text{th}})m} \middle| Y > \frac{\gamma_1^{\text{th}}}{n}\right] \Pr\left[Y < \frac{\gamma_1^{\text{th}}}{n}\right] = \Pr\left[X < \frac{\gamma_1^{\text{th}}}{(nY - \gamma_1^{\text{th}})m} \middle| Y > \frac{\gamma_1^{\text{th}}}{n}\right] \Pr\left[Y > \frac{\gamma_1^{\text{th}}}{n}\right] + \Pr\left[Y < \frac{\gamma_1^{\text{th}}}{n}\right] =$$

$$\left\{ \exp\left(-\frac{\gamma_1^{\text{th}}}{\Phi_2 n}\right) - \int_{\frac{\gamma_1^{\text{th}}}{n}}^{\infty} \exp\left(-\frac{\gamma_1^{\text{th}}}{\Phi_1(ny - \gamma_1^{\text{th}})m}\right) \frac{1}{\Phi_2} \exp\left(-\frac{y}{\Phi_2}\right) dy \right\} \times \exp\left(-\frac{\gamma_1^{\text{th}}}{\Phi_2 n}\right) + 1 - \exp\left(-\frac{\gamma_1^{\text{th}}}{\Phi_2 n}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma_1^{\text{th}}}{\Phi_2 n}\right) + \left\{ \exp\left(-\frac{\gamma_1^{\text{th}}}{\Phi_2 n}\right) \right\}^2 - \frac{1}{\Phi_2} \int_{\frac{\gamma_1^{\text{th}}}{n}}^{\infty} \exp\left(-\frac{\gamma_1^{\text{th}}}{\Phi_1(ny - \gamma_1^{\text{th}})m} - \frac{y}{\Phi_2}\right) dy$$

令 $ny - \gamma_1^{\text{th}} = z$, 所以 $y = \frac{z + \gamma_1^{\text{th}}}{n}$

$$P_{S_1}^{\text{out}} = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma_1^{\text{th}}}{\Phi_2 n}\right) + \left\{ \exp\left(-\frac{\gamma_1^{\text{th}}}{\Phi_2 n}\right) \right\}^2 - \frac{1}{\Phi_2} \exp\left(-\frac{\gamma_1^{\text{th}}}{n\Phi_2}\right) \int_0^{\infty} \left\{ -\exp\left(-\frac{\gamma_1^{\text{th}}}{\Omega_x m z} - \frac{z}{n\Phi_2}\right) \right\} dz \quad (25)$$

所以, 可以得到次用户 S_1 的中断概率为

$$P_{S_1}^{\text{out}} = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma_1^{\text{th}}}{\Phi_2 n}\right) + \left\{ \exp\left(-\frac{\gamma_1^{\text{th}}}{\Phi_2 n}\right) \right\}^2 - \frac{1}{\Phi_2} \exp\left(-\frac{\gamma_1^{\text{th}}}{n\Phi_2}\right) \sqrt{\frac{4\gamma_1^{\text{th}} n \Phi_2}{\Phi_1 m}} K_1\left(\sqrt{\frac{4\gamma_1^{\text{th}}}{\Phi_1 m n \Phi_2}}\right)$$

其中, $K_1(\cdot)$ 代表一阶二类修正贝塞尔函数^[16].

类似地, 也可以得到次用户 S_2 的中断概率为

$$P_{S_2}^{\text{out}} = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma_2^{\text{th}}}{\Phi_1 n}\right) + \left\{ \exp\left(-\frac{\gamma_2^{\text{th}}}{\Phi_1 n}\right) \right\}^2 - \frac{1}{\Phi_1} \exp\left(-\frac{\gamma_2^{\text{th}}}{n\Phi_1}\right) \sqrt{\frac{4\gamma_2^{\text{th}} n \Phi_1}{\Phi_2 m}} K_1\left(\sqrt{\frac{4\gamma_2^{\text{th}}}{\Phi_2 m n \Phi_1}}\right)$$

推论 2 因为在每个传输时隙的 2 个阶段, 主用户网络收到的干扰不一样, 因此主用户网络在第一阶段和第二阶段的中断概率分别表示为

$$P_{\text{MA}}^{\text{out}} = 1 - \frac{1}{\Omega_0} \exp\left(-\frac{\sigma^2 \gamma_0}{\Omega_0 P_0}\right) \left(\frac{\gamma_0 P_1}{\Omega_0 P_0} + \frac{1}{\Omega_1}\right) \left(\frac{\gamma_0 P_2}{\Omega_0 P_0} + \frac{1}{\Omega_2}\right) \quad (26)$$

$$P_{\text{BC}}^{\text{out}} = 1 - \frac{1}{\Omega_0} \exp\left(-\frac{\sigma^2 \gamma_0}{\Omega_0 P_0}\right) \left(\frac{\gamma_0 P_R}{\Omega_0 P_0} + \frac{1}{\Omega_0}\right) \quad (27)$$

证明过程类似推论 1 的证明, 故本文略。

3.2 总的遍历速率优化分析

本文所提出的模型中，次用户系统的性能受到主用户干扰限制的约束，而不是在次用户节点上的最大可行功率，因此优化次用户系统的遍历速率也就等于优化次用户功率分配参数比 θ ，其中 θ 应该满足式(28)。

$$\theta = \frac{Q_p}{|h_1|^2 P_1}, p - \theta = \frac{Q_p}{|h_2|^2 P_2} \quad (28)$$

因此，功率分配参数比 θ 成为总速率的优化变量和主用影响因素。在这种情况下，相对应的总遍历速率可以记为

$$R = \mathbb{E} \left[\frac{1}{2} \text{lb}(1 + \gamma_1) + \frac{1}{2} \text{lb}(1 + \gamma_2) \right] \quad (29)$$

根据上述分析，找到一个最优的功率分配比参数就可以使次用户系统的总遍历速率达到最大，因此可以列出相应的优化等式，如式(30)所示。

$$R_{\max} = \max_{\theta} \left\{ \mathbb{E} \left[\frac{1}{2} \text{lb}(1 + \gamma_1) + \frac{1}{2} \text{lb}(1 + \gamma_2) \right] \right\} \quad (30)$$

对于式(30)，因为无论是第一项还是第二项，都是关于变量 θ 的单调函数，所以进行简单的数学运算即可。首先对式(30)求偏导并且令导数值等于 0，然后求出最大 θ ，最后把 θ 代入原函数方程中，就得到最优次用户总遍历速率。

$$\arg R_{\max} = \frac{\partial \mathbb{E} \left[\frac{1}{2} \text{lb}(1 + \gamma_1) \right]}{\partial \theta} + \frac{\partial \mathbb{E} \left[\frac{1}{2} \text{lb}(1 + \gamma_2) \right]}{\partial \theta} = 0 \quad (31)$$

又因为 $\theta \in (0, 1)$ ，所以根据求解可知当 $\theta = \frac{1}{2}$ 时，也就是说次用户 S_1 和 S_2 具有相等的信道条件下，用相同的发射功率传输数据能使整个系统的速率容量达到最大，这里指的是当次用户系统中 S_1 和 S_2 之间的功率分配参数是一半的时候次用户系统的总速率是最大的。

3.3 次用户系统的能量效率

人们往往定义一种合适的能量效率标准来估计给定的系统性能，比如单位能量消耗的系统吞吐量。根据这种标准测度，能量消耗包括两方面：1) 2 个次用户传输功率能量消耗，应用在可靠有效的数据传输上；2) 电路环路能量消耗，表示电子设备平均能量消耗。因此，可以定义能量效应如式(32)所示。

$$\phi_{EE} = \frac{C}{\frac{1}{2} P_1 + \frac{1}{2} P_2 + P_c} \quad (32)$$

其中，常数 P_c 一般代表相对应的电路能量消耗。同时 C 代表次用户系统中的总遍历吞吐量，如式(33)所示。

$$C = \mathbb{E}[R_1 + R_2] = \mathbb{E} \left[\frac{1}{2} \text{lb}(1 + \gamma_1) + \frac{1}{2} \text{lb}(1 + \gamma_2) \right] \quad (33)$$

因为电路能量消耗是固定的，所以影响整个次用户系统的平均能量效应仅仅与次用户发送功率和次用户遍历吞吐量有关系。又因为吞吐量主要受发送功率、信道增益和噪声功率影响，因此，可以通过发送功率和信道增益的变化分析次用户系统能量效应。从能量效应计算式可以发现，分子和分母这两部分都包含有发送功率，那么在满足主用户干扰限制范围下，虽然增加次用户发送功率能改进次用户吞吐量，但是也会增加能量消耗。这样就不能直接判定增加次用户传输功率对于次系统的能量效应影响。

4 数值分析结果

为了证实系统模型的优越性和分析的精确性，在本节提出数值结果。然而，使用推导的分析结果直观表现出所提出模型的影响。假设在这个模型中的时隙为单位时间，其他参数如表 1 所示。本文假设噪声功率的方差为 1，因此信噪比和传输功率可以等价互换。根据主用户传输中断概率式(26)和式(27)得到中断概率与次用户传输信噪比的关系，如图 3 所示。

表 1 数值仿真参数

参数	值
发射功率/dB	50
最大干扰/dB	25
噪声方差	1
目标速率/(bit·s ⁻¹ ·Hz ⁻¹)	2
能量转换率	0.75
能量采集比	0.35
信道增益	0.8
节点间距离/m	0.25

在图 3 中，在不同次用户信噪比情况下，通过检测得到了次用户系统的中断概率的分析结果。假设两路中继的 2 个次用户同时具有相同的发射功率，且假设 2 个次用户与中继之间的信道状态是相同的。因此，次用户系统的中断概率可以等价于某一个次用户传输速率小于最低解码信息下速率的概率值。从图 3 发现随着次用户系统信噪比的增加，主用户系统的中断概率不断增加，这是因为随着次

用户系统的发射功率增加，对主用户的干扰也越来越严重。因此当次用户信噪比达到 35 dB 时，主用户受到严重干扰影响。

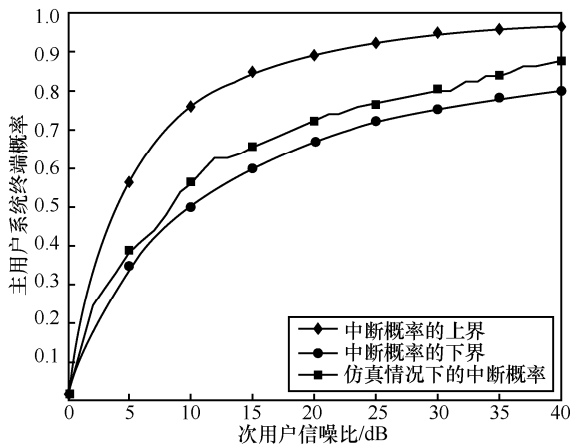


图 3 主用户中断概率与次用户信噪比的关系

图 4 展示了在恒定传输速率情况下，次用户系统中中断概率与次用户系统信噪比的关系。从图中可以看出，当功率分配参数 $\theta = 0.5$ 时次用户中断概率最低，且越接近 0.5，次用户中断概率相对应较小。这也验证了随着主用户干扰功率阈值 Q_p 越来越大，次用户系统中中断概率会不断降低。

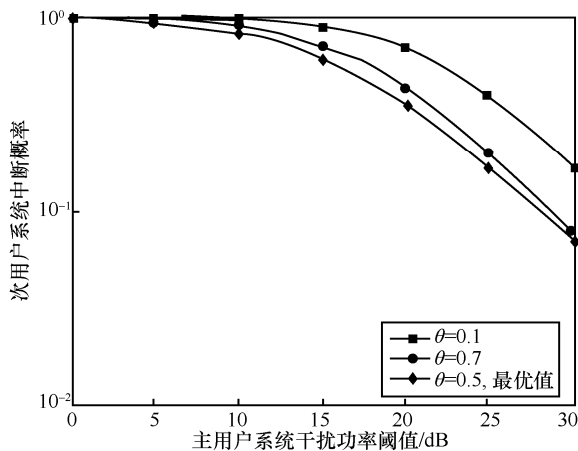


图 4 次用户系统中中断概率与主用户系统干扰阈值的关系

图 5 展示了次用户传输功率与次用户吞吐量之间的关系，且比较了 3 种不同功率分配参数情况下的性能分析。从图可知，次用户吞吐量在主用户允许传输功率下随着次用户传输功率的增加而不断增加。这是因为次用户传输功率增加，所以信道的信噪比增加，而且还能看出次用户分配功率对次用户系统吞吐量的影响，次用户发射功率分配参数越接近 0.5，次用户系统性能越好。

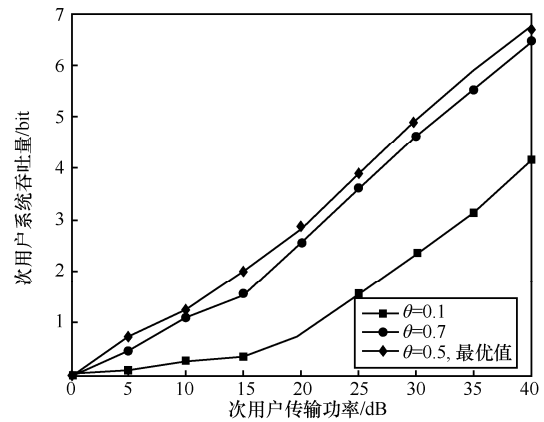


图 5 次用户系统吞吐量与次用户传输功率的关系

图 6 表示在不同的次用户发射功率分配参数情况下，次用户系统能量效率与发射功率的关系。从图 6 可以看出次用户发射功率信噪比的增加，次用户系统能量效率先增加后降低，那么就很明显存在一个峰值，而且在不同的次用户功率分配参数下，最优峰值时的发射功率不同。同时也能看出功率分配参数越接近 0.5，系统性能越好，且次用户系统功率分配参数等于 0.5 时系统吞吐量一直高于其他参数。

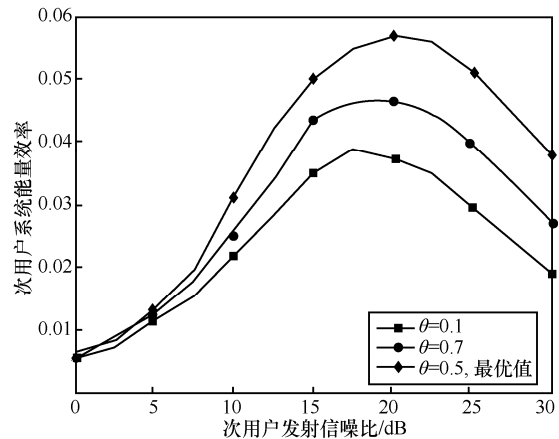


图 6 次用户系统能量效率与次用户发射功率信噪比的关系

5 结束语

本文首先提出了一种新的认知无线网络模型，确保主用户不受干扰时，两路中继的次用户网络与主用户网络共存且中继能采集无线能量和传递信息。其次推导了系统用户中断概率的精确表达式，随后优化了次用户系统的总遍历容量，进一步研究了次用户系统能量效率。最后通过数值计算和仿真结果表明所提出的模型在一定程度上明显提高了频谱效率和能量效应。

参考文献:

- [1] VARSHNEY L R. Transporting information and energy simultaneously[C]//IEEE International Symposium on Information Theory. 2008:1612-1616.
- [2] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2):201-220.
- [3] HUANG K, LARSSON E G. Simultaneous information-and-power transfer for broadband downlink systems[C]// IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. 2013: 4444-4448.
- [4] GROVER P, SAHAI A. Shannon meets Tesla: wireless information and power transfer[C]// IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings. 2010: 2363-2367.
- [5] ZHANG R, HO C K. MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(5):1989-2001.
- [6] KUSALADHARMA S, TELLAMBURA C. Interweave cognitive networks with co-operative sensing[C]// IEEE Global Communications Conference. 2015: 1-6.
- [7] CHU T M C, PHAN H, ZEPERNICK H J. Hybrid interweave-underlay spectrum access for cognitive cooperative radio networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(7): 2183-2197.
- [8] WANG S H, HSU C Y, HONG Y W P. Distributed exploitation of spectrum and channel state information for channel reservation and selection in interweave cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(7):3458-3472.
- [9] EMAM S, ÇELEBI M E. Two-way spectrum sharing protocol in overlay cognitive radio network[C]//Signal Processing and Communications Applications Conference. 2017: 1-4.
- [10] WANG F, ZHANG X. Resource allocation for multiuser cooperative overlay cognitive radio networks with rf energy harvesting capability[C]//IEEE Global Communications Conference. 2016: 1-6.
- [11] LIANG W, NG S X, HANZO L. Cooperative overlay spectrum access for cognitive radio networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, PP(99):1.
- [12] LEE S, HUANG K, ZHANG R. Cognitive energy harvesting and transmission from a network perspective[C]// IEEE International Conference on Communication Systems. 2012:225-229.
- [13] RAKOVIC V, DENKOVSKI D, HADZIVELKOV Z, et al. Optimal time sharing in underlay cognitive radio systems with RF energy harvesting[C]//IEEE International Conference on communication. 2015: 7689-7694.
- [14] ZHOU X, ZHANG R, HO C K, et al. Wireless information and power transfer: architecture design and rate-energy tradeoff[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(11): 4754-4767.
- [15] NASIR A A, ZHOU X, DURRANI S, et al. Relaying protocols for wireless energy harvesting and information processing[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(7):3622-3636.
- [16] GRADSHTEYN I S, RYZHIK I M. Table of integrals series, and products[M]. Academic Press, 2014.

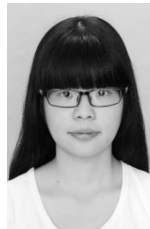
[作者简介]



徐纪胜(1987-),男,湖南常德人,湖南大学博士生,主要研究方向为无线通信、5G、认知无线网络、绿色通信、博弈论。



曾凡仔(1971-),男,湖南嘉禾人,博士,湖南大学教授、博士生导师,主要研究方向为无线通信、5G、认知无线网络、绿色通信、博弈论。



李康(1993-),女,湖南浏阳人,湖南大学硕士生,主要研究方向为无线通信、认知无线网络、5G、绿色通信、博弈论。



李勇峰(1980-),男,陕西洛南人,西藏大学副教授,主要研究方向为无线传感器网络、电路与系统设计和新能源利用。