



## 基于信能同传的认知中继网络性能研究

李新颖, 郝 浩, 黄海燕

(兰州交通大学 电子与信息工程学院, 兰州 730070)

**摘 要:** 针对认知网络传输中频谱效率与能量效率较低的问题, 提出一种基于信能同传的认知中继网络时隙分配与传输方案。建立认知网络传输模型, 实现认知用户和主用户交替使用频谱传输, 在认知用户源节点与目的节点之间引入中继节点, 从而在主用户占用频谱传输时采集和存储主用户发射信号的能量, 并在频谱释放后利用该能量转发信号, 同时推导出非完美频谱感知可靠性下认知用户吞吐量和能量效率表达式。仿真结果表明, 该方案所得认知用户传输性能随着频谱感知可靠性的增加而提升, 在低功耗场景下认知用户中引入能量采集中继节点, 可有效提高认知网络吞吐量和能量效率。

**关键词:** 信能同传; 认知中继网络; 频谱感知; 吞吐量; 能量效率

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



**中文引用格式:** 李新颖, 郝浩, 黄海燕. 基于信能同传的认知中继网络性能研究[J]. 计算机工程, 2020, 46(11): 201-206, 213.

**英文引用格式:** LI Xinying, HAO Hao, HUANG Haiyan. Research on cognitive relay network performance based on simultaneous information and power transfer[J]. Computer Engineering, 2020, 46(11): 201-206, 213.

## Research on Cognitive Relay Network Performance Based on Simultaneous Information and Power Transfer

LI Xinying, HAO Hao, HUANG Haiyan

(School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**[Abstract]** To address the low spectrum efficiency and low energy efficiency in cognitive network transmission, this paper proposes a slot allocation and transmission scheme based on simultaneous information and power transfer for cognitive relay networks. The transmission model for cognitive networks is established, in which the cognitive user and the primary user use spectrum transmission alternately. Then the relay node is introduced between the cognitive user's source node and the destination node in order to collect and store the energy of the primary user's transmitted signal when the primary user occupies the spectrum transmission. The energy is used to forward signals after the spectrum is released, and on this basis the expressions of the cognitive user's throughput and energy efficiency under imperfect spectrum sensing reliability is deduced. Simulation results show that the transmission performance of the cognitive user of the proposed scheme increases with the spectrum sensing reliability, and the introduction of energy collection relay node for the cognitive user in low-power scenarios can effectively improve the throughput and energy efficiency of cognitive networks.

**[Key words]** simultaneous information and power transfer; cognitive relay network; spectrum sensing; throughput; energy efficiency

**DOI:** 10.19678/j.issn.1000-3428.0056212

### 0 概述

随着无线数据业务的快速增长, 无线通信面临频谱资源短缺和能耗增高的问题。在认知网络中, 由于认知用户进行频谱感知需要消耗额外能量, 从

而影响认知无线电技术在能量受限场景下的应用效果, 因此有必要对该场景下认知网络性能进行研究<sup>[1]</sup>。在能量受限场景中, 利用射频能量采集技术可将接收信号中的能量信号作为能量源, 采集能量用于后续信号的发送或转发, 进而延长网络生存时

**基金项目:** 国家自然科学基金(61901201); 甘肃省自然科学基金(20JR5RA397)。

**作者简介:** 李新颖(1978—), 女, 副教授、硕士, 主研方向为无线电通信; 郝 浩, 硕士研究生; 黄海燕, 副教授、博士。

**收稿日期:** 2019-10-08 **修回日期:** 2020-01-15 **E-mail:** 1055047621@qq.com

间<sup>[2]</sup>。在网络中同时传输信息和能量信号称为无线信能同传 (Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, SWIPT)。文献[3-4]针对放大转发 (Amplify and Forward, AF) 和解码转发 (Decode and Forward, DF) 中继网络, 提出基于 SWIPT 的时间切换中继 (Time-Switching Relay, TSR) 与功率分裂中继 (Power-Splitting Relay, PSR) 两种中继节点设计方式。PSR 中继节点需同时进行能量采集和信号接收处理, 其在硬件上较 TSR 更难实现。

在基于射频能量采集的认知网络中, 认知用户可通过无线能量通信网络采集能量<sup>[5-7]</sup>, 由专用能量基站发送能量信号供认知网络各节点采集使用, 还可从其他网络节点发送的信号中采集能量, 这种网络称为基于 SWIPT 的认知无线网络 (SWIPT-based Cognitive Radio Network, SWIPT-CRN)<sup>[8]</sup>。在对 SWIPT-CRN 的研究中, 文献[9]针对 SWIPT 认知网络提出直连链路下基于功率控制和中断概率约束的传输机制, 以最小化认知用户对主用户的干扰。文献[10]基于协作 SWIPT 认知网络提出直连链路下基于保证主用户服务质量的功率和时间分配方案, 并使认知用户能量效率最大化。文献[11]围绕多天线 SWIPT 认知网络提出直连链路下协作频谱感知和无线功率传输机制, 发现认知用户采用 TSR 方式采集能量可提高频谱效率。文献[12]针对基于 AF 的 SWIPT 认知中继网络提出协作中继机制, 使认知网络的吞吐量最大化。文献[13]引入两路 AF 协作 SWIPT 认知中继网络并研究认知用户的中断概率、遍历容量和能量效率, 发现这两路中继网络有利于提高频谱效率和能量效应。文献[14]在基于 DF 的 SWIPT 认知中继网络基础上提出最小化认知用户对主用户干扰的传输机制, 并取得认知网络中断概率。文献[15-16]针对 NOMA 场景下基于 DF 的 SWIPT 认知中继网络提出基于功率分配的传输机制, 研究了认知网络的中断概率和分集增益, 发现该传输机制在不损失分集增益情况下会降低中断概率。文献[17]利用基于 AF 和 DF 的协作 SWIPT 认知中继网络提出动态协作频谱共享传输协议, 该传输协议有助于降低中断概率并提高网络吞吐量。

以上关于认知中继网络的研究多采用 PSR 作为能量采集的中继节点设计方式, 虽然易于分析但 PSR 方式从硬件上难以实现。此外, 这些研究多集中于 underlay 模式下主用户和认知用户同时同频传输的 SWIPT 认知网络, 而对主用户和认知用户交替占用频谱传输的 SWIPT 认知网络研究较少, 同时大部分研究基于完美频谱感知的假设, 未考虑频谱感知错误时主用户传输对认知网络的影响。

受上述文献启发, 本文提出非完美频谱感知条件下基于 TSR 的 SWIPT 认知中继网络传输方案, 使认知用户和主用户交替使用频谱, 当主用户占用频

谱传输时认知用户采集和存储主用户发射信号的能量, 并在频谱释放后利用该能量进行数据传输, 推导出吞吐量与能量效率的表达式, 同时针对频谱感知可靠性以及节点功率对认知网络吞吐量与能量效率的影响进行分析。

## 1 系统模型

### 1.1 模型建立

图 1 为本文提出的传输系统模型结构, 其中: 主用户包括源节点 PT 和目的节点 PR; 认知用户为单源单中继网络, 包括用于发射信号的源节点 S、用来转发节点 S 信号且基于 TSR 的 DF 中继节点 R 以及目的节点 D。图中实线表示信息和能量信号传输, 虚线表示主用户传输信息对认知用户的影响。所有节点都配备单根天线, 并采取时分复用 (Time Division Multiplexing, TDM) 的半双工方式工作。假设信道环境如下:  $h_i \sim \text{CN}(0, \lambda_i)$  表示各节点之间的瞬时信道衰落系数, 其中  $i = \{sr, rd, pr, pd\}$ ;  $n_j \sim \text{CN}(0, N_j)$  表示各节点接收信号时叠加的背景噪声, 其中  $j = \{r, d\}$ 。考虑因远距离造成的阴影衰落情况, 在分析该系统时需忽略认知用户源节点和目的节点之间的直连链路, 并假设所有链路之间为准静态瑞利衰落且各链路相互独立。

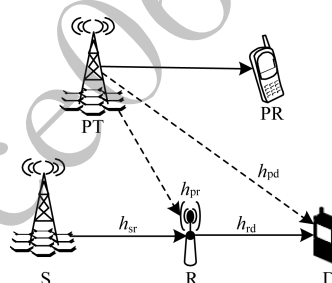


图 1 本文系统模型结构

Fig. 1 The proposed system model structure

### 1.2 传输方案

不失一般性, 本文将认知网络传输过程分为能量采集与频谱感知、数据传输两个阶段, 如图 2 所示。

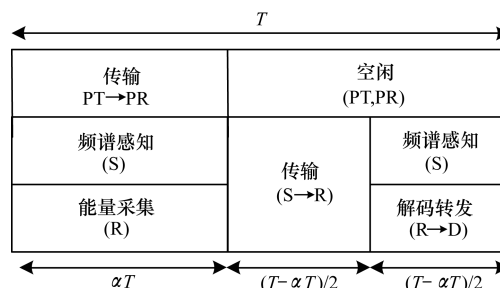


图 2 认知网络传输过程

Fig. 2 Cognitive network transmission process

#### 1) 能量采集与频谱感知阶段

在时间为  $(0, \alpha T)$  ( $\alpha$  为时间切换参数,  $T$  为时隙长度) 时, 节点 PT 占用频谱以功率  $P$  传输信号到节点 PR, 节点 S 保持静默和频谱感知, 中继节点 R 以

线性方式从信号中采集能量,并将其转换为电能储存,能量转换效率为  $\eta$ 。假设中继节点 R 配置超级电容且在每个时隙末将能量清空,即采集的能量不会发生溢出,则中继节点 R 在每个时隙所采集能量<sup>[18]</sup>的计算公式为:

$$E = \eta \alpha T P |h_{pr}|^2 \quad (1)$$

在上述阶段,认知用户通过节点 S 进行频谱感知。在时隙分配方案中,忽略频谱感知产生的响应延迟,即认知用户感知到频谱空闲后立即进入数据传输阶段,并忽略信号处理占用的时间。然而在非完美频谱感知可靠性下,认知用户频谱感知可能会发生判断错误(此时主用户仍占用频谱传输),导致认知用户传输受到主用户节点干扰。

将主用户空闲概率表示为  $p_0$ ,认知用户虚警概率表示为  $p_f$ ,认知用户发现概率表示为  $p_d$ ,认知用户正确不发现(主用户未传输,频谱未被占用,认知用户检测为频谱空闲,此时认知用户传输不受影响)的概率表示为  $\varphi_0$ ,认知用户漏警(主用户传输,频谱被占用,认知用户仍检测为频谱空闲,此时认知用户传输受主用户干扰)的概率表示为  $\varphi_1$ ,由贝叶斯公式得到如下表达式<sup>[19]</sup>:

$$\varphi_0 = \frac{\Pr(\hat{H} = H_0 | H_0) \Pr(H_0)}{\sum_{i=0}^1 \Pr(\hat{H} = H_0 | H_i) \Pr(H_i)} = \frac{p_0(1-p_f)}{p_0(1-p_f) + (1-p_0)(1-p_d)} \quad (2)$$

同理得到:

$$\varphi_1 = \frac{(1-p_0)(1-p_d)}{p_0(1-p_f) + (1-p_0)(1-p_d)} \quad (3)$$

## 2) 数据传输阶段

在时间为  $(T - \alpha T, T)$  时,认知用户中继节点 R 将能量采集与频谱感知阶段储存的能量用于数据传输,数据传输分为如下两步:

(1) 节点 S 以功率  $P_s$  发送信号  $x_s$  到中继节点 R,并将主用户源节点 PT 发送的信号表示为  $x_p$ 。中继节点 R 收到的信号表示如下:

$$y_r = \sqrt{P_s} h_{sr} x_s + \sqrt{\mu P} h_{pr} x_p + n_r \quad (4)$$

其中,  $\mu = \{0, 1\}$ ,  $\mu = 1$  表示频谱感知阶段出现漏警。此过程中 R 接收信号的信干噪比表示为:

$$\gamma_r = \frac{P_s |h_{sr}|^2}{\mu P |h_{pr}|^2 + N_r} \quad (5)$$

(2) 中继节点 R 在后半段时间内转发解码后的信号给节点 D,假设中继节点 R 处理信号消耗的能量为  $E_s$ ,则中继节点 R 用来转发信号的功率表示为:

$$P_r = \frac{E - E_s}{(T - \alpha T)/2} \quad (6)$$

节点 D 接收的信号表示为:

$$y_d = \sqrt{P_r} h_{rd} x_s + \sqrt{\mu P} h_{pd} x_p + n_d \quad (7)$$

节点 D 接收信号的信干噪比表示为:

$$\gamma_d = \frac{P_r |h_{rd}|^2}{\mu P |h_{pd}|^2 + N_d} \quad (8)$$

将式(6)代入式(8),令  $\Delta = \eta \alpha T P$  且  $t = T - \alpha T$ ,得到:

$$\gamma_d = \frac{2(\Delta |h_{pr}|^2 - E_s) |h_{rd}|^2}{t(\mu P |h_{pd}|^2 + N_d)} \quad (9)$$

## 2 系统分析

在认知用户中,如果 a 和 b 两节点 ( $ab = \{SR, RD\}$ ) 在某一阶段发生中断,链路的互信息量小于目标传输速率,则该中断事件表示为:

$$\frac{t}{2T} \log(1 + \gamma_{ab}) < R_{th} \quad (10)$$

其中,  $R_{th}$  表示目标传输速率。中断事件还可表示为:

$$\gamma_{ab} < \gamma_{th} \quad (11)$$

$$\gamma_{th} = 2^{\frac{2TR_{th}}{t}} - 1 \quad (12)$$

将认知网络频谱感知正确不发现时节点 S 和节点 R、节点 R 和节点 D 之间发生中断的概率分别表示为  $P_{out}^1$  和  $P_{out}^3$ ,将认知网络频谱感知漏警时节点 S 和节点 R、节点 R 和节点 D 之间发生中断的概率分别表示为  $P_{out}^2$  和  $P_{out}^4$ ,系统中断概率表示为:

$$P_{out} = \varphi_0 (P_{out}^1 + (1 - P_{out}^1) P_{out}^3) + \varphi_1 (P_{out}^2 + (1 - P_{out}^2) P_{out}^4) \quad (13)$$

由于各节点之间信道为瑞利衰落,因此瞬时信道增益  $|h_i|^2$  服从均值为  $\lambda$  的指数分布,均值为  $\lambda$  的指数分布概率分布函数 (Cumulative Distribution Function, CDF) 和概率密度函数 (Probability Density Function, PDF) 分别表示为:

$$F_\lambda(x) = 1 - e^{-\frac{x}{\lambda}} \quad (14)$$

$$f_\lambda(x) = \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{x}{\lambda}} \quad (15)$$

由此可以根据式(14)、式(15)推导得到  $P_{out}^1$ 、 $P_{out}^2$ 、 $P_{out}^3$  表达式如下:

$$P_{out}^1 = P_r(\gamma_r < \gamma_{th} | \mu = 0) = P_r\left(\frac{P_s |h_{sr}|^2}{N_r} < \gamma_{th}\right) =$$

$$P_r\left(\frac{P_s |h_{sr}|^2}{N_r} < \gamma_{th}\right) = 1 - e^{-\frac{\gamma_{th} N_r}{P_s \lambda_{sr}}} \quad (16)$$

$$P_{out}^2 = P_r(\gamma_r < \gamma_{th} | \mu = 1) =$$

$$P_r\left(\frac{P_s |h_{sr}|^2}{(P |h_{pr}|^2 + N_r)} < \gamma_{th}\right) = \int_0^\infty F_{|h_{sr}|^2}\left(\frac{\gamma_{th}(N_r + Px)}{P_s}\right) f_{|h_{pr}|^2}(x) dx = 1 - e^{-\frac{\gamma_{th} N_r}{P_s \lambda_{sr}}} \frac{P_s \lambda_{sr}}{P_s \lambda_{sr} + P \gamma_{th} \lambda_{pr}} \quad (17)$$

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}}^3 &= P_r(\gamma_d < \gamma_{\text{th}} | \mu = 0) = \\
&P_r\left(\frac{2(\Delta |h_{\text{pr}}|^2 - E_s)}{tN_d} < \gamma_{\text{th}}\right) = \\
&\begin{cases} P\left(|h_{\text{rd}}|^2 < \frac{t\gamma_{\text{th}}N_d}{2(\Delta y - E_s)}\right) = 1, \Delta |h_{\text{pr}}|^2 - E_s < 0 \\ P\left(|h_{\text{rd}}|^2 < \frac{t\gamma_{\text{th}}N_d}{2(\Delta y - E_s)}\right), \Delta |h_{\text{pr}}|^2 - E_s > 0 \end{cases} = \\
&\int_0^{\frac{E_s}{\Delta}} f_{|h_{\text{pr}}|^2}(y) dy + \\
&\int_{\frac{E_s}{\Delta}}^{\infty} P\left(|h_{\text{rd}}|^2 < \frac{t\gamma_{\text{th}}N_d}{2(\Delta y - E_s)}\right) f_{|h_{\text{pr}}|^2}(y) dy
\end{aligned} \quad (18)$$

式(18)中事件 A 表示若中继节点采集的能量不能满足信号处理和数据传输所需,则传输过程发生中断,中断概率为:

$$\int_0^{\frac{E_s}{\Delta}} f_{|h_{\text{pr}}|^2}(y) dy = 1 - e^{-\frac{E_s}{\Delta\lambda_{\text{pr}}}} \quad (19)$$

根据文献[20]中式(3.324.1)计算得到:

$$\begin{aligned}
&\int_{\frac{E_s}{\Delta}}^{\infty} F_{|h_{\text{rd}}|^2}\left(\frac{t\gamma_{\text{th}}N_d}{2(\Delta y - E_s)}\right) f_{|h_{\text{pr}}|^2}(y) dy = \\
&e^{-\frac{E_s}{\Delta\lambda_{\text{pr}}}} - \frac{1}{\lambda_{\text{pr}}} \int_{\frac{E_s}{\Delta}}^{\infty} e^{-\frac{t\gamma_{\text{th}}N_d}{2(\Delta y - E_s)\lambda_{\text{pr}}}} \frac{y}{\lambda_{\text{pr}}} dy = \\
&e^{-\frac{E_s}{\Delta\lambda_{\text{pr}}}} - \frac{1}{\Delta\lambda_{\text{pr}}} e^{-\frac{E_s}{\Delta\lambda_{\text{pr}}}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{t\gamma_{\text{th}}N_d}{2\Delta\lambda_{\text{pr}}x}} \frac{x}{\Delta\lambda_{\text{pr}}} dx = \\
&e^{-\frac{E_s}{\Delta\lambda_{\text{pr}}}} - e^{-\frac{E_s}{\Delta\lambda_{\text{pr}}}} \sqrt{\frac{2t\gamma_{\text{th}}N_d}{\Delta\lambda_{\text{rd}}\lambda_{\text{pr}}}} K_1\left(\sqrt{\frac{2t\gamma_{\text{th}}N_d}{\Delta\lambda_{\text{pr}}\lambda_{\text{rd}}}}\right)
\end{aligned} \quad (20)$$

其中,  $K_1(x)$  为定义于文献[20]中式(8.432)的第二类修正贝塞尔函数,由式(18)~式(20)推导出:

$$P_{\text{out}}^3 = 1 - e^{-\frac{E_s}{\Delta\lambda_{\text{pr}}}} \sqrt{\frac{2t\gamma_{\text{th}}N_d}{\Delta\lambda_{\text{rd}}\lambda_{\text{pr}}}} K_1\left(\sqrt{\frac{2t\gamma_{\text{th}}N_d}{\Delta\lambda_{\text{pr}}\lambda_{\text{rd}}}}\right) \quad (21)$$

类似式(18)整理得到:

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}}^4 &= \Pr\left\{\frac{2(\Delta |h_{\text{pr}}|^2 - E_s)}{t(\mu P |h_{\text{pd}}|^2 + N_d)} < \gamma_{\text{th}}\right\} = \\
&1 - e^{-\frac{E_s}{\Delta\lambda_{\text{pr}}}} + \int_{\frac{E_s}{\Delta}}^{\infty} P\left(\frac{2(\Delta y - E_s)}{t\gamma_{\text{th}}} < \frac{(\mu P |h_{\text{pd}}|^2 + N_d)}{|h_{\text{rd}}|^2}\right) \cdot \\
&f_{|h_{\text{pr}}|^2}(y) dy = 1 - e^{-\frac{E_s}{\Delta\lambda_{\text{pr}}}} + \Pr\left\{X < \frac{Y_1}{Y_2} \mid X > 0\right\}
\end{aligned} \quad (22)$$

$$X = \frac{2(\Delta |h_{\text{pr}}|^2 - E_s)}{t\gamma_{\text{th}}} \quad (23)$$

$$Y_1 = N_d + P |h_{\text{pd}}|^2 \quad (24)$$

$$Y_2 = |h_{\text{rd}}|^2 \quad (25)$$

由随机变量的函数变换计算得到式(22)~

式(25)中  $X, Y_1, Y_2$  的概率密度函数为:

$$f_X(x) = \frac{t\gamma_{\text{th}}}{2\Delta\lambda_{\text{pr}}} e^{-\frac{E_s}{\Delta\lambda_{\text{pr}}} - \frac{t\gamma_{\text{th}}}{2\Delta\lambda_{\text{pr}}}x} \quad (26)$$

$$f_{Y_1}(y) = \frac{1}{p\lambda_{\text{pd}}} e^{\frac{N_d}{p\lambda_{\text{pd}}} - \frac{1}{p\lambda_{\text{pd}}}y} \quad (27)$$

$$\begin{aligned}
f_{Y_2}(y) &= \int_0^{\infty} x f_{Y_1}(yx) f_{Y_2}(x) dx = \\
&e^{\frac{N_d}{p\lambda_{\text{pd}}}} \frac{1}{p\lambda_{\text{pd}}\lambda_{\text{rd}}} \int_0^{\infty} x e^{-\left(\frac{1}{p\lambda_{\text{pd}}}y + \frac{1}{\lambda_{\text{rd}}}\right)x} dx = \\
&\frac{1}{p\lambda_{\text{pd}}\lambda_{\text{rd}}} \frac{e^{\frac{N_d}{p\lambda_{\text{pd}}}}}{\left(\frac{1}{p\lambda_{\text{pd}}}y + \frac{1}{\lambda_{\text{rd}}}\right)^2}
\end{aligned} \quad (28)$$

结合式(23)~式(28)并根据文献[20]中式(3.382.4)计算得到:

$$\begin{aligned}
P_r\left(X < \frac{Y_1}{Y_2} \mid X > 0\right) &= \int_0^{\infty} \int_0^y f_X(x) f_{Y_2}(y) dx dy = \\
&e^{\frac{N_d}{p\lambda_{\text{pd}}}} \frac{1}{p\lambda_{\text{pd}}\lambda_{\text{rd}}} \left(1 - \frac{1}{p\lambda_{\text{pd}}\lambda_{\text{rd}}} \int_0^y e^{-\frac{t\gamma_{\text{th}}}{2\Delta\lambda_{\text{pr}}}x} \frac{1}{\left(\frac{1}{p\lambda_{\text{pd}}}y + \frac{1}{\lambda_{\text{rd}}}\right)^2} dy\right) = \\
&e^{\frac{N_d}{p\lambda_{\text{pd}}}} \frac{1}{p\lambda_{\text{pd}}\lambda_{\text{rd}}} \left(1 - \frac{t\gamma_{\text{th}}p\lambda_{\text{pd}}}{2\Delta\lambda_{\text{pr}}\lambda_{\text{rd}}} e^{\frac{t\gamma_{\text{th}}p\lambda_{\text{pd}}}{2\Delta\lambda_{\text{pr}}\lambda_{\text{rd}}}} \Gamma\left(-1, \frac{t\gamma_{\text{th}}p\lambda_{\text{pd}}}{2\Delta\lambda_{\text{pr}}\lambda_{\text{rd}}}\right)\right)
\end{aligned} \quad (29)$$

其中,  $\Gamma(\alpha, x)$  为定义于文献[20]中式(8.35)的非完备伽马函数,由式(22)~式(29)推导得到:

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}}^4 &= 1 - e^{-\frac{E_s}{\Delta\lambda_{\text{pr}}}} + e^{\frac{N_d}{p\lambda_{\text{pd}}}} \frac{1}{p\lambda_{\text{pd}}\lambda_{\text{rd}}} \left(1 - \frac{t\gamma_{\text{th}}p\lambda_{\text{pd}}}{2\Delta\lambda_{\text{pr}}\lambda_{\text{rd}}} e^{\frac{t\gamma_{\text{th}}p\lambda_{\text{pd}}}{2\Delta\lambda_{\text{pr}}\lambda_{\text{rd}}}} \cdot \right. \\
&\left. \Gamma\left(-1, \frac{t\gamma_{\text{th}}p\lambda_{\text{pd}}}{2\Delta\lambda_{\text{pr}}\lambda_{\text{rd}}}\right)\right)
\end{aligned} \quad (30)$$

将  $P_{\text{out}}^1, P_{\text{out}}^2, P_{\text{out}}^3, P_{\text{out}}^4$  和式(2)、式(3)代入式(13)得到非完美频谱感知可靠性下认知用户的中断概率  $P_{\text{out}}$ , 延迟受限传输模式下认知用户的吞吐量表示为:

$$C = \frac{t}{2T} (1 - P_{\text{out}}) R_{\text{th}} \quad (31)$$

在本文模型中,为实现认知用户的数据传输,将认知用户所消耗的能量按来源分为两类:1) 认知用户源节点向中继节点传输数据消耗的能量;2) 认知用户源节点频谱感知消耗的能量。认知用户的能量效率表示如下:

$$\xi = \frac{C}{P_s \frac{t}{2} + P_{\text{sense}} \left(T - \frac{t}{2}\right)} \quad (32)$$

其中,  $P_{\text{sense}}$  表示认知用户源节点频谱检测的功率。

### 3 仿真结果与分析

本文采用蒙特卡洛方法进行仿真实验,主要从主用户源节点和认知用户源节点功率、认知用户频谱感知可靠性对认知用户吞吐量与能量效率的影响进行分析,相关参数设置如表1所示。

表 1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameter setting

参数	参数值
$N_r$	0.1
$N_d$	0.1
$P_0$	0.8
$\lambda_{pr}/\text{dB}$	1
$\lambda_{rd}/\text{dB}$	1
$\lambda_{sd}/\text{dB}$	1
$E_s/\text{J}$	0.1
$R_{th}/(\text{bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1})$	2
$\eta$	0.8
$\lambda_{rd}/\text{dB}$	10
$\lambda_{sd}/\text{dB}$	10
$P_{\text{sense}}/(\text{J} \cdot \text{s}^{-1})$	1
$T/\text{s}$	1
$\alpha$	0.2

图 3 和图 4 分别为本文使用时间切换中继 TSR 进行能量采集的系统(系统 1)和未使用能量采集中继的系统(系统 2)中认知网络吞吐量和能量效率在不同频谱感知条件下随主用户源节点 PT 功率的变化曲线。频谱感知条件设置为认知用户发现概率  $P_d = \{0.9, 0.5, 0.1\}$ 、认知用户虚警概率  $P_f = 1 - P_d$ 、认知用户源节点 S 功率设置为 5 W。可以看出,当主用户源节点 PT 功率相同时,随着认知用户发现概率  $P_d$  (频谱感知可靠性)下降和虚警概率  $P_f$  上升,系统 1 和系统 2 中认知用户吞吐量和能量效率均降低,这是因为随着认知用户频谱感知可靠性下降,认知用户更可能将已占用的频谱状态检测为未占用(即发生漏警),从而传输链路被主用户网络干扰的可能性增大,网络传输性能下降,因此增加认知用户频谱感知可靠性提高认知用户传输性能。当频谱感知条件相同且主用户源节点 PT 功率小于 5 W 时,系统 1 中认知网络吞吐量和能量效率低于系统 2,但主用户源节点 PT 功率增大到 5 W 后,系统 1 中认知网络吞吐量和能量效率高于系统 2,这是因为随着主用户源节点发送信号功率的增大,中继节点采集能量增多,其传输功率也升高,有利于增加端到端的信噪比,从而提高认知用户传输性能。

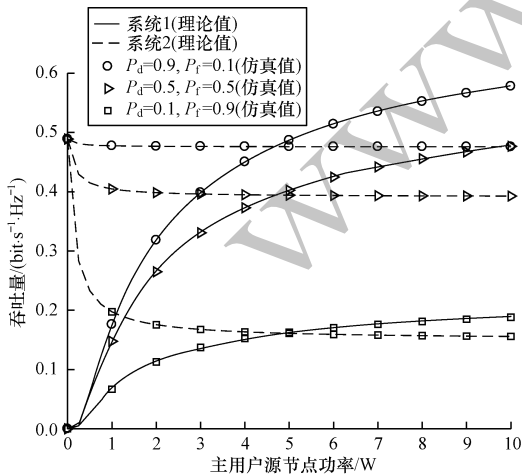


图 3 吞吐量随主用户源节点功率的变化曲线  
Fig. 3 Curve of throughput changing with power of source node of primary user

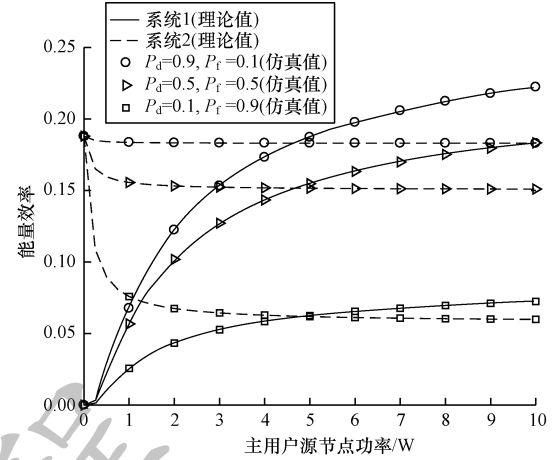


图 4 能量效率随主用户源节点功率的变化曲线  
Fig. 4 Curve of energy efficiency changing with power of source node of primary user

图 5 和图 6 分别为系统 1 和系统 2 中认知网络吞吐量和能量效率在不同频谱感知条件下随认知用户源节点 S 功率的变化曲线。频谱感知条件设置与上文相同,主用户源节点 PT 功率设置为 5 W。可以看出,当认知用户源节点 S 功率相同时,随着认知用户发现概率  $P_d$  下降和虚警概率  $P_f$  上升,系统 1 和系统 2 中认知用户吞吐量和能量效率均降低,这是因为随着认知用户频谱感知可靠性的下降,认知用户可能将已占用的频谱状态检测为未占用(即发生漏警),从而传输链路被主用户网络干扰的可能性增大,网络传输性能下降;当频谱感知条件相同且认知用户节点 S 功率小于 5 W 时,系统 1 吞吐量和能量效率高于系统 2,这是因为直连链路端到端传输性能较差,在认知用户中增加中继节点可提高传输性能;当认知用户节点 S 功率增大到 5 W 后,系统 1 中认知网络吞吐量逐渐增大并趋于稳定,能量效率呈现先增后降的趋势,且吞吐量和能量效率低于系统 2,这是因为系统 1 中认知网络的传输性能还取决于信道增益、目标传输速率等其他因素,仅增加认知用户节点 S 传输功率对网络传输性能的提升有限。

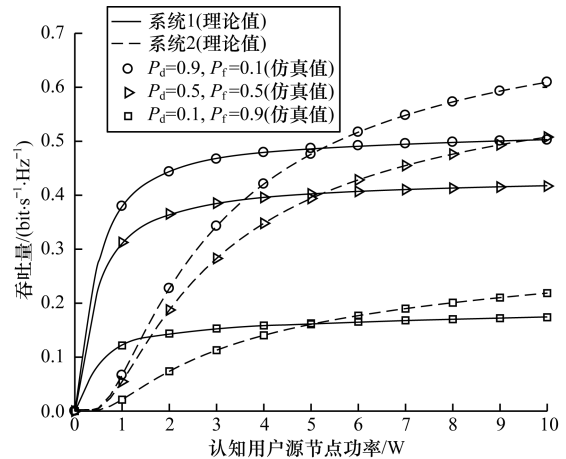


图 5 吞吐量随认知用户源节点功率的变化曲线  
Fig. 5 Curve of throughput changing with power of source node of cognitive user

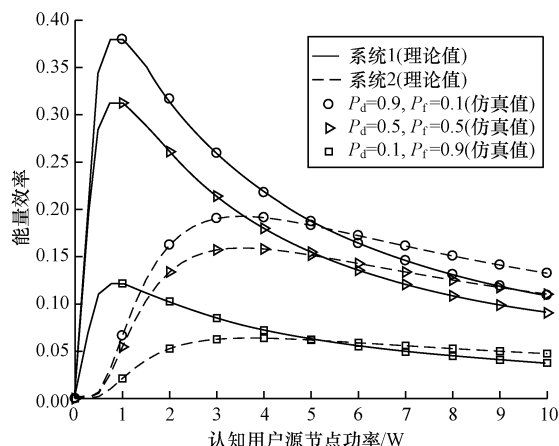


图6 能量效率随认知用户源节点功率的变化曲线  
Fig.6 Curve of energy efficiency changing with power of source node of cognitive user

由上述仿真分析可知:认知用户传输性能随着频谱感知可靠性的升高而提升;在认知用户源节点功率较小(处于低功耗场景)时,认知用户源节点和目的节点之间引入能量采集中继节点可提升认知网络的吞吐量与能量效率。

#### 4 结束语

本文提出一种面向认知用户的认知中继网络时隙分配与传输方案。引入能量采集中继节点使认知用户采集并存储主用户发射信号的能量,在频谱释放后利用该能量占用频谱转发信号,并就频谱感知可靠性和节点传输功率对认知网络吞吐量与能量效率的影响进行分析。仿真结果表明,低功耗场景下在认知用户中引入能量采集中继节点并增加频谱感知可靠性,可有效提高网络吞吐量与能量效率。下一步将对基于信能同传的多中继协作认知网络安全传输方案进行研究,提高系统频谱利用率并改善系统传输性能。

#### 参考文献

- [1] QU Zhaowei, SONG Qizhu, YIN Sixing. Optimal spectrum sensing in energy harvesting cognitive radio systems [J]. China Communications, 2014, 11 (5): 83-90.
- [2] YIN Sixing, ZHANG Erqing, QU Zhaowei, et al. Optimal cooperation strategy in cognitive radio systems with energy harvesting [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13 (9): 4693-4707.
- [3] NASIR A A, ZHOU X Y, DURRANI S, et al. Relaying protocols for wireless energy harvesting and information processing [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12 (7): 3622-3636.
- [4] NASIR A A, ZHOU X Y, DURRANI S, et al. Throughput and ergodic capacity of wireless energy harvesting based DF relaying network [C]//Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 4066-4071.
- [5] JU H, ZHANG R. Throughput maximization in wireless powered communication networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13 (1): 418-428.
- [6] MIRIDAKIS N I, TSIFTIS T A. A new interweave cognitive radio scheme for out-band energy harvesting systems [J]. IEEE Access, 2018, 6 (1): 72225-72232.
- [7] 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. (in Chinese)  
冯刚,覃锡忠,贾振红,等. 认知无线电环境下无线能量通信网能效研究 [J]. 计算机工程, 2019, 45 (3): 142-147.
- [8] PRADHA J J, KALAMKAR S S, BANERJEE A. On information and energy cooperation in energy harvesting cognitive radio [C]//Proceedings of 2015 IEEE Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015: 943-948.
- [9] SHIN J, KIM D. Simultaneous wireless information and power transfer for cognitive radio systems with average energy harvesting constraint [C]//Proceedings of 2015 Annual IEEE Consumer Communications and Networking Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015: 156-157.
- [10] QU Hua, ZHAO Yongqiang, ZHAO Jihong, et al. Energy efficient resource allocation in cooperative cognitive radio networks [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2018, 40 (5): 1024-1030. (in Chinese)  
曲桦,赵永强,赵季红,等. 合作认知无线网络中能效最优资源分配 [J]. 电子与信息学报, 2018, 40 (5): 1024-1030.
- [11] SONG Zhiqun, ZHANG Zhongzhao, LIU Xin, et al. Simultaneous cooperative spectrum sensing and wireless power transfer in multi-antenna cognitive radio [J]. Physical Communication, 2018, 29 (2): 78-85.
- [12] LU Xiaomei, XU Wenjun, LI Shengyu, et al. Simultaneous information and power transfer for relay-assisted cognitive radio networks [C]//Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Communications Workshops. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 331-336.
- [13] XU Jisheng, ZENG Fanzai, LI Kang, et al. Performance analysis of two-way relay cooperation underlay cognitive radio networks based on WIPT [J]. Journal on Communications, 2019, 40 (2): 129-136. (in Chinese)  
徐纪胜,曾凡仔,李康,等. 基于 WIPT 的两路中继协作 underlay 认知无线电的性能分析 [J]. 通信学报, 2019, 40 (2): 129-136.
- [14] YANG Zheng, DING Zhiguo, FAN Pingzhi, et al. Outage performance of cognitive relay networks with wireless information and power transfer [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65 (5): 3828-3833.

(上接第 206 页)

- [15] YU Yuehao, YANG Zheng, WU Yi, et al. Outage performance of NOMA in cooperative cognitive radio networks with SWIPT [J]. IEEE Access, 2019, 7 (8): 117308-117317.
- [16] YANG Zheng, DING Zhiguo, FAN Pingzhi, et al. The impact of power allocation on cooperative non-orthogonal multiple access networks with SWIPT[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16 (7): 4332-4343.
- [17] ZHANG Zhi, LU Yimin, HUANG Yuzhen. Simultaneous wireless information and power transfer for dynamic cooperative spectrum sharing networks [J]. IEEE Access, 2019, 7(1): 823-834.
- [18] NASIR A A, ZHOU X Y, DURRANI S, et al. Wireless-powered relays in cooperative communications; time-switching relaying protocols and throughput analysis [J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(5): 1607-1622.
- [19] ZOU Y L, CHAMPAGNE B, ZHU W P, et al. Relay-selection improves the security-reliability trade-off in cognitive radio systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(1): 215-228.
- [20] GRADSHTEYN I S, RYZHIK I M. Table of integrals, series, and products [EB/OL]. [2019-08-22]. <https://www.science-direct.com/book/9780123736376/table-of-integrals-series-and-products>.

编辑 宋 圆