

## 论文

## 空时机会模型下多跳认知无线网络的中断性能

许驰<sup>①②③</sup>, 郑萌<sup>①②</sup>, 梁炜<sup>①②</sup>, 于海斌<sup>①②\*</sup>

① 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016

② 中国科学院网络化控制系统重点实验室, 沈阳 110016

③ 中国科学院大学, 北京 100049

\* 通信作者. E-mail: yhb@sia.cn

收稿日期: 2014-12-31; 接受日期: 2015-04-06; 网络出版日期: 2015-05-21

中国科学院战略性先导科技专项 (批准号: XDA06021000) 和中国科学院科技创新交叉与合作团队计划 (面向智能电网安全监控及信息互动的网络与系统技术) 资助

**摘要** 本文以提高授权频段的频谱利用率和实现认知无线网络 (CRNs) 的连续数据传输为出发点, 结合频谱空洞的时域和空域特性, 定义了新的二维空时机会模型. 在此基础上, 进一步提出空时联合接入策略, 以实现 CRNs 对授权频段的连续接入以及数据的连续传输. 为了验证空时机会模型及空时联合接入策略的合理性和优势, 考察了多跳 CRNs 在 Nakagami- $m$  衰落信道下的中断性能. 其中, CRNs 采用固定中继的多跳传输模式, 并且应用了解码转发和选择分集合并策略. 结合空时机会模型, 推导出多跳 CRNs 的中断概率的闭式解析式. 通过仿真比较和分析了空时联合接入策略与单纯的时域或空域接入策略的中断性能. 结果表明, 空时联合接入策略的平均网络中断概率更低.

**关键词** 认知无线网络 多跳 频谱共享 空时机会 空时联合接入策略 中断概率

## 1 引言

认知无线电<sup>[1]</sup>技术的提出为缓解频谱稀缺问题提供了有效途径, 因此基于该技术的认知无线网络 (cognitive radio networks, CRNs)<sup>[1,2]</sup>受到了广大学者的极大关注, 并被认为是下一代无线网络技术之一. 认知无线网络的基本思想是通过探索已获授权的主用户 (primary users, PUs) 对授权频段的使用情况, 实现未获授权的次用户 (secondary users, SUs) 对授权频段的接入和数据传输. 这样, 在不影响 PUs 的情况下, 既可以满足 SUs 的通信需求, 又可以有效提高频谱利用率.

现有的频谱接入策略主要包括机会频谱接入和频谱共享两类<sup>[2]</sup>. 机会频谱接入<sup>[3]</sup>是一种周期感知和传输策略, 要求 CRNs 在每个帧内划定专门的感知时隙进行频谱感知. 只有在感知结果显示 PUs 未占用授权频段 (即出现频谱空洞) 的情况下才允许 SUs 接入该频段进行数据传输, 并且当 PUs 重新占用授权频段时, SUs 必须立即终止数据传输, 确保 PUs 通信的可靠性. 因此, 机会频谱接入是一种不连续的频谱接入策略, 不能保证数据的连续传输. 这种策略并不适合具有连续数据传输要求的应用, 特别是一些实时性的应用, 根本无法接受这种间歇性的数据传输策略. 相比之下, 频谱共享允许 SUs 在不影响 PUs 通信的情况下, 连续性地接入到授权频段进行数据传输. 但是, 频谱共享对 SUs 的传输功率有极高的要求, 即不能高于干扰温度阈值, 因此早期的频谱共享仅允许 SUs 以极低的功率接入授权

**引用格式:** 许驰, 郑萌, 梁炜, 等. 空时机会模型下多跳认知无线网络的中断性能. 中国科学: 信息科学, 2015, 45: 1490-1502, doi: 10.1360/N112014-00331

频段,并在一定程度上依靠数据库确定 PUs 占用授权频段的情况,以确保对 PUs 的有效保护.在频谱共享的基础上,基于感知的频谱共享<sup>[4,5]</sup>为实现 SUs 对授权频段的连续可靠接入提供了新的思路.该策略允许 SUs 根据频谱感知结果进行合理的功率控制,以进一步提高频谱效率和网络容量.因此,频谱共享是一种连续的频谱接入策略,可以实现数据的连续传输,有效避免机会频谱接入策略存在的数据传输不连续的问题.此外,频谱租赁<sup>[6]</sup>和频谱拍卖<sup>[7]</sup>策略也可以实现 SUs 对授权频段的接入.其中,频谱租赁允许 SUs 在辅助 PUs 传输的基础上,以租赁频谱的方式接入授权频段;而频谱拍卖则更加注重如何实现多个 SUs 对授权频段的合理分配与使用,并且需要考虑经济利益.

实际上,机会频谱接入和频谱共享两类策略分别只考虑了频谱的时域机会和空域机会<sup>[8]</sup>.时域机会就是 PUs 未占用授权频段时所产生的空白频谱, SUs 可以根据该空白频谱机会式地接入到授权频段进行数据传输.而空域机会目前可以从两个不同角度进行定义:(1)从 SUs 的角度来说, SUs 根据其感知灵敏度具有一个感知范围,如果 PUs 超过了 SUs 的感知范围,由于 SUs 无法检测到 PUs,那么 SUs 认为其获得了空域机会.但是, SUs 的感知能力并不随它们与 PUs 距离的增大而显著减小,当 PUs 位于 SUs 的感知范围外时, SUs 依然可能检测到 PUs,因此出现了文献<sup>[9]</sup>所讨论的空间误警问题.(2)从 PUs 的角度来说, PUs 根据其发射功率和接收灵敏度具有一个覆盖范围,如果 SUs 超过了 PUs 的覆盖范围,那么即使 PUs 正在占用授权频段, SUs 的通信也不会对 PUs 造成干扰,因此 SUs 可以自由接入授权频段.这种情况下,通常采用信道传输模型进行空间感知,如文献<sup>[10,11]</sup>.

基于频谱在时域和空域的双重特性,文献<sup>[12]</sup>综述了频谱空洞的时域和空域特性,并定义了两个新的频谱空洞度量机制,以进一步提高频谱利用率和接入可靠性.此后,文献<sup>[8]</sup>提出了一种基于区域的空时联合频谱共享方法.文献<sup>[13,14]</sup>提出了一种面向异构频谱的二维空时机会模型,并在该模型下完成了空时联合频谱感知.该模型准确地刻画了频谱的空域和时域特性,更符合实际情况,因此可以提高频谱感知的准确性和接入机会.在此基础上,文献<sup>[15]</sup>提出了一种基于频谱感知和数据库的混合频谱感知方法,在提升感知准确性的同时,通过比较说明了该方法对于提升吞吐量的重要作用.

频谱的空域和时域机会特性不仅为频谱的空时联合感知提出了新的问题,同时也为其接入策略提出了新的挑战.现有的空时机会模型<sup>[13,14]</sup>在未获得空域机会的情况下依然采用的是机会频谱接入策略,即当 PUs 占用授权频段时,频谱的接入依然是不连续的.因此,不同于此前的空时机会模型,本文定义了新的二维空时机会模型,并进一步提出了空时联合接入策略以实现频谱的连续接入和数据的连续传输.具体来说,当 SUs 检测到时域机会或空域机会时, SUs 可以自由接入授权频段进行数据传输;而当 SUs 既没有检测到时域机会也没有检测到空域机会时, SUs 将采用功率控制策略,以频谱共享的方式接入授权频段进行数据传输.这样,在确保 PUs 得到充分保护的前提下,实现了 SUs 对授权频段的连续接入和数据的连续传输.为了衡量空时机会模型及空时联合接入策略的合理性,考察了采用空时联合接入策略的多跳 CRNs 在 Nakagami- $m$  衰落信道下的中断性能. CRNs 的数据传输采用固定中继的多跳传输方式<sup>[16]</sup>,并在其中应用了解码转发 (decode and forward, DF) 和选择分集合并 (selection diversity combining, SDC)<sup>[17]</sup>策略.在该多跳传输模型下,根据 CRNs 的空时机会推导并得到了采用空时联合接入策略时的网络中断概率的闭式解析式,然后通过仿真对比和分析了采用空时联合接入策略的优势.结果表明,采用空时联合接入策略的 CRNs 的中断性能要好于单纯采用时域或空域接入策略的 CRNs.

基于上述讨论,本文的主要贡献如下:

(1) 根据频谱空洞在时域和空域的双重特性,定义了新的二维空时机会模型,并提出了空时联合接入策略.该策略可以实现 CRNs 对授权频段的连续接入,进而保证数据的连续传输.

(2) 基于空时机会模型及空时联合接入策略,推导出多跳 CRNs 在 Nakagami- $m$  信道下的中断概

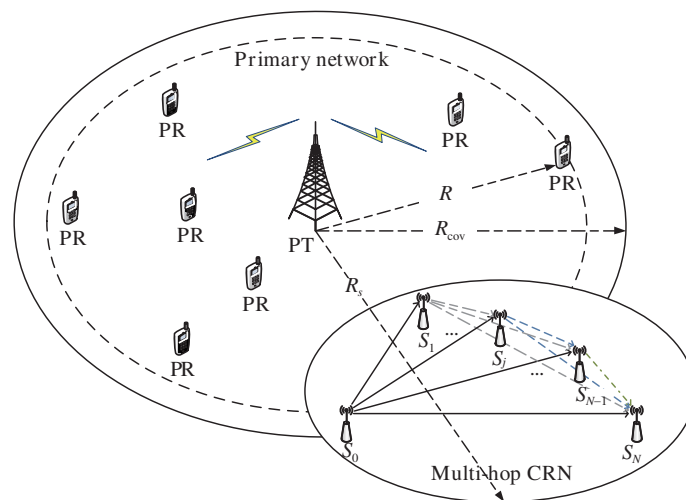


图 1 (网络版彩图) 认知无线网络模型  
 Figure 1 (Color online) Model of CRN

率的闭式解析式, 比较和分析了采用不同接入策略的网络中断性能.

本文与已有文献的主要区别在于: 首先, 文献 [13,14] 提出的空时机会模型是面向频谱感知, 并且在该模型下的数据传输依然具有不连续性, 而本文的一个基本出发点是确保 CRNs 的连续数据传输, 因此定义了新的空时机会模型, 并提出了空时联合接入策略; 其次, 由于协作中继网络在提高频谱感知准确性和数据传输可靠性等方面的重要作用, 已有的大量文献集中讨论两跳的认知中继网络, 如文献 [17~23] 等, 而本文的关注点在于 CRNs 进行多跳数据传输时的网络中断性能; 最后, 在新的空时机会模型下讨论 CRNs 在 Nakagami- $m$  衰落信道下的多跳传输性能目前尚未见刊载.

论文的结构安排如下: 第 2 部分提出了空时机会模型及空时联合接入策略, 并给出了 CRNs 的多跳传输模型; 第 3 部分推导了多跳 CRNs 在 Nakagami- $m$  信道下的中断概率; 第 4 部分通过仿真, 比较和分析了采用不同接入策略的多跳 CRNs 的中断性能; 第 5 部分对本文进行了总结.

## 2 系统模型

### 2.1 空时机会模型及空时联合接入策略

如图 1 所示, 主用户网络 (primary network) 是一个大规模的集中式网络, 包含一个高功率的主发射器 (primary transmitter, PT) 和若干主接收器 (primary receivers, PRs). PT 的发射功率为  $P$ , 其最大通信距离为  $R$ . 相比之下, CRN 是一个小规模的分分布式网络, 包含  $N+1$  个认知节点. 认知节点的最大通信距离为  $r$ , 并且  $r \ll R$ . 基于主用户网络与 CRN 在传输功率和通信距离上的差别, 假设 PT 到各认知节点的距离均相同, 并且信号所经历的路径损耗均相同. 根据 PT 的发射功率及它与 PRs 的相对位置, 可以计算 PT 的覆盖范围. 覆盖范围定义为 PRs 的接收能量不小于给定阈值的区域, 当 PRs 位于 PT 的覆盖范围之外时, 将无法接收 PT 的信息. 实际上, 覆盖范围为不规则的区域, 但这里将其视为一个圆域, 半径为  $R_{cov}$ . 注意, 本文的覆盖范围还包含保护边界 PRs 不受干扰的保护区域 (即图 1 的环形区域), 因此  $R_{cov} > R$ . 而由于本文考察的是小规模的 CRN, 故仅考虑 CRN 整体位于 PT 的覆盖范围内和外两种情况, 并将整个 CRN 作为一个统一的对主用户网络的干扰源. 基于此,

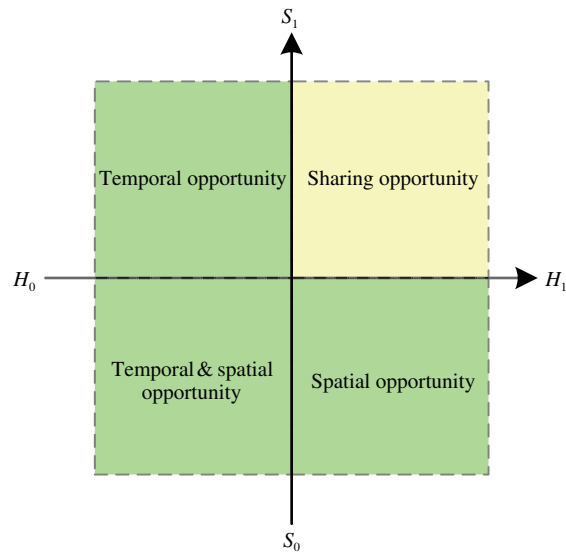


图 2 空时机会模型

Figure 2 Spatial-temporal opportunity model

PT 的覆盖范围及它与 CRN 的相对位置决定了 CRN 是否可以接入授权频段的空域机会. 当 CRN 位于 PT 的覆盖范围外时, 将其表示为  $S_0$ , 认知节点将获得空域机会, 可以自由接入授权频段进行数据传输; 而当 CRN 位于 PT 的覆盖范围内时, 将其表示为  $S_1$ , 认知节点未获得空域机会.

PT 的状态变化建模为 ON-OFF 过程, 其中 ON 和 OFF 分别表示 PT 正在占用或未占用授权频段. 进一步假设 PT 占用授权频段的到达情况服从 Poisson 过程, 且 PT 在不同时刻的到达情况相互独立. 这样, PT 在 ON 和 OFF 状态的持续时间服从指数分布, 其均值分别为  $\alpha_1$  和  $\alpha_0$ , 那么 PT 处于 ON 和 OFF 状态的概率分别为  $P(H_1) = \frac{\alpha_1}{\alpha_0 + \alpha_1}$  和  $P(H_0) = \frac{\alpha_0}{\alpha_0 + \alpha_1}$ . 其中,  $H_1$  表示 PT 处于 ON 状态,  $H_0$  表示 PT 处于 OFF 状态. 当 PT 处于 OFF 状态时, 认知节点将获得接入授权频段的时域机会.

在空域机会和时域机会的基础上, 建立频谱的二维空时机会模型, 如图 2 所示. 当 CRN 具有时域机会或空域机会时, 即  $H_0 \cup S_0$  (如图 2 的绿色区域), 认知节点可以在无功率控制的情况下自由接入到授权频段进行数据传输; 而当 CRN 既没有时域机会, 也没有空域机会时, 即  $H_1 \cap S_1$  (如图 2 的黄色区域), 将其定义为共享机会. 在这种情况下, 认知节点进行数据传输时需要进行严格的功率控制以确保它对主用户网络的干扰低于给定阈值. 如上所述, 新的空时机会模型确保了认知节点对授权频段的连续接入以及数据的连续传输.

基于上述空时机会模型, 本文进一步提出 CRN 的空时联合接入策略. 首先, 认知节点协作进行空间感知, 确定 CRN 与主用户网络的相对位置. CRN 空间位置的确定既可以采用 GPS 等定位技术, 也可以根据接收信号的功率水平、到达时间或到达方位角等参数进行估算<sup>[23]</sup>. 此外, 也可以采用已有的空间感知算法, 如文献 [8~15]. 由于定位技术的相对成熟, 假设空间感知结果均正确, 并无空间误警和漏警现象<sup>[9]</sup>. 然后, CRN 根据空间感知结果选择是否进行时域的频谱感知, 并确定其接入方式. 具体来说, 当空间感知结果显示 CRN 位于 PT 的覆盖范围外时, 认知节点不再进行时域的频谱感知, 以降低节点的感知功耗. 同时, 认知节点无需进行功率控制, 可以采用最大发射功率  $P_0$  进行数据传输. 相反, 当空间感知结果显示 CRN 位于 PT 的覆盖范围内时, 认知节点需要进一步执行时域的频谱感知, 然后根据时域的协作频谱感知结果选择最大发射功率  $P_0$  或受控功率  $P_1$  进行数据传输. 时域感

知方法可以采用能量检测、匹配滤波以及特征值检测等方法<sup>[24]</sup>. 协作的认知节点可以形成一个较大的感知范围, 其半径为  $R_s$ , 如图 1 所示, CRN 的感知范围大于 PT 的覆盖范围, 即  $R_s > R_{cov}$ . 如果  $R_s = R_{cov}$ , 那么新的空时机会模型将退化成传统的时域机会模型.

## 2.2 多跳传输模型

如图 1 所示, 假设任意一次端到端通信的路径已经由网络层的路由协议确定, CRN 采用固定中继的多跳传输模式<sup>[16]</sup>. 网络中共有  $N + 1$  个认知节点, 数据由认知源节点  $S_0$  经过  $N - 1$  个认知中继节点到达认知目的节点  $S_N$ , 即  $N$  跳数据传输. 所有认知节点均采用半双工的工作方式, 同一时刻节点在某一信道上只能发送或接收数据. 认知中继节点采用 DF 方式传输数据. 当某一认知节点  $S_k$  ( $k = 1, \dots, N - 1$ ) 接收到信息时, 首先解码该信息并重新编码, 然后根据 CRN 的空时机会选择不同的发射功率将数据转发给后续认知节点  $S_j$  ( $j > k$ ). 因此, 只要数据被正确地接收并解码, 它将作为再生数据重新编码发送, 而不受之前的影响. 在转发过程中, 认知节点采用 SDC 策略选择信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 最大的接收数据进行解码转发. 具体来说, 将整个时间帧划分为  $N$  个时隙, 每个时隙足够完成一跳数据传输, 采用 TDMA 方式调度网络的  $N$  跳数据传输. 在第  $j$  ( $j = 1, \dots, N$ ) 个时隙, 认知节点  $S_j$  最多将接收到  $j$  个转发数据. 然后,  $S_j$  选择信噪比最大的接收数据进行下一跳的数据转发.

认知节点  $S_j$  接收到的信号  $r_j$  可以表示为

$$r_j = h_{k,j} \cdot \sqrt{P_v} \cdot s_k + h_{p,j} \cdot \sqrt{P} \cdot s_p + n_j, \quad k = 0, \dots, j - 1, \quad j = 1, \dots, N, \quad (1)$$

其中,  $s_k$  和  $s_p$  分别表示  $S_k$  和 PT 的发送信号.  $h_{k,j}$  和  $h_{p,j}$  分别表示发送节点  $S_k$  和 PT 到接收节点  $S_j$  的直通链路上的信道增益系数.  $P_v$  表示认知节点的传输功率,  $v = 0$  表示最大发射功率,  $v = 1$  表示受控功率. 其中, 受控功率  $P_1$  可以保证主用户网络得到有效保护.  $n_j$  为  $S_j$  处的噪声.

本文主要考察 Nakagami- $m$  衰落信道对多跳 CRN 的影响, 这是因为 Nakagami- $m$  信道是一类较具普遍性的衰落信道, 可以通过设置衰减程度参数  $m$  反映不同的信道衰落特性. 例如,  $m = 1$  时符合 Rayleigh 衰落;  $m < 1$  时符合 Hoyt 衰落; 而  $m > 1$  时符合 Rice 衰落<sup>[20]</sup>. 基于此, 本文假设网络中的所有通信信道均为 Nakagami- $m$  衰落信道. 这样, 由于信道增益系数  $h$  服从 Nakagami- $m$  分布, 故信道的功率增益系数  $g = |h|^2$  服从 Gamma 分布<sup>[21]</sup>, 其概率密度函数 (probability density function, PDF) 和累积分布函数 (cumulative distribution function, CDF) 分别如下:

$$f_g(x) = \frac{\beta^m}{\Gamma(m)} x^{m-1} e^{-\beta x}, \quad (2)$$

$$F_g(x) = \frac{\gamma(m, \beta x)}{\Gamma(m)}, \quad (3)$$

其中,  $m$  是信道衰落程度参数,  $\beta = \frac{m}{\Omega}$ ,  $\Omega$  是平均功率水平.  $\Gamma(m) = \int_0^\infty t^{m-1} e^{-t} dt$  表示完全 Gamma 函数,  $\gamma(m, x) = \int_0^x t^{m-1} e^{-t} dt$  表示互补的不完全 Gamma 函数.

具体来说, 将各认知节点到 PT 以及 CRN 内部认知节点间的信道衰落程度参数和平均功率水平分别表示为  $m_{k,p}$ ,  $m_{k,j}$  和  $\Omega_{k,p}$ ,  $\Omega_{k,j}$ . 由于各认知节点到 PT 的距离均视为相同且信道为独立同分布的, 故将  $m_{k,p}$  和  $\Omega_{k,p}$  分别简化表示为  $m_p$  和  $\Omega_p$ ; 同样, 对于短距离的多跳 CRN 来说, 将各认知节点间的信道也视为独立同分布的, 并将  $m_{k,j}$  和  $\Omega_{k,j}$  分别简化表示为  $m_j$  和  $\Omega_j$ . 更进一步, 将  $\beta_{k,p}$  和  $\beta_{k,j}$  分别表示为  $\beta_p$  和  $\beta_j$ . 注意, 各认知节点到 PT 的信道和 CRN 内部认知节点间的信道是独立非

同分布的. 此外, 假设小规模 CRN 的噪声均为高斯白噪声, 用  $n$  简化表示  $n_j$ .  $n$  服从均值为 0, 方差为  $\sigma^2$  的 Gaussian 过程, 即  $n \sim N(0, \sigma^2)$ .

### 3 中断概率

为了衡量 CRN 在空时机会模型下的传输性能, 本部分推导多跳 CRN 在 Nakagami- $m$  衰落信道下的中断概率. 中断概率<sup>[22]</sup> 定义为瞬时的信道容量不高于一个预定义的速率阈值的概率. 该速率阈值通常也称为中断容量<sup>[4, 5]</sup>. 在  $N$  跳 CRN 中, 两个认知节点  $S_k$  和  $S_j$  的直通链路的中断概率为

$$P_{\text{out}}^{\text{link}} = \Pr \left( \frac{1}{N} \log_2(1 + \eta_{k,j}) \leq R_{\text{th}} \right), \quad (4)$$

其中,  $\eta_{k,j}$  表示  $S_k$  和  $S_j$  之间直通链路的信噪比,  $R_{\text{th}}$  表示中断容量,  $1/N$  考虑的是整个帧时间内一跳数据传输的时间.

由于认知中继节点采用 SDC 策略选择具有最大信噪比的数据进行解码转发, 故用  $\hat{\eta}_j = \max_{k \in \Delta_j} \eta_{k,j}$  表示最大的信噪比, 其中  $\Delta_j$  表示截止  $j$  时刻已向  $S_j$  转发数据的认知节点的标号集合, 该标号集合指向认知节点集  $\{S_0, \dots, S_{j-1}\}$ . 当具有最大信噪比的链路传输速率不高于中断容量时, 该认知节点将被视为中断. 由于各信道都是统计独立的, 所以单个认知节点  $S_j$  的中断概率为

$$\begin{aligned} P_{\text{out},j}^{\text{node}} &= \Pr \left( \frac{1}{N} \log_2(1 + \hat{\eta}_j) \leq R_{\text{th}} \right) = \Pr \left( \max_{k \in \Delta_j} \eta_{k,j} \leq 2^{NR_{\text{th}}} - 1 \right) \\ &= \prod_{k=0}^{j-1} \Pr \left( \eta_{k,j} \leq 2^{NR_{\text{th}}} - 1 \right). \end{aligned} \quad (5)$$

从式 (5) 可以看出, 单个认知节点的中断概率和与该节点通信的各直通链路上的信噪比密切相关, 可由信噪比的 CDF 计算得到, 而信噪比又与认知节点的传输功率直接相关, 因此要根据空时机会模型分如下 4 种情况分别进行处理. 在求解信噪比 CDF 的过程中, 由于各信道均为同分布的, 故用  $\eta_j$  简化表示  $\eta_{k,j}$ .

**情况 1** 协作的认知节点正确地检测到时域机会或空域机会, 即 CRN 处于 PT 的覆盖范围外或 PT 处于 OFF 状态. 其中, 当 CRN 位于 PT 的覆盖范围外时, PT 对认知节点的干扰可以忽略. 这种情况下, 认知节点采用最大发射功率  $P_0$  进行数据传输, 信噪比为  $\eta_j = \frac{P_0 \cdot g_j}{\sigma^2}$ . 由于  $g_j$  服从 Gamma 分布, 所以信噪比 CDF 的计算过程如下:

$$\begin{aligned} F_{\eta_j}^{(1)}(x) &= \Pr \left( \frac{P_0 \cdot g_j}{\sigma^2} \leq x \right) = \int_0^{\frac{\sigma^2 x}{P_0}} \frac{\beta_j^{m_j}}{\Gamma(m_j)} z^{m_j-1} e^{-\beta_j z} dz \\ &= \frac{\gamma \left( m_j, \frac{\beta_j \sigma^2 x}{P_0} \right)}{\Gamma(m_j)}. \end{aligned} \quad (6)$$

**情况 2** CRN 位于 PT 的覆盖范围内且 PT 处于 OFF 状态, 但是协作的认知节点进行时域感知时出现误警, 错误地判决 PT 处于 ON 状态. 这样, CRN 将执行功率控制, 其节点的发射功率为  $P_1$ . 注意, 该受控功率可以保证主用户网络受到严格地保护, 而不对其造成过量干扰. 此时, 信噪比为  $\eta_j = \frac{P_1 \cdot g_j}{\sigma^2}$ . 在这种情况下, 信噪比 CDF 的计算过程与情况 1 相似.

$$F_{\eta_j}^{(2)}(x) = \Pr \left( \frac{P_1 \cdot g_j}{\sigma^2} \leq x \right) = \frac{\gamma \left( m_j, \frac{\beta_j \sigma^2 x}{P_1} \right)}{\Gamma(m_j)}. \quad (7)$$

**情况 3** 协作的认知节点既没有检测到时域机会, 也没有检测到空域机会, 即 CRN 位于 PT 的覆盖范围内, 且 PT 处于 ON 状态. 这时, CRN 仅获得了共享机会, 因此必须执行功率控制以保护主用户网络. 这种情况下, 信噪比为  $\eta_j = \frac{P_1 \cdot g_j}{P \cdot g_p + \sigma^2}$ . 由于  $g_j$  和  $g_p$  均服从 Gamma 分布, 且两者相互独立, 所以信噪比 CDF 的计算式如下:

$$F_{\eta_j}^{(3)}(x) = \Pr\left(\frac{P_1 \cdot g_j}{P \cdot g_p + \sigma^2} \leq x\right) = 1 - \left(\frac{\beta_p \sigma^2}{P}\right)^{m_p} e^{-\frac{\beta_j \sigma^2 x}{P_1}} \sum_{i=0}^{m_j-1} \frac{1}{i!} \left(\frac{\beta_j \sigma^2 x}{P_1}\right)^i \Psi\left(m_p, m_p + 1 + i; \frac{\beta_p \sigma^2}{P} + \frac{\beta_j \sigma^2 x}{P_1}\right), \quad (8)$$

其中,  $\Psi(\alpha, \gamma; z) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^\infty e^{-zt} t^{\alpha-1} (1+t)^{\gamma-\alpha-1} dt$  是第 2 类合流超几何函数 [25]. 具体推导过程请参看附录 A.

**情况 4** CRN 位于 PT 的覆盖范围内且 PT 处于 ON 状态, 但是协作的认知节点进行时域感知时出现漏警, 错误地判定其具有时域机会, 而没有进行功率控制. 在这种情况下, 认知节点采用最大发射功率  $P_0$  进行数据传输, 因此会对主用户网络造成干扰. 此时, 信噪比为  $\eta_j = \frac{P_0 \cdot g_j}{P \cdot g_p + \sigma^2}$ , 其 CDF 的计算过程与情况 3 相似.

$$F_{\eta_j}^{(4)}(x) = \Pr\left(\frac{P_0 \cdot g_j}{P \cdot g_p + \sigma^2} \leq x\right) = 1 - \left(\frac{\beta_p \sigma^2}{P}\right)^{m_p} e^{-\frac{\beta_j \sigma^2 x}{P_0}} \sum_{i=0}^{m_j-1} \frac{1}{i!} \left(\frac{\beta_j \sigma^2 x}{P_0}\right)^i \Psi\left(m_p, m_p + 1 + i; \frac{\beta_p \sigma^2}{P} + \frac{\beta_j \sigma^2 x}{P_0}\right). \quad (9)$$

根据空时机会模型分上述 4 种情况求得信噪比的 CDF 后, 就可以根据其闭式解析式计算多跳 CRN 的网络中断概率. 单个链路的中断概率为  $\Pr(\eta_j \leq 2^{NR_{th}} - 1) = F_{\eta_j}(2^{NR_{th}} - 1)$ . 由于信道是独立同分布的, 根据式 (5), 单个认知节点  $S_j$  的中断概率为

$$P_{\text{out},j}^{\text{node}} = [\Pr(\eta_j \leq 2^{NR_{th}} - 1)]^j = [F_{\eta_j}(2^{NR_{th}} - 1)]^j. \quad (10)$$

对于采用固定中继的多跳 CRN 来说, 只有当认知源节点到认知目的节点路径上的全部认知节点均未出现中断时, 才能实现数据的端到端可靠传输. 如果该路径上的任一认知节点发生中断, 那么整个网络将无法正常运行. 因此, 整个网络的中断概率为

$$P_{\text{out}}^{\text{net}} = 1 - \prod_{j=1}^N (1 - P_{\text{out},j}^{\text{node}}). \quad (11)$$

在得到单个节点以及整个网络的中断概率的计算式后, 将式 (6)~(9) 依次带入式 (10) 和 (11) 就可以根据空时机会模型分别计算上述 4 种情况下的网络中断概率.

$$P_{\text{out}}^{(n)} = 1 - \prod_{j=1}^N \left[1 - \left(F_{\eta_j}^{(n)}(2^{NR_{th}} - 1)\right)^j\right], n \in \{1, 2, 3, 4\}, \quad (12)$$

其中,  $n \in \{1, 2, 3, 4\}$  分别对应空时机会模型下的 4 种情况.

在此基础上, 下面根据空时机会模型及空时联合接入策略进一步计算平均网络中断概率以衡量多跳 CRN 的中断性能. 当空间感知结果显示 CRN 位于 PT 的覆盖范围外时, 协作的认知节点无需进行时域的频谱感知. 这时仅出现了情况 1, 认知节点无需进行功率控制, 平均网络中断概率为

$$\bar{P}_{\text{out}}^{\text{JSTAS}} = P_{\text{out}}^{(1)}. \quad (13)$$

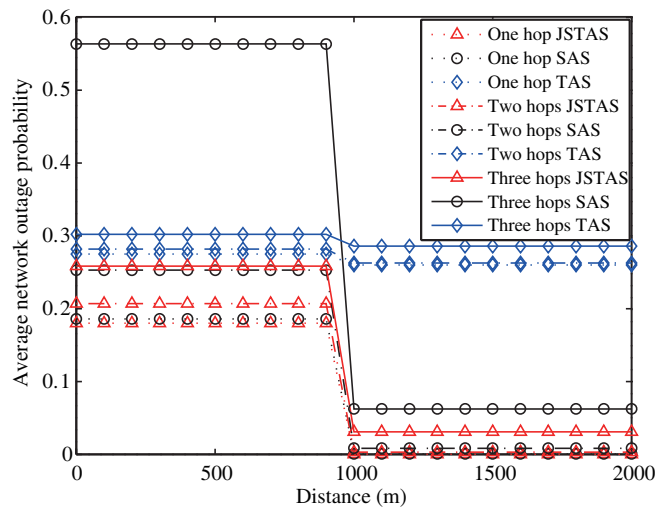


图 3 (网络版彩图) 中断概率与空间距离的关系

Figure 3 (Color online) Relationship between outage probability and spatial distance

当空间感知结果显示 CRN 位于 PT 的覆盖范围内时, 由于时域的频谱感知存在误警和漏警的情况, 所以出现了前面所述的 4 种情况. 这时, 平均网络中断概率为

$$\bar{P}_{\text{out}}^{\text{JSTAS}} = P(H_0)(1 - P_f)P_{\text{out}}^{(1)} + P(H_0)P_fP_{\text{out}}^{(2)} + P(H_1)P_dP_{\text{out}}^{(3)} + P(H_1)(1 - P_d)P_{\text{out}}^{(4)}, \quad (14)$$

其中,  $P_d$  和  $P_f$  分别为时域频谱感知的检测率和误警率.

#### 4 性能分析与比较

根据空时机会模型及空时联合接入策略, 前面已经推导并得到了多跳 CRN 在 Nakagami- $m$  信道下的中断概率的闭式解析式. 为了衡量空时机会模型的合理性, 本部分将采用空时联合接入策略 (joint spatial-temporal access scheme, JSTAS) 的 CRN 与单纯采用时域接入策略 (temporal access scheme, TAS) 和空域接入策略 (spatial access scheme, SAS) 的 CRN 进行中断性能比较. 注意, 为了比较的公平性, JSTAS, TAS 和 SAS 3 种接入策略都是应用在本文所提出的空时机会模型下. 其中, TAS 采用通常意义下的机会频谱接入策略, 如文献 [3, 18]. 同时, 假设认知节点在 PT 覆盖范围内和外的感知能力相当, 并且存在虚警和漏警现象. 而 SAS 是根据空间感知结果进行功率控制来实现频谱共享的, 并不考虑时域的频谱感知问题. 具体来说, 当 CRN 位于 PT 的覆盖范围外时以最大功率  $P_0$  进行频谱共享, 而当其位于 PT 的覆盖范围内时以受控功率  $P_1$  进行频谱共享.

相关的仿真参数设置如下: PT 在 ON 和 OFF 状态的平均持续时间分别为 200 和 800 ms, 通过计算得到  $P(H_1) = 0.2$  和  $P(H_0) = 0.8$ . 对于时域的频谱感知, 参考 IEEE 802.22 标准,  $P_d = 0.9$  和  $P_f = 0.1$ . Nakagami- $m$  信道的参数设置如下: 信道的平均功率水平  $\Omega_p = \Omega_j = 1$ , PT 与认知节点之间的信道衰落程度参数  $m_p = 1$ , 认知节点间的信道衰落程度参数  $m_j = 3$ . 噪声方差归一化为单位值, 即  $\sigma^2 = 1$ . 在此基础上, PT 的传输功率设置为 20 dB, 认知节点的最大传输功率设置为 15 dB. 功率控制策略采用  $P_1 = P_0 - 5$ . PT 的覆盖范围为 1 km. 中断容量设置为  $R_{\text{th}} = 1$  ( $\text{bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ).

图 3 表现了 CRN 与 PT 的空间距离对平均网络中断概率的影响. 为了直观地比较 3 种策略的中断性能, 仿真过程中忽略了自由空间路径损耗的影响, 仅区分 CRN 在 PT 覆盖范围内和外时所受到



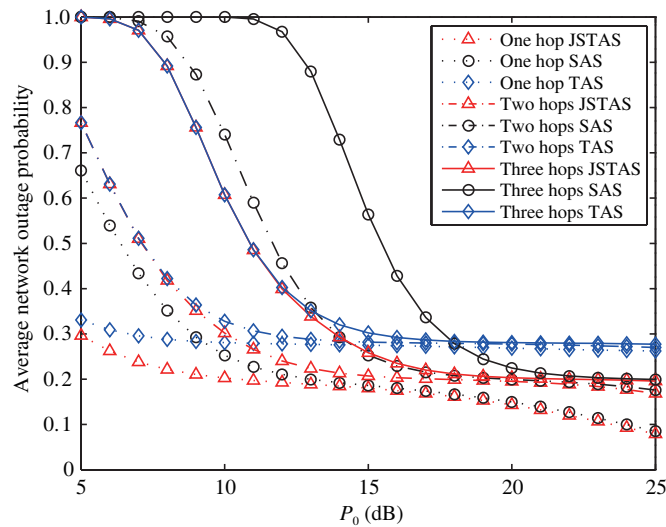


图 4 (网络版彩图) 中断概率与认知节点最大传输功率的关系

Figure 4 (Color online) Relationship between outage probability and the maximum transmit power of cognitive node

的干扰不同. 因此, 3 种策略的中断概率并没有随距离的增大而缓慢降低, 仅在覆盖半径处发生了不同程度的跳变. 显然, 随着 CRN 跳数的增多, 3 种策略的中断概率都有不同程度的升高. 但是, 无论是在 PT 的覆盖范围内还是覆盖范围外, JSTAS 的中断性能始终好于单纯的 TAS 或 SAS. 具体来说, 当 CRN 位于 PT 的覆盖范围内时, 采用 SAS 进行三跳数据传输的中断概率要远大于 TAS 和 JSTAS; 而当 CRN 位于 PT 的覆盖范围外时, 采用 SAS 和 JSTAS 的中断概率要低于 TAS. 但是, 由于 SAS 始终考虑 PT 可能存在的干扰, 故 SAS 在 PT 覆盖范围外时的中断概率仍略高于 JSTAS.

图 4 表现了 CRN 位于 PT 的覆盖范围内时, 平均网络中断概率与认知节点的最大传输功率  $P_0$  之间的关系.  $P_0$  的范围设置为 5~25 dB, 用以考察 CRN 在低功率和高功率情况下中断性能的变化情况, 功率控制策略为  $P_1 = P_0 - 5$ . 显然, 当认知节点的最大传输功率很小时, 如  $P_0 = 5$  dB, 3 种策略的中断概率都很高. 特别是当跳数增加时, SAS 的中断概率急剧上升. 相比之下, TAS 和 JSTAS 在低传输功率情况下的中断概率要远低于 SAS. 随着  $P_0$  的增大, 3 种策略的中断概率均减小. 其中, SAS 的中断概率的下降速度明显大于 TAS 和 JSTAS. 当  $P_0$  足够大时, 3 种策略的中断概率基本趋于平稳, 不再随跳数的增加而剧烈变化, 这是因为足够大的传输功率是确保数据成功传输的必要条件, 特别是对于多跳 CRN 来说更是如此. 具体来说, 当  $P_0 > 17$  dB 时, TAS 的中断概率已趋于相同, 而 SAS 的中断概率低于 TAS, 并且继续下降. 然而, JSTAS 的中断概率始终低于 TAS 和 SAS.

图 5 表现了 CRN 位于 PT 的覆盖范围内时, 平均网络中断概率与中断容量  $R_{th}$  的关系. 当  $R_{th} = 0$  时, SAS 和 JSTAS 的中断概率均为 0, 即没有中断容量限制时, 认为网络可以实现不间断的数据传输. 但是, TAS 的初始中断概率要高于 SAS 和 JSTAS, 这是因为采用 TAS 时, 认知节点在 PT 存在时是禁止接入的. 随着中断容量限制的增大, 3 种策略的中断概率均增大, 而且跳数越多, 增长速度越快. 特别是对于 SAS 来说, 当跳数增加时, 其中断概率急剧增大, 体现出 SAS 对于多跳 CRN 的鲁棒性较低. 具体来说, 当  $R_{th} < 0.5$  时, SAS 和 JSTAS 的中断概率基本相同, 并且低于 TAS. 但是, 当  $R_{th} > 1$  时, 采用 SAS 的三跳 CRN 的中断概率已经远高于相同情况下的 TAS 和 JSTAS. 其中, TAS 和 JSTAS 的中断概率在  $R_{th} > 1.4$  以后趋于一致, 在  $R_{th} = 2$  时达到最大, 与 SAS 相同. 但是, 通常情况下, 网络并没有这么高的中断容量限制. 因此, JSTAS 的中断性能仍是 3 种策略中表现最佳的.

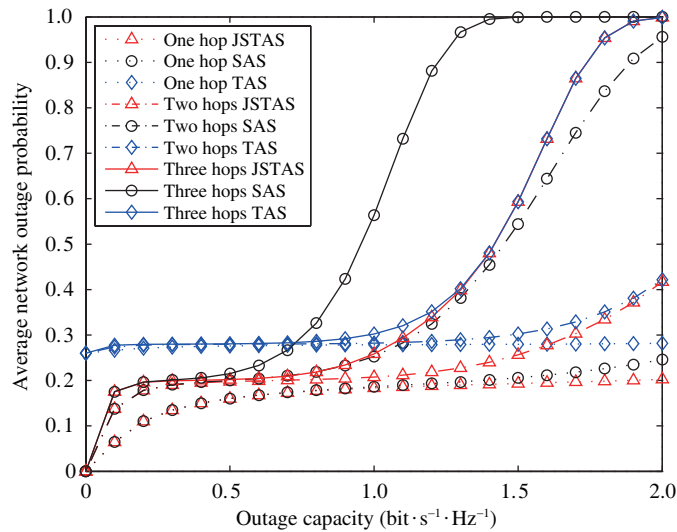


图 5 (网络版彩图) 中断概率与中断容量的关系

Figure 5 (Color online) Relationship between outage probability and outage capacity

## 5 结论

本文根据频谱空洞的时域和空域特性, 提出了新的二维空时机会模型. 该模型充分考虑 PT 对授权频段的占用情况以及 CRN 的空间位置, 可以有效地提高频谱利用率. 在此基础上, 进一步提出空时联合接入策略, 从而实现 CRN 对授权频段的连续接入以及数据的连续传输. 在空时机会模型下, 考察了多跳 CRN 在 Nakagami- $m$  衰落信道下的中断性能, 推导并得到了中断概率的闭式解析式. 为了衡量空时机会模型及空时联合接入策略的合理性, 以单纯的时域接入策略和空域接入策略作为对比, 对 3 种策略下的平均网络中断概率进行了比较和分析. 结果表明, 在新的机会模型下, 采用空时联合接入策略的中断性能要好于单纯的时域或空域接入策略. 未来, 该空时机会模型及空时联合接入策略可以应用于认知无线传感器网络、无线体域网等短距离低功率的无线网络中, 在提高频谱利用率的同时, 满足无线网络对连续性和实时性的要求.

## 参考文献

- 1 Haykin S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications. *IEEE J Sel Area Commun*, 2005, 23: 201–320
- 2 Wang B, Liu K J R. Advances in cognitive radio networks: a survey. *IEEE J Sel Topics Signal Process*, 2011, 5: 5–23
- 3 Liang Y C, Zeng Y H, Peh E C Y, et al. Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2008, 7: 1326–1337
- 4 Kang X, Liang Y C, Garg H K, et al. Sensing-based spectrum sharing in cognitive radio networks. *IEEE Trans Veh Tech*, 2009, 58: 4649–4654
- 5 Stotas S, Nallanathan A. On the outage capacity of sensing-enhanced spectrum sharing cognitive radio systems in fading channels. *IEEE Trans Commun*, 2011, 59: 2871–2882
- 6 Zhai C, Zhang W. Adaptive spectrum leasing with secondary user scheduling in cognitive radio networks. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2013, 12: 3388–3398
- 7 Kash I A, Murty R, Parkes D C. Enabling spectrum sharing in secondary market auctions. *IEEE Trans Mob Comput*, 2014, 13: 556–568
- 8 Li Q, Feng Z Y, Li W, et al. Joint temporal and spatial spectrum sharing in cognitive radio networks: a region-based

- approach with cooperative spectrum sensing. In: Proceedings of IEEE WCNC, Shanghai, 2013. 620–625
- 9 Han W J, Li J D, Li Z, et al. Spatial false alarm in cognitive radio network. *IEEE Trans Signal Process*, 2013, 61: 1375–1388
  - 10 Mark B L, Nasif A O. Estimation of maximum interference-free transmit power level for opportunistic spectrum access. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2009, 8: 2505–2513
  - 11 Do T, Mark B L. Joint spatial-temporal spectrum sensing for cognitive radio networks. *IEEE Trans Veh Tech*, 2010, 59: 3480–3490
  - 12 Tandra R, Mishra S M, Sahai A. What is a spectrum hole and what does it take to recognize one? *Proc IEEE*, 2009, 97: 824–848
  - 13 Wu Q H, Ding G R, Wang J L, et al. Spatial-temporal opportunity detection for spectrum-heterogeneous cognitive radio networks: two-dimensional sensing. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2013, 12: 516–526
  - 14 Ding G R, Wang J L, Wu Q H, et al. Spectrum sensing in opportunity-heterogeneous cognitive sensor networks: how to cooperate? *IEEE Sens J*, 2013, 13: 4247–4255
  - 15 Wang J L, Ding G R, Wu Q H, et al. Spatial-temporal spectrum hole discovery: a hybrid spectrum sensing and geolocation database framework. *Chin Sci Bull*, 2014, 59: 1896–1902
  - 16 Farhadi G, Beaulieu N C. Fixed relaying versus selective relaying in multi-hop diversity transmission systems. *IEEE Trans Commun*, 2010, 58: 956–965
  - 17 Guimaraes F R V, Costa D B, Tsiftsis T A, et al. Multiuser and multirelay cognitive radio networks under spectrum-sharing constraints. *IEEE Trans Veh Tech*, 2014, 63: 433–439
  - 18 Zou Y L, Yao Y D, Zheng B Y. Cognitive transmissions with multiple relays in cognitive radio networks. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2011, 10: 648–659
  - 19 Zhang X, Xing J, Yan Z, et al. Outage performance study of cognitive relay networks with imperfect channel knowledge. *IEEE Commun Lett*, 2013, 17: 27–30
  - 20 Duong T Q, Costa D B, Elkashlan M, et al. Cognitive amplify-and-forward relay networks over Nakagami- $m$  fading. *IEEE Trans Veh Tech*, 2012, 61: 2368–2374
  - 21 Zhong C J, Ratnarajah T, Wong K K. Outage analysis of decode-and-forward cognitive dual-hop systems with the interference constraint in Nakagami- $m$  fading channels. *IEEE Trans Veh Tech*, 2011, 60: 2878–2879
  - 22 Lee J, Wang H, Andrews J G, et al. Outage probability of cognitive relay networks with interference constraints. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2011, 10: 390–395
  - 23 Jin A L, Song W, Ju P J, et al. Energy-aware cooperation strategy with uncoordinated group relays for delay-sensitive services. *IEEE Trans Veh Tech*, 2014, 63: 2104–2114
  - 24 Yucek T, Arslan H. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications. *IEEE Commun Surv Tutor*, 2009, 11: 116–130
  - 25 Gradshteyn I S, Ryzhik I M. Table of Integrals, Series, and Products. 7th ed. San Diego: Academic, 2007

## 附录 A 式 (8) 和 (9) 的计算过程

根据情况 3 和 4 的特点, 信噪比的表达式为  $\eta_j = \frac{P_v \cdot g_j}{P \cdot g_p + \sigma^2}$ . 其中,  $g_p$  和  $g_j$  均服从 Gamma 分布且两者相互独立. 两个 Gamma 随机变量的参数分别为  $m_p, \beta_p$  和  $m_j, \beta_j$ . 这样, 根据它们的 PDF 可以计算信噪比的 CDF, 具体计算过程如下.

$$\begin{aligned}
 F_{\eta_j}(x) &= \Pr\left(\frac{P_v \cdot g_j}{P \cdot g_p + \sigma^2} \leq x\right) \\
 &= \int_0^\infty f_{g_p}(y) \int_0^{\frac{(P y + \sigma^2)x}{P_v}} f_{g_j}(z) dz dy \\
 &= \int_0^\infty \frac{\beta_p^{m_p}}{\Gamma(m_p)} y^{m_p-1} e^{-\beta_p y} \cdot \frac{\gamma\left(m_j, \frac{\beta_j(P y + \sigma^2)x}{P_v}\right)}{\Gamma(m_j)} dy
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\beta_p^{m_p}}{\Gamma(m_p)} \int_0^\infty y^{m_p-1} e^{-\beta_p y} \left[ 1 - e^{-\frac{\beta_j(Py+\sigma^2)x}{P_v}} \sum_{i=0}^{m_j-1} \frac{1}{i!} \left( \frac{\beta_j(Py+\sigma^2)x}{P_v} \right)^i \right] dy \\
&= 1 - \frac{\beta_p^{m_p}}{\Gamma(m_p)} e^{-\frac{\beta_j\sigma^2 x}{P_v}} \sum_{i=0}^{m_j-1} \frac{1}{i!} \left( \frac{\beta_j\sigma^2 x}{P_v} \right)^i \int_0^\infty y^{m_p-1} e^{-(\beta_p+\frac{\beta_j P x}{P_v})y} \left( 1 + \frac{P}{\sigma^2} y \right)^i dy \\
&= 1 - \left( \frac{\beta_p\sigma^2}{P} \right)^{m_p} e^{-\frac{\beta_j\sigma^2 x}{P_v}} \sum_{i=0}^{m_j-1} \frac{1}{i!} \left( \frac{\beta_j\sigma^2 x}{P_v} \right)^i \Psi \left( m_p, m_p + 1 + i, \frac{\beta_p\sigma^2}{P} + \frac{\beta_j\sigma^2 x}{P_v} \right). \quad (\text{A1})
\end{aligned}$$

在上述推导过程中, 主要应用了文献 [25] 的公式 [8.352.6] 和 [9.211.4], 然后经过整理最终获得式 (8) 和 (9). 其中, [9.211.4] 是第 2 类合流超几何函数, 主要用于求解上述推导过程中的积分, 并得到其闭式解析式.

## Outage performance of multihop cognitive radio networks with a spatial-temporal opportunity model

XU Chi<sup>1,2,3</sup>, ZHENG Meng<sup>1,2</sup>, LIANG Wei<sup>1,2</sup> & YU HaiBin<sup>1,2\*</sup>

1 *Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;*

2 *Key Laboratory of Networked Control Systems, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;*

3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

\*E-mail: yhb@sia.cn

**Abstract** With the aim of improving the spectrum utilization of licensed bands and achieving continuous data transmission for cognitive radio networks (CRNs), we define a novel two-dimensional spatial-temporal opportunity model that considers both the temporal and spatial characteristics of a spectrum hole. Based on this model, a joint spatial-temporal access scheme is proposed to ensure that CRNs can access the licensed bands successively and carry out data transmission continuously. In order to validate the rationalities and superiorities of the proposed model and scheme, the outage performance of multi-hop CRNs for the Nakagami- $m$  fading channel was investigated. The CRNs exploit the fixed relay multi-hop transmission mode in which decode-and-forward and selection diversity combining schemes are employed. Using the proposed model, we derived the outage probability of multi-hop CRNs and obtained its closed-form expression. Then, the outage performance of the joint spatial-temporal access scheme was analyzed and compared with that of pure temporal and spatial access schemes through simulations. The results showed that the average network outage probability of the joint scheme is much lower.

**Keywords** cognitive radio networks, multihop, spectrum sharing, spatial-temporal opportunity, joint spatial-temporal access scheme, outage probability



**XU Chi** was born in 1987. He received the B.S. degree in communications engineering and the M.S. degree in communications and information systems from Liaoning Technical University in 2010 and 2013, respectively. He is pursuing the Ph.D. degree in control theory and control engineering at the Shenyang Institute of Automation (SIA), Chinese Academy of Sciences (CAS). His research interests include wireless sensor networks and cognitive radio networks.



networks.

**ZHENG Meng** was born in 1983. He received the B.S. degree in information and computing science and the M.S. degree in operational research and cybernetics from Northeastern University in 2005 and 2008, respectively, and the Ph.D. degree in mechatronic engineering from SIA, CAS, in 2012. He is an associate professor at SIA, CAS. His research interests include wireless ad hoc and sensor networks and cognitive radio



**LIANG Wei** was born in 1974. She received the Ph.D. degree in mechatronic engineering from SIA, CAS, in 2002. Currently, she is a professor at SIA, CAS. Her primary research interests include wireless sensor networks, industrial wireless networks, and body area networks.



**YU HaiBin** was born in 1964. He received the B.S. and the M.S. degrees in industrial automation and the Ph.D. degree in control theory and control engineering from Northeastern University in 1984, 1987, and 1997, respectively. He has been a full professor at SIA, CAS since 1997. He is a Fellow of ISA. His primary research interests include wireless sensor networks, industrial communication and networked control, and industrial automation and smart grid.