

文章编号 1004-924X(2017)06-1587-10

## 主用户移动场景下的感知用户时间分配算法

于洪涛<sup>1</sup>, 张光宇<sup>2</sup>, 张中兆<sup>1</sup>, 叶 东<sup>2\*</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 电子与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学 航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**传统的认知无线电技术主要针对主用户和感知用户静止的认知网络,近年来对于用户移动性的研究逐渐成为了研究热点。认知网络在多媒体接入技术中应用广泛,而多媒体接入技术的协议多是基于时间分配的,本文对主用户移动场景下感知用户的时间分配方法开展了研究工作;首先构建了认知无线网络下主用户在感知用户的干扰域内和干扰域外的时间分配模型,并从用户移动的角度给出了单个感知用户可用的传输时间,并提出了感知时间门限的问题,即由于主用户的移动性,频谱感知算法的感知准确性不会因为感知时间的延长而提高。之后为了给出实际中可以应用的时间参数设计方法,特别针对随机模型中最为常用的随机游走模型,给出了单感知用户占用频谱情况下最优传输时间和感知时间门限的表达式,并进行了仿真实验以验证方法的正确性。

**关键词:**认知无线电;主用户移动;用户容量;传输时间

**中图分类号:** TN929.53 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172506.1587

## Research on cognitive user's time allocation algorithm on the mobile scene of primary users

YU Hong-tao<sup>1</sup>, ZHANG Guang-yu<sup>2</sup>, ZHANG Zhong-zhao<sup>1</sup>, YE Dong<sup>2\*</sup>

(1. School of Electronics and Information Engineering,  
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

\* Corresponding author, E-mail: yed@hit.edu.cn

**Abstract:** Traditional cognitive radio techniques mainly aim at the primary user and cognitive user in static. For the past few years, the research on the mobility of the user has become a hot research topic, the cognitive network is widely used in multimedia access technology, and the protocols of multimedia access technology are mostly based on the allocation of time. This paper focuses on time allocation method of cognitive users under mobile scenarios of primary users. In this paper, we firstly construct the time distribution model of the primary user in and out of the interference region of the cognitive radio network. From the view of the user's movement, the available transmission time for a single user and the problem of sensing time threshold are put forward. Secondly, Because of the mobility

**收稿日期:** 2016-11-04; **修订日期:** 2017-01-05.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(No. 61603115); 中国博士后科学基金资助项目(No. 2015M81455); 2015年黑龙江省博士后资助经费(No. LBH-Z15085); 微小型航天器技术国防重点学科实验室开放基金资助项目(No. HIT. KLOF. MST. 201501, HIT. KLOF. MST. 201601)

of the primary users, the sensing accurate of spectrum sensing algorithm would not be improved although using the longer sensing time. In order to give the time parameter design method of the application, especially for the random walk model which is most commonly used, a single user's optimal transmission time and sensing time threshold are given. The simulation is completed to verify the correctness of the algorithm.

**Key words:** cognitive radio; primary user mobility; user capacity; transmission time

## 1 引言

频谱资源已成为国家重要的战略性资源,大部分频谱都需要经过授权才能使用,以避免频率复用带来的严重干扰。然而授权频谱的使用率并不高,据美国联邦通信委员会 FCC(Federal Communications Commission)调查结果显示,用于数字电视和广播方面的频谱利用率仅为 5.2%左右<sup>[1]</sup>,因此从总体上来说,还有丰富的潜在频谱资源可利用。频谱感知技术的出现,使得频谱资源稀缺的现状得到了一定程度上的缓解,在认知网络中对于多媒体接入协议的研究一直是研究热点<sup>[2]</sup>。

从信号空间传播的角度分析,目前的频谱感知技术主要包括信号在一维空间的传播问题、在二维空间的传播问题和在三维空间的传播问题。早在 2007 年,就有美国学者基于周期平稳谱密度,提出了频谱感知中将信号的二维传播简化为一维传播的算法,使 BPSK 信号的检测概率超过了 90%<sup>[3]</sup>。2011 年,Chuyen Khoa Huynh 提出了一种基于 OFDM 认知无线电系统的二维遗传算法<sup>[4]</sup>。2012 年,Zhi Tian 等人从宽带随机信号的欠奈奎斯特采样中提取出有用的二阶统计量,提出了一种新的基于压缩感知的频谱感知算法<sup>[5]</sup>。2013 年,Ahmed M. Elzanati 等人通过研究基于克罗内克稀疏基的协作频谱感知技术,提出了信号在二维空间传播过程中,减小均方误差的方法<sup>[6]</sup>。

对于信号在三维空间内传播的研究,近两年比较热门。2013 年,Qiong Shi 等人提出了一种广泛适用于上行链路和下行链路的“基于拍卖”机制的协作频谱感知方法,提高了感知过程中的能量利用率<sup>[7]</sup>。2014 年,Tareq M. Shami 等人仿真分析了利用卫星进行协作频谱感知的效果,得出了 GPS 优选的结论<sup>[8]</sup>。2015 年,Roberto Ce-

sarr Dias Vilela Bomfin 等人分析了基于特征值在相关阴影衰落下的协作频谱感知,得出了这种场景下的能量检测率优于其他方法的结论<sup>[9]</sup>。

3 种信号传播场景目前已经得到广泛研究,然而,对于不同的主用户(拥有频谱资源的用户)和感知用户移动场景的频谱感知技术不尽相同。对于主用户移动的场景,2011 年,Kae Won Choi 等人提出了基于位置感知的协作频谱感知算法,并证明该算法与当时已有的算法相比性能更佳<sup>[10]</sup>。2014 年,Girish V. Lakhekar 等人提出了使用模糊神经系统的认知无线电网络的研究方案,讨论了频谱使用率,移动性和主用户及感知用户之间的距离 3 个参数的影响,实现了更高的感知准确率<sup>[11]</sup>。

对于感知用户移动的问题,2013 年,Debjani Mitra 等人提出了基于模糊干扰感知的方案,讨论了信号能量频谱使用率、移动性和主用户及感知用户之间距离等要素的影响,给出了 81 条合理化建议<sup>[12]</sup>。

从研究的参数考虑可以将认知无线电的相关研究分为:传输时间、感知时间、系统容量 3 方面内容。对于系统容量的研究,2009 年,Shensheng Tang 等人提出了不可靠频谱感知的机会频谱接入技术,得出了该技术可以提高系统业务容量的结论<sup>[13]</sup>。2013 年,Luigi Paura 等人研究了基于时间参数和移动性的系统容量<sup>[14]</sup>。同年,Michele Guerrini<sup>[15]</sup>等人从感知用户平均容纳量的角度研究了系统的传输时间。

对于感知时间的研究,2012 年,Aditya Kelkar 和 Qi Cheng 提出了一种基于代价的估计频谱感知框架结构<sup>[16]</sup>;对于传输时间的研究,2014 年,Kang Kang 提出了对于多跳中继认知网络的理想时间分配<sup>[17]</sup>。

关于一段时间的感知效果问题,2013 年,Qiang Liu 和 Xin Wang 等人提出了一个间歇性周期感知方案<sup>[18]</sup>。对于保护半径,即主用户与感

知用户之间不产生有害干扰的最小距离,许多学者给出了自己的功率控制算法<sup>[19-22]</sup>。

对于感知效率的研究,2010年,Yohannes D. Alemseged 等人提出了认知网络多媒体接入方案,并且从感知成功率的角度对方案进行分析,得到了该方案能够提高感知效率的结论<sup>[23]</sup>。2012年,Kevin Chang 等人考虑了感知时间和传输时间,考虑了二者联合概率密度的最大值问题<sup>[24-26]</sup>。

综上所述,目前认知无线电相关技术的研究,大多数停留在主用户静止的场景,对于主用户移动情景的研究相对较少。当出现主用户移动的场景时,会产生如下问题:在主用户运动前,感知用户可以检测到主用户,而当主用户运动到感知用户感知范围之外时,感知用户则无法检测到活跃的主用户,而且当能量检测算法出现误判时,感知用户只能放弃传输数据,从而降低了频谱的利用率。

因此,本文对主用户移动场景下的时间分配方案进行了探索,通过建立移动场景下的时间分配模型,分析系统最优传输时间和感知时间门限的表达式,并且通过仿真验证理论推导的表达式正确性,为以后频谱感知系统的设计提供参考。

## 2 主用户移动场景感知用户时间分配模型

### 2.1 主用户网络模型

若主用户在主用户网络覆盖范围  $A$  中一般地随机移动,则称  $A$  为网络域。网络域  $A$  可以是一维、二维或是三维。 $f_{x_{PU}}(x_{PU})$  表示主用户稳态空间分布的概率密度函数。本文用  $R$  表示主用户的保护域半径,即认知无线电用户应该探知到活跃的主用户的范围。在传统的 ON-OFF 信道模型下,主用户只存在两种状态,即占用频谱和不占用频谱,本文用  $P_{on}$  表示主用户占用频谱资源的概率,用  $P_{off}$  表示主用户不占用频谱资源的概率。

本文中假定单个认知无线电用户(感知用户)是静态均匀分布在网络域  $A$  中的,令  $f_{x_{CR}}(x_{CR})$  表示主用户稳态空间分布的概率密度函数。

由于主用户的移动性对于感知用户是未知的,具有很强的随机性,因此通常采用随机移动模型研究主用户的移动性。在普通随机移动模型

中,可将主用户的移动分解为若干段直线运动,一段直线运动所用的时间称为一个时间段。由于主用户所在的网络域存在边界,本文假设主用户到达网络域  $A$  的边界后,立即沿相反方向,以相同的速率返回网络域内。特别在随机游走模型下,若主用户在任何一个地点都不做停留,始终随机运动,到达边界,就做反方向运动,因此,不论主用户的平均速度如何,其在下一时刻的分布都可以认为是均匀稳态的空间分布。

### 2.2 主用户在干扰域内外的时间分配模型

主用户的随机移动使其在感知用户干扰域内和干扰域外两个事件交替出现。即对感知用户而言,主用户的随机移动是进出感知用户干扰域的往复运动,往复运动的周期为一段连续的主用户在感知用户干扰域内和干扰域外的时间和。将主用户的移动看成若干段直线运动的和,令  $L$  表示每一段直线运动时间内主用户移动的欧几里得距离。令  $M$  表示从开始到进入干扰域的直线运动的时间段的数目。显然,  $M$  和感知用户的位置  $x_{CR}$ , 以及主用户每一段直线运动长度  $L$  有关。若以  $C(x_{CR})$  表示感知用户的干扰域,首先考虑概率关于  $x_{CR}$  的  $M$  的概率分布  $P(M > k | x_{CR})$ 。

在网络域  $A$  中,假设主用户在第  $i$  次匀速直线运动长度  $L = l_i$ , 经过  $k$  个直线运动的时间段后,主用户没有进入干扰域的概率为:

$$P(M > k | x_{CR}) = \int_{L_1} \cdots \int_{L_k} (1 - P_{C(x_{CR}, l_1)}) \cdots (1 - P_{C(x_{CR}, l_k)}) dl_1 \cdots dl_k, \quad (1)$$

其中  $C(x_{CR}, l_i)$  是在  $x_{CR}$  附近,由随机变量  $L$  决定的。

虽然这些连续运动的长度不是独立的,但是可以认为每一段直线运动的长度是遍历的。也就是使主用户的运动从一切可能的点出发,遍历所有步长从而保证到达的位置是均匀分布的。因此,可以得到:

$$P(M > k | x_{CR}) = (1 - P_g(x_{CR}))^k = \left(1 - \int_L P_{C(x_{CR}, l)} f_{L(l)} dl\right)^k, \quad (2)$$

把关于  $x_{CR}$  的  $M$  的概率分布函数表示为:

$$P_g(x_{CR}) = \int_L P_{C(x_{CR}, l)} f_{L(l)} dl. \quad (3)$$

显然  $P_g(x_{CR})$  是每一段直线运动主用户成功进入干扰域的概率,相当于是  $M$  的平均值的倒数,

即平均经过  $E[M|x_{CR}]$  个直线运动的时间段数主用户进入任意个 CR 用户的干扰域。那么,有

$$E[M|x_{CR}] = (P_g(x_{CR}))^{-1}. \quad (4)$$

令  $\theta$  表示主用户在一个感知用户干扰域外的时间,  $D$  表示一段段匀速直线运动所用的时间。在移动模型中假定,  $D$  包括主用户经过一段运动后, 在同一个地点停留的时间。根据  $\theta$  的定义和不失普遍性的假设, 可将  $\theta$  表示为:

$$\theta = t - t_1 = \sum_{l=1}^M D_l + \xi - t_1, \quad (5)$$

其中  $D_l$  表示第  $l$  个运动所用的时间。而  $\xi = t - \sum_{l=1}^M D_l$  表示不足第  $(M+1)$  个运动所剩的时间。

由定义显然可以得到:

$$\bar{\theta} = E[\theta] = \bar{D} \cdot \bar{M}, \quad (6)$$

其中  $\bar{D} = E[D]$  表示每段直线运动的平均时间。

将式(6)带入式(3), 可以得到一般移动模型下主用户在感知用户干扰域外的平均时间  $\bar{\theta} = E[\theta]$  可以表示为:

$$\bar{\theta} = \bar{D} \int_A \frac{f_{x_{CR}}(x_{CR}) dx_{CR}}{\int_L \int_{C(x_{CR}, D)} f_{x_{PU}}(x_{PU}) dx_{PU} f_L(D) dl}, \quad (7)$$

设  $S$  表示主用户在任意一个感知用户干扰域内的逗留时间,  $\tau$  表示主用户连续两次进入感知用户干扰域之间的时间, 显然有  $\tau = S + \theta$ 。

即:

$$\bar{\tau} = E[\tau] = \bar{\theta} + \bar{S}, \quad (8)$$

由于事件  $I$  表示 CR 用户在 PU 用户的保护域内, 则有

$$\bar{S} = P(I) \bar{\tau}, \quad (9)$$

可得到对于一般随机模型, 主用户连续两次进入感知用户干扰域之间的平均时间  $\bar{\tau} = E[\tau]$ :

$$\bar{\tau} = \frac{\bar{\theta}}{1 - P(I)} = \frac{\bar{D} \int_A \frac{f_{x_{CR}}(x_{CR}) dx_{CR}}{\int_L \int_{C(x_{CR}, D)} f_{x_{PU}}(x_{PU}) dx_{PU} f_L(D) dl}}{1 - P(I)}, \quad (10)$$

其中  $P(I)$  表示事件  $I$  发生的概率, 事件  $I$  表示 CR 用户在 PU 用户的保护域内。

同样可以得到, 对于一般随机模型, 主用户在网络域  $A$  中移动,  $\tau$  的概率分布函数  $F_\tau(t)$  满足:

$$F_\tau(t) = P(\tau \leq t) \leq 1 - \int_A e^{-\frac{t}{\bar{D}} P_g(x_{CR})} f_{x_{CR}}(x_{CR}) dx_{CR}. \quad (11)$$

### 2.3 感知用户时间分配模型

#### 2.3.1 最优传输时间

最优传输时间满足:(1)在主用户移动环境下能够允许认知用户满足主用户干扰限制。(2)传输时间尽可能的长。

若  $F_\theta(x)$  为  $\theta$  的概率分布函数。当频谱感知的虚警概率足够小时, 一个 PU 在网络区域  $A$  内随机移动, 其最优移动传输时间  $T_{Tr}^{opt}$  为:

$$T_{Tr}^{opt} = F_\theta^{-1}\left(\frac{P_{int}}{P_{on}}\right), \quad (12)$$

式中  $F_\theta^{-1}$  是 PU 在连续两次到达干扰域的时间内在干扰域外的时间  $\theta$  的概率分布函数的反函数,  $P_{on}$  是 PU 处于“ON”状态, 即主用户占用频谱的概率,  $P_{int}$  是主用户通信所能接受的最大干扰概率。

然而实际上, 任何一种频谱感知算法的虚警概率都不可能为零, 因此实际上, 虽然认知网络能够提供的通信时长为  $T_{Tr}^{opt}$ , 感知用户能够利用的最优传输时间为:

$$T'_{Tr} = T_{Tr}^{opt} (1 - P_f), \quad (13)$$

其中  $P_f$  为频谱感知算法的虚警概率。

#### 2.3.2 感知时间门限

在主用户移动场景下, 若单独考虑频谱感知的虚警概率方面的最佳性能, 感知时间存在一个门限值, 称其为最优感知时间门限, 感知时间超过此门限时检测概率不增加, 而虚警概率会增大。当一个 PU 在网络区域  $A$  内按随机游动模型移动, 感知用户的频谱感知算法的检测概率  $P_d$  和虚警概率  $P_f$  分别表示为:

$$P_d = P(Y > \gamma | H_1) = P(Y > \gamma | H_1, D) P(D) + P(Y > \gamma | H_1, O) P(O) = P_{d1} P(D), \quad (14)$$

$$P_f = P(Y > \gamma | H_0) = P(Y > \gamma | H_0, D) P(D) + P(Y > \gamma | H_0, O) P(O) = P_{f10} + P_{f11}, \quad (15)$$

式中  $P(D) = \bar{S} / \bar{T}$ 。事件  $I$  表示 CR 用户在 PU 用户的保护域内, 事件  $O$  表示 CR 用户在 PU 用户的保护域外。式(15)和式(16)表明: 当观察频带时间大于平均逗留时间  $\bar{S}$  时一方面  $P_d$  不会增大; 另一方面  $P_f$  会增大。因此, 高效频谱感知的感知时间  $T_s$  一定与  $\bar{S}$  有关。

因此, 最优移动感知时间需要满足

$$T_s \leq \bar{S}. \quad (16)$$

实际的认知网络往往对频谱感知的虚警概率和检测概率有要求, 对于不同的频谱感知算法, 可以在感知时间少于主用户在感知用户干扰域内逗

留的时间的情况下,达到认知网络的虚警概率和检测概率的要求。因此式(16)可以写为:

$$T_s = \nu_{(P_d, P_f)} \bar{S} = \nu_{(P_d, P_f)} P(D) \bar{T} = \nu_{(P_d, P_f)} \frac{P(D)}{1 - P(D)} \bar{\theta}, \nu_{(P_d, P_f)} \in (0, 1], \quad (17)$$

其中  $\nu_{(P_d, P_f)}$  由认知网络目标检测准确度 ( $P_f, P_d$ ) 和采用的频谱感知算法直接决定。公式(21)提供了一种移动 PU 下设置  $T_s$  的实际方法,即  $\bar{S} \rightarrow 0, T_s \rightarrow 0$ , 也就是说,如果 PU 一直在 CR 用户的干扰域外,则感知该频带没有必要。若  $\bar{\theta} \rightarrow 0$ , 则主用户始终在认知用户的干扰范围内。 $T_s$  需按照静态网络设置。

### 2.3.3 移动场景下感知用户的时间分配模型

所有感知用户对主用户的干扰总体上仍应满足主用户所能容忍的最大干扰概率  $P_{int}$ , 从满足主用户通信需求的角度,可以得到在主用户运动的一个往复周期内,认知网络分配给感知用户的传输时间比例最大为  $\frac{T'_{Tx}}{\tau}$ , 感知用户可用的传输时间比例为:

$$\frac{T'_{Tx}}{\tau} = \frac{T_{Tx}^{opt}(1 - P_f)}{\tau}. \quad (18)$$

若把整段时间划分为若干个时隙,则保证各

$$f_{\vec{x}_{PU}}(\vec{x}_{PU}) = \begin{cases} f_{X_{PU}}(x_{PU}) & A = [0, a] \\ f_{X_{PU}Y_{PU}}(x_{PU}y_{PU}) & A = [0, a] \times [0, a] \\ f_{X_{PU}Y_{PU}Z_{PU}}(x_{PU}y_{PU}z_{PU}) & A = [0, a] \times [0, a] \times [0, a] \end{cases} \quad (19)$$

其中  $a$  表示主用户所在网络域的边长。

当  $2(R+L) \ll a$  时,任何一个维度下都有:

$$1 \approx \left[ 1 - \frac{2 \cdot (R+L)}{a} \right], \quad (20)$$

因此可忽略边界效应。由于  $P_g(x_{CR})$  可理解为下一段匀速直线运动主用户进入感知用户干扰域的概率。

当  $A = [0, a] \times [0, a] \times [0, a]$  时,在三维网络域  $A$  中,感知用户的分布近似为在  $[R+L, a-R-L] \times [R+L, a-R-L] \times [R+L, a-R-L]$  区域内的均匀分布,在整个体积为  $a \times a \times a = a^3$  的区域内,存在一个区域使主用户在经过一段匀速直线运动即可进入感知用户干扰域内,该区域面积是:

$$s_3 = \frac{4\pi}{3} ((R+L)^3 - R^3), \quad (21)$$

当  $L \ll R$  时,可以得到:

时隙传输时间的比例如式(18)所示,此时感知用户对主用户的干扰达到容限,此时系统提供的传输时间最长。在每个时隙内感知时间,需要综合频谱感知检测概率和虚警概率的性能进行选择,其余时间用作信道搜索。该时间分配方法是保证主用户通信质量的最优时间分配方法。

## 3 基于随机游走模型时间分配方法

### 3.1 主用户在干扰域内外的时间分配

在随机游走模型下,主用户的任意一段直线运动所选择的方向和速率都服从在  $[0, 2\pi]$  和  $[\nu_{min}, \nu_{max}]$  之间的均匀分布。每次匀速直线运动后,新的运动方向和运动速率又会在  $[0, 2\pi]$  和  $[\nu_{min}, \nu_{max}]$  之间随机等概率产生。

随机游走模型把主用户在某个位置的停留时间算在主用户的移动时间之内,即主用户的停留只影响了主用户移动的平均速度。根据随机游走模型的推论,主用户在空间中的位置是均匀分布的。因此,主用户的位置  $\vec{X}_{PU}$  是在主用户网络域中服从均匀分布的随机变量,其概率密度函数  $f_{\vec{x}_{PU}}(\vec{x}_{PU})$  可以表示为:

$$s_3 \approx 4\pi R^2 L. \quad (22)$$

由此可知,在  $s_3$  内的任意一个位置,主用户沿一定范围内的空间角运动最终到达的位置构成一个感知用户干扰域内的球面,该球面面积的积分占整个网络域的体积即为  $P_g(x_{CR})$ 。

$$P_g(x_{CR}) = \int_L^L P_C(x_{CR}, l) f_L(l) dl \approx \int_R^{R+L} 4\pi x^2 \int_{L \cos \omega}^L r / \sqrt{L^2 - r^2} dr dx / a^3 = \int_R^{R+L} 2\pi x^2 \sqrt{1 - \left( \frac{x^2 + L^2 - R^2}{2xL} \right)^2} / a^3 dx, \quad (23)$$

其中  $\cos \omega = \frac{x^2 + L^2 - R^2}{2xL}$ 。

主用户在网络域  $A$  中,根据随机游走模型(RWM),主用户连续两次进入感知用户干扰域

之间的时间间隔  $\overline{\tau_{\text{RWM}}}$  可以表示为:

$$\overline{\tau_{\text{RWM}}} = \frac{\bar{\theta}}{1 - P_{\text{RWM}}(I)}, \quad (24)$$

当  $A = [0, a] \times [0, a] \times [0, a]$  时,

$$\overline{\tau_{\text{3D-RWM}}} = \frac{\overline{Da^3}}{\int_R^{R+L} 2\pi x^2 \sqrt{1 - \left[ \frac{x^2 + L^2 - R^2}{2xL} \right]^2} dx (1 - P_{\text{3D-RWM}}(I))}, \quad (25)$$

$$\text{其中, } P_{\text{3D-RWM}}(I) = \frac{-1}{6} \left( \frac{R}{a} \right)^6 + \frac{8}{5} \left( \frac{R}{a} \right)^5 - \frac{3\pi}{2} \left( \frac{R}{a} \right)^4 + \frac{4\pi}{3} \left( \frac{R}{a} \right)^3.$$

一个 PU 在网络区域  $A$  内按随机游动模型连续两次进入感知用户干扰域的平均时间间隔的累积分布函数  $F_{\tau_{\text{RWM}}}(t)$  服从参数  $\Omega_{\text{RWM}}$  的指数分布:

$$F_{\theta_{\text{RWM}}} = P(\theta_{\text{RWM}} \leq t) \leq 1 - e^{-\Omega_{\text{RWM}} t} = \epsilon_{\Omega_{\text{RWM}}}(t), \quad (26)$$

其中  $\Omega_{\text{RWM}} = \frac{1}{\theta_{\text{RWM}}}$ .

主用户在感知用户干扰域之外的平均时间为

$$\bar{\theta} = E[\theta] = \overline{DM} = \overline{D}(P_g(x_{\text{CR}}))^{-1}, \quad (27)$$

主用户每一段匀速直线运动的平均距离为

$$\overline{L} = \overline{vD}, \quad (28)$$

将公式(27)和公式(28)带入公式(26), 可得:

$$\Omega_{\text{RWM}} = \frac{\int_R^{R+L} 2\pi x^2 \sqrt{1 - \left[ \frac{x^2 + L^2 - R^2}{2xL} \right]^2} dx}{a^2 \overline{D}}$$

$$A = [0, a] \times [0, a] \times [0, a]. \quad (29)$$

### 3.2 感知用户最优传输时间和感知时间门限

主用户在网络区域  $A$  内按随机游走模型移

$$T_{\text{3D-s}} = \frac{\overline{Da^3} \nu_{(P_d, P_f)} \left[ -\frac{1}{6} \cdot \left( \frac{R}{a} \right)^6 + \frac{8}{5} \left( \frac{R}{a} \right)^5 - \frac{3\pi}{2} \left( \frac{R}{a} \right)^4 + \frac{4\pi}{3} \left( \frac{R}{a} \right)^3 \right]}{\int_R^{R+L} 2\pi x^2 \sqrt{1 - \left[ \frac{x^2 + L^2 - R^2}{2xL} \right]^2} dx [1 - P_{\text{3D-RWM}}(I)]}, \quad (34)$$

其中

$$P_{\text{3D-RWM}}(I) = \frac{-1}{6} \cdot \left( \frac{R}{a} \right)^6 + \frac{8}{5} \cdot \left( \frac{R}{a} \right)^5 - \frac{3\pi}{2} \left( \frac{R}{a} \right)^4 + \frac{4\pi}{3} \cdot \left( \frac{R}{a} \right)^3, \quad (35)$$

公式(35)表明  $T_s$  取决于 5 个因素: (1) 归一化保护距离; (2) 网络区域  $A$ ; (3) 平均主用户速

动的最优传输时间可表示为:

$$T_{T_x}^{\text{opt}} = F_{\text{PU-RWM}}^{-1} \left[ \frac{P_{\text{int}}}{P_{\text{on}}} \right] \geq T_x = \epsilon_{\Omega_{\text{RWM}}}^{-1} \left[ \frac{P_{\text{int}}}{P_{\text{on}}} \right] = \overline{\theta_{\text{RWM}}} \log \left[ \frac{P_{\text{on}}}{P_{\text{on}} - P_{\text{int}}} \right], P_{\text{on}} \geq P_{\text{int}}. \quad (30)$$

式中  $P_{\text{on}}$  表示主用户占用频谱的概率,  $P_{\text{int}}$  表示主用户是最大干扰的概率。

当  $A = [0, a] \times [0, a] \times [0, a]$  时

$$\overline{\theta_{\text{3D-RWM}}} = \frac{\overline{Da^3}}{\int_R^{R+L} 2\pi x^2 \sqrt{1 - \left[ \frac{x^2 + L^2 - R^2}{2xL} \right]^2} dx}, \quad (31)$$

当考虑频谱感知算法的虚警概率为  $P_f$  时, 最优传输时间  $T'_{T_x, \text{RWM}}$  可以表示为

$$T'_{T_x, \text{RWM}} = (1 - P_f) \overline{\theta_{\text{RWM}}} \log \left[ \frac{P_{\text{on}}}{P_{\text{on}} - P_{\text{int}}} \right], P_{\text{on}} \geq P_{\text{int}}, \quad (32)$$

式(32)表明感知用户的最优传输时间与以下 4 个因素有关: (1) 归一化保护距离; (2) 平均主用户速度; (3) 感知准确度; (4) 每一步的平均时间。除了第 3 个因素之外, 其余的因素都与主用户的移动性有关, 因此感知用户的时间分配与主用户的移动性关系密切。

当一个 PU 在网络域  $A$  内按随机游走模型移动, 最优移动感知时间满足:

$$T_s = \nu_{(P_d, P_f)} \overline{S} = \nu_{(P_d, P_f)} P(I) \bar{\tau} = \nu_{(P_d, P_f)} \frac{P(I)}{1 - P(I)} \bar{\theta}, \nu_{(P_d, P_f)} \in (0, 1], \quad (33)$$

其中  $\nu_{(P_d, P_f)}$  与目标检测准确度 ( $P_d, P_f$ ) 和采用的感知算法相关。

当  $A = [0, a] \times [0, a] \times [0, a]$  时,

度; (4) 感知准确度; (5) 每一步的平均时间。假设  $L \ll R$ , 可以认为  $T_s$  只取决于前 4 个因素。

在满足主用户通信需求的条件下, 在主用户运动的一个往复周期内, 认知网络分配给感知用户的传输时间比例最大为  $\frac{T_{T_x}^{\text{opt}}}{\tau}$ , 感知用户可用的传输时间比例为:

$$\frac{T'_{Tx}}{\tau} = \frac{T_{Tx}^{opt}(1-P_f)}{\tau} = \frac{\overline{\theta_{RWM}} \log \left\{ \frac{P_{on}}{P_{on}-P_{int}} \right\} (1-P_f)}{\tau_{RWM}} \quad (36)$$

随机游走模型下,令每个时隙内传输时间所占的比例为 $\frac{T_{Tx}^{opt}}{\tau_{RWM}}$ ,其余时间为频谱感知时间和信道搜索时间,则主用户连续两次进入感知用户干扰域的时间间隔趋于统计平均值时,感知用户恰好满足主用户对干扰概率的要求,即所得的基于随机游走模型的感知用户时间分配方案,理论上在满足主用户干扰概率的条件下,感知用户传输时间最长,性能最优。

### 3.3 蒙特卡洛仿真验证

由于主用户所在网络域大多是三维空间,因此本节对主用户在三维网络域中的移动场景进行了仿真验证。主用户按照随机游走方式运动,可看作一个随机试验,为了获得其统计特性,本节采用蒙特卡洛仿真,以验证得到的最优传输时间和感知时间门限公式的准确性。由于在二维网络域和三维网络域下,主用户在感知用户干扰域之外的时间表表达式是一个不可积的积分。给定一组主用户的保护半径 $R$ 和平均移动距离 $L$ 能得到唯一确定的值。为验证本章理论推导所得公式的准确性,本节设 $R=L$ ,此时主用户在下一段匀速直线运动进入感知用户干扰域的概率为:

$$P_g(x_{CR}) = \frac{142 \sqrt{2} \pi R^3}{105 a^3} \quad A=[0, a] \times [0, a] \times [0, a]. \quad (37)$$

单感知用户情况下,感知用户和主用户初始位置的随机性很强,为使主用户的运动尽快满足主用户的统计特性,在网络域的每个维度上设置了 $\lceil a/2(R+L) \rceil$  (表示取整函数)个感知用户,使得主用户在下一段匀速直线运动进入不同感知用户干扰域的区域彼此不相互重叠,主用户在感知用户的干扰域外的时间缩短为原来的 $\lceil 2(R+L)/a \rceil^\rho$ ,其中 $\rho$ 表示网络域所在空间的维度,加快了仿真的进程。主用户在所有感知用户干扰域外的时间的数学期望为:

$$E[\theta_\rho] = \frac{6.720R}{71 \sqrt{2} \pi (v_{max} + v_{min})} \\ A=[0, a] \times [0, a] \times [0, a]. \quad (38)$$

同时,主用户在感知用户干扰域内的时间变为了原来的 $\lceil a/2(R+L) \rceil^\rho$ ,在整个类周期性的进

出感知用户干扰域的运动中,主用户在感知用户干扰域之外的时间比例的期望为:

$$\frac{E[\theta_\rho]}{E[\tau_\rho]} = \frac{\frac{E[\theta]}{\lceil a/2(R+L) \rceil^\rho}}{\frac{E[\theta]}{\lceil a/2(R+L) \rceil^\rho} + \lceil a/2(R+L) \rceil^\rho E[S]} = \frac{1}{1 + \left[ \frac{a}{2(R+L)} \right]^{2\rho} \frac{P(I)}{1-P(I)}}. \quad (39)$$

实际的通信场景中,如果归一化的保护半径 $R/a$ 过小,则主用户和感知用户之间很难产生干扰; $R/a$ 过大,则导致移动场景下主用户对感知用户通信的影响很大,认知无线网络中的感知用户不能使用主用户的空闲频谱。对于主用户在内移动二维网络域的仿真参数设定如下:

主用户所在的无线网 $A$ 的覆盖半径 $a=1000$ ,主用户的最小运动速度 $v_{min}=10$ ,主用户的最大运动速度 $v_{max}=90$ ,感知用户个数 $K=\lceil a/2(R+L) \rceil^3$ ,感知用户的干扰半径和主用户每一个匀速运动的平均距离 $R=L=10:5:50$ ,初始时刻随机选取主用户和感知用户的位置,每一组随机位置对应一个场景,每个场景做100组实验,每个场景的时间为理论上主用户完成2000次进出感知用户干扰域往复运动的时间。

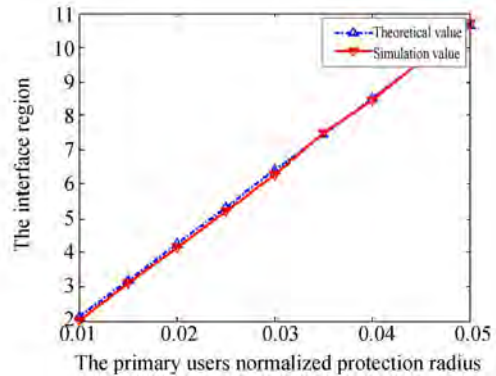


图1 三维网络域主用户在感知用户干扰域外的时间与主用户归一化保护半径的关系图

Fig. 1 Time of primary user out of interference region of other users versus its normalized protection radius in three-dimensional network domain

三维网络域下主用户在所有感知用户干扰域外的时间与主用户归一化保护距离之间也为线性关系。为方便验证理论的正确性,图1对主用户连续两次进入 $K=\lceil a/2(R+L) \rceil^3$ 个感知用户干

扰域时间间隔内,主用户在所有感知用户干扰域外的时间的理论值和仿真值与主用户归一化保护距离之间的关系进行了仿真。在三维网络域总的感知用户数与  $R^3$  成反比,因而主用户在单一感知用户干扰域外的时间与归一化保护距离二次方成反比关系。即归一化保护距离越大,主用户在感知用户干扰域外的时间越短。而且相比于二维网络域,三维网络域中的主用户在单一感知用户干扰域外的时间随主用户归一化保护半径的增大减小得更快。

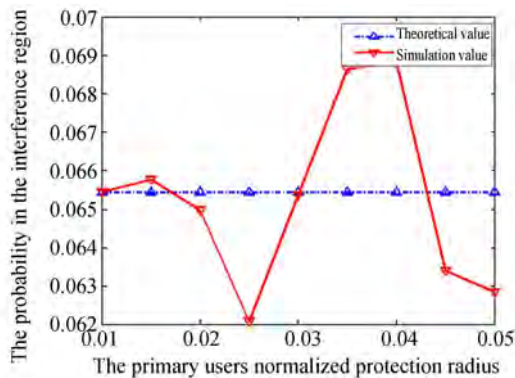


图 2 三维网络域主用户在感知用户干扰域内的概率与主用户归一化保护半径的关系图

Fig. 2 Probability of primary user in interference region of other users versus its normalized protection radius in three-dimensional network domain

图 2 对主用户在连续两次进入  $K = \lceil a/2(R+L) \rceil^3$  个感知用户干扰域时间间隔内,主用户在所有感知用户干扰域内的概率的理论值和仿真值与主用户归一化保护距离之间的关系进行了仿真。在三维网络域总的感知用户数与  $R^3$  成反比,因而归一化保护距离越大,主用户在感知用户干扰域内的概率越大。

图 1 和图 2 验证了主用户在三维网络域中移动的场景下,理论推导的三维网络域下在连续两次进入  $K = \lceil a/2(R+L) \rceil^3$  个感知用户干扰域时间间隔内,主用户在感知用户干扰域内和感知用户干扰域外的时间分配模型的正确性。由图 1 和图 2 可知,在三维网络域下,由于主用户的移动方向上更随机,主用户在单一感知用户干扰域外的时间更长,所占的比例更大,感知用户传输时间更长。

当主用户占用频谱概率  $P_{on} = 1/3$ , 三维网络

域下主用户允许的最大干扰概率分别为 0.02 和 0.05 时的最优传输时间与归一化保护半径的关系进行了仿真,如图 3 所示。理论值与仿真值接近,验证了三维网络域下感知用户最优传输时间门限的表达式正确性。由于在三维网络域总的感知用户数与  $R^3$  成反比,因而归一化保护距离越大,单一感知用户的最优传输时间越小,且其随保护距离增大而减小的速度比二维网络域中的最优传输时间快。

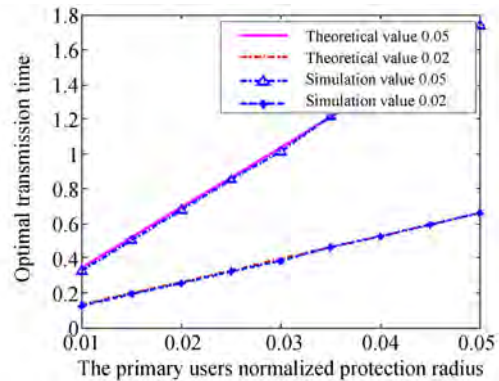


图 3 三维网络域认知网络感知用户最优传输时间与主用户归一化保护半径的关系图

Fig. 3 Optimal transmission time of cognitive users versus normalized protection radius of primary user in three-dimensional network domain

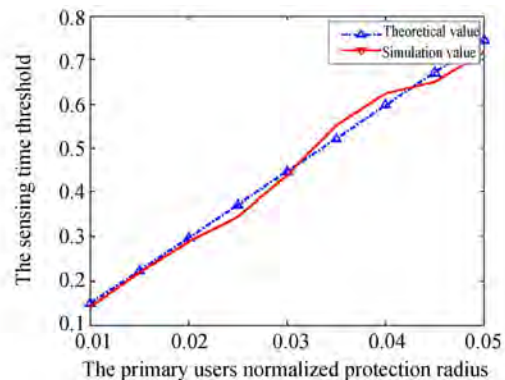


图 4 三维网络域感知时间门限与主用户归一化保护半径的关系图

Fig. 4 Sensing time threshold versus normalized protection radius of primary user in three-dimensional network domain

图 4 对三维网络域下感知用户的感知时间门限与归一化保护半径的关系进行了仿真,仿真值与理论值相近。由于在三维网络域总的感知用户

数与  $R^3$  成反比,因此归一化保护距离越大,单一感知用户的感知时间门限也随之增大。

## 4 结 论

本文研究了在主用户移动场景下,基于主用户移动性的感知用户时间分配方法,建立了主用

户移动场景下主用户在感知用户干扰域内及在干扰域外的时间分配模型和感知用户时间分配模型,理论推导了感知用户最优传输时间和感知时间门限的表达式,且在随机游走模型下对以上两个参数表达式进行了简化,并通过蒙特卡洛仿真对两个参数的表达式加以验证,验证了算法的有效性。

### 参考文献:

- [1] GHASEMI A, SOUSA E S. Optimization of spectrum sensing for opportunistic spectrum access in cognitive radio networks[C]. *Consumer Communications and Networking Conference, Ccnc*. 2007: 1022-1026.
- [2] ZOU Y, YAO Y D, ZHENG B. A cooperative sensing based cognitive relay transmission scheme without a dedicated sensing relay channel in cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(2): 854-858.
- [3] GHASEMI A, SOUSA E S. Optimization of spectrum sensing for opportunistic spectrum access in cognitive radio networks[C]. *Consumer Communications and Networking Conference, Ccnc*. 2007: 1022-1026.
- [4] HUYNH C K, LEE W C. Two-dimensional Genetic algorithm for OFDM-based cognitive radio systems [C]. *Proceedings of 2011 IEEE 3rd International Conference on IEEE Communication Software and Networks (ICCSN)*, 2011: 100-105.
- [5] TIAN Z, TAFESSE Y, SADLER B M. Cyclic feature detection with sub-Nyquist sampling for wide-band spectrum sensing[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2012, 6(1): 58-69.
- [6] ELZANATI A M, ABDELKADER M F, SEDDIK K G, et al.. Collaborative compressive spectrum sensing using kronecker sparsifying basis[C]. 2013 *IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC)*, 2013: 2902-2907.
- [7] SHI Q, COMANICIU C, JAFFRES-RUNSER K. An auction-based mechanism for cooperative sensing in cognitive networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(8): 3649-3661.
- [8] SHAMI T M, EL-SALEH A A, KAREEM A M. On the detection performance of cooperative spectrum sensing using particle swarm optimization algorithms[C]. *Proceedings of 2014 IEEE 2nd International Symposium on the Telecommunication Technologies (ISTT)*, 2014: 110-114.
- [9] DIAS V B R C, De SOUZA R A. Performance of centralized data-fusion cooperative eigenvalue-based spectrum sensing under correlated shadowed fading [C]. *Proceedings of the 2015 International Workshop on Telecommunications (IWT)*, 2015: 1-6.
- [10] CHOI K W, HOSSAIN E, DONG I K. Cooperative spectrum sensing under a random geometric primary user network model[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(6): 1932-1944.
- [11] LAKHEKAR G V, ROY R G. A fuzzy neural approach for dynamic spectrum allocation in cognitive radio networks[C]. *Proceedings of 2014 International Conference on the Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, 2014: 1455-1461.
- [12] MITRA D, MAHAPATRA R D. FIS based cognitive radio scheduling[C]. *Proceedings of 2013 IEEE International Conference on the Fuzzy Systems (FUZZ)*, 2013: 1-7.
- [13] SHENSHENG T, MARK B L. Modeling and analysis of opportunistic spectrum sharing with unreliable spectrum sensing[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(4): 1934-1943.
- [14] PAURA L, SAVOIA R. Mobility-aware sensing enabled capacity in cognitive radio networks[C]. *Proceedings of 2013 IEEE International Workshop on the Measurements and Networking Proceedings (M&N)*, 2013: 179-183.
- [15] GUERRINI M, RUGINI L, BANELLI P. Sensing-throughput tradeoff for cognitive radios [C]. *Proceedings of 2013 IEEE 14th Workshop on the*

- Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, 2013: 115-119.
- [16] KELKAR A, QI C. Spectrum sensing scheduling in a cost-based framework [C]. *Proceedings of 2012 Conference Record of the Forty Sixth Asilomar Conference on the Signals, Systems and Computers (ASILOMAR)*, 2012: 1051-1055.
- [17] KANG K. Optimal time allocation for multi-hop relay cognitive radio network [C]. *Proceedings of 2014 International Conference on the Wireless Communication and Sensor Network (WCSN)*, 2014: 5-10.
- [18] QIANG L, XIN W, YONG C. Scheduling of sequential periodic sensing for cognitive radios [C]. *2013 Proceedings of the INFOCOM*, 2013: 2256-2264.
- [19] JEN-FENG H, GUEY-YUN C, SHIN-FA H, *et al.*. A self-diagnosis method for spectrum sensing algorithm in cognitive radio networks [C]. *Proceedings of 2015 Eighth International Conference on the Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU)*, 2015: 25-29.
- [20] JUNE H, SEONG-LYUN K. Cross-layer optimization and network coding in CSMA/CA-based wireless multihop networks [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2011, 19(4): 1028-1042.
- [21] KARMOKAR A K, SENTHURAN S, ANPAL-AGAN A. POMDP-based cross-layer power adaptation techniques in cognitive radio networks [C]. *Proceedings of the Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2012 IEEE, 2012: 1380-1385.
- [22] YUEHUI M, YOUYUN X, DONGMEI Z. Power allocation in heterogeneous networks: Limited spectrum-sensing ability and combined protection [J]. *Journal of Communications and Networks*, 2011, 13(4): 360-366.
- [23] ALEMSEGED Y D, TRAN H N, SUN C, *et al.*. Media access scheme in distributed spectrum sensing [C]. *IEEE Vehicular Technology Conference Fall*, 2010: 1-5.
- [24] CHANG K, SENADJI B. Spectrum sensing optimisation for dynamic primary user signal [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2012, 60(12): 3632-3640.
- [25] 王征, 何云丰, 曹小涛, 等. 基于 FPGA 的大面阵 CMOS 相机高速率电子学系统设计 [J]. *液晶与显示*, 2016, 31(2): 172-178.
- ZHENG W, HE Y F, CAO X T, *et al.*. Design of large area array CMOS of high speed electronic camera system based on FPGA [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016: 31(2): 172-178.
- [26] 郭玉强, 王翼飞, 刘建龙, 等. 取向层厚度及介电常数对 TN-LCD 影响的研究 [J]. *液晶与显示*, 2016: 31(11): 1018-1022.
- GUO Y Q, WANG Y F, LIU J L, *et al.*. Effect of thickness and dielectric constant of alignment layer on the TN-LCD [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016: 31(11): 1018-1022. (in Chinese)

#### 作者简介:



于洪涛(1983—),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,2009年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要研究方向为移动通信理论研究、下一代无线宽带通信系统资源广利算法和协议设计。E-mail: htyu@hit.edu.cn

#### 导师简介:



张中兆(1951—),男,北京人,教授、博士生导师,1984年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要研究方向为数据通信、移动通信和卫星通信。E-mail: zzzhang@hit.edu.cn