

认知网络主用户吞吐量受限下的传输半径分析与仿真

廖勇* 杨士中 陈徐洪 程金波 彭小秦
(重庆大学通信与测控中心 重庆 400044)

摘要: 该文针对认知无线电中认知用户对主用户接收机造成的并发通信干扰问题,采用信息论的观点,在主用户吞吐量门限和主用户通信中断概率的限制条件下,首先分析了认知用户对主用户接收机的干扰功率,并引用马尔科夫不等式,推导出主用户传输半径范围,同时数值分析表明:在其他条件一定时,主用户平均吞吐量、认知用户接入数目和主用户传输半径之间是相互量化制约的关系。其次,改进开发了一个基于中断概率的认知无线网络仿真平台,分析了在不同认知用户密度下,主用户吞吐量和传输半径之间的实际作用关系,验证了所提模型的合理性和正确性。

关键词: 认知无线电; 服务质量; 干扰信道; 并发通信; 传输半径

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)01-0001-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00493

Analysis and Simulation of the Transmission Radius of the Cognitive Network Primary User under Limited Throughput

Liao Yong Yang Shi-zhong Chen Xu-hong Cheng Jin-bo Peng Xiao-qin

(Center of Communication and Tracking Telemetry Command, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: This paper concerns the concurrent communication interference problem that cognitive user conducts to primary user's receiver under cognitive radio network. Adopted the Information theory viewpoint, it analyzes the interference power that cognitive user conducts to primary user's receiver under the restrictive condition of a throughput threshold and communication outage probability for primary user. Moreover, it cites the Markov inequality to deduce out the domain of primary user's transmission radius. Meanwhile, numerical analysis indicates that under certain conditions the correlation of the average throughput of primary user, the accessed number of cognitive user and primary user's transmission radius is quantitatively mutual restriction. Eventually, this paper develops a network simulation platform for cognitive radio based on outage probability and analyzes the practical function relation between primary user's throughput and transmission radius under different density of cognitive user, which validates the rationality and correctness of the model.

Key words: Cognitive Radio (CR); Quality of Service (QoS); Interference channel; Concurrent communication; Transmission radius

1 引言

认知无线电诞生的目的是提高空闲频谱的利用率,近年来引起了众多研究人员的注意,而在认知网络中主用户和认知用户并发(underlay)通信时的多信道干扰问题是一个尚未得到解决的基础通信问题^[1]。文献[2-6]在认知用户和主用户基础通信方面做了大量的工作,其中,文献[2]考虑了在单对主用户发射机和接收机的链路下, n 对认知用户发射机和接收机并发通信的问题,并且首次提出中断概率

对主用户吞吐量的影响,只要认知用户数目一定,认知用户链路总吞吐量随 $n \rightarrow \infty$ 时呈线性增长,并且开发出“主用户专属区域”(Primary Exclusive Region, PER)模型,在此区域内认知用户不能通信;文献[3]在文献[2]的基础上进一步阐述了PER,并分析了PER外的认知用户对主用户接收机的干扰及PER的传输半径极限问题;文献[4]研究了 n 个均匀分布在主用户周围的认知用户,在采用单跳传输的方式和主用户进行并发通信时,认知用户的平均网络吞吐量随 n 增长的关系:当 n 较小时,吞吐量随 n 呈线性增长,当 n 较大时,吞吐量按照 $n \log(n)$ 呈非线性增长;文献[5]分析了在Ad hoc网络和认知网络这两种不同网络模型下总吞吐量的变化情况,

2011-05-25 收到, 2011-08-29 改回

中央高校基本科研业务费专项资金(CDJXS11161157)和重庆市科委信息制造业重大科技专项(CSTC, 2009AB2167)资助课题

*通信作者: 廖勇 liaoy@cqu.edu.cn

并推导出当节点数 $n \rightarrow \infty$ 时, 不同网络下节点容量的量化表达式; 文献[6]继续研究了在 Ad hoc 网络下主用户和认知用户通信的吞吐量问题, 并发现, 当认知用户密度比主用户密度大时, 两种网络下吞吐量的变化规则是一样的。但是以上研究并没有深入分析主用户传输半径、认知用户数目以及主用户吞吐量三者之间的相互关系, 并且仅限于对认知模型进行了数值分析, 还没有通过认知网络仿真平台验证其结论的合理性和实用性。文献[7]采用和文献[2]相同的网络研究模型, 对主用户和认知用户网络吞吐量和延迟性能进行分析后, 得出只要采用合适的传输机制, 两种网络的性能可以达到一种相对平衡, 但是也和上述文献[2-6]存在相同的问题。文献[8]综合研究了干扰认知无线网络的因素, 强调了认知网络信道干扰主要通过主用户接收机体现, 同时通过对信道干扰的分析确定了明确的研究对象。

针对以上问题, 本文主要进行了以下研究: 首先构建并分析了典型的认知网络主用户和认知用户并发通信的几何模型。其次根据信息论的观点, 分析了认知用户对主用户接收机的干扰功率和平均干扰功率, 并得出在主用户吞吐量受限的前提下, 主用户传输半径随认知干扰用户数目的变化趋势。最后通过设计仿真软件对典型认知网络进行仿真, 验证了所提模型的合理性和正确性。

2 认知网络拓扑

图 1 是典型的认知用户和主用户并存的网络, 共存于边长为 L 的正方形区域内, 其中主用户网络用 PUN(Primary User Network)表示, 认知用户网络用 CUN(Cognitive User Network)表示。PU_s 和 PU_d 分别表示 2 个主用户, 前者表示发射机, 后者表示接收机, 并且在同一个 PUN 里面, 只有一对 PU_s 和 PU_d, L_p 表示主用户的传输半径。CU_{*i*} ($i=1, 2, \dots, n$) 表示认知用户节点, L_{c_i} 表示 CU_{*i*} 到 PU_d 的干扰通信距离。在方形区域里面主用户网络数目出现的概率服从泊松分布, 而认知用户数以泊松分布的概率出现在主用户网络的周围, 并且随机进行动态频谱接入, 组网采用的是 Ad hoc 方式^[9]。

3 接收机的干扰分析

3.1 分析假设

由于实际的认知无线网络传输过程非常复杂, 为方便讨论, 我们去掉一些对分析影响不大的条件, 在不影响最后结论正确性的前提下, 做如下假设:

(1) 主用户接收机受到的干扰只来自周围一定范围内正在通信的认知用户, 超过一定半径之后,

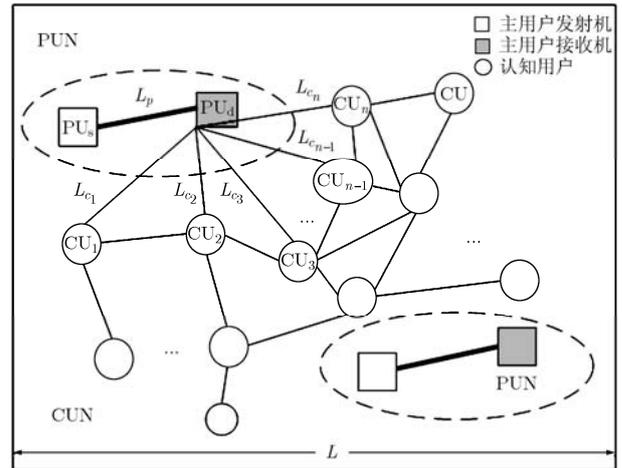


图 1 典型的认知网络主用户和认知用户拓扑

由于路径损耗衰落和接收机灵敏度的缘故, 不对主用户接收机造成干扰;

(2) 相邻主用户网络之间不造成干扰, 即本地发射机不会对相邻的接收机造成干扰;

(3) 对整个网络而言, 传输距离并不远(几百米之内), 路径损耗不能直接使用经典的无线信道大尺度损耗, 我们采用一种短距离计算信道损耗的方法^[3]

$$\Delta = A/d^{\alpha/2} \quad (1)$$

Δ 是一个电压衰落比例, A 是频率相关常数, d 是发射机和接收机之间的距离, α 是路径衰落因子(通常取大于 2 的值)。为方便讨论, 我们归一化 A 为 1;

(4) 假设信道为加性高斯白噪声信道, 噪声的分布满足均值为 0, 方差为 δ^2 的高斯分布;

(5) 假设主用户网络发射机的功率都为定值 P_p , 所有认知用户发射机的功率也都为定值 P_c ;

(6) 假定在主用户传输半径(以下简称传输半径) L_p 内, 认知用户不能并发进行通信。

3.2 分析过程: 信息论观点

认知无线电的主要目的是满足主用户 QoS 要求的前提下, 让更多的认知用户动态接入频谱。本文主要分析在满足主用户吞吐量要求的前提下, 认知用户对其接收机的干扰。

假设主用户实际传输速率为 C , 要达到的平均吞吐量不能低于主用户最低吞吐量 C_0 , 我们可以通过概率函数建模来描述这一 QoS 要求, 表达式为

$$\Pr[C \leq C_0] \leq \beta, \quad 0 \leq \beta \leq 1 \quad (2)$$

$\Pr(\cdot)$ 是一个概率函数, β 是一个中断概率, 式(2)表示在传输的过程中实际吞吐量小于吞吐量 C_0 的概率必须小于概率 β , 这样才能保证最后得到的平均吞吐量在 C_0 之上。

由香农公式, 我们得到

$$C = \log_2 \left(1 + \frac{S}{I + N} \right) \quad (3)$$

S 是接收到的有用信号功率, I 是接收到的干扰功率, N 是噪声功率。

显然主用户接收机接收到的主用户发射机功率、认知用户的干扰功率和平均噪声功率分别为

$$S = P_p \Delta_p^2 \quad (4)$$

$$I = \sum_{i=1}^n P_c \Delta_{c_i}^2 \quad (5)$$

$$N = \delta^2 \quad (6)$$

Δ_p^2 是主用户发射机的功率衰减因子, $\Delta_{c_i}^2$ 是认知用户发射机功率衰减因子。将图 1 的 L_p 代入式(4)得

$$S = P_p / L_p^2 \quad (7)$$

为计算出认知用户对接收机产生的干扰, 我们对图 1 进行抽象建模, 并且只分析其中一个主用户网络和附近一定区域内的认知用户, 得到图 2。

图2(a)是认知用户干扰主用户通信的一般模型, 其中, $L_{p_{\max}}$ 为满足中断概率 β 且达到最低吞吐量 C_0 的主用户最远实际传输半径; R 是主用户在没有干扰时主用户传输的最远距离, 也就是干扰半径, 在本文中只跟主用户发射功率 P_p 和接收机灵敏度有关; ω 为认知干扰用户区域对应的圆心角, 其角平分线为节点 A 和 B 的连线, 实际大小与认知用户发射机功率 P_c 和主用户接收机灵敏度有关。图 2(b)为一种极限情况, 主用户实际传输半径 L_p 刚好等于满足中断概率 β 且达到最低吞吐量 C_0 的主用户最远实际传输半径 $L_{p_{\max}}$ 。

为便于进行数值推导及求解, 本文以图 2(b)为精确模型进行分析。

为了求出平均干扰功率, 假设任意一个认知用户和主用户发射机的夹角为 θ , 到达主用户发射机

的距离为 r , 显然可以在这 3 个节点组成的 $\triangle ABC$ 中, 利用余弦定理求出

$$d(r, \theta) = r^2 + L_p^2 - 2L_p r \cos \theta \quad (8)$$

显然, 这和图 1 认知用户对主用户接收机的距离表达是一致的, $L_{c_i} = d(r, \theta)$, θ 均匀分布在 $[0, 2\pi]$ 内, r 的概率密度为

$$f(r) = \frac{2r}{R^2 - L_p^2}, \quad L_p \leq r \leq R \quad (9)$$

单个的认知用户对接收机产生的干扰为

$$\bar{I} = \int_{L_p}^R \frac{2r P_c}{(R^2 - L_p^2) r^\alpha} dr = \frac{2P_c}{(R^2 - L_p^2)(\alpha - 2)} \cdot \left(\frac{1}{L_p^{\alpha-2}} - \frac{1}{R^{\alpha-2}} \right) \quad (10)$$

在这个环形区域内, 认知用户的总数为

$$m = \lambda_c \pi (R^2 - L_p^2) \quad (11)$$

由分析假设(1)可知, 并不是所有圆环内的认知用户对主用户接收机都能造成干扰, 由图 2(b)可以看出, 只有圆心角 ω ($\omega \in [0, 2\pi]$) 对应的圆环弧段内的认知用户才能对主用户接收机造成干扰, 其认知干扰用户数为

$$n = \frac{\omega}{2\pi} m = \frac{\omega}{2\pi} \lambda_c \pi (R^2 - L_p^2) = \frac{\omega}{2} \lambda_c (R^2 - L_p^2) \quad (12)$$

λ_c 为泊松分布, 那么在认知用户干扰区域内, 所有认知用户干扰的均值为

$$E[I] = n \bar{I} = \frac{\omega \lambda_c P_c}{(\alpha - 2)} \left(\frac{1}{L_p^{\alpha-2}} - \frac{1}{R^{\alpha-2}} \right) \quad (13)$$

4 传输半径分析

第 3 节分析了主用户接收机的干扰功率, 用 Θ 等效替换 $\text{Pr}(\cdot)$ 函数。

由式(2)得

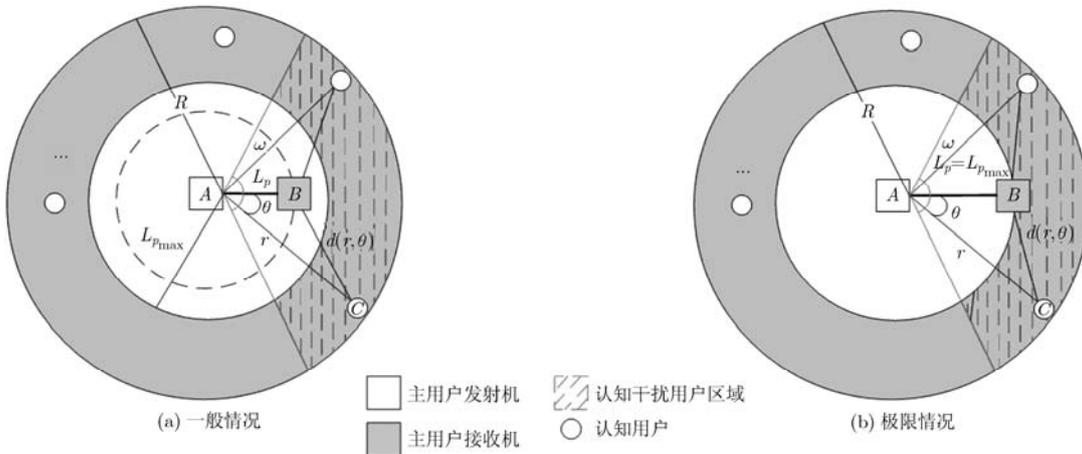


图 2 认知用户对主用户通信的干扰模型

$$\begin{aligned}\Theta &= \Pr \left[\log_2 \left(1 + \frac{P_p / L_p^\alpha}{I + \delta^2} \right) \leq C_0 \right] \\ &= \Pr \left[I \geq \frac{P_p / L_p^\alpha}{(2^{C_0} - 1)} - \delta^2 \right]\end{aligned}\quad (14)$$

由式(14)可得, 如果没有干扰, 那么传输距离应该最大, 为 R

$$R \equiv \left(\frac{P_p}{\delta^2(2^{C_0} - 1)} \right)^{1/\alpha} \geq L_p \quad (15)$$

为了能在有确定的主用户吞吐量要求的前提下, 计算出主用户接收机的传输范围, 我们先给出一个引理:

引理(马尔科夫不等式): 设 X 是样本空间 Ω 上的非负随机变量且有有限期望, 则

$\forall \varepsilon > 0, P(X \geq \varepsilon) \leq E(X)/\varepsilon$, 其中等号成立当且仅当 $P(X \in \{0, \varepsilon\}) = 1$ 。

显然 I 是符合这个条件的随机变量,

$$\varepsilon = \frac{P_p / L_p^\alpha}{(2^{C_0} - 1)} - \delta^2 \quad (16)$$

将式(14)-式(16)代入马尔科夫不等式之后, 得到

$$\Theta \leq \frac{E[I]}{\frac{P_p / L_p^\alpha}{(2^{C_0} - 1)} - \delta^2} \quad (17)$$

由式(13), 当 $R \rightarrow \infty$ 时, $E[I]$ 的上限为

$$E[I]_{UB} = \frac{\omega \lambda_c P_c}{(\alpha - 2) L_p^{\alpha-2}} \quad (18)$$

将 $E[I]$ 代入式(17), 又 $\Theta \leq \beta$, 可得

$$\Theta \leq \beta \leq \frac{\frac{\omega \lambda_c P_c}{(\alpha - 2) L_p^{\alpha-2}}}{\frac{P_p / L_p^\alpha}{2^{C_0} - 1} - \delta^2} \quad (19)$$

化简式(19),

$$\left(\frac{P_p / L_p^\alpha}{2^{C_0} - 1} - \delta^2 \right) \beta \leq \frac{\omega \lambda_c P_c}{2 L_p^{\alpha-2}} \quad (20)$$

再次化简式(20)

$$\frac{1}{L_p^\alpha} \frac{P_p \beta}{2^{C_0} - 1} - \frac{\omega \lambda_c P_c}{2 L_p^{\alpha-2}} - \delta^2 \beta \leq 0 \quad (21)$$

令式(21)=0, 即可求出主用户传输半径的精确范围。

为更好地理解式(21), 我们进行数值分析, 其结果如图3所示。

从图3中可知, 当中断概率 β 一定时, 随着认知用户密度 λ_c 的增大, 主用户传输半径 L_p 会随之减小, 这是因为当认知用户密度 λ_c 增大后, 主用户受到的干扰增大, 导致传输半径 L_p 变小; 当认知用户密度 λ_c 不变时, 主用户传输半径 L_p 会随着中断概率

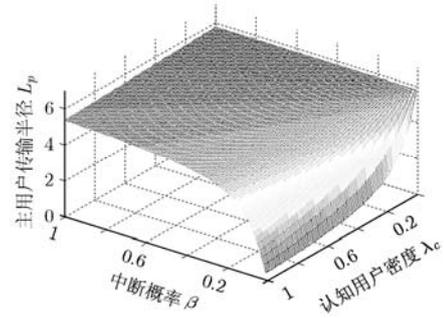


图3 当 $\omega = \pi/2$, $P_p=100$, $P_c=1$, $\delta^2=1$, $C_0=1$, $\alpha=4$ 时, λ_c , L_p 和 β 三者之间的关系

β 的增大而增大, 这是因为干扰一定时, 主用户中断概率 β 的增大意味着容忍通信中断的能力增强, 这就允许主用户有更远的传输半径; 当主用户传输半径 L_p 保持不变时, 随着认知用户密度 λ_c 的增大, 中断概率 β 会随之变大。

通过以上推导和分析, 可以得出结论: 在其他条件一定下, 主用户平均吞吐量、认知用户接入数目以及主用户传输半径三者之间是相互量化制约关系。这个结论对于实际认知无线电的工程实践有一定的指导意义, 在明确主用户服务质量需求的前提下, 网络优化管理人员可以控制认知用户的接入数目, 以达到频谱资源利用的最大化。

5 传输半径仿真

5.1 仿真环境及主要参数

仿真平台的设计思路主要参考了文献[10]构建认知 Ad hoc 网络的部分思想, 并融入了中断概率、主用户实时吞吐量和最大信道容量等影响主用户 QoS 性能的关键指标。利用 Visual C++ 6.0 平台开发了认知网络主用户和认知用户并发通信仿真程序, 并通过 Matlab R14 对通信中产生的数据进行处理。

仿真主要参数设置见表1, 为简化单位转换带来的复杂性, 仿真过程中的主要参数采用无量纲单位。本文假定通信的最大信道容量 C_{\max} 为 100, 要求实际需要达到的平均吞吐量不能低于 $C_0=50$, 中断概率 $\beta=0.3$, 信道衰减因子 $\alpha=2$, 整个仿真区域是边长为 $L=4000$ m 的正方形区域, 主用户和认知用户按照泊松分布随机产生, 主用户节点密度固定为 $\lambda_p=0.00025$, 主用户发射机功率 P_p 固定, 其干扰半径为 260 m, 认知用户传输最大范围为 50 m, 认知用户节点密度为仿真变量。

5.2 仿真结果分析

图4是当 $\lambda_c=0.001$ 时, 认知网络主用户和认知用户并发通信的仿真图。图4(a)是全局图, 我们可

表 1 仿真主要参数

仿真时间	60 s
计算平均吞吐量间隔	1 s
C_{\max}	100
C_0	50
β	0.3
α	2
λ_p	0.00025
L	4000 m
主用户干扰半径 R	260 m
认知用户传输最大范围	50 m

以观察到整个区域内完整的主用户对有 5 对，认知用户较密集地围绕在主用户网络周围。认知用户相互之间的连线表示通信链路，连线越多，通信的认知用户数目越多。图 4(b)是局部图，在该条件下，仿真得到的主用户平均吞吐量 C 为 56，主用户最大传输半径 $L_{p_{\max}}$ 为 200 m。

图 5 为当 $\lambda_c = 0.0005$ 时认知网络通信图。图 5(a)对比图 4(a)，由于主用户的泊松分布概率不变，所

以主用户网络数还是 5，而就认知用户网络链接的密集程度而言，较图 4(a)稀疏，通信的认知用户数明显减少。图 5(b)是同一个区域认知网络局部通信图，实际得到的主用户平均吞吐量 C 为 72，其最大传输半径 $L_{p_{\max}}$ 为 250 m，比在 $\lambda_c = 0.001$ 时对应的主用户平均吞吐量高 16，最大传输半径大 50 m。

通过以上仿真平台多次验证，我们得出结论：在其他条件不变的前提下，认知主用户网络的吞吐量和传输半径受干扰认知用户接入数目的影响较明显，并且通过该仿真平台，可以具体计算出主用户吞吐量、最大传输半径和干扰半径。

6 总结

本文提供了一种认知网络下主用户和认知用户并发通信下提高频谱资源利用率的分析方法和仿真系统。该方法的目的是在主用户吞吐量和认知用户接入数目之间寻找一种动态的平衡，最大限度的提高频谱利用率。通过数值分析和改进的软件平台仿真，验证了该思路的正确性和实用性，可以供其他研究认知无线网络优化的科研人员参考。

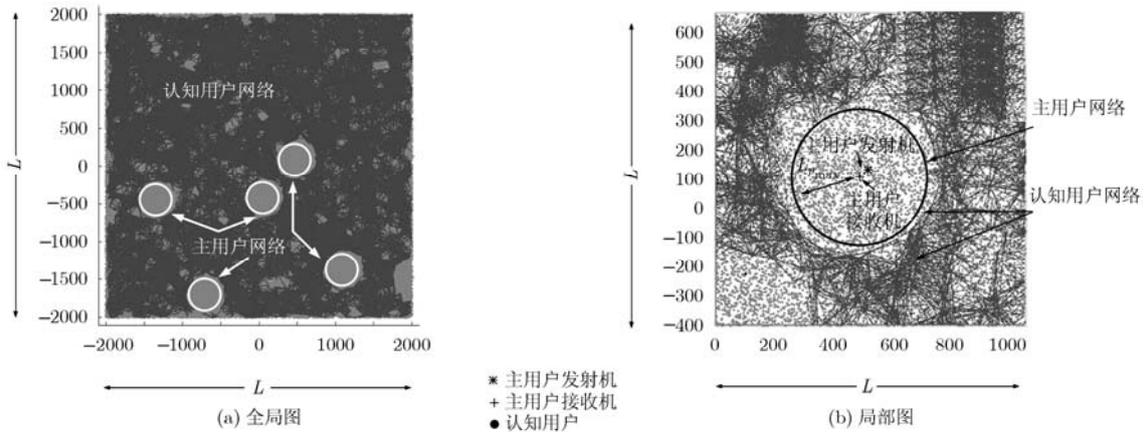


图 4 $\lambda_c = 0.001$ 时的认知网络通信图

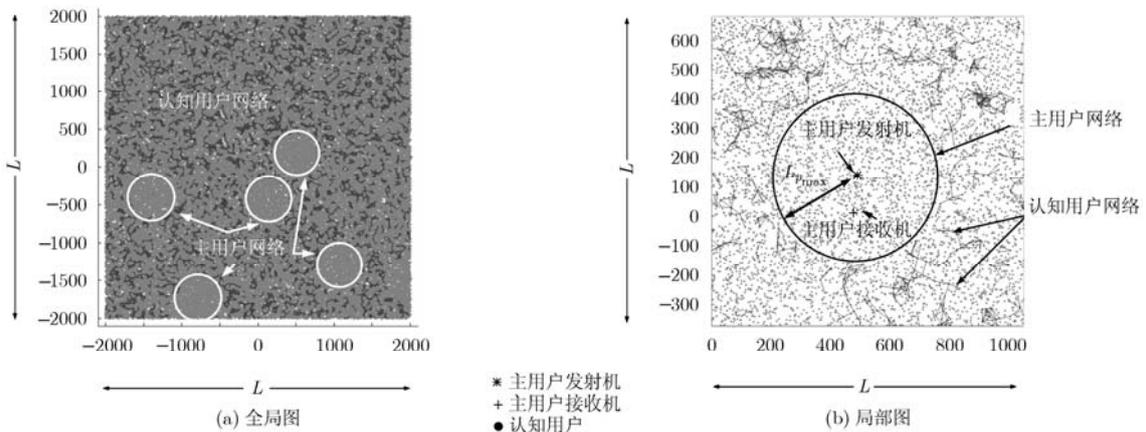


图 5 $\lambda_c = 0.0005$ 时的认知网络通信图

参 考 文 献

- [1] Tarokh V. *New Directions in Wireless Communications Research* [M]. New York: Springer, 2009: 251–289.
- [2] Vu M, Devroye N, Sharif M, *et al.* Scaling laws of cognitive networks[C]. Proceedings of the 2nd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, Orlando, FL, United States, Aug. 1-3, 2007: 2–8.
- [3] Vu M, Devroye N, and Tarokh V. On the primary exclusive region of cognitive networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(7): 3380–3385.
- [4] Vu M and Tarokh V. Scaling laws of single-hop cognitive networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(8): 4089–4097.
- [5] Vu M, Devroye N, and Tarokh V. An overview of scaling laws in Ad hoc and cognitive radio networks [J]. *Wireless Personal Communications*, 2008, 45(3): 343–354.
- [6] Jeon Sang-woon, Devroye N, Vu M, *et al.* Cognitive networks achieve throughput scaling of a homogeneous network[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2011, 57(8): 5103–5115.
- [7] Yin Chang-chuan, Gao Lang, and Cui Shu-quang. Scaling laws for overlaid wireless networks: a cognitive radio network versus a primary network[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2010, 18(4): 1317–1329.
- [8] Rabbachin A, Quek T Q S, Shin Hyun-dong, *et al.* Cognitive network interference[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2011, 29(2): 480–493.
- [9] Xie Min, Zhang Wei, and Wong Kai-kit. A geometric approach to improve spectrum efficiency for cognitive relay networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(1): 268–281.
- [10] Cheowtirakul D. Simulation of large-scale Ad hoc cognitive radio networks [D]. USA California: University of California at Davis, 2009.
- 廖 勇: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为宽带无线移动通信.
- 杨士中: 男, 1937 年生, 教授, 中国工程院院士, 主要研究领域为宽带无线网络通信、测控及遥感信息传输.
- 陈徐洪: 男, 1987 年生, 硕士生, 研究方向为宽带无线移动通信.
- 程金波: 男, 1986 年生, 硕士生, 研究方向为宽带无线移动通信.
- 彭小秦: 女, 1986 年生, 硕士生, 研究方向为宽带无线移动通信.