

基于用户需求的图着色论频谱分配算法

瞿越¹, 鲜永菊^{1,2}, 徐昌彪²

(1. 重庆大学 通信工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆邮电大学 移动通信重点实验室, 重庆 400065)

(quyue126@126.com)

摘要:对最新的图着色论频谱分配算法进行了分析,针对认知用户需求未得到满足的缺点,提出用户满意度,根据它来设置频谱分配优先级函数,对需求满足情况较差的用户优先进行分配,得到一种基于用户需求的图着色论频谱分配算法。仿真结果表明,提出的算法能增加系统信道效益,更好地满足多个用户的信道需求,提高了频谱利用率。

关键词:频谱复用;用户需求;优先级;信道效益

中图分类号: TN915; TP393.01 **文献标志码:** A

Spectrum allocation algorithm of graph coloring theory based on user requirement

QU Yue¹, XIAN Yong-ju^{1,2}, XU Chang-biao²

(1. College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Key Laboratory of Mobile Communications, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: This paper analyzed the latest spectrum allocation algorithms of graph coloring theory. Concerning the shortage of the cognitive users' requirement not being satisfied, the user-satisfaction was proposed. Based on it, the authors set the spectrum allocation priority function. And the users, whose need was not well satisfied, were preferentially assigned. A spectrum allocation algorithm of graph coloring based on the requirement was obtained. The simulation results show that the proposed algorithm can enhance the system's channel efficiency, meet the needs of multiple users' bandwidth requirements better, and improve the spectrum efficiency.

Key words: spectrum-multiplex; user requirement; priority; channel efficiency

0 引言

随着各种无线技术的广泛应用,频谱资源稀缺已成为无线通信技术发展的瓶颈,而频谱资源又是不可再生资源,因此如何更好地利用现有的频谱资源成为了当代通信人迫在眉睫需要解决的问题。认知无线电技术^[1]是一种智能的频谱共享技术,它通过对周围的环境进行感知,从中获取信息并实时地调整传输功率等一系列参数以适应环境的变化,同时还要避免对其他用户产生干扰。认知无线电使得非授权用户与授权用户共享授权频谱成为可能,大大提高了频谱资源的利用率。

认知无线电存在于一个时空快变的动态环境中,能否选择一种合适的动态频谱分配策略直接关系到系统性能是否能够达到最优。目前,频谱分配模型的相关研究主要从两个角度出发:一是考虑用户公平性的博弈论^[2]频谱分配模型和拍卖竞价^[3]频谱分配模型;二是从系统干扰方面出发的干扰温度^[4]频谱分配模型和图着色论^[5]频谱分配模型。其中,基于图着色论的频谱分配模型在认知无线电频谱分配领域得到了广泛关注和深入研究。

1 图着色论频谱分配模型分析

采用图着色论进行频谱分配并不陌生,蜂窝通信中的小

区频率规划就是通过图着色论实现的。但是由于认知无线网络中授权用户和非授权用户是共存的,所以认知无线电中的频谱分配与传统的频谱分配有很大的区别。

认知无线网络中基于图论的频谱分配模型主要是从考虑干扰出发,在避免干扰的情况下,尽可能地使频谱效用最大化。颜色敏感的图论着色(Color Sensitive Graph Coloring, CSGC)算法^[6]是经典的图着色论频谱分配算法,它针对列表着色算法未考虑认知无线电频谱效益差异性和干扰差异性的缺点进行了改进。虽然CSGC算法在这方面做出了一些改进,但随着信道的增加,它的时间开销也急剧地增加,产生了巨大的运算量,于是针对CSGC算法,相关研究者又提出了各种改进算法。并行算法^[7]虽然可以克服CSGC算法时间开销过大的缺点,但在相同条件下它却很难达到CSGC算法的效用。J. Wang等人提出了一个改进的频谱分配算法(Improved Algorithm of Spectrum Allocation, IASA),在频谱分配过程中为了提高用户效用,将分配和标号同时进行^[8],可以在减少时间开销的同时不影响系统的整体效用,但这仍然在一定程度上增加了时间开销,使得分配的时间比并行算法大。该算法在执行完一次分配之后将信道删除,没有考虑信道的复用,使得频谱的利用率较低,且对用户需求的考虑也不全面。基于需求的频谱分配算法在分配时首次将用户需求考虑在内^[9],解决现有算法大多只考虑最大化系统带宽而造成的尴尬局

收稿日期: 2010-09-09; **修回日期:** 2010-11-04。 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60972068); 重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJ090502); 重庆大学研究生科技创新基金重点资助项目(200904B1A0010306)。

作者简介: 瞿越(1986-),女,贵州毕节人,硕士研究生,主要研究方向:动态频谱资源分配; 鲜永菊(1973-),女,四川南部人,副教授,博士,主要研究方向:认知无线电、动态频谱管理、网络安全; 徐昌彪(1972-),男,贵州思南人,教授,博士,主要研究方向:无线宽带接入、虚拟现实、光突发交换。

面,避免不合理的分配造成频谱资源的浪费,但重复选择分配准则进行二次分配,造成时间开销较大。谢显中等人在资源分配时加入了对历史信息的考虑^[10],提出了用户饱和度概念,意在提高公平性和系统总效用。综上所述,算法执行的时间和系统效用是一对矛盾体,上述算法在时间开销和系统效用方面进行了深入分析和研究,并得到了一些优良的算法,但这些算法在设计过程中仅从提高频谱利用率等方面进行频谱分配,并没有综合考虑次用户的需求,所以在频谱分配过程中,次用户的频谱需求并没有得到很好的满足。因此,本文通过对图着色论频谱分配算法的研究,提出一种基于用户需求的频谱分配算法,旨在提高系统效用且兼顾用户需求。

2 基于用户需求的图着色论频谱分配算法

认知无线网络中,动态频谱分配的目的在于在保证用户完成基本通信的同时,尽可能地提高频谱的利用率。但频谱的时空差异性和次用户对频谱需求的差异性导致了在频谱分配过程中次用户的频谱需求将很难得到满足。本文在继承 IASA 思想(即将标号和分配同时进行以提高用户效用和减少时间分配)的基础上,考虑各个用户的频谱需求,得到一种基于用户需求的图着色论频谱分配算法(Algorithm Based on User-Requirement, ABUR)。算法基本思想是:首先通过频谱复用提高系统信道效益,如频谱利用率、吞吐量、传输速率等;再考虑认知用户的信道需求,提出用户满意度的概念,根据用户满意度来设置用户频谱分配的优先级,用户满意度差的用户优先分配频谱,完成频谱的二次分配。

2.1 算法参数矩阵

本文所建立图着色论模型的用户参数矩阵包括需求矩阵、空闲频谱矩阵、效益矩阵和干扰矩阵。

需求矩阵 $D = \{d_n | d_n \in \{0, 1, 2, \dots\}\}_{N \times 1}$, 其中 d_n 表示用户 n 所需要的信道效益,这里,信道效益可以为用户 n 在频谱 m 的吞吐量或者传输速率等。

空闲频谱矩阵 $L = \{l_{n,m} | l_{n,m} \in \{0, 1\}\}_{N \times M}$, 其中: N 为用户数; M 为频谱数; $l_{n,m} = 1$ 表示频谱 m 对于用户 n 是可用的,反之, $l_{n,m} = 0$ 表示不可用。

效益矩阵 $B = \{b_{n,m} | b_{n,m} \in \mathbb{R}\}_{N \times M}$, 表示用户 n 使用频谱 m 产生的信道效益权重。

那么,每个用户 n 在频谱分配完成后所得到的总效益可表示为 B_n :

$$B_n = \sum_{m=1}^M a_{n,m} \cdot b_{n,m} \quad (1)$$

其中 $a_{n,m} = 1$ 表示将频谱 m 无干扰地分配给用户 n , 无干扰分配必须满足条件:

$$a_{n,m} \cdot a_{k,m} = 0 \text{ if } c_{n,k,m} = 1, \forall n, k < N, m < M$$

系统信道效益 B 表示在频谱分配完成后系统中所有用户的效益之和:

$$B = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M a_{n,m} \cdot b_{n,m} \quad (2)$$

系统平均信道效益 B_p 表示频谱分配完成后系统中每个用户得到的平均效益:

$$B_p = \left(\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M a_{n,m} \cdot b_{n,m} \right) / N \quad (3)$$

干扰矩阵集合 $C = \{c_{n,k,m} | c_{n,k,m} \in \{0, 1\}\}_{N \times N \times M}$, 其中: $c_{n,k,m} = 1$ 表示用户 n 和用户 k 在同时使用频谱 m 时会产生干扰, $c_{n,k,m} = 0$ 则表示不会产生干扰。

2.2 用户满意度

在分配过程中,一个用户的需求是否得到满足,直接关系到一个系统的性能是否达到最优。鉴于以往研究的算法中,用户的需求没有被充分考虑,本文提出用户满意度概念,用以在分配过程中衡量用户需求的满足情况。

在频谱分配过程中建立用户满意度的基本思想是:通过评估用户满意度,为设置用户优先级函数提供依据,以便在二次分配中更多地将用户需求考虑在内。

定义1 用户满意度(user-satisfaction)为在当前频谱分配情况下,用户对其所获得信道的满意程度。

用户满意度的评估方法为用户获得的信道效益与其所需要的信道效益之比,即:

$$s_n = \left(\sum_{m=1}^M a_{n,m} \cdot b_{n,m} \right) / d_n \quad (4)$$

当 $d_n = 0$ 时,用户满意度 $s_n = 1$ 。从式(4)可以看出,用户满意度与用户需求紧密相关,是用以衡量用户需求满足情况的参数。用户分配到的信道效益与其所需信道效益之比越大,说明用户所得到的频谱越接近其频谱需求,用户的满意度就越高,相应地,在分配过程中未满足的用户需求就越少。

2.3 优先级函数

在现有的研究中,大多都是从资源方面来考虑频谱的分配,而忽略了用户需求,导致为用户分配的信道对于用户来说不一定是最优,也就是说不一定能满足其频谱需求。为了进一步满足用户需求,解决信道分配给用户后不能满足用户需求的情况,本文提出在频谱分配过程中,为用户按其当前已获信道的满意度设置不同的频谱分配优先级 p_n , 将其作为第二阶段分配时考虑的重要因素。

$$p_n = \left(- \sum_{m=1}^M a_{n,m} \cdot b_{n,m} \right) / d_n \quad (5)$$

由式(4)、(5)可知,当用户满意度越大时,他的需求就越能被满足,相应地,其频谱分配优先级就越低。

由于算法第一阶段只考虑提高频谱的利用率以增加系统信道效益,并未考虑需求,所以,在算法第二阶段,考虑用户需求,对认知用户按其频谱分配优先级由高到低依次进行分配,对优先级高(即满意度较低)的用户优先进行分配。这样,在算法执行过程中充分考虑用户需求,可以在保证系统信道效益的同时,最大限度地满足用户的信道需求,使得频谱分配算法的设计不仅从资源角度出发,而且从用户角度考虑分配,更合理地分配资源,优化系统性能。

2.4 算法描述

本文算法将分为两个阶段进行:第一阶段是根据用户的信道效益情况初次分配信道;第二阶段考虑用户需求,设置用户优先级函数,完成信道的二次分配。

算法执行第一阶段首先将标号和分配同时进行,搜索拥有最大效益的用户 n , 对其分配相应的频谱 m , 若此时有多个用户拥有相同的最大效益,则随机选取一个用户进行分配。然后计算干扰矩阵 C , 搜索与 n 同时使用频谱 m 时不相互产生干扰的用户,若这些用户之间也不产生干扰,把频谱 m 继续分配给这些用户;若这些用户之间有干扰,则把频谱 m 分配给具有最大效益的用户。当系统中所有用户都分配完成后,若空闲频谱列表不为空,此时进入算法的第二阶段。根据第一阶段频谱分配后的情况计算用户满意度,得出用户频谱分配优先级,对拥有最高优先级的用户 n' 分配相应的频谱 m' , 若有多个用户拥有相同的优先级,随机选取一个用户进行分配。再从与用

户 n' 共同使用频谱 m' 时会产生相互干扰的用户颜色列表中删除频谱 m' 。当空闲频谱列表为空,算法结束。

具体执行过程如下。

- 1) 初始化,设置参数和仿真模型。
 - 2) 计算效益矩阵 B 。
 - 3) 搜索具有最大效益的用户 n ,并把相应的频谱 m 分配给用户 n 。
 - 4) 计算干扰矩阵 C ,搜索与用户 n 同时使用频谱 m 时无干扰的用户 k 。此时:
 - 如果存在多个与 n 同时使用频谱 m 时无干扰的用户,且这些用户之间相互不产生干扰,则直接把频谱 m 分配给这些用户,执行 5);若这些用户之间存在相互干扰,转到 3);将频谱 m 分配给与 n 无干扰用户中效益最大的用户;
 - 如果不存在与 n 同时使用频谱 m 时无干扰的用户,则直接执行 5)。
 - 5) 删除已分配用户 n, k 和相关频谱 m ,更新拓扑。
 - 6) 判断图是否为空,若图不为空,执行 3);若图为空,执行 7)。
 - 7) 若可用频谱列表不为空,即仍有空闲频谱可以分配,执行 8);若为空,则执行 11)。
 - 8) 根据用户满意度计算用户频谱分配优先级。
 - 9) 搜索拥有最高优先级的用户 n' ,对其分配使其效益最大的频谱 m' 。
 - 10) 将频谱 m' 从用户 n' 和与其共用频谱 m' 时相互干扰的用户的可用频谱列表中删除;返回 7)。
 - 11) 结束本周期分配。
- 算法流程如图 1 所示。

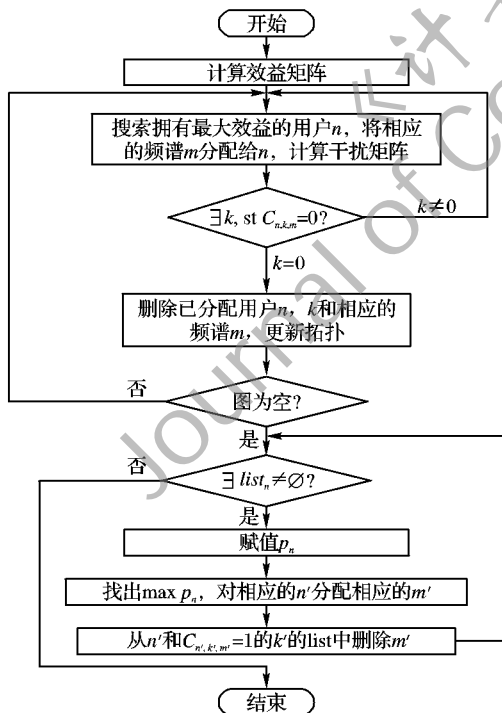


图1 算法整体流程

3 仿真分析

本文对所提出的 ABUR 进行了仿真验证,并且在随机生成的相同拓扑图下与 IASA 在系统平均信道效益和用户需求满足情况两方面进行了比较。

仿真所需参数设置如表 1 所示。

表1 仿真参数

参数	说明
分布区域	15 m × 15 m
主用户的辐射距离/m	10
次用户的辐射范围/m	[1, 5]
用户数 N	7
频谱数 M	从[3, 30]依次取值
效益矩阵 B	从[1, N]取值
空闲频谱矩阵 L	随机生成的 0, 1 二元矩阵
干扰矩阵集合 C	各矩阵为随机生成的 0, 1 二元对称矩阵
需求矩阵 D	随机生成的行矩阵

图 2 表示了系统平均信道效益和频谱数目的关系。从图中可以看到,两种算法的系统平均信道效益都随可用频谱数目的增加呈上升趋势。由于随着可用频谱数目的增加,分配给每个用户的信道数目也相应增加,故每个用户的信道效益随之增加,系统信道效益也随之增加,在相同用户数目下,系统平均信道效益也随着频谱数目的增加而增加。

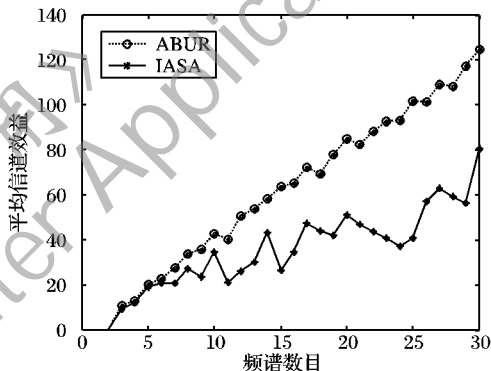


图2 平均信道效益与频谱数目关系

另外,在同一频谱数目的下,ABUR 比 IASA 相应的系统平均信道效益要高。由于 ABUR 不仅在一次频谱分配中,通过用户信道效益指标复用频谱,而且充分考虑用户需求,根据用户优先级函数进行了频谱的二次分配,增加了频谱复用的程度,而 IASA 只是基于用户信道效益的一次频谱分配算法,频谱复用程度明显低于 ABUR,故相比于 ABUR,其系统平均信道效益明显降低。

图 3 可以反映出随着频谱数目的增加,两种算法用户需求的满足情况都得到改善。由于随着频谱数目的增加,用户得到频谱复用的概率也增加,用户获得的信道效益增多,在用户需求一定的情况下,用户需求的满足程度随之增加。而在频谱资源相对较少的情况下,两种算法的用户需求满足程度接近,这是由于 ABUR 在频谱资源较少的情况下,一次分配后的可用频谱资源更加有限,只有很少的频谱资源用于二次分配,故用户需求满足程度与 IASA 相似。

而在同一频谱数目下,ABUR 的用户需求满足程度优于 IASA。同一频谱数目下,ABUR 通过考虑一次频谱分配后,根据用户满意度的情况设置用户频谱分配的优先级函数,在二次频谱分配中,弥补了一次频谱分配后未得到满足的用户需求,提高了频谱复用程度,同时增加了用户获得的信道效益,更多地满足了用户的信道需求,而 IASA 没有针对用户需求对频谱进行再次分配,故 ABUR 用户需求满足程度优于 IASA。

4 结语

本文从提高系统信道效益和满足用户需求两方面出发考

虑分配,设计出一种基于需求的图着色论频谱分配算法。算法在增加系统信道效益,提高频谱利用率的同时,使未满足的用户需求最小化,从而更好地满足认知网络中多个用户的频谱需求。仿真结果证明,在相同环境下,提出的算法不但使次用户可以获得更大的系统平均信道效益,而且显著改善了次用户信道需求的满足情况,减少了未满足的用户需求,提高了频谱利用率,使得频谱的分配更为合理,系统性能得到了优化。

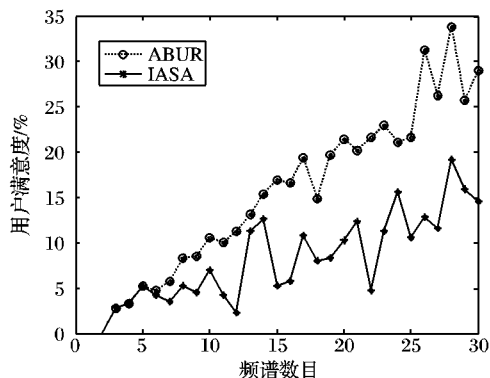


图3 满足的用户需求与频谱数目关系

参考文献:

- [1] HAYKIN S, REED J H, LI G Y. Scanning the issue [J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(4): 608–611.
- [2] ZHANG XIN-CHUN, HE SHI-BIAO, SUN JIANG. A game algorithm of dynamic spectrum allocation based on spectrum difference [C]// WOCC 2010: Proceedings of the 19th Annual Wireless and Optical Communications Conference. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2010: 1–4.
- [3] CHANG H-B, CHEN K-C, PRASAD N R, *et al.* Auction based spectrum management of cognitive radio networks [C]// Proceedings of the 69th Vehicular Technology Conference. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2009: 1–5.
- [4] PANG J-S, SCUTARI G, PALOMAR D P, *et al.* Design of cognitive radio systems under temperature-interference constraints: A variational inequality approach [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(6): 3251–3271.
- [5] ZHANG JIAN-WU, ZHAO QI, ZOU JING-YUAN. Advanced graph-coloring spectrum allocation algorithm for cognitive radio [C]// WiCOM 2009: Proceedings of the 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2009: 1–4.
- [6] ZHENG HAI-TAO, PENG CHUN-YI. Collaboration and fairness in opportunistic spectrum access [C]// ICC 2005: 2005 IEEE International Conference on Communications. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2005: 3132–3136.
- [7] LIAO CHU-LIN, CHEN JIE, TANG YOU-XI. Parallel spectrum allocation algorithm for cognitive radios [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2007, 29(7): 1608–1611.
- [8] WANG JIAO, HUANG YU-QING, JIANG HONG. Improved algorithm of spectrum allocation based on graph coloring model in cognitive radio [C]// CMC 2009: 2009 WRI International Conference on Communications and Mobile Computing. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2009: 353–357.
- [9] 陈勃, 李少谦, 廖楚林. 认知无线网络中基于需求的频谱资源分配算法研究[J]. 计算机应用, 2008, 28(9): 2188–2191.
- [10] 谢显中, 杨黎丽, 郑轶. 一种基于历史信息的感知无线动态频谱分配算法[J]. 重庆邮电大学学报, 2009, 21(5): 573–577.

(上接第597页)

率工作无法始终满足网络性能需求的情形,本文研究了随机调度机制下节点的能耗以及网络中各参数对网络寿命的影响,并通过分析提出了一种根据网络中有效节点数目来调节节点工作概率的策略。仿真实验表明,该策略使每轮内的工作节点数目基本一致,始终满足网络的初始性能需求,尽可能地延长了网络寿命。

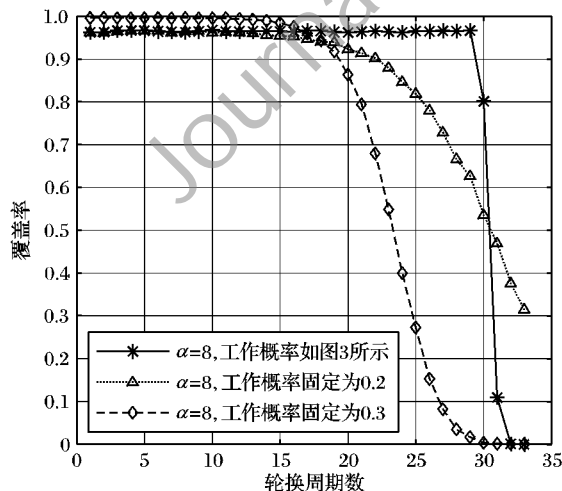


图6 点覆盖性能对比图($\alpha=8$)

参考文献:

- [1] 夏俐, 陈曦, 赵千川, 等. 无线传感器网络及其应用简介[J]. 自动化博览, 2004, 21(1): 34–37.
- [2] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, *et al.* Wireless sensor networks: A survey [J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393–422.
- [3] WANG X R, XING G L, ZHANG Y F, *et al.* Integrated coverage and connectivity configuration in wireless sensor networks [C]// Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM, 2003: 28–39.
- [4] LIU Y H, PU J H, ZHANG S, *et al.* A localized coverage preserving protocol for wireless sensor networks [J]. Sensors, 2009, 9(1): 281–302.
- [5] TIAN D, GEORGANAS N D. Location and calculation-free node-scheduling schemes in large wireless sensor network [J]. Ad Hoc Networks, 2004, 2(1): 65–85.
- [6] BAI H X, CHEN X, LI B, *et al.* A location-free algorithm of energy-efficient connected coverage for high density wireless sensor networks [J]. Journal of Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications, 2007, 17(1): 1–21.
- [7] 何朝笋, 石高涛, 廖明宏. 传感器网络随机睡眠节点调度算法研究及实现[J]. 计算机工程, 2007, 33(8): 115–117.
- [8] KUMAR S, LAI T H, BALOGH J. On k-coverage in a mostly sleeping sensor network [C]// Proceedings of the 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2004: 144–158.
- [9] CHEN X, HO Y C, BAI H X. Complete coverage and point coverage in randomly distributed sensor networks [J]. Automatica, 2009, 45(6): 1549–1553.
- [10] WAN P J, YI C W. Coverage by randomly deployed wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(6): 2658–2669.