

面向无线认知网络的冗余感知数据消除^{*}

胡 罡¹, 刘丽霞¹, 周航军², 黄 震¹, 彭宇行¹

¹(国防科学技术大学 计算机学院, 湖南 长沙 410073)

²(香港城市大学 计算机系, 香港)

通讯作者: 刘丽霞, E-mail: 5460liulixia@126.com

摘 要: 在无线认知网络的协作式频谱感知方案中, 非授权用户(次要用户)将各自感知到的可用频谱信息转发给邻居节点, 作为频谱分配的依据. 而实际上, 仅有部分数据影响着频谱分配的结果. 无用信息的传递不仅产生了大量额外的通信开销, 而且在频谱分配过程中浪费了计算资源. 这种情况对于频谱资源稀缺的无线认知网络和能量有限的认知终端来说是无法接受的. 因此, 如何减少无用信息的传递是一个具有重大实际意义的问题. 基于 skyline 查询处理, 提出了多目标约束下 skychannel 查询处理方法, 以减少冗余感知信息传递. 其基本思想是: 将数据空间划分为控制区域、被控区域和自由区域, 按照信道的性能参数, 将要查询的信道放入相应区域. 传输时, 直接忽略被控信道的信息而仅传输非被控信道的数据. 在保证不影响频谱分配结果的前提下, 可以大量降低网络开销, 节约用户的计算资源. 仿真结果显示, skychannel 查询方法在节约查询时间、降低通信开销和计算开销等方面具有优势.

关键词: skyline 查询; 无线认知网络; 通信开销; 计算开销; 频谱

中图法分类号: TP393

中文引用格式: 胡罡, 刘丽霞, 周航军, 黄震, 彭宇行. 面向无线认知网络的冗余感知数据消除. 软件学报, 2014, 25(5): 1113-1124. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4524.htm>

英文引用格式: Hu G, Liu LX, Zhou HJ, Huang Z, Peng YX. Eliminating redundant sensed data for wireless cognitive networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2014, 25(5): 1113-1124 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4524.htm>

Eliminating Redundant Sensed Data for Wireless Cognitive Networks

HU Gang¹, LIU Li-Xia¹, ZHOU Hang-Jun², HUANG Zhen¹, PENG Yu-Xing¹

¹(College of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

²(Department of Computer Science, City University of Hong Kong, Hong Kong, China)

Corresponding author: LIU Li-Xia, E-mail: 5460liulixia@126.com

Abstract: The unlicensed user (the secondary user) sends the available spectrum information that it sensed to its neighbors as the foundation of spectrum allocation in the distributed spectrum allocation process for wireless cognitive radio networks. In reality only part of the information affects the allocation results. The transmission of redundant data not only generates extra communication cost but also wastes computing resource in the spectrum allocation process and is therefore undesirable for spectrum-scarce CRNs and power-limited cognitive terminals. Thus, it is a practical problem to eliminate the useless data before transmission. Based on skyline query processing, this paper proposes a multiple-objective redundant sensed traffic eliminating algorithm called Sskychannel query processing. The fundamental idea of the algorithm is to divide the channel space into dominate region, dominated region and free region. Each sensed channel will be put into the corresponding region according to its parameters. The information of dominated channels is ignored, and user only transmits the information of non dominated channels. It can decrease the network cost and save the computing resource for each user while guaranteeing not to affect the spectrum allocation result. The experimental results also show the advantages of skychannel query algorithm in terms of decreasing communication cost and saving computing resource.

* 基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)(2011CB302600); 国家自然科学基金(61070211, 60903223); 国家高技术研究发展计划(863)(2011AA01A202); 教育部博士点基金(20114307120003)

收稿时间: 2011-10-21; 修改时间: 2012-09-29, 2013-07-09; 定稿时间: 2013-11-14

Key words: skyline query, wireless cognitive network, communication cost, computing cost, spectrum

在无线认知网络中,非授权用户(次要用户)通过感知频谱空洞,择机动态接入频谱资源^[1,2].在接入前,它们将各自感知到的有效频谱信息传递给邻居节点,分布式地协作完成频谱分配过程.

因为授权用户(首要用户)对频谱资源有绝对的使用权,它可以随时接入它的授权信道,而无需其他类型用户(比如次要用户)的许可.因而对于次要用户而言,频谱资源的有效性是高度动态的,因此要充分利用已知的频谱空洞,尽量高效地进行数据传输,避免冗余信息的传递.

为了收集完整的频谱资源信息,次要用户将所有感知到的频谱信息互相传递.事实上,仅有部分频谱资源信息对频谱的分配结果起到了决定性作用,因为所有性能参数都比较差的信道被用户选择作为传输信道的概率极小,这样的信道信息对频谱分配结果影响甚微.这种冗余信息的传递不仅增加了信道拥塞的概率,增大了通信链路调度的难度,而且浪费了无线认知终端宝贵的计算资源和频谱资源.故很有必要在进行传输前对感知数据进行筛选,以便减少不必要的数据传输,将宝贵的传输机会保留给有价值的信息.因此,在确保不影响频谱分配结果的前提下,如何对感知数据进行准确的归类,以便做出是否传输的判断,是一个实际而有重要意义的问题.

如果信道只有 1 个目标参数,则很容易得出哪些信道的数据该被抛弃.排序即可解决这种问题.部分工作就是将某个参数作为目标函数,比如在文献[3]中,其目标是最大化系统的总流量.然而在实际的操作中,一个目标参数往往难以反映用户的真实需求.通常来讲,用户有两个或以上的偏好和目标.比如,要求更多带宽的同时要求公平性好,要求花费较少开销的同时要求服务质量得到保证等.因此在多目标的情况下,感知完信道后如何消除冗余信息以降低通信流量,实质上就是一个多目标决策问题.传统的方法就是将参数标准化后,再将其整合到一个函数,以评估网络的性能.在文献[4]中,Zhang 等人就是将总带宽奖励 U 和次要用户的接入公平 σ 一般化后,利用权重 w_1 和 w_2 整合到一个适配函数 A .在文献[5]中,Baris 将允许功率、请求功率以及 QoS 请求的学习因子整合到信道选择概率.但这样的做法往往因为各用户的不同偏好而难以对权重进行合理的选取.

作为一种经典的多目标优化解决方法,skyline 查询处理可以找到没有被其他点所控制的数据,适合用来解决多目标约束下冗余感知数据的消除问题.所谓点 p 控制点 q ,即 p 的所有参数都不比 q 差,并且至少有 1 个参数是严格优于 q .Skyline 查询方法^[6]主要分为带检索和不带检索两类:带检索的查询方法主要有 R-trees,NN, BBS 等算法,需要在检索节点专门建立和维护一个索引,这对于资源有限的无线认知网络终端来说是不划算的;不带检索的方法主要有 BNL 算法和 D&C 算法等,不需要在检索节点建立和维护索引.但是 BNL 算法效率不高,而 D&C 算法只适合静态查询.Skyline 查询已经被用在多个领域,比如数据流^[7,8]、P2P^[9]、无线传感器网络^[10-12].以往的集中式 skyline 查询并不适合无线认知网络,因为在实际的无线认知网络环境下,往往难以布置一个中央实体来进行计算和查询操作,具体原因在我们以往的工作^[13]中已描述.而应用于 P2P 的分布式 skyline 查询方法同样也不适合,因为无线移动终端的功率、计算能力和存储能力都是有限的.这些应用在其他领域的 skyline 查询方法都是针对各自的特点而设计的,无法直接应用到无线认知网络的查询中.

针对无线认知网络数据量不大、节点存储和运算能力有限以及频谱资源可用性快速变化等特点,本文基于 skyline 查询提出了消除无线认知网络冗余感知数据的算法——skychannel 查询.每个用户对信道空间进行划分,在分析其感知到的数据所落入的区域后,进行对应区域的 skychannel 查询处理.然后,仅传输不被控制的有用信道信息.这样能够减少大量的通信开销,避免无用数据的传输,减少了频谱分配的计算时间.

本文第 1 节描述网络场景,给出一些重要的定义.第 2 节详细介绍 skychannel 查询处理算法,其中包括区域划分、二次查询、区域更新、冗余信息界定以及对算法的讨论和分析.第 3 节给出详细的仿真结果,并对其进行讨论.第 4 节对全文进行总结,并介绍下一步的工作.

1 网络场景和相关定义

在本文中,感知信息不仅指信道忙闲状况,而且更广泛地包括次要用户从各种途径所获取的信道信息.本文假设各次要用户主要关注两个信道指标:允许信道带宽 b 和发射功率 p .每个用户都希望获得更多的发射功率和

更宽的信道带宽.假设用户感知到的信道集合为 $C=\{c_1,\dots,c_m\}$.

定义 1(信道的控制关系). 对于两个信道 c_i 和 $c_j, c_i \in C$ 且 $c_j \in C$, 如果 c_i 控制 c_j , 表示为 $c_i \prec c_j$, 当且仅当 c_i 的信道指标都不差于 c_j , 并且某个信道指标严格好于 c_j .

控制关系具有传递性: 如果 $c_i \prec c_j$ 且 $c_j \prec c_k$, 则 $c_i \prec c_k$.

定义 2(天际信道(skychannel, 简称 sc)). 给定一组用户感知到的可用信道组合 $C=\{c_1, c_2, \dots, c_m\}$, 其中一个信道 c_j 称为天际信道, 当且仅当 c_j 不被 C 中其他任何信道所控制.

在查询处理完成后, 我们将获得一个 skychannel 集合, 可表示为 $SC=\{sc_1(b_1, p_1), sc_2(b_2, p_2), \dots, sc_k(b_k, p_k)\}$, 容易得出: $1 \leq k \leq m, SC \neq \emptyset$ 且 $SC \subseteq C$.

定义 3(信道空间的控制区域(dominate region)). 假设存在一个 skychannel, 记为 $sc_j(b_j, p_j)$. 如果将 sc_j 作为区域划分的数据点, 则 $p > p_j$ 且 $b > b_j$ 的区域称为控制区域.

定理 1. 如果信道 c_q 落入信道空间的控制区域, 则它将成为一个新的 skychannel, 并且一定控制部分原有的 skychannel.

证明: $\forall c_q(b_q, p_q) \in C$, 假设 c_q 落入以 $sc_j(b_j, p_j)$ 划分的控制区域, 根据定义 3, 我们可以得到 $b_q > b_j$ 且 $p_q > p_j$. 可以得到 c_q 至少控制了 sc_j . 因为 skychannel 之间不能互相控制, 即, 原有的 SC 集合中没有任何一个信道可以得到 $b \geq b_j$ 且 $p > p_j$ 或者 $b > b_j$ 且 $p \geq p_j$. 已有 c_q 控制了 sc_j , 则没有任何 skychannel 可以控制 c_q . 也就是说, 不存在 skychannel 可以同时得到 $b \geq b_q$ 且 $p > p_q$ 或 $b > b_q$ 且 $p \geq p_q$. 因此, c_q 是一个新的 skychannel. \square

定义 4(信道空间的被控区域(dominated region)). 假设存在一个 skychannel, 记为 $sc_j(b_j, p_j)$. 如果将 sc_j 作为区域划分的数据点, 则 $p < p_j$ 且 $b < b_j$ 的区域称为被控区域.

定理 2. 如果信道 c_q 落入信道空间的被控区域, 它肯定被部分 skychannel 所控制, 不能成为新的 skychannel.

证明: $\forall c_q(b_q, p_q) \in C$, 假设 c_q 落入以 $sc_j(b_j, p_j)$ 划分的被控区域, 根据定义 4, 我们可以得到 $b_q < b_j$ 且 $p_q < p_j$. c_q 至少被 sc_j 所控制, 而无法成为一个新的 skychannel. \square

定义 5(信道空间的自由区域 free region). 假设存在一个 skychannel, 记为 $sc_j(b_j, p_j)$. 如果将 sc_j 作为区域划分的数据点, 则 $p < p_j$ 且 $b \geq b_j$ 的区域和 $p \geq p_j$ 且 $b < b_j$ 的区域被称为自由区域.

定理 3. 如果信道 c_q 落入信道空间的自由区域, 则它可能控制 skychannel, 也有可能被 skychannel 所控制, 取决于在自由区域内的二次查询结果.

2 Skychannel 查询处理

在进行查询处理前, 必须先对信道集合 $C(b, p) = \{c_1(b_1, p_1), c_2(b_2, p_2), \dots, c_m(b_m, p_m)\}$ 完成过滤操作, 以保证基本的 QoS. 系统将根据用户的需求为各参数设定阈值, 本文中为 $[p_{\max}, p_{\min}]$ 和 $[b_{\max}, b_{\min}]$. 不在该区间里的信道数据将被抛弃. 这样可以减少查询时间, 提高查询效率, 并且保证用户基本的服务质量. 过滤操作后, 将得到更新的待查询信道集合 C , 其信道数目为 n_c .

完成过滤操作后, 对 skychannel 集合进行初始化设置, 并完成初步的区域划分, 然后对 C 进行 skychannel 查询操作. 在查询过程中, 不断地更新 skychannel 集合, 同时也可以根据需要进行调整区域划分. 任何在阈值内的信道都属于其中的一个区域. 对比 BNL 查询算法, 可以减少不必要的查询时间.

- 落入控制区域信道就被作为一个新的 skychannel 放入 SC 集合; 同时, 要将被新的 skychannel 所控制的原有 skychannel 移出 SC 集合, 因为它的性能指标已不具有优势, 用户在选择信道时将会偏向于新的 skychannel.
- 落入被控区域信道直接归入非 SC 集合, 因为它在性能指标各方面不如已有的 skychannel, 具有极小的被选择概率.
- 落入自由区域信道将进行二次查询, 与在该自由区域的 skychannel 进行比较.

算法 1. Skychannel query.

Input: $C(b, p)$.

Output: SC .

- (1) $C(b,p)=\{c_1(b_1,p_1),c_2(b_2,p_2),\dots,c_m(b_m,p_m)\};$
- (2) $SC=\emptyset; n_c=m;$
- (3) **for** $j=1:m$ **do**
- (4) **if** $p_j > p_{\max} \parallel p_j < p_{\min} \parallel b_j > b_{\max} \parallel b_j < b_{\min}$ **then**
- (5) $C(b,p)=C(b,p)-\{c_j(b_j,p_j)\}; n_c=n_c-1;$
- (6) $SC_1=C_1(b_1,p_1);$
- (7) **For** $q=1:n_c$ **do**
- (8) **If** c_q falls into free region **then**
- (9) Rejudge;
- (10) **else if** c_q falls into dominate region **then**
- (11) Update;
- (12) **else if** c_q falls into dominated region **then**
- (13) $C(b,p)=C(b,p)-\{c_q(b_q,p_q)\};$
- (14) Transmit query result SC to neighbors;

2.1 区域划分

在对信道空间进行区域划分前,首先要完成 *skychannel* 集合的初始化操作.待查询信道集合 C 的第 1 个元素 $c_1(b_1,p_1)$ 将设置为第 1 个 *skychannel* 元素 sc_1 ,并且根据它的参数 b_1 和 p_1 对信道空间进行区域划分.然后,依次将待查询信道集合 C 中的其他元素放入划分了区域的信道空间进行查询,并更新 *skychannel* 集合.在查询过程中,要根据查询结果更新 *skychannel* 集合,并根据需要调整区域划分的粒度和划分方式.

定义 6(区域划分的粒度). 用来对信道空间进行划分区域的 *skychannel* 数目 n_{div} 称为区域划分的粒度.根据 n_{div} 的大小,可分为粗粒度区域划分和细粒度区域划分.

2.1.1 粗粒度区域划分

区域划分时,粒度越粗,对应的控制区域和被控区域的面积就越小.此时,信道 c_q 落入自由区域的概率就比较大,需要花费较长的时间进行二次查询.

如图 1(a)所示,如果仅仅以 sc_j 来划分信道空间,则可以得到:

- 总面积:

$$Area_{total}=(b_{\max}-b_{\min})\times(p_{\max}-p_{\min}) \quad (1)$$

- 控制区域面积:

$$Area_c=(b_{\max}-b_j)\times(p_{\max}-p_j) \quad (2)$$

- 被控区域面积:

$$Area_d=(b_j-b_{\min})\times(p_j-p_{\min}) \quad (3)$$

- 自由区域面积:

$$\begin{aligned} Area_f &= Area_{total} - Area_c - Area_d \\ &= (b_{\max} - b_{\min}) \times (p_{\max} - p_{\min}) - (b_{\max} - b_j) \times (p_{\max} - p_j) - (b_j - b_{\min}) \times (p_j - p_{\min}) \\ &= (b_j - b_{\min}) \times (p_{\max} - p_j) + (b_{\max} - b_j) \times (p_j - p_{\min}) \end{aligned} \quad (4)$$

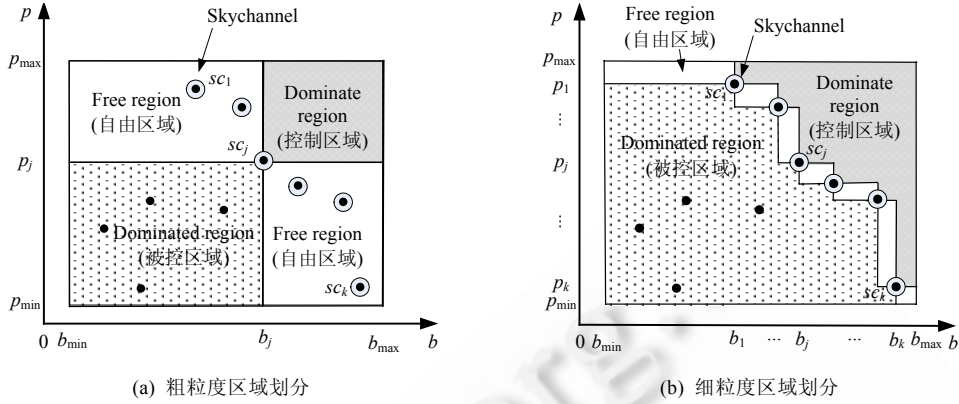


Fig.1 Examples of region division

图 1 区域划分示例

2.1.2 细粒度区域划分

区域划分的粒度越细,对应的控制区域和被控区域的面积就越大,则信道落入控制区域和被控区域是大概率事件.此时,首次查询的时间相对于粗粒度区域划分就比较长.如图 1(b)所示,如果根据所有的 skychannel 来对信道空间进行区域划分,当信道 c_q 落入自由区域时, c_q 不被任何 skychannel 所控制,不再需要二次判断而可以直接放入 skychannel 集合, c_q 可能控制了被控区域的部分信道.此外, c_q 不可能控制已有的 skychannel,因此不需要从集合中删除原有的任何 skychannel.

- 控制区域面积:

$$Area_c = \sum_{j=1}^{n_{div}} (b_{max} - b_j)(p_{j-1} - p_j) \tag{5}$$

- 被控区域面积:

$$Area_d = \sum_{j=1}^{n_{div}} (b_j - b_{j-1})(p_j - p_{min}) \tag{6}$$

- 自由区域面积:

$$\begin{aligned} Area_f &= Area_{total} - Area_c - Area_d \\ &= (b_{max} - b_{min}) \times (p_{max} - p_{min}) - \sum_{j=1}^{n_{div}} (b_{max} - b_j)(p_{j-1} - p_j) - \sum_{j=1}^{n_{div}} (b_j - b_{j-1})(p_j - p_{min}) \\ &= \sum_{j=1}^{n_{div}+1} (b_j - b_{j-1}) \times (p_{j-1} - p_j) \end{aligned} \tag{7}$$

其中, $p_0 = p_{max}, b_0 = b_{min}, p_{n_{div}+1} = p_{min}, b_{n_{div}+1} = b_{max}$.

由此可以看出:区域划分的粒度越细,自由区域的面积就越小,系统进行二次查询所花费的时间也就越少.然而粒度越细,系统判断信道属于哪个区域所需花费的时间就越多.因此,如何设计一个合理的粒度值,使得首次查询时间和二次查询时间得以很好地折中,是一个必须慎重考虑的问题.

2.2 自由区域的二次查询

定义 7(二次查询概率). 待查询信道落入自由区域且该区域内有 skychannel 的概率称为二次查询概率 Pr_{q_2} .

当信道落入自由区域时,当此区域内有 1 个或多个 skychannel,此时需要二次查询.如果没有 skychannel 存在此自由区域内,则该信道不被任何 skychannel 所控制,可以作为一个新的 skychannel 直接放入 skychannel 集合中.由此可见:在信道的属性值没有特定分布的情况下,二次查询概率 Pr_{q_2} 不仅与自由区域面积相关,而且与

SC 集合中不作为区域划分依据的 skychannel 数目相关.

$$pr_{q_2} = \frac{Area_f}{Area_{total}} \times \frac{n_{div}}{n_{sc}} \times 100\% = \frac{\sum_{j=1}^{n_{div}+1} (b_j - b_{j-1}) \times (p_{j-1} - p_j)}{(b_{max} - b_{min}) \times (p_{max} - p_{min})} \times \frac{n_{sc} - n_{div}}{n_{sc}} \times 100\% \quad (8)$$

其中, $\frac{Area_f}{Area_{total}}$ 是落入自由区域的概率, 而 $\frac{n_{div}}{n_{sc}}$ 是自由区域内存在不作为区域划分依据的 skychannel 点的概率.

当粒度 n_{div} 等于 n_{sc} 时, 二次查询概率为 0, 此时不需要进行二次查询. 这里特别强调: 信道的属性值没有任何分布规律, 因为如果属性值呈现特定分布规律, 那么二次查询概率是与属性值紧密相关的, 而与区域面积关系不大.

如果将整个信道空间进行粗粒度划分, 那么在进行二次查询时, 需要将自由区域根据区域内的 skychannel 进行二次划分, 迭代执行 Skychannel 查询算法以提高查询效率. 因为在粗粒度划分的情况下, 自由区域的 skychannel 数目较大, 如果根据 BNL 算法进行二次查询, 将耗费较多查询时间.

相应地, 如果整个信道空间进行细粒度划分, 此时的二次查询则可以按照 BNL 算法来执行, 因为此时自由区域的 skychannel 数目较少, 用 BNL 算法查询比较简单.

算法 2. Rejudge.

Input: $SC, c_q(b_q, p_q)$.

output: SC .

- (1) **if** $n_{sc} - n_{div} = 0$ **then**
- (2) $SC = SC \cup \{c_q\}$;
- (3) **else for** $j = 1 : \overline{n_{div}}$ **do**
- (4) **if** $sc_j < c_q$ **then**
- (5) $C(b, p) = C(b, p) - \{c_q(b_q, p_q)\}$;
- (6) **else if** $c_q < sc_j$ **then**
- (7) $SC = SC \cup \{c_q\} - \{sc_j\}$;
- (8) **else** $SC = SC \cup \{c_q\}$

2.3 控制区域的skychannel更新

如果待查询信道 c_q 落入控制区域, 则它将成为一个新的 skychannel sc_q . 显然, sc_q 会控制一些已有的 skychannel, 比如作为区域划分依据的 sc_j . 与 sc_j 邻近的 skychannel 也有可能被 sc_q 控制. 此时, 需要通过向上向下局部区域的查询来更新 skychannel 集合.

算法 3. Update.

Input: SC, sc_q, sc_j .

Output: SC .

- (1) $SC = SC \cup \{sc_q\}, d = j$;
- (2) **While** $j \neq 0$ **do**
- (3) **if** $sc_q < sc_j$ **then**
- (4) $SC = SC - \{sc_j\}$;
- (5) $j = j - 1$;
- (6) **else break**;
- (7) $j = d + 1$
- (8) **While** $j \leq k$ **do**
- (9) **if** $sc_q < sc_j$ **then**
- (10) $SC = SC - \{sc_j\}; j = j + 1$;

(11) **else break;**

(12) Redivide the space according to the query result

如图 2(a)中所示,信道空间依据 sc_j 进行划分.信道 c_q 落入控制区域,变成一个 skychannel 集合中的元素 sc_q .如图 2(b)中所示, sc_q 控制了 sc_j .向上继续执行查询操作, sc_{j-1} 没有被 sc_q 控制,向上的查询操作终止.向下执行查询操作, sc_{j+1} 被 sc_q 控制.继续向下执行查询操作, sc_{j+2} 不被 sc_q 控制,此时,向下查询操作终止.从 skychannel 集合中删除被 sc_q 控制的 sc_j 和 sc_{j+1} ,并且根据 sc_q 重新对信道空间进行区域划分.

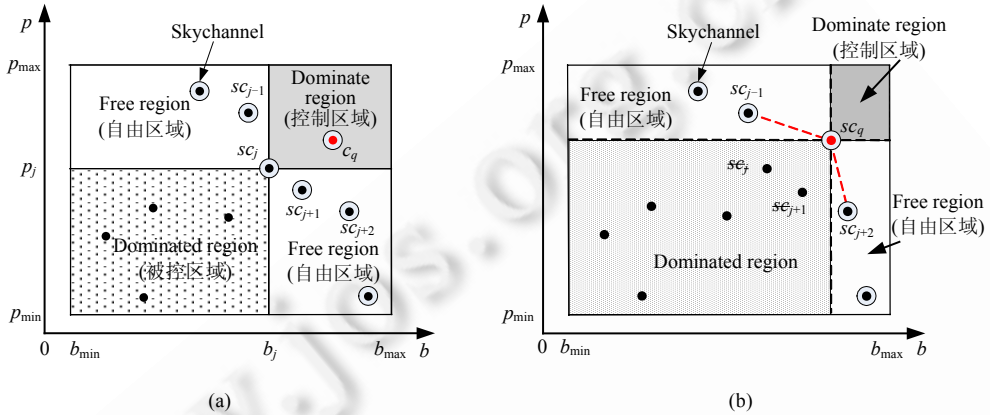


Fig.2 Update skychannel set
图 2 Skychannel 集合更新

2.4 冗余信息界定

在查询到 skychannel 集合后,需要结合频谱分配需求和传输能力来确定需传输信息的 skychannel 数目.此时需要解决两个问题:

- 1) 当 skychannel 集合中元素个数大于需要传输的信道数时,如何从 skychannel 集合中选取传输信息;
- 2) 当 skychannel 集合中元素个数小于需要传输的信道数时,如何从非 skychannel 集合中选取传输信息.

为了解决极大点数目与传输要求不符的问题,我们将信道空间分层.如图 3 所示,将信道集合按照查询结果分层显示.图中一共显示了 3 层.

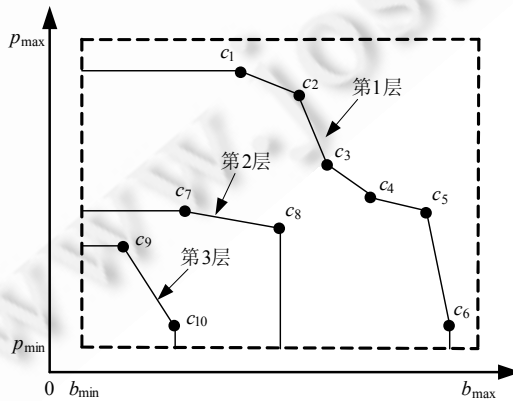


Fig.3 Hierarchy of channel space
图 3 信道空间分层结构

根据分层查询结果确定冗余信息界定规则如下:

规则 1. 在同一层 skychannel 集合中,按照用户对属性的偏好排序,按顺序选取需传输的信道信息.在图 3 中,在第 1 层 skychannel 集合中,如果用户偏好于属性 p ,则第 1 层 skychannel 的排序为 $\{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6\}$.在传输信道数为 3 时,则按顺序选取 $\{c_1, c_2, c_3\}$ 进行传输.

规则 2. 如果第 1 层 skychannel 数目小于所需传输的信道数目,则依次选取下一层 skychannel.每层 skychannel 按照规则 1 排序.比如在传输信道数为 7 的情况下,第 1 层 skychannel 不能满足传输需求,则从第 2 层 skychannel 中按照属性 p 的按顺序选取 c_7 加入到需传输的集合中,得到最终的传输信息为 $\{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7\}$.

按照规则 1 和规则 2 所查找到的信息可确定为有效信息,而剩余不需要传输的为冗余信息.

2.5 算法的讨论与分析

本文中所讨论的多目标约束下消除冗余感知数据的问题类似于求二维极大点问题(maxima finding problem),但是又有所不同:

- 求二维极大点问题是在二维空间中求解极大点,最直接的方法是比较每一对点或者 BNL 算法,其复杂度较大,查询效率不高.如果使用分治策略 D&C 来解决二维极大点问题,首先要找出 x 轴的中位数,将这个点集划分为两个子集,然后再递归地找出两个子集的极大点,最后将查找到的极大点通过投影和线性扫描,将子集的极大点合并.该算法比较适合静态数据查询.
- 我们所提出的消除冗余感知数据的 skychannel 查询算法,是通过区域划分来进行查找,先判断感知信道属于哪个区域,然后再根据相应区域的规则进行处理.通过区域划分粒度的调节,使得查找更具有灵活性,并且不需要另外进行合并操作.此算法还可以扩展到三维数据空间,将由 3 个性能参数构成的整个信道空间按照 skychannel 划分为空间区域块,此时的自由区域面积更大.以 1 个 skychannel 来划分区域为例,二维空间的自由区域为 2 块,而三维空间的自由区域有 6 块,这样,二次查询的概率将增大.此时,在自由区域迭代执行 skychannel 查询算法可以保证查询效率.

综上所述,skychannel 查询算法的主要优势表现在:

- 1) 不需要合并解的过程,可以适合无线认知网络的动态查询环境.
- 2) 分区域查询的方法使得查询效率更高,并且区域划分的粒度具有伸缩性,可根据实际需要确定划分粒度,使得查询算法更加灵活.
- 3) 以极大点作为区域划分的依据,区域归属使得查询更有针对性,减少了查询量.比如,在被控区域的数据点可以直接被忽略.

3 仿真和讨论

在仿真实验中,以 Matlab(R2010a)作为仿真实验平台,处理器为 Intel 的双核 3GHzCPU,内存为 4GB RAM.我们先讨论 skychannel 查询算法进行区域划分时粒度与各区域面积的关系,以及粒度与二次查询概率的关系.然后再将 skychannel 查询算法与 BNL 算法和 D&C 算法在查询次数方面进行比较.最后再比较应用 skychannel 查询和不应用 skychannel 查询两种情况下,用户传输数据的通信开销和频谱分配时计算开销的差别.如文中假设,信道属性值没有特定分布规律,故实验中随机生成感知信道的性能参数值(允许功率 p 和带宽 b).

3.1 粒度和区域面积

本实验中,我们分别随机生成 10 个 skychannel: $\{sc_1, sc_2, \dots, sc_{10}\}$ 和 100 个 skychannel: $\{sc_1, sc_2, \dots, sc_{100}\}$,均匀分布在信道空间.允许功率和带宽的边界值与 skychannel 的数目成正比.我们先根据 sc_1 来划分区域.在下次区域划分时,加入下一个 skychannel: sc_2 .重复此过程,直到所有的 skychannel 都作为区域划分的依据.

第 2.1 节中分析已知:如果区域空间根据细粒度来划分,那么控制区域的面积比按照粗粒度划分的控制区域面积要大.这一点在图 4 中得到了验证.当区域划分的粒度增加时,控制区域和被控区域的面积随之稳定增长.控制区域和被控区域的面积差别不大,主要是因为 skychannel 被设置成均匀分布的.自由区域的面积则随着粒

度的增加而逐渐减少.图 4(b)中显示:当粒度接近 100 时,自由区域的面积将趋近于 0.该实验说明:随着粒度的增加,待查询节点落入自由区域的概率逐渐减小,相应地,落入控制区域和被控区域的概率变大.

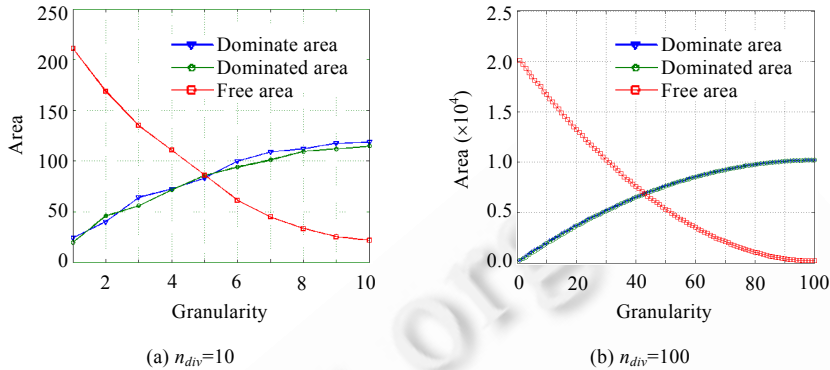


Fig.4 Granularity and area

图 4 粒度和面积

3.2 粒度和二次查询概率

前文第 2.2 节中已经提到:二次查询概率不仅与自由区域的面积大小有关,还与区域划分的粒度相关.由第 3.1 节节可知:随着粒度的增加,自由区域的面积随着减少,那么二次查询概率也相应地降低.图 5 清晰地说明了这个结论.随着 n_{div} 从 1 增加到 10,二次查询概率 pr_{q2} 由 75%慢慢降低,直到当 n_{div} 等于 skychannel 数目 10 时,二次查询概率为 0.因为当所有的 skychannel 用来划分区域时,在每个自由区域内已经没有 skychannel 存在,此时,落入自由区域的信道已经不需要再进行二次查询.该实验证明:在信道属性值没有特定分布的情况下,二次查询概率随着粒度值的增大而减小.在查询过程中,我们可通过调节粒度值来控制二次查询概率.

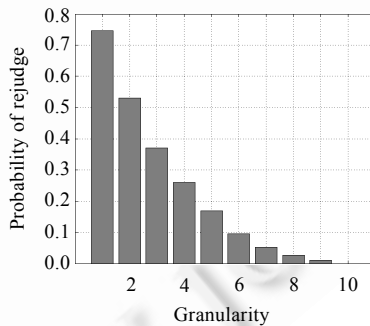


Fig.5 Granularity and probability of rejudge

图 5 粒度和二次查询概率

3.3 信道数目和查询时间

在图 6 中,将 skychannel 查询算法与 BNL 算法、D&C 算法在查询次数方面进行了比较.假设待查询信道的数目变化范围为[5,100].我们取 1 000 次操作后的平均值进行比较.

从图 6 中可以看出:随着信道数目的增加,3 种查询算法的查询次数都在增加,但是 BNL 算法和 D&C 算法的查询次数总是要多于 skychannel 查询算法的次数.可以明显地看出,skychannel 查询算法总比 BNL 算法减少大约 50%的查询次数,而比 D&C 算法减少 20%的查询次数.该实验结果说明,运用 skychannel 查询算法可以提高查询的效率.

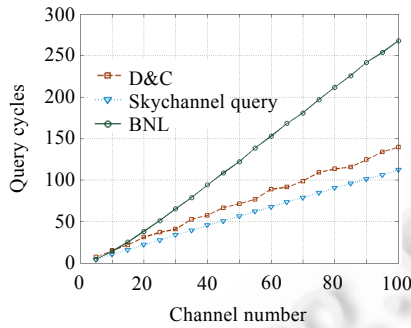


Fig.6 Channel number and query time
图 6 信道数目与查询次数

3.4 信道数目和通信开销

本节将讨论信道数目与通信开销的关系.如果没有 skychannel 查询操作,那么需要将所有感知到的信道数据发送给邻居节点.当感知到的信道数目较大时,通信开销是很大的.如果运用 skychannel 查询操作,假设仅传输 skychannel 集合即能满足频谱分配需求.在图 7 中我们可以看到:应用 skychannel 查询操作以后,可以大幅度降低通信开销.感知到的信道数目越大,系统节约的通信开销就越多.特别是当信道数目超过 6 时,需要传输的信道数据的百分比低于所有感知信道数据的 40%.也就是说,系统能够节约超过 60%的网络资源.这对于频谱资源稀缺的无线认知网络来说,意义是很重大的.

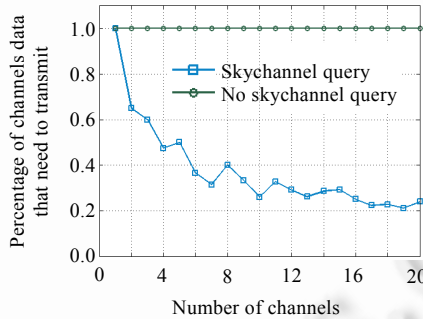


Fig.7 Channel number and communication cost
图 7 信道数目和通信开销

3.5 信道数目和计算开销

图 8 中显示的分别是应用和不应用 skychannel 查询两种情况下,需要参与频谱分配的信道数目对比.

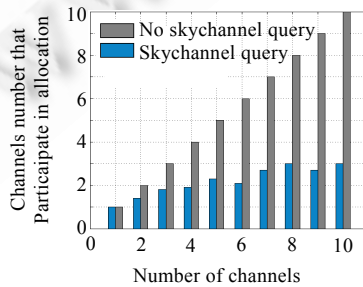


Fig.8 Channel number and computing cost
图 8 信道数目和计算开销

如图 8 所示,除了信道数目为 1 的特例以外,通过 *skychannel* 查询处理后,需要参与分配的信道数目明显少于不应用 *skychannel* 查询的情况。当信道数目增大时,*skychannel* 查询方法显示出了明显的优势,参与分配的信道数目较少,这就意味着将大量减小计算开销。这对于无线认知网络中能量有限的终端具有重要的实际意义。

4 结 论

在无线认知网络中,如果用户将感知到的所有信道数据传输给邻居节点,其中的冗余数据将耗费大量不必要的通信开销和网络资源,这对于高度动态的稀缺频谱资源和能量有限的认知终端来说是一种极大的浪费。为了减少这种不必要的数据传输,本文基于 *skyline* 查询提出了一种多目标约束下消除冗余感知数据的算法——*skychannel* 查询算法。该算法能够找到具有较大被选择概率的非被控信道 *skychannel*,仅将 *skychannel* 集合传输给邻居节点。理论分析和实验仿真均表明:在保证频谱分配合理性的前提下,应用这种 *skychannel* 查询方法能够比 BNL 算法和 D&C 算法减少查询次数,同时可以降低大量通信开销和频谱分配开销。本文中,我们假设所有用户都具有多个相同的偏好。在很多应用场景中,用户往往会关注不同的性能指标,根据自己的需求和偏好,提出不同的目标函数。在不同的偏好约束下,无线认知网络中多用户多目标的频谱决策问题,是我们下一步的研究重点。

References:

- [1] Akyildiz IF, Lee WY, Vuran MC, Mohanty S. NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey. *Computer Networks Journal (Elsevier)*, 2006,50(13):2127–2159. [doi: 10.1016/j.comnet.2006.05.001]
- [2] Zhao Q, Sadler BM. A survey of dynamic spectrum access: Signal processing, networking, and regulatory policy. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007,24(3):79–89. [doi: 10.1109/MSP.2007.361604]
- [3] Doerr C, Sicker DC, Grunwald D. Dynamic control channel assignment in cognitive radio network using swarm intelligence. In: *Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM 2008)*. IEEE, 2008. 1–6. [doi: 10.1109/GLOCOM.2008.ECP.932]
- [4] Zhang BW, Hu KY, Zhu YL. Spectrum allocation in cognitive radio network using swarm intelligence. In: *Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Communication Software and Network*. 2010. 8–12. [doi: 10.1109/ICCSN.2010.23]
- [5] Atakan B, Akan OB. Biologically-Inspired spectrum sharing in cognitive radio networks. In: *Proc. of the Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC 2007)*. IEEE, 2007. 43–48. [doi: 10.1109/WCNC.2007.14]
- [6] Wei XJ, Yang J, Li CP, Chen H. A survey on skyline query processing. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2008,19(6): 1386–1400 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/1386.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.01386]
- [7] Li JJ, Sun SL, Zhu YY. Efficient maintaining of skyline over probabilistic data stream. In: *Proc. of the 4th Int'l Conf. on Natural Computation (ICNC 2008)*, Vol.4. 2008. 378–382. [doi: 10.1109/ICNC.2008.534]
- [8] Tao YF, Papadias D. Maintaining sliding window skylines on data streams. *IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering*, 2006,18(3):377–391. [doi: 10.1109/TKDE.2006.48]
- [9] Vlachou A, Doukeridis C, Kotidis Y, Vazirgiannis M. Efficient routing of subspace skyline queries over highly distributed data. *IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering*, 2010,22(12):1694–1708. [doi: 10.1109/TKDE.2009.204]
- [10] Huang JM, Xin JC, Wang GR, Li M. Efficient k -dominant skyline processing in wireless sensor networks. In: *Proc. of the 2009 9th Int'l Conf. on Hybrid Intelligent Systems (HIS 2009)*. 2009. 289–294. [doi: 10.1109/HIS.2009.273]
- [11] Chen BC, Liang WF. Progressive skyline query processing in wireless sensor networks. In: *Proc. of the 2009 5th Int'l Conf. on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks (MSN 2009)*. 2009. 17–24. [doi: 10.1109/MSN.2009.43]
- [12] Pan LQ, Li JZ, Luo JZ. Approximate skyline query processing algorithm in wireless sensor networks. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2010,21(5):1020–1030 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3703.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03703]
- [13] Liu LX, Hu G, Peng YX. Swarm intelligence based distributed spectrum allocation for cognitive networks. In: *Proc. of the Int'l Computer Science and Information Technology: Future Information Technology*, Vol.13. IACSIT Press, 2011. 357–361.

附中文参考文献:

- [6] 魏小娟,杨婧,李翠平,陈红.Skyline 查询处理综述.软件学报,2008,19(6):1386-1400. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/1386.htm>
[doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.01386]
- [12] 潘立强,李建中,骆吉洲.无线传感器网络中一种近似 Skyline 查询处理算法.软件学报,2010,21(5):1020-1030. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3703.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03703]



胡罡(1980-),男,湖南沅江人,博士,讲师,
主要研究领域为认知无线网络.

E-mail: golfhg@vip.sohu.net



刘丽霞(1979-),女,博士,助理工程师,主
要研究领域为无线认知网,无线传感器
网络.

E-mail: 5460liulixia@126.com



周航军(1979-),男,博士,高级研究助理,
主要研究领域为并行与分布处理,大数据
计算与分析.

E-mail: zhouhangjun@cityu.edu.hk



黄震(1984-),男,博士,助理研究员,CCF
会员,主要研究领域为云计算,大数据.

E-mail: Zhenhuang.nudt@gmail.com



彭宇行(1963-),男,博士,研究员,博士生
导师,CCF 高级会员,主要研究领域为分布
式计算,云计算,大数据.

E-mail: pengyuxing1963@yahoo.com.cn