

CRN 中基于单位圆盘图模型的广播调度算法

祝 青,何建新

(湖南城市学院信息科学与工程学院,湖南 益阳 413000)

摘 要: 广播调度是目前认知无线网络中的研究热点之一,现有广播调度算法主要为近似算法,存在方案性能与最优解方案差距太大的问题。为此,提出一种基于单位圆盘图模型的广播调度算法 BS-UDGM。构建一棵基于连通支配集的广播树,作为调度的基础结构,采用平面细分和着色技术对广播树进行优化,通过混合使用单播和广播通信模式,完成广播任务。仿真实验结果表明,相比其他调度算法,该算法在延时和冗余方面的性能明显提高。

关键词: 认知无线网络;广播调度;连通支配集;单位圆盘图模型;延时

中文引用格式: 祝 青,何建新. CRN 中基于单位圆盘图模型的广播调度算法[J]. 计算机工程,2014,40(11):101-105.

英文引用格式: Zhu Qing, He Jianxin. Broadcasting Scheduling Algorithm Based on Unit Disk Graph Model in Cognitive Radio Networks[J]. Computer Engineering, 2014, 40(11): 101-105.

Broadcasting Scheduling Algorithm Based on Unit Disk Graph Model in Cognitive Radio Networks

ZHU Qing, HE Jianxin

(School of Information Science and Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China)

【Abstract】 Broadcasting scheduling problem is a hot research problem in Cognitive Radio Networks (CRN), and existing works for the broadcast scheduling issue in CRN are either heuristic solutions without performance guarantee or with performance far from the optimal solution. This paper proposes a Broadcasting Scheduling Algorithm Based on Unit Disk Graph Model (BS-UDGM). It constructs a Connected Dominating Set (CDS) based broadcasting tree, which serves as the scheduling infrastructure, and subsequently, the broadcasting tree is optimized by using the tessellation and coloring of a plane. The broadcast task is finished by employing mixed unicast and broadcast communication modes. Simulation results show that compared with the existing algorithms, the performance of the proposed algorithm is improved with respect to both latency and redundancy.

【Key words】 Cognitive Radio Networks (CRN); broadcasting scheduling; Connected Dominating Set (CDS); unit disk graph model; latency

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2014.11.020

1 概述

无线电频谱是一种珍贵有限的资源,现有的频谱分配方案^[1]大多采用静态分配原则,即把频谱资源条状分割成若干个子频段,每个子频段通常只分配给一种授权用户使用,只有很少的一部分频段未被分配。这种分配的不平衡性造成频谱资源日益枯竭,开放使用的非授权频段只占整个频谱资源的很小一部分,但在该频段的用户却很多,已基本趋于饱和;而授权频段占用了整个频谱资源的绝大部分,但根据美国联邦通信委员会(Federal Communications

Commission, FCC) 的调查发现,在不同地方不同时间,不少授权频段处于空闲状态,平均使用率仅为 5.2%。

认知无线网络^[2](Cognitive Radio Networks, CRN)可以提高无线频谱的使用效率,是下一代超宽带无线网接入的首要选择。CRN 由主要用户(PU, 认证用户)和次要用户(SU, 未认证用户)组成,它们共享相同的时间、空间、频谱。其中, SU 用户通过频谱感知,找到可以使用的空间频谱,在不对 PU 用户造成干扰的前提下,进行数据传输。在 CRN 中,有效的广播调度是一个重要的问题,它关系到 SU 用户

基金项目: 湖南省科技计划基金资助项目(2014FJ3111)。

作者简介: 祝 青(1976 -),女,副教授、硕士,主研方向:信息检索,认知无线网络;何建新,副教授、硕士。

收稿日期: 2013-11-04 **修回日期:** 2014-01-10 **E-mail:** 404685796@qq.com

的频谱感知效率、认知路由的可靠性^[3]等方面,对于提高 CRN 运行的可靠性具有重要影响。因此,本文将主要针对 CRN 中的广播调度问题展开研究。

2 相关工作

广播调度问题是 CRN 中的研究热点之一,相继有众多研究者提出了一系列解决 CRN 广播调度问题的方法,如文献[4]提出了基于首要信道半双工的无线认知传感器网络广播协议。仿真实验表明,与完全广播相比,该协议降低了广播延迟和开销,更利于应用于无线认知传感器网络。文献[5]利用静态博弈方法,根据最小增量按需驱动思想建立了节约能量的组播树,提出基于能量优化的适用于认知无线网络的按需组播路由协议。文献[6]提出了一种负载均衡的无线链路权值函数及计算算法 LBWC,在此基础上,设计了一种满足 QoS 约束的负载均衡组播路由与频谱分配算法 LMRS2A。LMRS2A 算法首先采用 LBWC 算法计算无线链路的权值,进行负载均衡组播树的构造,然后采用基于无线广播特性的 QoS 约束频谱分配算法 WBA2S 对无线链路进行信道分配。仿真结果表明,LMRS2A 能达到预定目标,不仅避免了拥塞节点的产生,而且仅需较少的传输次数。

另外,文献[7]提出了一种不需使用共同控制信道的分布式广播协议。该协议不需要网络全局拓扑信息及时间同步信息。然而该协议未给出明确的广播延时边界。文献[8]研究了多跳 CRN 网络选择性广播问题,广播消息通过预先选择的信道进行传输。通过引入相邻图和最小相邻图概念,提出了一种选择性广播近似算法,并通过仿真实验验证了算法的有效性。文献[9]提出一种 CRN 网络广播算法,以实现消息到达率最大化,降低数据冗余和传输时延。然而,该文献没有对算法进行分析,只是通过仿真对算法做了评估。文献[10]基于简单的网络干扰模型,将广播调度问题建模为整数线性规划问题,然后提出了复杂度分别为 $O(RMN^3 \log N + LN^3 \log N)$ 和 $O(LMN^3 \log N)$ 的近似算法,其中, R 是网络半径; M 是 CRN 网络的可用信道数量; N 是 SU 用户数量; L 是一次性调度中的时隙数量。然而,这 2 种近似算法的性能远低于最优解 ($O(R)$)。鉴于此,本文在现有工作的基础上,提出了一种基于单位圆盘图模型的广播调度算法 BS-UDGM。

3 系统模型

3.1 网络模型

本文假设,主要用户网络由 N 个服从泊松分布的 PU 用户组成,用集合 $V_p = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$ 表示。

PU 用户的传输半径和干扰半径表示为 R 和 R_I 。网络时间分为多个时隙,每个时隙的长度为 τ , PU 用户在时隙内传输数据报文。在每个时隙期间,主发送方的分布服从密度为 λ 的二维泊松点过程 X_T 分布。根据位移定理^[11],在每个时隙期间,主要接收方的分布与 X_T 存在关联,形成了另一个密度为 λ 的二维泊松点过程 X_R 。

次要用户网络由一个随机分布的广播源次要用户 (SU 用户) (表示为 s_0) 和 n 个随机分布的 SU 用户 (表示为 s_1, s_2, \dots, s_n) 组成。SU 用户的传输半径和干扰半径分别为 r 和 r_I 。对 2 个 SU 用户 s_i 和 s_j , 如果欧几里德距离 $D(s_i, s_j)$ 满足 $D(s_i, s_j) \leq r$, 则认为两者间存在一条链接。因此,次要用户网络可以建模为图 $G = (V_s, E_s)$, 其中, $V_s = \{s_0, s_1, \dots, s_n\}$ 为结点集, E_s 为 V_s 中 SU 用户可能形成的所有链路集。另外,本文采用 UDG 模型^[12]作为干扰模型,在该模型中,干扰范围等于发射范围,即有 $R_I \in R$, $r_I = r$ 。

3.2 问题定义

根据上述定义的网络模型,可以定义 CRN 的广播调度问题 (BSP) 如下: 设次要用户网络表示为图 $G = (V_s = \{s_0, s_1, \dots, s_n\}, E_s)$, 其中, s_0 为广播源, s_0 需要将数据报文发送给网络所有其他 SU 用户。然后,延迟为 l 的广播调度表示为一个子集序列 $\langle V_0, V_1, \dots, V_l \rangle$, 且满足: (1) $V_0 = \{s_0\}$, $\forall 1 \leq i \leq l, V_i \subseteq V_s$; (2) 在时隙 $1 \leq i \leq l$ 内, V_i 中的所有 SU 用户可以成功接收 $\cup_{j=0}^{i-1} V_j$ 中部分 SU 用户广播的数据报文; (3) $\cup_{i=0}^l V_i = V_s$, 即所有 SU 用户在调度结束时都有被广播的数据报文的一份拷贝。依据以上定义,设广播延时为 l , 广播冗余为 $\max \{d_i | s_i (0 \leq i \leq n) \text{ 在整个广播调度期间发送 } d_i \text{ 次数据报文的}\}$, 则本文要研究的问题是: 确定一种广播调度策略, 使延时 l 最低。

4 广播树的构建

本节首先构建一个基于连通支配集 (CDS) 的广播树, 表示为 T , 作为调度的基础结构。对于图 $G = (V_s, E_s)$ 的次要用户网络, 图 G 的支配集 (DS) 为 V_s 的一个子集 D , 于是对 $\forall s_i \in V_s, s_i \in D$ 或者 s_i 与 D 中部分 SU 用户相邻。如果 G 在 D 上的导出子图 $G[D]$ 相连, 则 D 为图 G 的相连支配集 (CDS)。图 G 的最大独立集 (MIS) M 为 V_s 的一个子集, 于是有: (1) 对 $\forall s_i \in V_s, s_i \in M$ 或者 $\exists s_j \in M$, 满足 $(s_i, s_j) \in E_s$; (2) $\forall s_i, s_j \in M$, 使 $(s_i, s_j) \notin E_s$ 。很明显, MIS 也为 DS。

本文根据如下 3 个步骤构建基于 CDS 集的广播树 T : (1) 以 s_0 为起点, 对图 G 实施宽度优先搜索, 确定一个 MIS, 表示为图 G 的集合 D 。如

图1(a)所示,黑色节点集合为该网络的 MIS 集。很明显,集合 D 也为一个 DS 集。 D 中的黑色节点经常称为支配节点。(2)确定一个节点最小集 C ,将 D 中的支配节点连接起来,使 $D \cup C$ 成为图 G 的一个 CDS 集。如图1(a)所示, C 由灰色节点组成,也称为连接节点。黑色节点和灰色节点共同构成图1(a)中的 CDS 集。(3)对 $V_s \setminus (D \cup C)$ 中剩余的每个白色节点,称为受支配节点,将距离最短的相邻支配节点分配给 s_0 作为其母节点。对 $C(D)$ 中的每个连接节点(除了 s_0 的支配节点),将距离最短的相邻支配节点(连接节点)分配给 s_0 作为其母节点。此时,基于 CDS 集的广播树 T 构建完毕。例如,图1(b)即图1(a)中次要用户网络构建的广播树。

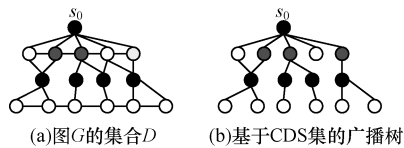


图1 广播树构建示例

对 T 树的节点 $s_i \in V_s$, 定义 $p(s_i)$ ($s_i \neq s_0$) 为其母节点, $c(s_i) = \{s_j | p(s_i) = s_j\}$ 为其子节点集。设 $\Delta(s_i) = |c(s_i) \cap (V_s \setminus (D \cup C))|$ 为子节点 s_i 在树 T 中拥有的受支配节点的数量。很明显,如果 s_i 为连接节点或受支配节点,则 $\Delta s_i = 0$ 。同时定义 $\Delta_r = \max \{\Delta(s_i) | s_i \in V_s\}$, 表示一个支配节点所能拥有的受支配子节点的最大数量。树 T 中节点 s_0 的高度定义为 $h(s_0) = 0$, 对其他节点 $s_i \neq s_0$, 它在树 T 中的高度定义为 $h(s_i) = (p(s_i)) + 1$ 。此外,树 T 的高度定义为 $h = \max \{h(s_i) | s_i \in V_s\}$ 。根据以上分析,有如下的引理:

引理1 对 $\forall s_i \in C$, s_i 最多与 D 中 5 个支配节点相邻,其中一个为其母节点。对 $\forall s_i \in D$, 如果 $s_i \neq s_0$ 且 $|c(s_0) \cap C| \leq 12$, 则 $|c(s_i) \cap C| \leq 11$, 即如果 s_i 不是根支配节点(不是 s_0), 且 s_0 最多有 12 个连接子节点, 则 s_i 最多有 11 个连接子节点。

引理2 半径 $2r$ ($3r$) 范围圆盘内, 最多有 21(42) 个支配节点。

引理3 一般地, 假设半径 θ_r 范围圆盘内支配节点的数量为 ϕ_θ , 则 $\phi_\theta \leq \frac{2\pi}{\sqrt{3}}\theta^2 + \pi\theta + 1$ 。

5 广播调度算法

在本文提出的广播调度算法 BS-UDGM 中, 一个时隙被分为 2 个部分: (1) τ_s , 表示 SU 用户的感应窗口, 用于进行频谱感知; (2) τ_d , 表示数据传输窗口, 用以传输数据报文。算法伪代码如下:

算法1 BS-UDGM 算法

输入 基于 CDS 的广播树

输出 广播调度策略

```

1:  $B_0 \leftarrow (C \cup D) \setminus \{s_0\}$ ;
2:  $B_1 \leftarrow \{s_0\}$ ;
3: while  $B_0 \neq \emptyset$  do
4:   for 每个  $s_i \in B_1$  do
5:     if  $c(s_i) \cap B_0 \neq \emptyset$  then
6:       for 每个  $s_j \in c(s_i) \cap B_0$  do
7:         如果存在可用频谱机会, 则  $s_i$  通过单播模式向  $s_j$  发送数据报文;
8:        $B_1 \leftarrow B_1 \cup \{s_j\}$ ;
9:      $B_0 \leftarrow B_0 \setminus \{s_j\}$ ;
10: 用半径为  $\frac{r}{2}$  的半开半闭六边形对 CRN 进行平面细分, 对平面细分进行  $3k^2$  上色处理, 其中  $k=2$ ;
11: 将支配节点集合  $D$  分为  $3k^2$  个互相分离的子集  $D_1, D_2, \dots, D_{3k^2}$ ;
12:  $B_0 \leftarrow V_s \setminus B_1$ ;
13: while  $B_0 \neq \emptyset$  do
14:   在每个时隙内通过调用函数 Scheduling-subset( $D_i$ ), 不断对  $D_1, D_2, \dots, D_{3k^2}$  进行调度;
```

算法1由2个阶段组成: 第一阶段(1行~6行), 将数据报文发送给树 T 的支配节点和连接节点, 即 $\{s_0\} \rightarrow D \cup C$ 。第2阶段(7行~10行), 将数据报文发送给树 T 的所有受支配节点, 即 $D \rightarrow V_s \setminus (D \cup C)$ 。第1阶段的广播调度用单播模式完成。第2阶段首先用六边形对网络平面进行细分并着色, 然后将支配节点集 D 分割为互相分离的子集。最后由支配节点在树 T 中的母节点对这些支配节点子集采用 Scheduling-subset(D_i) 函数(算法2)进行调度, 直到所有受支配节点接收到数据报文。

算法2 Scheduling-subset(D_i)

```

1: if  $\forall s_u \in D_i, c(s_u) \cap B_0 = \emptyset$  then
2:   return
3:  $\forall s_u \in D_i$ , if  $|c(s_u) \cap B_0| > \exp(\pi\lambda(r_1^2 + R_1^2))$  then
4:   如果传输过程不会给主要用户网络造成严重干扰, 则  $s_u$  向  $c(s_u) \cap B_0$  中的子节点发送数据报文;
5: else if  $0 < |c(s_u) \cap B_0| \leq \exp(\pi\lambda(r_1^2 + R_1^2))$  then
6:   对每个  $s_v \in (c(s_u) \cap B_0)$ , 如果存在可用频谱机会, 则  $s_u$  基于单播模式向其发送数据报文;
7:  $\forall s_v \in (c(s_u) \cap B_0)$ , if  $s_v$  成功接收到来自  $s_u$  的广播报文 then
8:    $B_0 \leftarrow B_0 \setminus \{s_v\}$ ;
```

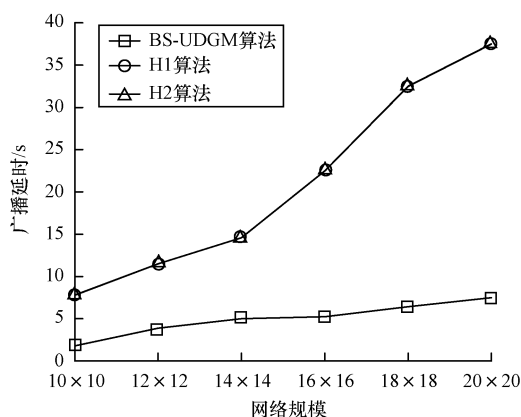
从算法2中可以看出, Scheduling-subset(D_i) 函数通过使用混合单播和广播模式完成广播调度任务。对 SU 用户 $s_i \in D_i$, 如果它还没有接收到数据报文的子节点数量不低于阈值 $\exp(\pi\lambda(r^2 + R^2))$, 则它将广播数据报文。否则, 它将通过单播方式将数据发送给仍在等待接收广播报文的子节点。

6 仿真实验

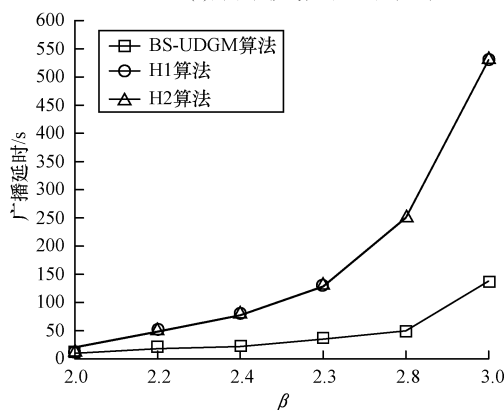
本文采用 Matlab2012 进行仿真实验来验证 BS-UDGM 算法的延时和冗余性能。在仿真中,设定主要用户网络和次要用户网络在大小为 $X \times Y$ 的方形区域内共存,且共享同一信道。PU 用户行为服从密度为 λ 的泊松分布;携带广播报文的广播源 SU 用户和 n 个其他 SU 用户随机分布。次要用户网络的网络密度为 $\rho = \frac{n}{\text{网络规模}}$ 。网络时间分为多个时隙,每个时隙长度为 1 ms,其他参数设为: $X = 15, Y = 15, \rho = 4.0, \lambda = 0.15, r = 1.0, R = 1.0, \beta = 2.0$ 。此外,本文采用文献[10]中提出的 2 种近似算法(分别表示为 H1 算法和 H2 算法)作为比较对象。下文比较 BS-UDGM、H1、H2 算法在延时和冗余方面的性能。每组仿真重复 50 次,取均值作为最终结果。

6.1 广播延时分析

图 2 给出了 3 种算法的延时性能比较结果。



(a) 网络规模与广播延时的关系



(b) β 与广播延时的关系

图 2 BS-UDGM 算法的广播延时

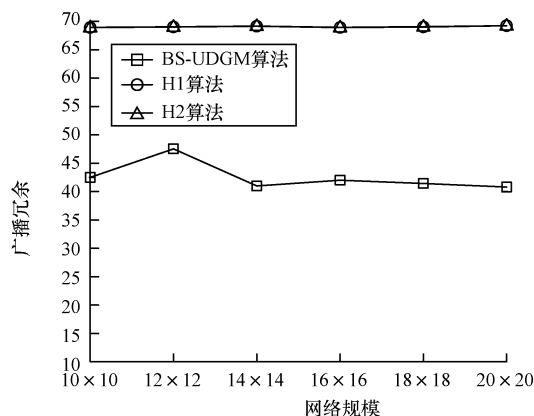
将 SU 用户密度确定为 $\rho = 4.0$ 时,网络规模对 3 种算法的影响见图 2(a)。从图中可以看出,当网络规模上升时,所有算法的延时均有上升。这主要是因为:有更多 SU 用户参与到广播任务中,广播树的高度增加。BS-UDGM 算法性能优于 H1 和 H2,面对大型 CRN 时更是如此。这是因为成功的广播

机会往往比成功的单播机会更为难得。利用这一特点,BS-UDGM 首先通过单播方式,将报文发送给部分 SU 用户。然后,BS-UDGM 通过混合使用单播和广播模式,对这些 SU 用户同时调度,以实现通信效率最大化,显著提高了广播调度的速度。平均来说,BS-UDGM 算法的延时相比 H1 和 H2 分别下降了 297.89% 和 297.98%。

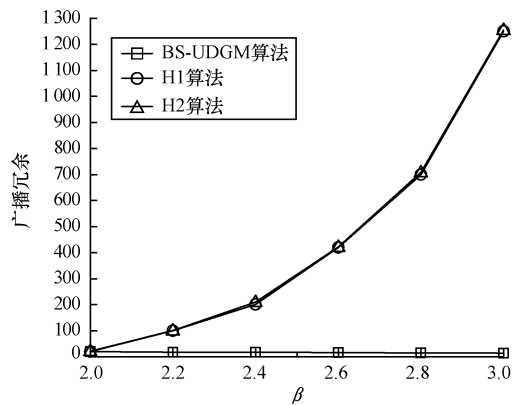
当 β 变大时,3 种算法的延时变化情况见图 2(b)。从中可以看出, β 增大时,3 种算法的延时也会增大。这是因为: β 越大,SU 和 PU 的干扰范围越大。所以,3 种算法的传输并行性和频谱机会下降,从而导致延时上升。另外,由于 BS-UDGM 可以根据不同网络情况自适应地运用混合单播和广播通信模式来完成广播调度任务,因此延时要低于 H1 和 H2 算法。

6.2 广播冗余分析

图 3 给出了 3 种算法的广播冗余性能比较结果。



(a) 网络规模与广播冗余的关系



(b) β 与广播冗余的关系

图 3 BS-UDGM 算法的广播冗余

从图 3(a) 中可以看出,如果网络密度固定,改变网络规模,所有算法的广播冗余保持稳定。这主要是因为广播冗余与网络的规模无关,它只取决于广播树中的子节点数量和可用频谱机会的多少。因此,网络规模对 3 种算法的冗余度影响很小。此外,BS-UDGM 性能优于 H1 和 H2。这是由于 H1 和 H2

只使用广播通信模式,由于CRN广播传输可能会频谱机会的不足使得接收方数量极低,因此,H1和H2算法中的SU用户需要广播多次以保证子节点接收到报文,既浪费了SU用户的能量,又给PU用户造成了更大的干扰。而BS-UDGM算法可用根据网络情况自适应地采用单播和广播模式,从而实现通信效率最大化。因此,BS-UDGM的广播冗余效率更高,冗余度平均比H1和H2算法降低了63.68%和63.79%。

另外, β 对3种算法的影响见图3(b)。从图中可以看出,当 β 变大时,H1和H2的冗余显著上升。这是因为它们的冗余度主要取决于广播频谱机会,而频谱机会受 β 值影响。 β 值越大,SU和PU用户的干扰范围越大。因此, β 较大时,频谱机会减少,H1和H2冗余变大。另一方面,BS-UDGM算法冗余度的决定性因素是SU用户拥有的子节点数量。因此, β 值较大时,对BS-UDGM延时性能有较大影响,但对冗余性能的影响很小。总的来说,BS-UDGM冗余基本保持稳定,而H1和H2的冗余度是BS-UDGM的8.46倍和8.47倍。

7 结束语

广播调度问题一直是CRN研究中较为重要的内容,针对现有广播调度算法的不足,本文基于单位圆盘图模型,提出了一种改进的广播调度算法,仿真实验结果表明,本文算法相对当前其他算法延时更低,冗余效率更高。下一步工作的重点是考虑采用随机图理论对认知无线网络中的路由问题进行建模,研究基于最小化延迟的认知路由算法。

参考文献

- [1] 邱祝芳,陈志刚,杨艺清. 基于SNR和谱熵的协作式频谱感知算法仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(4): 662-667.
 - [2] 赵贺楠,黄刘生,张银东,等. 认知无线网络中终端群的接入网切换算法[J]. 小型微型计算机系统, 2013, 34(8): 1732-1735.
 - [3] 张光华,张玉清,刘雪峰. 认知无线网络中基于信任的安全路由模型[J]. 通信学报, 2013, 34(2): 56-64.
 - [4] 普健杰,曾凡仔. 基于首要信道的无线认知传感器网络多信道广播协议[J]. 通信学报, 2013, 34(7): 81-86.
 - [5] 王超,张羲,周贤伟,等. 基于能量优化的认知无线网络组播路由协议[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(7): 99-101.
 - [6] 邱祝芳,陈志刚,刘蕙. 一种认知无线Mesh网络中负载均衡的组播路由算法[J]. 计算机学报, 2013, 36(3): 521-531.
 - [7] Song Yi, Xie Jiang. A Distributed Broadcast Protocol in Multi-hop Cognitive Radio Ad Hoc Networks Without a Common Control Channel [C]//Proceedings of INFOCOM'12. [S. l.]: IEEE Press, 2012: 2273-2281.
 - [8] Kondareddy Y R, Agrawal P. Selective Broadcasting in Multi-hop Cognitive Radio Networks [C]//Proceedings of Sarnoff Symposium. [S. l.]: IEEE Press, 2008: 1-5.
 - [9] Ertugrul O, Buzluca F. An Efficient Broadcasting Scheme for Cognitive Radio Ad Hoc Networks [C]//Proceedings of the 4th International Conference on Cognitive Radio and Advanced Spectrum Management. [S. l.]: ACM Press, 2011: 5-13.
 - [10] Arachchige C J L, Venkatesan S, Chandrasekaran R, et al. Minimal Time Broadcasting in Cognitive Radio Networks [M]. Berlin, Germany: Springer, 2011.
 - [11] Abramson J, Pitman J. Concave Majorants of Random Walks and Related Poisson Processes [J]. Combinatorics, Probability & Computing, 2011, 20(5): 651-682.
 - [12] Lotker Z, Peleg D. Structure and Algorithms in the SINR Wireless Model [J]. ACM SIGACT News, 2010, 41(2): 74-84.
- 编辑 任吉慧
-
- (上接第100页)
- [3] 唐甲东,蔡明. 基于LEACH协议的能耗均衡路由算法[J]. 计算机工程, 2013, 39(7): 133-141.
 - [4] 王伟超,代增全,徐启建. LEACH协议簇头选择算法的改进[J]. 无线电工程, 2010, 40(3): 1-3.
 - [5] Liang Ying, Yu Haibin. Energy Adaptive Cluster-head Selection for Wireless Sensor Networks [C]//Proceedings of the 6th International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies. Dalian, China: [s. n.], 2005: 634-638.
 - [6] Xu Jia, Jin Ning, Lou Xizhong, et al. Improvement of LEACH Protocol for WSN [C]//Proceedings of 2012 International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. Chongqing, China: [s. n.], 2012: 2174-2177.
 - [7] Li Yuling, Ding Luwei, Liu Feng. The Improvement of LEACH Protocol in WSN [C]//Proceedings of 2011 International Conference on Computer Science and Network Technology. [S. l.]: IEEE Press, 2011: 1345-1348.
 - [8] Zhao Fuzhe, Xu You, Li Ru, et al. Improved Leach Communication Protocol for WSN [C]//Proceedings of 2012 International Conference on Control Engineering and Communication Technology. Jilin, China: [s. n.], 2012: 700-702.
 - [9] 王志刚,李腊元,李春林. 一种新的无线传感器网络均匀分簇路由协议[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(31): 81-84.
 - [10] 王振飞,纪越峰. 基于能量均衡策略的无线传感器网络LEACH协议改进[J]. 东南大学学报, 2008, 38(S1): 262-270.
 - [11] 刘明,曹建农,陈贵海,等. EADEEG: 能量感知的无线传感器网络数据收集协议[J]. 软件学报, 2007, 18(5): 1092-1109.
 - [12] Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An Application-specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Network [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 4(1): 660-670.
 - [13] 万青苗,张浩平,王强,等. 无线传感器网络LEACH协议的改进研究[J]. 电脑知识与技术, 2012, 32(8): 7679-7701.
- 编辑 任吉慧