

一种基于遗传算法的信道感知顺序设计

韩 寒^{1,3} 周 君² 王敬超³

(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)¹ (解放军 73681 部队 南京 210042)²

(中国电子设备系统研究所 北京 100141)³

摘 要 认知无线电中,认知用户必须不断对待选频段进行扫描以发现可用频谱用来通信。在感知能力有限的现实环境下,认知用户逐一进行信道的感知带来的问题是,感知信道越多,耗时越长,用于通信的时间就越短。所以合理设计感知顺序将是非常关键的技术。对该问题进行了全面的分析和建模,相比前人工作又引入了空闲概率和信道容量等因素,但是该问题变成了 NP 难问题。为了在多项式时间内求解该问题,使用了遗传算法。不仅设计了详细的算法过程,使用了精英保留等多种加速算法收敛的技术,而且重点对交叉算子进行了研究,提出了 3 种可行的交叉算子:单点交叉、多点交叉和编码交叉。在仿真分析中比较了遗传算法和全搜索算法的复杂度和准确度,同时以平均吞吐量和最大吞吐量为准,对 3 种交叉算子进行了仿真比较,验证了编码交叉算子的相对优越性。

关键词 遗传算法,信道感知,编码交叉,认知无线电

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.3.018

Approach of Channel Sensing Order Based on Genetic Algorithm

HAN Han^{1,3} ZHOU Jun² WANG Jing-chao³

(College of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)¹

(PLA Troop 73681, Nanjing 210042, China)²

(Research Institute of China Electronic System, Beijing 100141, China)³

Abstract In cognitive radio, the cognitive user has to sense all the candidate channels to search idle channels. In practice, its sensing ability is limited, which makes the user sense the channel in one-by-one mode. However, the more channels are to sense till an idle is found, the more time is needed to spend in the sensing process, so that the less time is remainder for transmission. Therefore, sensing order is critical for the spectrum efficiency. In this paper, the optimization of sensing order problem was modeled completely with the idle probability and channel capacity considered, which is different from the previous studies. Since the modeled problem is NP-hard, the traditional optimization lacks computation efficiency. Therefore, the genetic algorithm was adopted. Different from the classical genetic algorithm, the proposed algorithm develops a unique elite reservation strategy. Moreover, three crossing operators were proposed intensively for the problem, i. e. the single-spot crossing, the multiple-spot crossing and the coding crossing. In simulation, the computation complexity and the accuracy are compared between the genetic algorithm and brute force algorithm. After obtaining the advantage of the genetic algorithm, we compared the three proposed crossing operators in terms of expected throughput and maximum throughput, and verified the superiority of the coding crossing operator.

Keywords Genetic algorithm, Channel sensing, Coding crossing, Cognitive radio

1 前言

认知无线电技术^[1]是一种动态频谱接入技术,旨在解决固定频谱分配带来的频谱短缺和浪费的矛盾问题。认知无线电用户可以改变自己的收发信机参数,以动态地适应无线环境的变化,并且这种改变不能给授权用户带来干扰。所以这种技术的先决条件是能够准确快速地感知现有的空闲频谱,以在主用户到来时能够快速地发现并及时退出该信道的使用,当主用户离开时,又能够及时利用该空闲信道资源。在没

有发现可用信道资源时,认知用户将不断地进行信道的搜索,直到发现可用频谱,但是较长的搜索时间将带来可用信道资源的减少^[2]。所以如何在有限的时间内搜索到可用容量最大的信道,以获得最大的认知用户吞吐量,将是一个极为重要的问题。

由于信道是有差异的:不同的信道有不同的空闲概率、带宽和信道质量,因此接入信道的吞吐量不仅与接入信道的时间有关,而且还与信道的带宽和信道质量有关。文献[3]考虑实际感知和接入的硬件限制:每次最多感知 N 个信道,使用

到稿日期:2015-01-26 返修日期:2015-04-08 本文受国家自然科学基金重点项目(61231011),国家自然科学基金面上项目(61172062)资助。

韩 寒(1986-),男,博士生,主要研究方向为认知无线电、资源分配,E-mail:hhhd20042008@163.com;周 君(1983-),女,硕士,助理工程师,主要研究方向为认知无线电;王敬超(1980-),男,博士,工程师,主要研究方向为卫星通信。

的相邻信道数不超过 W 个, 频谱片断 (fragment) 不超过 F 个。文中假设可以对感知到的空闲信道捆绑使用, 使用最佳停止准则分析感知增益和代价的最佳折中, 最终得到每次感知的信道数。但是文中认为信道是同构的, 感知的信道只有数目的差别, 没有“哪几个”和“先后顺序”的差异, 这在实际中是欠妥的。文献[4]以切换时延最小为调度优化目标, 设计感知顺序, 并得出了顺序排列的标准表达式。在同构和异构两种授权信道环境下分别给出了蜕化等式和贪婪次优解。对信道状态的预测采用贝叶斯学习和最大似然联合更新, 通过仿真看出其比单一似然估计性能优越。文献[5]考虑不同的信道有不同的主用户流量模型, 所以不同的信道的感知时间不同。对多个信道依次进行感知, 直到发现可用的空闲频谱信道进行通信。文章关注于各信道的感知时间的确定, 优化目标是 minimized 搜索时延, 但是却忽略了感知顺序对该优化问题的影响, 实际上不同的感知顺序会带来不同的切换时延性能。文献[6]对单用户的感知顺序问题进行了研究, 以吞吐量最大为调度感知任务的目标。经过推导得到, 直觉感知顺序(按信道的空闲概率由大到小进行感知)在不使用自适应调制的通信环境中是最优的, 但在使用自适应调制技术时考虑不同的信道有不同的信道容量, 给出了动态规划实现的最佳频谱感知顺序。其计算复杂度虽然相对强搜索有所降低, 但还是比较大, 有待进一步降低。之后又对信道可用概率未知的情景采用贝叶斯推理的方法进行了分析。后来作者在文献[7]中又对两个用户感知顺序的相互影响进行了分析, 提出了两种启发式算法用于设置两个用户的感知顺序。文献[8]考虑各信道(信道容量相同)的空闲概率未知情况下的信道选择和感知任务调度问题。文中提到优化选择的目标应该有两个: 短期增益是即时传输容量; 长期增益是更新的统计状态信息, 可以用于未来决策的制定。对单感知信道环境提出了最优信道秩准则, 每次选择的信道应该是具有最大信道秩(信道秩每个周期进行更新)的信道; 该准则同样适用于多感知信道环境, 只不过每次选择前 K 个最大信道秩的信道。文章创新点是新颖的调度目标和信道秩的定义, 可以应用于在线学习环境; 但是信道异构性的影响未做考虑, 有待深入研究。文献[9]提出在感知到空闲信道即将进行通信的情景下, 如果信道的空闲概率相等, 那么依照信道的容量由大到小的感知顺序是最佳的; 而且对多个用户存在时采用这种感知顺序带来的冲突概率和资源利用率进行分析, 取得了一些理论上的成果。但其只关注信道容量的影响, 对信道空闲概率带来的对认知吞吐量的影响分析不够充分。

总体来讲, 对感知顺序的确定有两种直观的方法, 一种是按照信道的空闲概率由高到低排序作为感知顺序, 另一种是按照信道的容量由高到低进行排序作为感知顺序。实际上这两种感知顺序都不是最佳的, 最佳的感知顺序应该是以最大化认知用户的吞吐量为目标的。但是该顺序的计算是较为复杂的, 难以在多项式时间内得解。本文将引入遗传算法对该问题进行全新的分析和求解, 将最优顺序问题建模成染色体进化问题, 采用轮盘赌的选择方式, 设计了3种不同的交叉算法完成该求解过程, 并进行了性能的比较和实验结果的分析。

2 感知顺序设计

本文考虑 N 个主用户和 1 个认知用户的目标环境。每一个主用户占用一个授权信道, 每个信道的带宽为 $B_k, k=1, 2, \dots, N$ 。信道被建模为 AWGN (Addictive White Gaussian Noise) 信道, 各信道的平均噪声功率不同, 为 $\sigma_k, k=1, 2, \dots, N$ 。 N 个信道都可以被认知用户调整中心频率而动态接入。授权信道相互独立, 每个信道被主用户的占用都建模成 ‘0-1’ 两状态的 Markov 随机过程, ‘0’ 表示信道空闲, ‘1’ 表示信道被主用户占用。当信道的参数分别为 (λ_i, μ_i) 时, 状态转移概率为:

$$\begin{aligned} P_{01}^i(\Delta t) &= \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} - \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} e^{-(\lambda_i + \mu_i)\Delta t} \\ P_{11}^i(\Delta t) &= \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} + \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} e^{-(\lambda_i + \mu_i)\Delta t} \\ P_{00}^i(\Delta t) &= \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} + \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} e^{-(\lambda_i + \mu_i)\Delta t} \\ P_{10}^i(\Delta t) &= \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} - \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} e^{-(\lambda_i + \mu_i)\Delta t} \end{aligned} \quad (1)$$

认知用户只有单天线, 一次只能感知一个信道, 在一个感知周期内可以依次感知多个信道, 直到发现空闲信道为止, 这就是所谓的“多感知信道”。假设认知用户以单位功率发射信号, 接收机到发射机间的信道质量的变化较为缓慢, 所以信噪比在 L 个周期内保持不变, 设为 $SNR_k, k=1, 2, \dots, N$ 。 L 个周期后进行一次全频段的信道质量探测, 重新确定每个信道的 SNR。本文研究某一个周期的感知顺序问题, L 值的确定不属于我们的研究范围。在每一个周期开始前, 对各信道的空闲概率进行更新, 更新方程为:

$$\theta_i = P_{idle} = \begin{cases} P_{10}^i(\Delta_1 t), & \text{最近一次感知结果为‘1’} \\ P_{00}^i(\Delta_0 t), & \text{最近一次感知结果为‘0’} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\Delta_1 t$ 是从最近一次感知到现在的时间间隔, 最近一次的感知结果为“忙”; $\Delta_0 t$ 是从最近一次感知到现在的时间间隔, 最近一次的感知结果为“闲”。本文暂不研究不同感知周期间的相互影响, 认为各感知周期间相互独立。在每一个周期都进行多信道感知后接入信道, 感知接入模型如图 1 所示。

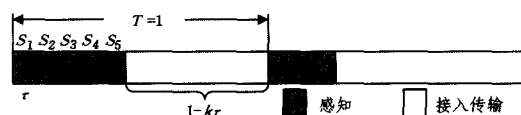


图 1 感知接入模型(前一周期 $k=5$, 后一周期 $k=3$)

说明: 图 1 中有 10 个目标信道(主用户), 前面一个感知周期按照周期开始前设置的感知顺序感知了 5 个信道后发现信道空闲, 后面一个感知周期感知 3 个信道后发现了空闲信道。如果 10 个信道都感知完仍未发现空闲信道的存在, 则停止在该周期的认知通信, 下一个周期继续进行。

设信道的感知顺序为 $s = (s_1, s_2, \dots, s_N)$, N 为信道数, s 为 $\{1, 2, \dots, N\}$ 的一个全排列。这里忽略信道的空闲概率更新时间(见图 1), 用于信道接入的时间为:

$$T_{acc} = 1 - k \cdot \tau \quad (3)$$

k 为该周期感知的信道数, τ 为单信道感知时间 ($\tau < 1/N$), 不失一般性, 各感知周期的时间相等, 设为 1。忽略信道的感知差错。信道 i 的接入容量以香农公式计算, 如下:

$$C_i = B_i \log(1 + \text{SNR}_i) \quad (4)$$

该周期的期望吞吐量为:

$$Q = E[C_k(1 - k\tau)] = \sum_{k=1}^N \left(\prod_{i=1}^{k-1} (1 - \theta_i) \right) \theta_k C_k (1 - k\tau) \quad (5)$$

其也是我们优化的目标。该感知顺序问题的数学模型归纳为求解最优的感知顺序,使得:

$$s^o = \arg \max_s Q \quad (6)$$

该问题是一个 NP 问题,下面将从遗传算法的角度寻找可行解。

3 最优感知顺序的遗传算法

从上一节的分析可以看出,最优感知顺序的全搜索策略将是感知顺序集 Ω 中逐一搜索最优顺序。共有 $N!$ 个元素,每个感知顺序需要进行 N 次乘法运算,故复杂度为 $O(N * N!)$ 。为有效折中这种最优性和复杂性,本文采用遗传算法进行问题的求解。

3.1 遗传算法设计

基本遗传算法求解过程可包括:编码、种群初始化、适应度评价、遗传操作(选择、交叉、变异)、终止条件判定、解码等步骤,算法参数包括交叉概率、变异概率、最大遗传代数、种群大小、染色体长度等。以待确定感知顺序的 N 个信道为基因,也即染色体的长度为 N 。最大遗传代数为 $10 * N$ 。无线场景包括预先已探明的 N 个信道的空闲概率和信道容量,该变量随机生成。目标函数值定义为感知顺序所能获得的认知用户的期望吞吐量,参见式(5)。

这里的适应度定义为期望吞吐量的平方归一化值,也即:

$$F(k) = \frac{Q^2(k)}{\sum_{j=1}^N Q^2(j)} \quad (7)$$

对每一代的种群都要计算最大期望吞吐量及其对应的感知顺序和平均的期望吞吐量,并且将该感知顺序作为精英保留的对象直接保留到下一代种群中,以此方式缩短迭代搜索的时间。

传统的遗传算法可以采用多种遗传终止条件,但是在本算法中基于简单性考虑,采用固定遗传代数的方法。

3.2 变异和选择算子设计

轮盘赌选择是在当前种群中根据个体的适应度值,按某种准则挑选出好的个体进入下一代种群。每个个体进入下一代的概率就等于它的适应度值与整个种群中个体适应度值的比例。每个个体就像圆盘中的一个扇形部分,扇面的角度和个体的适应度值成正比,随机拨动圆盘,圆盘停止转动时指针所在扇面对应的个体被选中,显然,适应值越高,被选中的可能性就越大。这里直接定义选中的概率为适应度,即

$$p(k) = F(k), k = 1, 2, \dots, N! \quad (8)$$

由于在复制、交叉、变异的 3 个过程都可能造成上一代精英的消失,因此在 3 个过程中都要进行精英保留的操作。精英保留的操作可以简单地认为是将上一代的最优的感知顺序无条件地遗传到下一代中,取代下一代中的一个个体。另外,为防止取代的对象是该代中最优的个体,本算法设计将下一代中的最差个体使用上一代的精英个体取代。

变异运算的实质是将感知顺序中的两个元素互换位置,

如下某种变异可能是:

变异前: 2 4 1 6 7 3 5

变异后: 2 4 3 6 7 1 5

其中 $N=7$, 当然是否变异是受变异概率决定的。

3.3 交叉算子设计

本文对感知顺序的交叉算子作了深入研究,提出了 3 种交叉算子,分别为单点交叉、双点交叉和编码交叉。下面分别予以介绍:

1) 单点交叉。以自然顺序为染色体,随机确定一个交叉点,并为了使交叉后的两个染色体仍然是合法的染色体,该算子需要寻找对方染色体的对应基因位置,并进行置换,如图 2 所示。

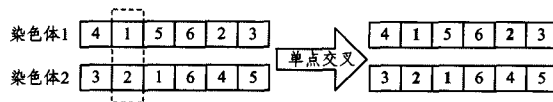


图 2 染色体的单点交叉算子

在图 2 中不仅第二位置上的 1 和 2 基因进行了交换,而且连带着的 1 号染色体的基因 2 和 2 号染色体的基因 1 也进行了交换,这样保证了交换后的两个染色体仍然是合法的。

2) 双点交叉。为了加快新个体的生成速度,提出双点交叉算子,其实质就是两个单点交叉相继执行。需要注意的是,为使新个体生成能够突破局部最优的限制,两个交叉点的选取约定为一个在染色体的前半段,一个在染色体的后半段,如图 3 所示。

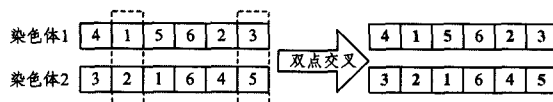


图 3 染色体的双点交叉算子

图 3 中不仅进行了交叉点 1 的单点交叉,也进行了交叉点 2 的单点交叉,且是先执行 1 再执行 2。当然,有可能交叉点 1 带来的位置变动在第 2 个单点交叉时又被改动,这是允许的。

3) 编码交叉。本交叉算子摒弃了前两种算子对非交叉点的联动影响,采用编码的方式避免新的个体的非法性。具体来讲,染色体不再采用自然顺序,而是采用编码顺序,设某染色体为 $[R(1), R(2), \dots, R(N)]$, 对第 k 位的基因的翻译语言为:“以 1 到 N 的自然顺序为参照,去掉前面的已解码信道后,第 $R(k)$ 位的信道即为第 k 位基因的代表信道”。若顺序号小于参照长度,则取循环后的值。如染色体 2-6-4-3-5-1 的翻译为:以顺序 1-2-3-4-5-6 为参照,第 2 位的信道 2 即为染色体的第一个基因代表的信道;去掉信道 2,以 1-3-4-5-6 为参照,第 6 位的信道 1 即为染色体的第二个基因代表的信道;再去掉信道 1,以 3-4-5-6 为参照,第 4 位的信道 6 即为染色体的第三个基因代表的信道;再去掉信道 6,以 3-4-5 为参照,第 3 位的信道 5 即为染色体的第四个基因代表的信道;再去掉信道 5,以 3-4 位参照,第 5 位的信道 3 即为染色体的第五个基因代表的信道;再去掉信道 3,剩下信道 4 即为染色体的第六个基因代表的信道。综上,即染色体 2-6-4-3-5-1 的翻译的感知顺序为信道 2-1-6-5-3-4。

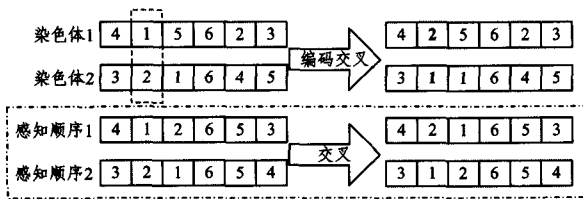


图4 染色体的编码交叉算子

这种编码的好处是可以允许染色体中的基因重复,比如上面例子中染色体若为 2-4-4-3-5-1, 依上翻译方法得到感知顺序为:信道 2-5-6-4-1-3。这样,交叉便可以不用考虑下一代的合法性了,如图 4 所示。

4 仿真结果与分析

仿真环境:8 个待排序信道,交叉概率为 0.6,变异概率为 0.01,最大遗传代数 301,总群数目为 80, $\tau=0.01$,空闲概率在 $[0,1]$ 之间随机生成,信道容量在 $[0,10]$ 之间随机生成。得到的仿真结果如图 5 所示。

295	0.264883	0.011872	6	1	2	4	7	8	3	8	遗传算法每一代的精英
296	0.265883	0.072453	6	1	2	4	7	6	3	8	遗传算法每一代的精英
297	0.268883	0.067668	6	1	2	4	7	6	3	8	遗传算法每一代的精英
298	0.269883	0.110197	5	1	2	4	7	6	3	8	遗传算法每一代的精英
299	0.264883	0.132888	5	1	2	4	7	6	3	8	遗传算法每一代的精英
300	0.265883	0.137915	5	1	2	4	7	6	3	8	遗传算法每一代的精英
301	0.265883	0.103447	5	1	2	4	7	6	3	8	遗传算法每一代的精英

最大期望吞吐量为: 0.2598
 最佳解为: 5 1 2 4 7 6 3 8 代数: 14 遗传算法得到的结果
 真实最佳解为: 5 1 2 4 7 6 3 8
 吞吐量: 0.2598 全搜索得到的结果

图5 遗传算法的结果显示

其中,每一代的遗传结果都将记录下来,在最上方的矩形框中由左到右的数据列依次显示遗传代数、最大吞吐量、平均吞吐量以及最佳的感知顺序。将其与全搜索进行了比较,可以得出本文所提遗传算法可以获得最优感知顺序。

为研究算法的收敛性,将遗传算法的迭代收敛过程绘出,如图 6 和图 7 所示。两者基本上都在 50 次迭代之内完成了最优值的搜索,相比强搜索 $O(N * N!)$ 的计算复杂度,可以看出遗传算法有较大的优势。

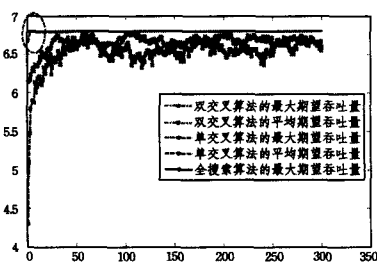


图6 双交叉算子和单交叉算子的性能比较

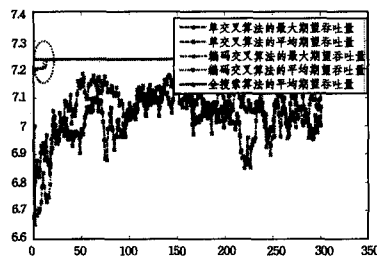


图7 编码交叉和单交叉算子的性能比较

为研究不同的交叉算子带来的性能差异,在图 6 和图 7 中分别进行了双交叉算子和单交叉算子的比较以及编码交叉

和单交叉算子的比较。由图 6 可以得出,双交叉算子比单纯的单交叉算子在收敛速度上有所改善,主要是由于交叉的幅度比较大,产生新的优秀的感知顺序的可能性更大。由图 7 可以得出,编码交叉可以以较快的收敛速度获得最优解,节约了搜索时间,从而性能也较传统的单点交叉算法有改进。对比平均期望吞吐量和最大吞吐量性能,可以从图 6 和图 7 的结果看出,前者相对后者在波动范围方面更大,这是由于智能算法在快速搜索最优解过程中体现出来的剧变性,也恰是由于这种特性才使得遗传算法可以以较小的计算复杂度和时间复杂度获得接近最优的信道感知顺序。

虽然遗传算法在收敛速度上优于全搜索,但是它的不足之处是可能会收敛到局部最优解,这样就难以获得最佳值,这也是使用遗传算法必须付出的代价。

将本文算法(基于编码交叉)和现有算法进行比较,得到图 8 所示的结果。其中,H. T. Cheng 的算法见文献[9],主要思想是依据各信道的期望信道容量进行顺序感知。H. Jiang 的算法见文献[6],主要思想是依据各信道的期望空闲概率进行顺序感知。可以看出,随着信道数的增多,本文所提算法仍然可以获得最佳的感知顺序,且可使用的信道增多,吞吐量也就变大。H. T. Cheng 的算法在信道数越多时,越不能获得最优感知顺序,因为信道数越多,容量大的信道出现低空闲概率的可能性也越大。H. Jiang 的算法更是失去了优势,且更易首选信道容量差的信道,导致信道数越多,性能越恶化。从以上仿真分析可以看出本文所提算法的优越性。

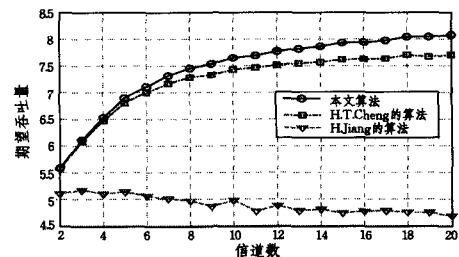


图8 不同算法关于信道数目的性能比较

结束语 本文对感知顺序问题的求解进行了重新的分析,引入了信道空闲概率和信道容量等更为全面的考察因素,建立了最优感知顺序的求解模型。为了在多项式时间内求解该 NP 难问题,本文采用遗传算法,并且对遗传算法的交叉算子进行了详尽的探讨,提出了 3 种交叉算子,同时通过仿真验证了遗传算法的可解性和优越性,为最优感知顺序的获取提供了坚实的支撑。

参考文献

[1] Ge F, Chen Q, Wang Y, et al. Cognitive Radio: From Spectrum Sharing to Adaptive Learning and Reconfiguration [C]// IEEE Aerospace Conference. Big Sky, Montana, Mar, 2008

[2] Chen Ming. Cognitive Radio Spectrum Access Energy Efficiency Algorithm [J]. Computer Science, 2014, 41(7): 184-186, 221 (in Chinese)

陈明. 基于能效的认知无线电频谱接入算法[J]. 计算机科学, 2014, 41(7): 184-186, 221

(下转第 112 页)

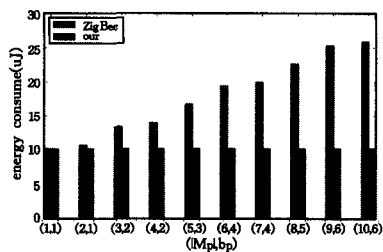


图7 M_P 和 b_P 对能耗的影响

结束语 本文设计了一个基于两跳邻居的地址借用策略,允许节点在缺少可用地址的情况下向其两跳范围内的邻居节点借用地址以缓解孤儿节点问题。本文策略通过给 IEEE 802.15.5 mesh 网络的 Hello 帧增加一个“剩余未使用地址数”字段,让代理节点直接向剩余地址最多的邻居节点借地址,无须广播一个地址借用请求,以此减小地址借用过程的开销。理论分析和仿真结果均表明,本文策略能够提高节点加入网络成功概率和网络地址利用率,且能够降低地址借用过程的能耗。

参考文献

[1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramanian Y, et al. Wireless sensor networks: a survey [J]. *Computer Networks*, 2012, 38(4): 393-422

[2] Rodenas-Herraiz D, Garcia-Sanchez A J, Garcia-Sanchez F, et al. Current trends in wireless mesh sensor networks: a review of competing approaches [J]. *Sensors*, 2013, 13(5): 5958-5995

[3] Liu Y H, He Y, Li M, et al. Does wireless sensor network scale? A measurement study on GreenOrbs [J]. *IEEE Transactions on Parallel And Distributed Systems*, 2013, 24(10): 1983-1993

[4] ZigBee Alliance (ZigBee Document 02130r7) Draft Version 0.90, Network Specification [S]. 2004

[5] Part 15.5: mesh topology capability in wireless personal area networks (WPANs); IEEE Std. 802.15.5-2009 [S]. 2009

[6] Garcia-Sanchez A J, Garcia-Sanchez F, Rodenas-Herraiz D, et al. On the synchronization of IEEE 802.15.5 wireless mesh sensor networks: shortcomings and improvements [J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2012(198): 1-23

[7] Zhang R, Park T, Lee M J, et al. Testbed experimentation of a meshed tree routing with local link state for wireless PAN mesh [C]//IEEE International Conference on Communications, 2008; 3060-3065

[8] Lee M J, Zhang R, Zheng J, et al. IEEE 802.15.5 WPAN mesh standard-low rate part: meshing the wireless sensor networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2010, 28(7): 973-983

[9] Lee M J, Zhang R, Zhu C, et al. Meshing wireless personal area networks; introducing IEEE 802.15.5 [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2010, 48(1): 54-61

[10] Pan M S, Tsai C H, Tseng Y C. The orphan problem in ZigBee wireless networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2009, 8(11): 1573-1584

[11] Ren Z, Suo J W, Liu Y, et al. High efficient and low delay address assignment algorithm for LR-WPAN Mesh [J]. *Computer Application*, 2014, 34(1): 1-3

[12] Giri D, Roy U K. Single level address reorganization in wireless personal area network [C]// International Conference on Computers and Devices for Communication, 2009: 1-4

[13] Li Y R, Shi H B. Address assignment and routing protocol for large-scale uneven wireless sensor networks [C]// International Symposium on Computer Network and Multimedia Technology, 2009: 1-4

[14] Giri D, Roy U K. Address borrowing in wireless personal area network [C]// IEEE International Advance Computing Conference, 2009: 181-186

[15] Fang M Q, Wang J, Xu X H. A preemptive distributed address assignment mechanism for wireless sensor networks [C]// Proceedings of The 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobil Computing, 2009: 1-5

[16] Park S, Lee E J, Ryu J H. Distributed borrowing addressing scheme for ZigBee/IEEE 802.15.4 wireless sensor networks [J]. *ETRI Journal*, 2009, 31(5): 525-533

[17] Yao Y, Li P, Ren Z, et al. A borrowed address assignment algorithm based on inheritance relation for ZigBee networks [C]// IEEE International Conference on Computational Problem-Solving (ICCP), 2011: 454-457

[18] Hu S C, Lin C K, Tseng Y C, et al. Distributed Address Assignment with Address Borrowing for ZigBee Networks [C]// IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC), 2014: 454-459

[19] Vazifehdan J, Venkatesha R, Niemegeers I. Energy-efficient reliable routing considering residual energy in wireless ad hoc networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2014, 13(2): 434-447

(上接第92页)

[3] Jia J, Zhang Q, Shen X. HC-MAC: A Hardware-Constrained Cognitive MAC for Efficient Spectrum Management [J]. *IEEE J. Selected Areas in Comm.*, 2008, 26(1): 106-117

[4] Kim H, Shin K G. Fast Discovery of Spectrum Opportunities in Cognitive Radio Networks [C]// Proc. IEEE Int'l Symp. Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN'08), 2008

[5] Guo C, Peng T, Qi Y, et al. Adaptive channel searching scheme for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks [C]// Proceedings of the 2009 IEEE Wireless Communications & Networking Conference, Budapest, Hungary, 2009: 1337-1342

[6] Jiang H, Lai L, Fan R, et al. Optimal selection of channel sensing

order in cognitive radio [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(1): 297-307

[7] Fan R, Jiang H. Channel sensing-order setting in cognitive radio networks; a two-user case [J]. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 2009, 58(9): 4997-5008

[8] Lai L, Gamal H E, Jiang H, et al. Cognitive Medium Access: Exploration, Exploitation and Competition [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2007, 10(2): 239-253

[9] Cheng H T, Zhuang W. Simple Channel Sensing Order in Cognitive Radio Networks [OL]. <http://engine.lib.uwaterloo.ca/ojs2.2/index.php/pptvt/article/view/541>