

认知无线传感网在规则拓扑中的媒体接入调度方法

李文翔^{1,2}, 张 峰², 马娅婕²

(1 冶金工业过程系统科学湖北省重点实验室(武汉科技大学), 湖北 武汉 430081;

2 武汉科技大学 信息科学与工程学院, 湖北 武汉 430081)

摘 要: 针对多种规则拓扑结构, 探讨基于 TDMA 和认知无线电的媒体接入调度策略; 为 Square、Hexagon 和 Triangle 结构设计时隙和信道组合选择算法, 并分析比较了对应的开销和吞吐量, 指出 Square 结构具有最佳的传输性能; 基于 OMNet++ 平台下面向 Square 结构的仿真实验, 指出 Square 中的 4 时隙调度方法提供最佳的传输性能, 且较小的时隙长度有益于提升吞吐量。

关键词: 规则拓扑; 认知无线网; 信道接入控制; 无线传感网

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)08-0080-05

The Scheduling Method for Media Access in Cognitive Wireless Sensor Network with Regular Topology

LI Wen-xiang^{1,2}, ZHANG Feng², MA Ya-jie²

(1 Hubei Province Key Laboratory of Systems Science in Metallurgical Process

(Wuhan University of Science and Technology), Wuhan 430081, China)

(2 School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: Explore the media access scheduling methods based on TDMA and cognitive radio for regular topology structures. Design timeslot and channel selection algorithm for such topologies as Square, Hexagon and Triangle, analyze on the cost and maximal throughput of these methods, and point out that Square yields the optimal transmission performance. The OMNet++ based simulation experiment for Square topology verified the superiority of 4-timeslot scheduling method, and showed that smaller timeslot helps to increase throughput.

Key words: regular topologies; cognitive radio network; medium access control; wireless sensor network

1 引言

认知无线网络技术(CRN)^[1]使各类网络设备协同工作, 通过对网络和用户环境的智能学习和决策高效共享频谱资源. CRN 已成为未来异构网络共存与融合的有效手段, 将此技术应用在未授权 ISM 频段的无线传感网(WSN)中, 发展为一种新型的网络——认知无线传感网(Cognitive Radio Sensor Network, CRSN)^[2].

采用规则拓扑结构的 CRSN 能够以较少的节点进行可控的网络部署, 实现采集对象的精确定位和监测区域的完全覆盖, 具有相比随机拓扑结构更好的网络传输性能和扩展性^[3]. 适用于与其他类型网络共存的区域中的监控. 但 WSN 中的数据采集通信体现为多对一的汇聚模式, 汇聚点(Sink)附近的节点易产生时域和空域上的通信冲突, 且具有很大的运行开销. 作为较早面向规则拓扑结构的 CRSN 研究, 本文通过高效媒体接入方法的设计解

收稿日期: 2013-10-21; **修回日期:** 2013-12-19

基金项目: 国家自然科学基金(61104215); 湖北省教育厅科技研究计划(Q20141110); 武汉科技大学教育部冶金自动化与检测技术工程研究中心开放基金(MARC201304, MRAC201307); 冶金工业过程系统科学湖北省重点实验室(武汉科技大学)开放基金(Y201322); 武汉科技大学大学生创新基金(12ZRC123)

决多种规则拓扑在空域上的通信冲突问题,在保障 PU 优先通信机会的同时,也实现 CU 间的最大同步通信. 提出 C-MAX 和 DC-MAX 两种基于 TDMA 的认知媒体接入方法.

2 相关工作

TDMA 型 MAC 协议^[4-7]不存在信道监听和冲突,相比争用信道型 MAC 协议,在规则拓扑中的效率要高些. 其中 Yun Wang 和 Dharma P. Agrawal^[5]在规则拓扑 WSN 中实现 k -hop 分簇,簇内各节点形成向簇首树形汇聚的传输模式,在此基础上实现簇内的 TDMA 调度,给定链路带宽 BW,对 2-hop 成簇的 Square、Triangle 和 Hexagon,其每 TDMA 帧内吞吐量分别达到 $BW/7$ 、 $BW/9$ 和 $BW/6$,在 1-hop 成簇时则分别达到 $BW/5$ 、 $BW/7$ 和 $BW/4$. 给定节点度为 k ,MAX 协议将规则拓扑网络分块,每块含 $(k+1)$ 个节点,一个时隙内块内只有一个节点发送数据,链路吞吐量达 $BW/(k+1)$,这与文献^[5]中 1-hop 成簇的结论是一致的.

在动态频谱接入条件下,MAX 虽然进行了针对多信道的分块方法设计,但没有实现链路吞吐量的提升. C. Cicconetti^[6]在多接口多信道的 Square 拓扑 WMN 中设计信道分配和路由方法,但只采用了面向随机拓扑的优化模型,并未利用拓扑的结构特性展开优化. 目前 CRSN^[7-8]中尚缺乏针对规则拓扑的高效认知接入方法.

3 时隙和信道分配方法

将 Sink 节点放置在直角坐标系的源点,规则拓扑中的其他点位于第一象限. 假设所有节点以单接口多信道进行单工通信,并都已实现启动和休眠时间同步^[9]. 网络的时隙设置方法如图 1 所示,其中整个网络生存期包含多个数据采集周期 ($T_{ON/OFF}$),每个 $T_{ON/OFF}$ 由待机时间 T_{ON} 和睡眠时间 T_{OFF} 两部分组成,此 T_{ON} 又包含多个 TDMA 帧 (TF). 每个 TF 包含频谱感知时隙 t_0 ,和记为 $t_1, t_2, \dots, t_k$ 的 k 个等长度时隙,用于数据传输或寻找频谱空穴并进行频谱切换,其中 k 为可直接通信的邻节点数目. 在 t_0 中 CU 仅检测其所占用的几个信道,用来判断是否可以继续利用这些频谱,故 t_0 可设得小些.

在 CRSN 中对应的问题:如何为各链路选择信道和时隙,以减小通信冲突并实现最大的吞吐量. 采用边着色理论分析,将同步单播通信的链路染上同一颜色. 若所用信道取自频谱池 $\{c_1, c_2, \dots, c_l\}$, j 为

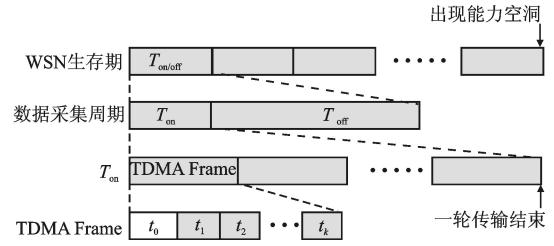


图1 网络运行中的时隙结构

最大可用信道数,则将时隙和信道的选择描述为一个 2 元着色问题:给定 $1 \leq i \leq k, 1 \leq j \leq l$, 为每条链路指定一个着色 2 元组 (t_i, c_j) , 使网络满足 2 个约束条件,且所用信道数最少. 2 个约束分别为: (C1) — 具有相同着色 2 元组的链路至少间隔 2 跳,以保证同步通信互不干扰, (C2) — 各节点的 k 条链路的第一着色元素互不相同,以确保该节点与各邻点采用不同的时隙通信. 针对这个问题,在直角平面坐标系中设计 2 元着色算法,从 Sink 开始进行宽度优先遍历着色,得出不唯一的各边着色方案. 描述如下:

时隙与信道选择的 2 元着色算法

输入	直接通信邻节点数 k , 链表表示的拓扑图 $G(V, E)$, 节点平面坐标数组 $NodeArr(v, x, y)$, 数组中按到 Sink 距离递增顺序进行节点元素排序, 以保证宽度优先遍历
输出	最小第二着色数 χ'_c , 各链路染色 2 元组数组 $ECArr(e, (t, c))$
(1) 初始化所选信道数: $\chi'_c = 0$ (2) 以任一点为坐标系原点, 计算其各链路 with x 轴的夹角, 将夹角与时隙类型建立一一映射关系, 保存在数组 $Angle[k] = \{0, 2\pi/k, 2 \cdot 2\pi/k, \dots, (k-1) \cdot 2\pi/k\}$ 中 (3) 初始化当前点为 Sink: $CurNode \leftarrow Sink$ (4) 取以 $CurNode$ 为端点的一条未处理链路, 赋给 $CurEdge$ (5) 在以 $CurNode$ 为原点的直角坐标系中, 计算 $CurEdge$ 与 x 轴的夹角, 根据 $Angle[k]$ 赋 $CurEdge$ 以对应类型的时隙, 标记 $CurEdge$ 对应的链路为已处理 (6) 如果有以 $CurNode$ 为端点的链路未分配时隙, 将此链路赋为 $CurEdge$, 转至 (5) (7) 标记 $CurNode$ 为已处理 (8) 如果有节点未处理, 则将此节点赋为 $CurNode$, 转至 (4) (9) 标记所有链路和节点为未处理状态, 初始化当前节点为 Sink: $CurNode \leftarrow Sink$; 取 $CurNode$ 的一条未处理链路, 赋给 $CurEdge$ (10) 遍历网络中已处理过的同时隙类型的链路, 检查是否存在某个已选的信道使 $CurEdge$ 选用此信道后满足约束 C1 (11) 如果找到了满足约束条件 C1 的已选信道 $CurCh$, 连同此链路的时隙组成 2 元组, 添加到 $ECArr$ 中, 并标记此链路已处理完 (12) 否则添加新信道 $CurCh$, χ'_c++ , 连同此链路时隙组成 2 元组, 添加到 $ECArr$ 中, 标记此链路处理完 (13) 如果 $CurNode$ 中还有未处理链路, 转到 (9) (14) 标记 $CurNode$ 处理完, 如果 $NodeArr$ 中还有节点未处理, 则选择 $CurNode$ 后一节点作为新的 $CurNode$, 转到 (9) (15) 输出 χ'_c 和 $ECArr$, 结束	

此算法中, (1)、(2) 步为初始化, (3) ~ (8) 为各

链路分配满足约束(C2)的时隙类型,(9)~(14)为各链路分配满足约束(C1)的信道.每个节点有 k 条链路需要处理,且每个链路需要遍历所有已处理链路以满足约束(C1),故算法的时间复杂度为 $\Theta(k \cdot |V| \cdot |E|)$.

在 CRSN 部署过程中,选择可能对 PU 造成最小影响的信道,如图 2 所示,基于 IEEE 802.11 的 PU 多采用信道 1、6、11 以避免信道间干扰,则基于 IEEE 802.15.4 的 CU 可选择信道 5、10、15、16,尽可能与 PU 所用的信道不重叠.

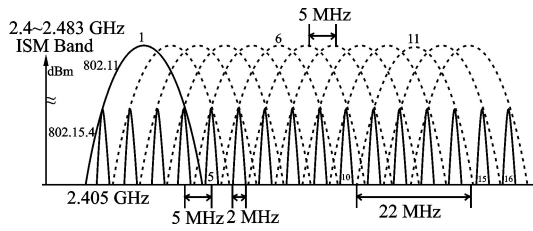


图 2 IEEE 802.11 与 IEEE 802.15.4 的信道共存

4 媒体接入调度方法分析

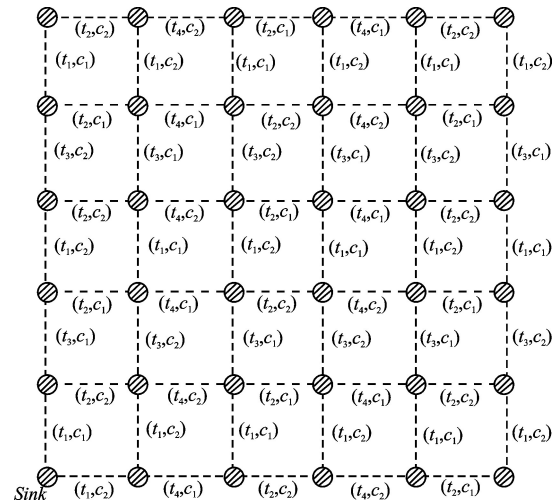
利用以上算法,提出认知媒体接入调度方法(Cognitive MAX,记为 C-MAX)如图 3 所示.其中虚线链路上的 2 元组指示了所用的时隙和信道,给定一个节点,根据链路所起的不同作用,对应的时隙可称为发送时隙或接收时隙.考虑到 Sink 附近的节点承受很重的负载,可用最大吞吐量来描述对应的传输性能.

对 Square 结构,可看出最少需 2 个信道实现所有节点间同步通信,在每个 TF 的 4 个时隙内, $1 \leq i \leq 4$,每个链路只在一个时隙工作.不考虑边界节点的影响,每个节点以 $t_i \cdot BW / (t_0 + 4 \cdot t_i)$ 的吞吐量分别向左节点和下节点发送数据,以 $t_i \cdot BW / (t_0 + 4 \cdot t_i)$ 的吞吐量分别从上节点和下节点接收数据, Sink 在 2 个时隙内从上邻点和右邻点接收数据,故理论上每 TF 内最大吞吐量为

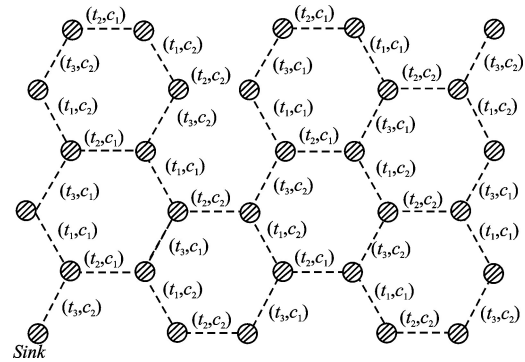
$$TP_{\text{Squ}} = \frac{2 \cdot t_i \cdot BW}{t_0 + 4 \cdot t_i}, 1 \leq i \leq 4 \quad (1)$$

类似的,Hexagon 需要 2 个信道,在每个 TF 的 3 个传输时隙内, $1 \leq i \leq 3$,每个节点或者以吞吐量 $t_i \cdot BW / (t_0 + 3 \cdot t_i)$ 发送数据并以吞吐量 $2 \cdot t_i \cdot BW / (t_0 + 3 \cdot t_i)$ 接收数据,或者以吞吐量 $t_i \cdot BW / (t_0 + 3 \cdot t_i)$ 接收数据并以吞吐量 $2 \cdot t_i \cdot BW / (t_0 + 3 \cdot t_i)$ 发送数据. Sink 能在 3 个时隙中的 1 个接收数据,故 TF 内最大吞吐量为

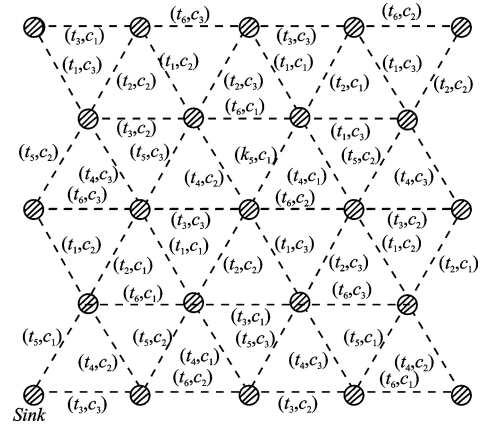
$$TPF_{\text{Hex}} = \frac{t_i \cdot BW}{t_0 + 3 \cdot t_i}, 1 \leq i \leq 3 \quad (2)$$



(a) Square 需 2 个信道和 4 个时隙



(b) Hexagon 需 2 个信道和 3 个时隙



(c) Triangle 需 3 个信道和 6 个时隙

图 3 规则拓扑 CRSN 的 TDMA 信道接入

Triangle 具有更多的直接通信邻节点,故其需要 3 个信道. Sink 能在 6 个时隙中的 2 个接收数据包,故其在 TF 内最大吞吐量为

$$TPF_{\text{Tri}} = \frac{2 \cdot t_i \cdot BW}{t_0 + 6 \cdot t_i}, 1 \leq i \leq 6 \quad (3)$$

基于图 3(a),添加 2 个时隙 t_5 、 t_6 并采用 4 个信道,实现 45 度角方向的对角线链路,提出图 4 所示的 4-信道对角线接入方法(Diagonal Cognitive

MAX, DC-MAX). 对角线链路能将 2-hop 通信减至 1-hop, 但由于距离增大, 对角线节点间的通信需要更大的能耗, 且 6 个时隙带来较大的 TF. Sink 在 3 个时隙内从上邻点、右邻点级对角线邻点接收数据, 故理论上每个 TF 内最大吞吐量为

$$TP_{\text{Squ-Diag}} = \frac{3 \cdot t_i \cdot BW}{t_0 + 6 \cdot t_i}, 1 \leq i \leq 6 \quad (4)$$

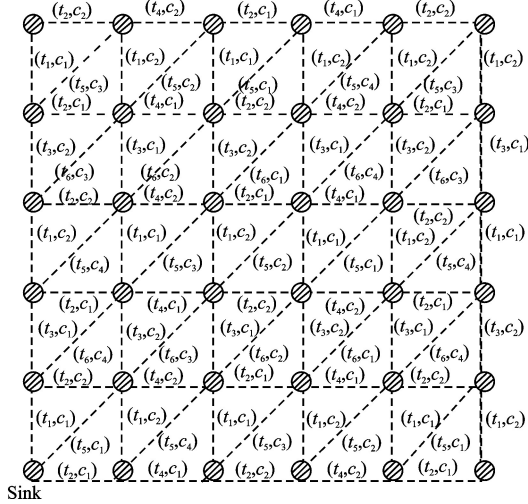


图4 Square CRSN 的 TDMA 对角接入

采用 C-MAX 或 DC-MAX, 节点几乎在每个时刻都处于有效的发送 / 接收状态, 相对减少了空闲待机状态下的能耗. 结合 (1) ~ (4) 绘出曲线, 几种方法在每 TF 内的最大吞吐量随 t_0/t_i 的变化特性如图 5 所示.

从图中看出, 随着 t_0/t_i 增大, 各调度方案的吞吐量降低, 这体现了频谱感知效果和传输吞吐量之间的折中. 当 t_0 足够小时, Square、Triangle 和 Hexagon 的最大吞吐量可分别达到 $BW/2$ 、 $BW/3$ 和 $BW/3$.

对 Square 结构, 当 $t_0/t_i < 6$ 时 (图 5 中箭头 ①), C-MAX 的每 TF 内最大吞吐量高于 MAX 的, 当 $t_0/t_i < 9$ 时 (箭头 ②), C-MAX 的每 TF 内最大吞吐量高于 MAX 的. 对 Triangle, 当 $t_0/t_i < 8$ 时 (箭头 ③), C-MAX 的每 TF 内最大吞吐量高于 MAX 的. 而对于 Hexagon, 仅在 $t_0/t_i < 1$ (箭头 ④) 时, C-MAX 才体现出优势.

显然, Hexagon 无法提供高的吞吐量. TPF_{Tri} 低于 TPF_{Squ} , 且由于更多的邻节点数目, Triangle 中的 TF 要大些, 故 Triangle 的实际传输性能要低于 Square 的. 在 Square 中, C-MAX 的吞吐量要低于 DC-MAX 的, 但其对应的 TF 更小, 故难以直接判断哪一种调度策略产生更好的传输性能.

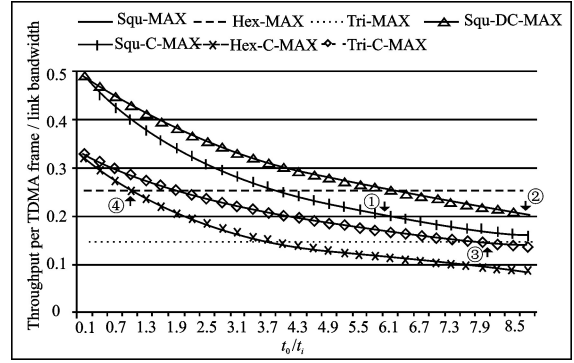


图5 各媒体接入方案下每帧内的吞吐量

5 仿真实验与分析

在 OMNet++ 平台下通过仿真实验对 Square 结构中的多种调度方法的传输性能进行分析. 拓扑中竖直方向含 $j_m=10$ 行、水平方向含 $i_m=10 \sim 30$ 列节点. 考虑到 CRSN 频段的窄带特性, 可认为在发现 PU 后, 从 t_1 到 t_k 的时间足以找到频谱空穴并完成频谱切换. 仿真参数设置如下: DATA 数据包未遇到 PU 干扰或链路失效而成功传输的概率为 0.9; 每个节点在 5 s 的数据采集周期内产生一个 DATA 包; 考虑链路带宽和数据包长度, 成功传输一个 DATA 包并收到 ACK 包的时延为 1 ms; 感知时隙长度 $t_0=2$ ms, t_i 分别取 4 ms、6 ms、...18 ms.

采用随机路由选择方式, 进行 200 个采集周期的仿真, 设定 T_{PS} 参数分别为 4 ms、6 ms、8 ms、..., 得到不同网络规模下, 在一次数据采集周期内所有数据包传到 Sink 所需的时间, 结果如图 6 所示, 图例中接入方法名称后的数字为拓扑中节点横向的列数与纵向的行数之比.

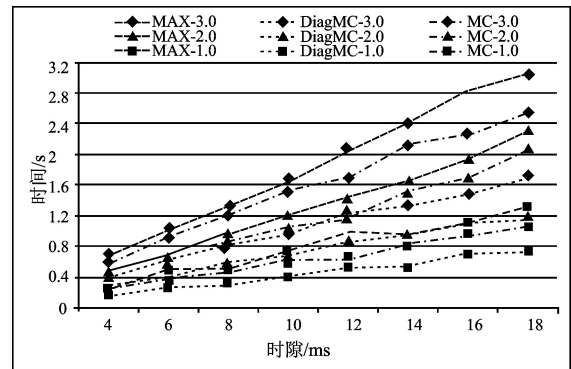


图6 以 T_{PS} 为参数的数据包传输平均时延

从中看出, MAX 的实际时延约为 MC-MAX 的 1.71 ~ 1.75 倍, 为 DiagMC-MAX 的 1.13 ~ 1.20 倍. 在相同网络规模下, MC-MAX 的时延要明显小于其他两个的, DiagMC-MAX 的时延与 MC-MAX

有明显差距,MAX 的最低;时延随 T_{PS} 增加近似呈线性增大趋势,可认为取较小的 T_{PS} 取有益于提升吞吐量。

6 结束语

文中提出了面向规则拓扑结构的媒体接入调度方法,分析、比较了对应的开销和理论最大吞吐量,能为高效的部署认知无线传感网提供方法参考。其它值得进一步探讨的问题包括:面对信道之间的特性差异和信道间的干扰,如何为 CU 选择具体的信道;针对具有双工及多工通信能力的节点,如何设计调度方法以进一步提升性能;采用层次化结构的规则拓扑 CRSN 的时隙和信道分配问题。

参考文献:

- [1] De Domenico A, Strinati E C, Di Benedetto M. A survey on MAC strategies for cognitive radio networks [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2012, 14(1): 21-44.
- [2] Vijay G i, Ben Ali Bdira E, Ibnkahla M. Cognition in wireless sensor networks: a perspective [J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(3): 582-592.
- [3] Yun Z Q, Bai X L, Xuan D. Complete optimal deployment patterns for full-coverage and k-connectivity ($k < 6$) wireless sensor networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2010, 18(3): 934-947.
- [4] Hong K Z, Hua Y B. Throughput analysis of large

wireless networks with regular topologies [J]. Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking, 2007(1):3.

- [5] Wang Y, Dharma P A. Optimizing sensor networks for autonomous unmanned ground vehicles [C] // SPIE. Cardiff, UK: SPIE Press, 2008(711215)1-11.
- [6] CicconeIII C, Gardellin V, Lenzini L, et al. PaMeLA: A joint channel assignment and routing algorithm for multi-radio multi-channel wireless mesh networks with grid topology [C] // Proc. of 6th IEEE International Conference on Mobile Ad hoc and Sensor Systems. China:Macau, 2009: 199-207.
- [7] 阙保强, 范建华, 王建业. 认知无线网络信道接入协议 [J]. 软件学报, 2012, 23(7): 1824-1837.
- [8] Satish C Jha, Mohammad M Rashid, Vijay K Bhargava. Medium access control in distributed cognitive radio networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(4): 41-51.
- [9] 李云, 王学军. 基于同构型环境的认知无线网络拥塞控制算法 [J]. 微电子学与计算机, 2013, 30(10): 13-16.

作者简介:

李文翔 男,(1979-), 博士, 副教授. 研究方向为认知无线网。

张峰 男,(1990-), 硕士研究生. 研究方向为无线传感网。

马娅婕 女,(1974-), 博士, 教授. 研究方向为无线传感网。

(上接第 79 页)

间,本文算法预处理时间比 AC 算法多,是由于本文改进预处理阶段所做的额外工作造成。由于本文算法对 AC 算法的改进,可看到本文算法的匹配时间明显小于 AC 算法,使系统的性能得到大大提高。

5 结束语

本文从内容过滤网关的架构设计和多模式匹配算法进行分析,采用 Netgraph 内核级的数据包捕获引擎和改进的多模式匹配优化算法相结合,大大提高了网关对报文的处理速度和内容过滤的性能,同时在实际产品中也取得了良好的应用,将具有广阔的前景。

参考文献:

- [1] 沈凤仙, 朱巧明, 刘钊. 基于 Netfilter 的实时网页内容过滤器的设计与实现 [J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(7): 198-201.

- [2] netgraph [EB/OL]. [2013-10-23]. <http://www.freebsd.org/cgi/man.cgi>.

- [3] 石磊. 多网卡绑定技术的研究与实现 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
- [4] 王佰玲, 方滨兴, 云晓春. 零拷贝报文捕获平台的研究与实现 [J]. 计算机学报, 2005, 28(1): 46-52.
- [5] 王若梅, 张绮雯, 周凡. 一种新的多模式快速匹配算法 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2005(11): 117-120.
- [6] Aho A V, Corasick M J. Efficient string matching: an aid to bibliographic search [J]. Communications of the ACM, 1975, 18(6): 333-340.
- [7] 孙钦东, 黄新波, 王倩. 面向中英文混合环境的多模式匹配算法 [J]. 软件学报, 2008, 19(3): 674-686.

作者简介:

何怀文 男,(1980-), 讲师, 博士研究生. 研究方向为云计算、网络安全、绿色计算。