

# 基于 M&S 模型的分布式认知无线网络时间同步机制

汤 璘<sup>1</sup> 刘俊霞<sup>2</sup> 赵 丽<sup>3</sup> 齐兴斌<sup>3</sup>

(四川省装备制造业机器人应用技术工程实验室 德阳 618000)<sup>1</sup>

(新疆大学信息科学与工程学院 乌鲁木齐 830046)<sup>2</sup> (山西大学计算机工程系 太原 030013)<sup>3</sup>

**摘要** 针对分布式认知无线网络(DCRN)中节点时间同步的问题,提出一种基于M&S同步模型的节点协作式时间同步机制。首先,选定的主用户(PU)通过控制信道将其空闲频谱列表广播到邻居节点,以确定节点对之间的可用公共信道;然后,邻居节点以该PU节点为参考,在公共信道上发送同步信息,并通过M&S同步模型调整内部计时器,从而实现时钟同步;经过多次迭代,最终实现全网时间同步。实验结果表明,该方案能够实现DCRN的时间同步,同时具有较快的收敛速度和较低的开销。

**关键词** 分布式认知无线网络,时间同步,M&S同步模型,节点协作

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.12.012

## Time Synchronization Scheme for Distributed Cognitive Radio Networks Based on M&S Model

TANG Lin<sup>1</sup> LIU Jun-xia<sup>2</sup> ZHAO Li<sup>3</sup> QI Xing-bin<sup>3</sup>

(Sichuan Equipment Manufacturing Industry Robot Application Technology Engineering Laboratory, Deyang 618000, China)<sup>1</sup>

(School of Information Science and Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)<sup>2</sup>

(School of Computer Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030013, China)<sup>3</sup>

**Abstract** Aiming at the time synchronization in distributed cognitive radio network (DCRN), a collaborative time synchronization scheme based on M&R model was proposed. First, the selected primary user (PU) broadcasts the free spectrum list to the neighbor nodes through control channel, to determine the available common channel between the node pairs. Then, the neighbor node takes this PU node as a reference node, and transmits the synchronization information on this common channel. At the same time, the M&S synchronization model is used to adjust the internal timer of nodes, to realize the clock synchronization. After several iterations, finally the entire network time synchronization is realized. Experimental results show that the proposed scheme can achieve the time synchronization for DCRN, and has faster convergence speed and lower cost.

**Keywords** Distributed cognitive radio network, Time synchronization, M&S synchronization model, Node collaborative

分布式认知无线网络(Distributed Cognitive Radio Networks, DCRN)是一种分布式自组织多跳网络,其将认知无线电(Cognitive Radio, CR)技术应用到了自组织网络中<sup>[1]</sup>。次级用户(Secondary User, SU)对主要用户(Primary User, PU)的频谱进行感知,在不对PU产生干扰的前提下,通过择机的方式接入暂时空闲的PU频段,以提高频谱利用效率<sup>[2]</sup>。

分布式自组织网络中,业务通信通常采用时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)技术,而TDMA中最关键的前提就是时钟同步。然而,自组织网络中的节点由于硬件问题,其内部时钟存在一定的误差<sup>[3]</sup>。另外,节点以分布式形式分布且可能存在移动性,无固定的中心节点来对所

有节点的时钟进行校准,从而导致网络的实时业务传输能力降低<sup>[4]</sup>。因此,保证自组织网络的时钟同步尤为重要。对于DCRN,由于SU节点无固定的通信信道,需要择机占用频谱来进行通信,因此DCRN的时钟同步比其他分布式自组织网络的难度更大。

解决时钟同步的方法主要有两种:1)利用全球定位系统(Global Positioning System, GPS)标时,该方法成本高、能耗大;2)建立时钟同步协议,其又可分为:依赖主节点同步、依赖中间节点同步和节点互相协作同步<sup>[5]</sup>,其中最著名的为属于节点互相协作同步类型的发送者-接收者同步机制(Timing-sync Protocol for Sensor Networks, TPSN)<sup>[6]</sup>,但其假设根节

到稿日期:2016-12-20 返修日期:2017-02-17 本文受新疆维吾尔自治区高校科研计划自然科学基金项目(XJEDU2014S074, XJEDU2016S106),山西省基础研究计划项目——青年科技研究基金(2014021039-6)资助。

汤璘(1981—),男,硕士,讲师,主要研究领域为计算机网络, E-mail: tlwylwolf@163.com; 刘俊霞(1980—),女,博士生,主要研究领域为计算机网络、移动通信网络规划与建模; 赵丽(1980—),女,硕士,副教授,主要研究领域为计算机网络、中文信息处理; 齐兴斌(1976—),男,硕士,副教授,主要研究领域为计算机网络。

点在网络中央且各节点之间的距离已知,具有一定局限性。为此,学者对上述方法进行了一些改进。文献[7]提出了一种用于传感器网络的改进型 TPSN 机制(Tree Timing-sync Protocol for Sensor Networks, TTPSN),该机制将网络构建成为一个树状结构,通过层层转发来实现全网同步;然而,当网络中的节点移动时,其需要重建树,从而导致了额外开销。文献[8]描述了一种用于 Ad-hoc 多跳网络的同步机制(DMTS),但其对传输延迟采用估计的方式,接收到的时间信息不准确,从而导致同步精度较低。目前,针对 DCRN 的时钟同步的研究还较少,原因在于 DCRN 中 SU 节点的频谱具有不确定性。上述自组织网络的同步机制也可用于 DCRN 中,但需要增加一个频谱感知和确定公用信道过程。

本文提出一种基于 M&S 同步模型的 DCRN 节点协作时间同步机制,该机制主要分为同步请求阶段和时间设置阶段。在同步请求阶段,选定的 PU 通过与邻居节点之间的协作来确定节点对之间的可用公共信道。在时间设置阶段,邻居节点以该 PU 节点为参考,通过 M&S 同步模型调整内部计时器来实现时钟同步。经过多次迭代扩散,最终实现全网时间同步。与现有自组织网络的同步机制相比,本文方案在同步收敛速度和同步开销方面都具有较优的性能。

## 1 M&S 同步模型

M&S 同步模型<sup>[9]</sup>来源于萤火虫同步现象,萤火虫同步是一种著名的互同步现象,由东南亚地区大量萤火虫在深夜里出现同步闪烁现象而启发。随后, Mirollo 和 Strogatz 将萤火虫同步建模成一个脉冲耦合振荡器数学模型(即 M&S 模型)<sup>[10]</sup>。

在 M&S 模型中,振荡器拥有固定周期  $T$ 、频率和相位  $\phi$ ,每个振荡器都有一个内部定时器  $t$  用以控制其周期和频率, $t$  的值不断从 0 增加到阈值  $T$ ,当  $t=T$  时,振荡器将其内部定时器  $t$  重置为 0,并发出一个脉冲,以此模拟萤火虫的闪烁。其他振荡器观察该振荡器的脉冲,若不同步则产生耦合,改变电压状态量,从而改变相位量,进而调整内部定时器  $t$ ,最终实现同步性<sup>[11]</sup>。M&S 模型中,变量  $t$  为相位  $\phi$  的函数:

$$t=f(\phi) \quad (1)$$

其中, $f$  为一个定义域和值域都在  $[0,1]$  上单调递增的上凸函数,即  $f:[0,1] \rightarrow [0,1]$ ,  $f(0)=0$ ,  $f(1)=1$ 。在振荡器中,变量  $t$  可被视为到达 1 时的电压,然后触发萤火虫闪烁并降到 0,根据振荡器的固有频率,电压再次朝着 1 上升。当其他振荡器接收到闪烁时,电压  $t$  提升一个增量  $\epsilon$  (小于 1 的定值):

$$t'=\min(t+\epsilon,1); \phi'=f^{-1}(t') \quad (2)$$

其中, $t'$  和  $\phi'$  为振荡器在收到脉冲后其内部计时器和相位的更新值。当  $t'$  大于阈值  $T$  时,振荡器重启计时器,即设置  $t=0$  并发出脉冲。图 1 给出了振荡器中计时器  $t$  的同步调整过程。在未收到任何外部脉冲时,振荡器自然波动并在等于  $T$  的时间上发出脉冲,如图 1(a) 所示。而当振荡器在  $t=x$  处观察到另一个振荡器的脉冲时,基于方程  $\min(t+\epsilon,1)$  调整其计时器,如图 1(b) 所示。经过多次调整,大量振荡器的时钟将保持一致,从而实现同步。

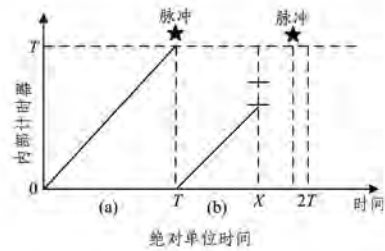


图 1 M&S 同步模型

## 2 提出的 DCRN 时间同步机制

M&S 模型通过脉冲耦合振荡器<sup>[10]</sup>表示萤火虫自发的同步行为,文献[12]证明了无论节点的数量和启动同步过程的时刻是否一致,M&S 模型都能收敛于同步。因此,将该模型应用到 DCRN 中,设定每个节点  $X_i$  对应于一个萤火虫,且具备一个内部计时器  $t_i$  和同步周期阈值  $T$ 。其中, SU 节点可以发现附近的其他 CR 节点,并见机使用闲置的无线频道。每个节点  $X_i$  都具有一个全网公共控制信道(Common Control Channel, CCC)<sup>[13]</sup>的接口和多个收发器,CCC 为一个专用信道,在该信道上 CR 节点可以互相发现和广播一般控制信息,并建立第一次接触。

### 2.1 基本思想

本文同步机制的同步过程是由 PU 节点发起的,主要分为两个循环阶段:同步请求阶段和时间设置阶段。每个节点  $X_i$  从 0 开始启动内部计时器  $t_i$ ,并逐渐增加以达到阈值  $T$ 。当  $t_i=T$  时,节点重新设置计时器  $t_i=0$  并发出一个脉冲,进而执行同步请求阶段。该过程模拟了萤火虫的发光过程,所发脉冲由同步请求的广播信标组成,并发送向所有邻居节点。在邻居节点获得请求信标后,利用响应信标来答复该节点,以此确定该节点对之间的可用公共信道。邻居节点  $X_j$  接收到来自节点  $X_i$  的同步信息时,执行时间设置阶段,并增加或减少  $t_j$  来调整频率。

上述过程中,节点处理了 3 种类型的消息:信标请求、信标响应和同步信息。信标请求包含节点  $X_i$  的空闲信道清单  $L_i$ ,将其表示为  $b_{req}(L_i)$ 。信标响应包含由  $X_i-X_j$  节点对选择的用于交换同步信息的公共同步信道,将其表示为  $b_{res}(c_{ij})$ ,其中  $c_{ij}$  为公共同步信道。同步信息由  $m(X_i, t_i, T_{S_i})$  表示,其包含节点  $X_i$  的标识符、内部计时器值和时间戳  $T_{S_i}$ 。其中,通过 CCC 进行信标信息交换,通过节点对选择的公共同步信道来传输同步信息。

### 2.2 同步请求阶段

在初始时,同步请求阶段由指定 PU 节点发起,在后续迭代过程中,同步请求阶段可由各 SU/PU 节点开始。每个 SU 节点需要利用频谱感知的认知能力来获得无 PU 占用的闲置信道,以确定后续可用公共信道。在获得闲置信道清单后,每个节点执行同步请求阶段。

在同步请求阶段,每个给定的节点  $X_i^*$  初始化  $t_i=0$ ,并根据其实时时钟逐步增加。一旦  $t_i$  值达到  $T$ ,则  $X_i^*$  通过 CCC 向其邻居节点集  $A_i$  中的每个节点发送信标请求  $b_{req}(L_i)$ ,并重置  $t_i$  为 0。邻居节点  $X_j$  接收到  $b_{req}(L_i)$  后,选择一

个可用公共信道(对于发送者和接收者,均无PU存在的信道),并回复包含所选择公共信道信息的信标响应  $b_{res}(c_{ij})$ 。在定义公共信道之后,  $X_i^*$  在公共信道  $c_{ij}$  上向邻居节点  $X_j$  发送同步信息  $m(X_i, t_i, T_{S_i})$ , 接收到同步信息的所有邻居节点将  $X_i^*$  作为参考节点。

### 2.3 时间设置阶段

在节点  $X_j$  接收到来自节点  $X_i$  的同步信息  $m(X_i, t_i, T_{S_i})$ , 且都调整到同一个公共信道之后, 启动时间设置阶段。在该同步信息中,  $X_j$  获得  $X_i$  的时间戳  $T_{S_i}$ , 并将其与自己的实时时钟值  $T_{S_j}$  进行比较。

假设数据传输分为  $N$  个时钟, 则有:

$$t_i = T_{S_1} + T_{S_2} + \dots + T_{S_{(N-1)}} + T_{S_N} \quad (3)$$

图2给出了3个节点基于时钟的数据收集实例, 将数据传输分为3个时钟。在第一个时钟内, 节点  $v_2$  将其数据传送到节点  $v_1$ , 且  $v_0$  是空闲的; 在第二个和第三个时钟内, 节点  $v_1$  将其数据和节点  $v_2$  传送到节点  $v_0$ 。

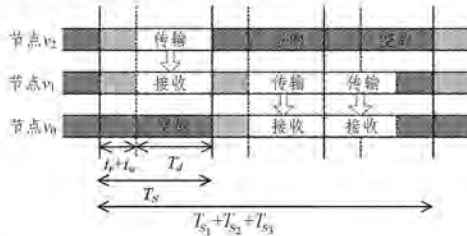


图2 分配给3个节点3个时钟的数据传输实例

所提出的机制考虑了时间同步误差界限  $t$ , 故总时间大小  $T_S$  为  $t_r, t_w$  和  $T_d$  的总和, 如式(4)所示:

$$T_S = t_r + t_w + T_d \quad (4)$$

其中,  $t_w$  表示休眠节点唤醒并开启无线电模块所需的时间,  $T_d$  表示有效数据的传输时间。若  $T_{S_j} > T_{S_i}$ , 则  $X_j$  减少  $k$  个单位时钟值,  $k$  为  $T_{S_j}$  和  $T_{S_i}$  之间差的绝对值; 反之, 若  $T_{S_j} < T_{S_i}$ , 则  $X_j$  增加  $k$  个单位时钟值, 如式(5)所示:

$$T_{S_j} = \begin{cases} T_{S_j} - k, & \text{若 } T_{S_j} > T_{S_i} \\ T_{S_j} + k, & \text{若 } T_{S_j} < T_{S_i} \end{cases} \quad (5)$$

此外,  $X_j$  还获得了  $X_i$  的内部计时器值  $t_i$ 。  $X_j$  将  $t_i$  值与自身的内部计时器值  $t_j$  进行比较, 若  $t_i$  与  $t_j$  不同, 则通过式(6)将  $t_j$  更新为  $t_j'$ 。

$$t_j' = \min(t_i + \epsilon, 1) \quad (6)$$

当  $t_i$  值到达  $T$  时, 重新进入同步请求阶段, 并重复上述过程。因此, 在多次迭代后, 每个节点将具备相同的时钟。

### 2.4 提出的同步机制实例

图3给出了一个公共信道协商实例, 其中节点  $X_i$  发送包含其闲置信道(2,4,5)的请求信标( $b_{req}(2,4,5)$ )到一个邻居节点  $X_j$ 。节点  $X_j$  通过发送信标响应(5,  $b_{res}(5)$ )进行回复, 从而选择信道5为两个节点的公共信道。在确定公共同步信道后, 节点2和节点3将节点1设置为它们的参考节点, 节点5将节点6设置为其参考节点。调整这些节点到所选信道上, 并启动时间设置阶段。

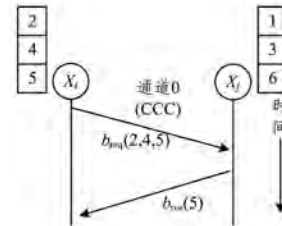


图3 公共信道协商实例

节点1在执行完同步请求阶段之后, 节点2可以获得来自节点5的其他信标请求。在此情况下, 为了防止不正确地调整实时时钟值, 节点2向其参考节点(节点1)发送一个查询, 参考节点以时间信息作为回复。然后, 节点2将其时间与节点5的时间进行比较, 根据该比较, 节点2调整其实时时钟。所有其他节点都需执行上述过程, 从而使整个网络都具有相同的时钟。

## 3 实验及分析

### 3.1 仿真环境

利用 NS-2 软件<sup>[14]</sup> 构建仿真 DCRN 环境<sup>[15]</sup>, 将提出的同步机制与 TTPSN 机制进行比较。DCRN 中, 每个节点装备 3 个 IEEE802.11a 协议的接口: 1) 1 个控制接口, 用于在 CCC 上发送控制包和广播信息; 2) 2 个收发接口, 用于感知频谱的信道和传输信息。仿真中, 设定可用信道数量为 10, 节点数量范围为 20~140, 且均匀分布于 1000m×1000m 的矩形区域内, 其中每个实验结果的置信区间为 95%。仿真参数值如表 1 所列。

表1 仿真参数值

参数	值	参数	值
网络大小	1000m×1000m	二级用户数量	20,40,60,80,100,120,140
无线电传播模式	双径传播模型	主用户数量	2
节点移动模型	随机路点	信道数量	10
MAC层协议	IEEE802.11	式(2)中的常量 $\epsilon$	0.5
路由协议	AODV	常量 $T$	1s

以两种指标来评估同步机制的性能: 1) 同步开销, 即同步机制产生的通信量(以控制信息数据包为单位); 2) 同步收敛时间, 即同步所有节点所花费的时间。

在两种不同场景下评估同步机制的性能: 1) 不同的网络节点数量。网络中节点数量对同步机制的性能有着重要的影响, 较多节点的网络的收敛速度比较少节点的网络的慢, 本文网络中节点的数量为 20~140。2) 不同的节点移动水平。本文使用随机路点移动模型, 将每个节点随机放置于网格中, 节点以随机速度进行移动(最大速度为 10m/s), 节点在目的地位置的停留时间范围为 1~10s, 较短的暂停时间意味着更大的移动性。

### 3.2 实验结果分析

首先考虑静态节点场景, 在不同网络节点数量下评估同步机制的性能, 本文构建网络节点数量分别为 20, 40, 60, 80, 100, 120 和 140 个的不同场景。图 4 给出了不同节点数量下的同步收敛时间。由图 4 可以看出, 本文同步机制的收敛时间比 TTPSN 的短, 原因在于 TTPSN 在进行同步之前需将网

络创建为一种树结构,对于较大的网络,其同步树叶节点需要更多的时间。而本文同步机制中,节点只需同步邻居节点,使其更灵活且有助于新节点的加入。图 5 给出了不同节点数量下,两种机制生成的总传输开销。由图 5 可以看出,提出的同步机制所生成的总开销略小于 TTPSN,原因在于提出的同步机制使用 CCC 向邻居节点传输交换信息,不需要与所有节点进行通信,且不需要构造特定的网络拓扑结构,减小了控制数据包的通信量。但由于本文与邻居节点所交换的协商数据包略大,因此本文方法在传输开销方面优势较弱。

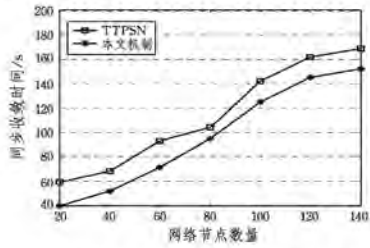


图 4 不同节点数量下的同步收敛时间

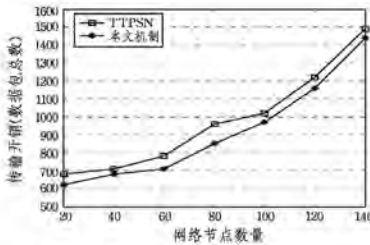


图 5 不同节点数量下的总传输开销

对于移动节点场景,设置节点数量为 80。在随机路点移动模型中,节点在目的地的停留时间为 1~10s。图 6 给出了不同移动级别下两种同步机制的收敛时间。从图 6 可以看出,移动停留时间越小,网络动态性越大,收敛时间越长。另外,本文同步机制的收敛时间大大少于 TTPSN 机制的收敛时间,且网络动态性越高,本文同步机制的收敛时间优势越大。

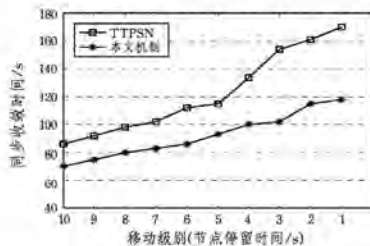


图 6 不同移动级别下的同步收敛时间

图 7 给出了不同移动级别下的总传输开销。从图 7 可以看出,提出的同步机制所生成的总开销小于 TTPSN 机制的总开销,且网络动态性越高,优势越大。其原因在于 TTPSN 机制中需要构建树结构,由于节点的移动,其树结构需要定期更新重建,因此需要传输更多的控制信息,这就增加了传输开销,延迟了同步时间。另外,本文同步机制的总开销随着网络移动性的增长几乎保持稳定,原因在于本文中节点通过与邻居节点之间的协商来实现同步,其传输开销主要取决于邻居节点的数量,而节点移动性对其影响不大,且节点的移动还有助于将协商结果扩散到整个网络。

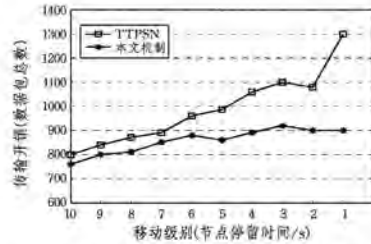


图 7 不同移动级别下的总传输开销

**结束语** 本文基于受萤火虫同步闪烁而启发的 M&S 同步模型,提出一种应用在 DCRN 中的节点时间同步机制。首先,通过节点与邻居节点之间的协作来确定可用公共信道;然后,邻居节点以该节点为参考,通过 M&S 同步模型调整内部计时器,从而实现时钟同步;最后,随着同步机制的扩散,最终实现全网时间同步。与现有相似方案相比,在静态和动态 DCRN 场景下,本文机制都获得了较快的同步收敛速度和较低的同步开销。

在本文所提机制中,节点间第一次握手是通过占用 CCC 来实现的,一定程度上会影响网络控制信息的转发。未来研究将考虑不使用 CCC,并精简交换信息量,以进一步减少收敛时间并降低开销。

### 参考文献

- [1] ZHANG C,ZENG B Q,YANG J S,et al. Power Control-oriented Spectrum Pricing and Allocation in OFDMA Cognitive Radio Networks[J]. Computer Science, 2015, 42(3): 85-90. (in Chinese)
- [2] ZHANG X,LIU C,HU S,et al. Queuing theory based centralized dynamic spectrum allocation scheme in cognitive radio networks[J]. Application Research of Computers, 2015, 32(1): 187-190. (in Chinese)
- [3] MOON B. Diffusion-based Time Synchronization in Large-Scale Distributed Sensor Networks[J]. International Journal of Multimedia & Ubiquitous Engineering, 2014, 9(4): 283-300.
- [4] DANILUK K. Time Synchronization In Wireless Sensor Networks[J]. Fedcsis Org, 2013, 61(24): 6387-6400.
- [5] LI Z T,LI R F,WEI Y H. Coordinated Algorithm for Time Synchronization and Distance Measurement in Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Computer Research and Development, 2010, 47(4): 638-644. (in Chinese)
- [6] SHI C,QIU H B. TPSN Time Synchronization Protocol Based on Pulse Coupling[J]. Journal of Applied Sciences, 2013, 31(1): 15-20. (in Chinese)
- [7] KHEDIRI S E,NASRI N,HEDFI H,et al. An Improved TPSN Algorithm for Time Synchronization in Wireless Sensors Net-

合有效容量的概念,实现统计延迟保障。本文的方法是基于一接入点实施的 PID 控制器,以此决定分配给每个链接的时间宽限值。仿真结果表明,本文提出的基于 PID 的聚合算法比现有的聚合算法更胜一筹,具有较高的信道利用率。

### 参 考 文 献

- [1] LIU J, YAO M, QIU Z. Enhanced Two-Level Frame Aggregation with Optimized Aggregation Level for IEEE 802. 11n WLANs[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(12):1.
- [2] NOMA A M, OTHMAN M, LUN K Y, et al. Two-Level Frames Aggregation with Enhanced A-MSDU for IEEE 802. 11n WLANs[J]. Wireless Personal Communications, 2015, 82(3): 1601-1614.
- [3] HONG K, KIM J P, KIM M S, et al. Channel measurement-based access point selection in IEEE 802. 11 WLANs[J]. Pervasive & Mobile Computing, 2016, 30(C): 58-70.
- [4] GHAFAROKHI B S. Distributed Q. E-aware channel assignment algorithms for IEEE 802. 11 WLANs[J]. Wireless Networks, 2014, 21(1): 1-14.
- [5] BELLALTA B. IEEE 802. 11ax: High-efficiency WLANs[J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 23(1): 38-46.
- [6] SARRET M G, ASHAT J S, MOGENSEN P, et al. A Multi-QoS Aggregation Mechanism for Improved Fairness in WLAN [J]. Vehicular Technology Conference IEEE, 2013, 14(6): 1-5.
- [7] SHAO X M. Study of 802. 11n IEEE frame aggregation mechanism [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)  
邵新明. IEEE 802. 11n 帧聚合机制的研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [8] WU D, NEGI R. Effective capacity: a wireless link model for support of quality of service[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2003, 2(4): 630-643.
- [9] FERNG H W, LEONOVICH A. Periods Scheduling Under the HCCA Mode of IEEE 802. 11e[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(12): 7037-7049.
- [10] LIU W J, FENG K T, TSENG P H. Optimality of Frame Aggregation-Based Power-Saving Scheduling Algorithm for Broadband Wireless Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(2): 577-591.
- [11] DAVY A, MESKILL B, DOMINGO-PASCUAL J. An Empirical Study of Effective Capacity Throughputs in 802. 11 Wireless Networks[C]// 2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), IEEE, 2012: 1770-1775.
- [12] CHEN K F, LV N, ZHANG W L. Frame structure optimization and analysis of fast dynamic time slot allocation MAC protocol [J]. Computer Engineering and Application, 2015, 51(15): 68-74. (in Chinese)  
陈柯帆, 吕娜, 张伟龙. 快速动态时隙分配 MAC 协议的帧结构优化与分析[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(15): 68-74.
- [13] VIJAYAREKHA K, RAO C M. Frame aggregation and fragment retransmission for very high throughput WLANs[J]. International Journal of Applied Engineering Research, 2015, 10(10): 25607-25616.
- [14] GE Q, BAI G W, SHEN H, et al. Opportunistic network coding mechanism for wireless network link quality aware[J]. Computer Science, 2013, 40(11): 29-34. (in Chinese)  
葛青, 白光伟, 沈航, 等. 无线网络链路质量感知的机会网络编码机制[J]. 计算机科学, 2013, 40(11): 29-34.
- [15] CHEN G X. Exploring on Anti-jamming of Outdoor Signals in High-Speed Wireless Local Area Network [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2011, 25(7): 92-95. (in Chinese)  
陈国先. 高速无线局域网室外信号抗干扰探讨[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2011, 25(7): 92-95.
- (上接第 67 页)
- works[C]// 32nd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW). IEEE: Piscataway, NJ, 2013: 279-284.
- [8] DAI Y W, YAN L H, CHEN Z P. A Study on Time Synchronization Algorithm Based on Energy Effective Strategy[J]. Advanced Materials Research, 2012, 49(5): 1976-1980.
- [9] YAMANAKA S, HASHIMOTO M, WAKAMIYA N. An Efficient Scheduling Method Based on Pulse-coupled Oscillator Model for Heterogeneous Large-scale Wireless Sensor Networks [J]. Procedia Computer Science, 2016, 83(4): 568-575.
- [10] MO W T, CHEN Z P, TANG C L, et al. Realization of Time Synchronization in Dynamic WSN by Mobile Pulse-Couple Oscillator[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2016, 29(7): 1090-1095. (in Chinese)  
莫文婷, 陈珍萍, 唐超礼, 等. 移动式脉冲耦合振荡器实现动态 WSN 时间同步[J]. 传感技术学报, 2016, 29(7): 1090-1095.
- [11] JIN Y, BAI Z, XU L, et al. Applying Firefly Synchronization Algorithm to Slot Synchronization[J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2014, 26(2): 1017-1029.
- [12] JIN Y, MA W, BAI Z, et al. Blind and buffer phase area based on M&S model fireflies synchronization in WSNs[C]// First International Symposium on Future Information and Communication Technologies for Ubiquitous Healthcare. IEEE: Piscataway, NJ, 2013: 1-4.
- [13] WANG Z C, MA M L, LI Y. Optimal Power Allocation in Broadband Cognitive Radio Networks Based on SC-FDMA[J]. Computer Science, 2015, 42(4): 56-59. (in Chinese)  
王振朝, 马明磊, 李延. 基于 SC-FDMA 的宽带认知无线网络中最优功率分配的研究[J]. 计算机科学, 2015, 42(4): 56-59.
- [14] LI D, HAN X C. Multipath Routing Optimization Scheme for Wireless Mesh Network Based on Mixed Integer Linear Programming Model[J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2016, 38(3): 54-58. (in Chinese)  
李岱, 韩小纯. 基于 MILP 模型的无线 Mesh 网络多径路由优化方案[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2016, 38(3): 54-58.
- [15] KWON S, KIM B, ROH B H. Preemptive Opportunistic MAC Protocol in Distributed Cognitive Radio Networks[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(7): 1155-1158.
- [16] 王忠思, 黄辉, 于爽. 认知无线电技术及其在军事通信上的应用[J]. 四川兵工学报, 2009, 30(7): 125-126.