

## 单兵作战系统中信息监听冲突消除技术研究

杨令兴<sup>1</sup>, 张喜斌<sup>1</sup>, 魏小龙<sup>1</sup>, 马二涛<sup>1,2</sup>, 冯文斌<sup>1,3</sup>

(1. 空军工程大学装备管理与安全工程学院, 西安 710038; 2. 中国人民解放军94371部队, 郑州 450000;  
3. 中国人民解放军93975部队, 乌鲁木齐 820006)

**摘要:** 针对当前单兵作战系统通信网络中所采用的固定分配 TDMA 算法不能适应大型战场环境和自组织运行需求的问题, 提出一种基于消费算法和二叉树时隙分配算法的动态时隙分配 TDMA 算法, 即 C-TDMA 算法, 通过多组载波监听消除接入冲突, 在保证延时的基础上使用消费算法控制节点分组发送量, 提高信道接入公平性, 同时通过二叉树时隙分配算法支持网络分布式运行。仿真结果表明, 对于负载较重、传输混合业务且时延敏感的单兵作战系统网络, 该算法可以消除接入冲突, 提高信道吞吐率。

**关键词:** 动态时隙; 移动自组织无线网; 时延敏感; 单兵作战系统

**中图分类号:** V271.4; TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)09-0010-04

## Conflict-Eliminated Channel Access of MAC Protocol in IISCS

YANG Lingxing<sup>1</sup>, ZHANG Xibin<sup>1</sup>, WEI Xiaolong<sup>1</sup>, MA Ertao<sup>1,2</sup>, FENG Wenbin<sup>1,3</sup>

(1. Engineering College of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;  
2. No. 94371 Unit of PLA, Zhengzhou 450000, China; 3. No. 93975 Unit of PLA, Urumqi 820006, China)

**Abstract:** The static slot allocation TDMA channel access algorithms used in Integrated Individual Soldier Combat System (IISCS) are not adaptable to the demand of large battlefield network and autonomous operation. To solve the problem, we proposed a dynamic slot allocation TDMA access algorithm of MAC protocol, named C-TDMA, based on consumption algorithm and binary tree slot allocation algorithm. The access conflicts are eliminated in the control slot by multiple RTS/CTS. The consumption arithmetic is used to control the data flow and improve fairness access of different services on the basis of delay quality, and the binary tree slot allocation algorithm is used for distributed network environment. The simulation results indicate that real-time services can be supported by C-TDMA protocol in heavy-load and mixed-service in IISCS, which presents good performance on access efficiency.

**Key words:** Integrated Individual Soldier Combat System (IISCS); dynamic time slot; Ad Hoc; time-delay limitation

### 0 引言

随着军方对作战平台抗毁性和可靠性能要求的提高, 下一代单兵作战系统 (Integrated Individual Soldier Combat System, IISCS) 组网技术研发的重点将是自组织运行模式<sup>[1]</sup>, 即 Ad Hoc 组网方式。与传统的单兵系统不同, 未来作战环境要求单兵系统不仅支持语音

对讲、GPS 定位等简单服务, 还需要支持指挥中心对战场环境的远程监控, 保障士兵与系统中枢或其他士兵进行宽带通信, 为单兵提供实时作战地图更新等, 这都要求下一代单兵系统的组网协议能够为视频 (远程监控)、语音 (宽带通信) 和数据 (实时地图) 等不同时延要求的业务提供可靠接入和传输保障, 以此满足战场环境信息的有效共享和及时更新。因此, 组网协议中的相关信道接入技术和时隙分配技术, 成为未来 IISCS 研究中的重要问题<sup>[2]</sup>。

传统单兵作战系统采用时分多址信道接入技术, 即固定分配类 TDMA<sup>[3]</sup>, 整个网络的传输时间安排算

收稿日期: 2013-01-04

修回日期: 2013-03-13

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目 (2009JM8001-4)

作者简介: 杨令兴 (1988—), 男, 山东济南人, 硕士生, 研究方向为装备发展论证。

法将全网络系统参数作为输入,按照系统中最大节点数量来做出其传输安排,即对于一个有  $N$  个节点的单兵系统,TDMA 协议必须使用时隙长度为  $N$  的帧结构,及每个节点分得唯一时隙,虽然这样消除了碰撞的威胁,但由于系统规模和帧长之间的等价性,TDMA 协议在大型战场环境中表现拙劣。

在当前多数自组织网络协议中,大多采用监听信道,碰撞回避的方式接入信道,如 FAMA 协议<sup>[4]</sup>,802.11 DCF<sup>[5]</sup>等。在这些协议中,如果在较短的时间间隔内有多个节点要求接入信道,会造成大量业务随机退避,重传,并且随着业务量的继续增加,会造成冲突累计,信道环境迅速恶化,形成泛洪效应,而战场环境的通信特点之一是业务大量突发。因此,相比较随机竞争接入,动态的时隙分配更有利于减少冲突的发生,适合作为下一代单兵作战系统组网技术的信道接入方式。

针对单兵系统和以上问题,本文提出了一种基于消费算法(consuming)和二叉树时隙分配算法的动态时隙分配信道接入方法,即 C-TDMA 算法。本文研究的主要目标是在保证公平性的条件下,减少节点接入单兵系统过程中的碰撞,并同时支持实时业务传输。

## 1 传统单兵作战系统中信道接入技术

### 1.1 固定 TDMA 的信道接入技术

当前单兵作战系统网络结构主要分为两种:一种是集总式结构,即有中心控制节点的网络;另一种是分布式结构,即无中心实体的网络。两种网络对于时隙的分配都采用固定 TDMA 模式。这种模式要求所有网内节点之间严格同步,并且在每帧中每个节点能够唯一地访问一个时隙<sup>[6]</sup>。

每当士兵或装备(即节点)有新业务产生,需要接入信道时,首先,该节点必须完成与网络同步,然后根据事先确定的顺序在固定的时隙上接入信道,并且在网络运行中分配结果保持不变。因此,为了保证所有节点的接入需求得到满足,协议必须提前探测出该帧内所需的最大时隙数。

计算出系统需要的最大时隙数并分配时隙序号

$$N_{\text{NUM}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [n_i] \quad (1)$$

式中: $n_i$  表示业务的时隙序号; $N$  代表信道个数。然后,发送带有序号和 MAC 地址等特征的信令<sup>[7]</sup>。帧结构一般为

$$L(t) = N \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i * t_i)}{N}} + N t_{\text{DATA}} \quad (2)$$

式中: $L$  为时域内,带有特征的业务一帧长度; $x_i * t_i$  表

示特征分组的长度; $t_{\text{DATA}}$  表示数据分组的长度。每个节点在它的主时隙发送信息,在任何时隙接收信息,并完成一系列端到端的传输<sup>[8]</sup>。为了验证单兵系统组网协议的有效性,使用网络归一化吞吐量以及平均分组时延这两个指标进行评价。方法为

$$S_{\text{average}}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{x_i t_{\text{DATA}}}{L_i} \quad (3)$$

$$T_{\text{constant}}(t) = \left( \sum_{i=1}^n x_i' * t \right) \quad (4)$$

式中: $T(t)$  为网络归一化吞吐量; $x_i t_{\text{DATA}}$  为成功接收分组的数据分组长度。

### 1.2 传统技术的弊端

在单兵作战系统的 MAC 协议中采用固定 TDMA 的时隙分配方式,复杂度小,能保证所有节点公平地接入信道且控制开销非常小,但是在网络规模很大,节点数量较多时,网络接入时延增大,同时对时隙资源产生非常大的浪费。

这是由于战场环境复杂多变,士兵和装备可在没有任何事先通知的情况下就被激活,或者被关闭,自由移动导致网络拓扑的易变,协议通常不能得到,或者很难预测网络的整体参数,例如节点总数和最大节点数。

## 2 基于消费算法的 IISCS 系统信道接入技术

### 2.1 信道接入控制时隙设计

C-TDMA 算法使用控制时隙与数据时隙相分离的结构,帧结构和时隙结构如图 1 所示。

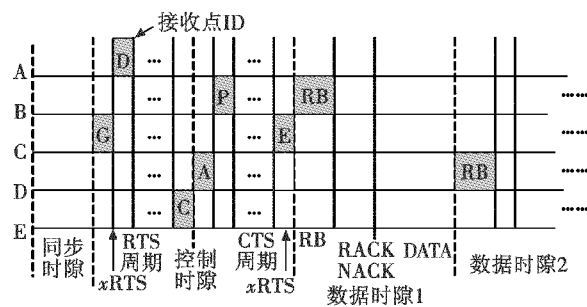


图 1 冲突帧和时隙结构

Fig. 1 Control frame structure and slot

每帧由固定长度的同步时隙(Syn)、控制时隙(CS)和数据时隙(DSi)组成,分别用于节点同步、信道预约和数据传输。控制时隙中的 RTS 和 CTS 周期又被均分为  $M$  个微时隙,第  $x$  个微时隙记为  $x\text{RTS}$ ,  $x\text{CTS}$ 。

同步时隙,节点通过接收和发送带有时间基准信息的时间戳完成与整个单兵系统网络的同步<sup>[9]</sup>。

新节点通过在控制时隙里多组虚拟载波监听竞争接入单兵系统网络中,节点预约成功后根据消费算法确定发送次序。具体如下所述。

在控制时隙开始,如图 1 所示,如果节点 a 要接入信道,首先随机选取一个微时隙  $iRTS$  向接收节点发送 RTS 分组,分组中包括节点序号(ID)、数据业务的优先级、到达时间等。而其他微时隙  $xRTS$ ,节点 a 保持监听状态。当 RTS 周期结束后,节点 a 的一跳邻节点都将获得其发送请求。如果接收节点成功接收 RTS 分组,则在 CTS 周期内的  $i$  微时隙  $iCTS$  回发 CTS 分组。

在数据时隙发送预留标志 RB 为实时业务保留时隙,以及 RACK, NACK 标志以解决暴露和隐藏终端问题<sup>[10]</sup>。

算法的工作过程主要包括同步入网、多组虚拟载波监听消除冲突、发送队列的形成与调整。整个工作流程如图 2 所示,其中:EI 为溢出标志位,用于防止节点密度过高而超出最大时隙数; $i$  为当前使用的帧时序数。

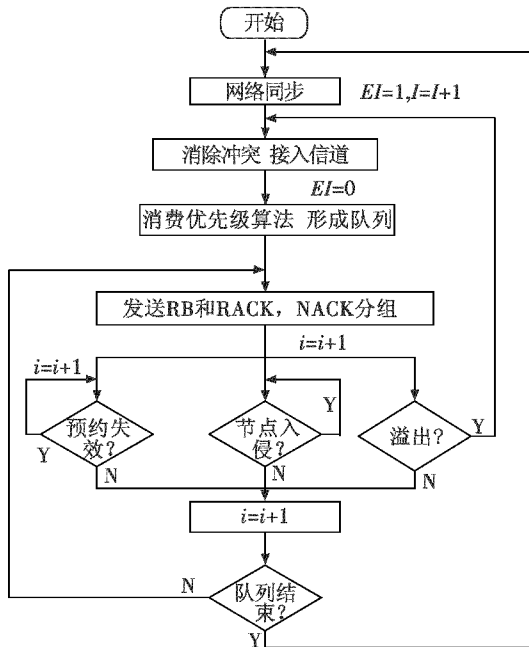


图 2 C-TDMA 算法工作流程

Fig. 2 Flow chart of C-TDMA algorithm

### 2.2 基于消费算法的时隙分配

为提高实时业务和紧急业务的接入速度并使算法更加公平,提出基于消费算法区分各项业务的优先级。消费算法源于生活中消费过程中价格的杠杆作用,原理是基于节点对自身的约束,通过对发送量的控制,在满足实时业务延时的前提下,尽可能公平地发送数据。

1) 首先,对单兵系统中各种业务  $i$  的时延要求进行衡量,按照每项业务对于延时的基本要求,给出“价格  $C$ ”。时延敏感的业务价格低,时延容忍的业务价格高,不同业务价格比约等于延时比,语音延时应在 150 ms 以内,流媒体在 50 ms 内。

$$C_{\text{语音}} : C_{\text{流媒体}} = 150 \text{ ms} : 50 \text{ ms} = 3 : 1 \quad (5)$$

2) 设置最高“消费  $T$ ”,防止优先级高的节点“饿

死”优先级低的节点;设置消费有效期,减少节点因为竞争或预留失败导致的算法失效的影响。

3) 在有效期的开始,每个节点被给予消费总额  $T$ ,发送一个数据包相当于一次消费,即消费总额变为  $T - C$ 。

$$T_{\text{余额}} = T - C_1 - C_2 \cdots C_n > 0 \quad (6)$$

当节点消费总额减到 0 或负值时,该节点会停止发送,并在下一竞争时隙重新得到  $T$ ,参与竞争。

4) 在控制时隙,没有成功接入的节点将“充值”到  $T$ ,来参与下一时隙的竞争,这样可以防止节点等待时间过长。

5) 为了在竞争时隙使优先级高的业务首先接入信道,要求在执行完每一次消费后,再进行排序。

6) 为了防止出现相同资金的节点发生冲突,给予每次“价格”一个 0.1 ~ 0.01 的漂移。

7) 如果控制时隙中成功预约的节点数超过当前帧所能提供的空闲信道数,协议将执行溢出处理,对于紧急业务(特权业务)做免费处理,即  $C$  为 0,确保迅速接入信道。

8) 各预约业务,按照当前资金量的高低对队列进行排序,如果相同,按照接入次序,由此形成预约队列  $P$ ,如图 3 所示。

X (·) C		\$	
A (3)	3.03	B (1)	0.03
C (5)	20.03	D (2)	0.01
E (3)	2.92	...	
10000.01	10000.06	10000.05	9999.01
			10000.05

图 3 针对不同优先级业务进行队列调整

Fig. 3 Adjusting access of different services

图中,字母 X 表示各节点,括号内数字表示节点的接入顺序。这里,总价为 \$ 10000,  $C$  为单价;优先级分为 3 级,特权  $C$  为 0,语音  $C$  为 3,而数据  $C$  为 20。

### 2.3 分布式队列管理机制

因为 C-TDMA 算法是分布式运行,即单兵作战系统通信网络只需要使用本地参数来分配时隙。可以预见,每个节点的一跳邻节点都不可能相同,所以在通过消费算法调整业务顺序之后,每个节点得到的预约队列  $P$  也不可能相同,因此需要用一种机制来防止分布式冲突的发生。

借鉴二叉树时隙分配法<sup>[11-12]</sup>,为了能使不同节点之间实现无冲突的报文传输,节点必须有严格的接入次序。因为在控制时隙的微时隙个数是定值  $M$ ,而每个节点发送  $xRTS$  分组的时隙序号也是确定的,因此,可以将每个节点的预约队列  $P$  移植进时隙二叉树,可以看到当某个业务同时存在两个预约队列中时,二叉树形成分支点,如图 4 所示。

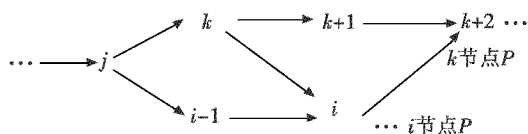


图4 数据时隙的二叉树结构

Fig.4 Binary tree slot allocation algorithm

规定在各预约队列  $P$  中,只有排在当前节点前的所有节点都已发送,当前节点才能发送,对照图4可以得到发送次序确定方法如下:

- 1) 根据  $P$  求出补集  $C(P)$ ,为全集  $\{1, 2, \dots, M\}$ , 并设  $P$  中首业务序号为  $j$ ,该节点自身发送序号为  $i$ ;
- 2) 如果监听信息在起始子队列(SQ)(含有序列1的子队列),发送次序为  $i-1$ ;
- 3) 如果监听信息在非起始子队列(NSQ),发送次序为  $M-(j-1)+(i-j)$ 。

### 3 仿真实验结果

为了进一步验证本文算法性能,通过网络仿真软件 OPNET 对传统的单兵系统网络协议和采用 C-TDMA 算法的单兵系统网络协议性能进行了仿真和对比,仿真对象为 MAC 协议的预约成功率、平均分组时延和吞吐量。

为了接近大型战场环境的实战要求,仿真场景设置为  $90 \text{ km} \times 120 \text{ km}$  单兵通信网络区域,节点在区域内随机分布,无线传输采用双向无差错模式,节点无线通信距离为  $600 \text{ m}$ 。考虑到未来战场对单兵系统带宽的要求,数据传输速率设定为  $11 \text{ Mbit/s}$ ,信道总数  $N$  设为  $40$  个,RTS,CTS,RACK,NACK 长度为  $16 \mu\text{s}$ ,帧长为  $12.5 \text{ ms}$ ,PKT 长度为  $220 \mu\text{s}$ 。仿真网络环境参数为:网络规模  $800$  个节点,邻节点密度  $5 \sim 50$ ,仿真时间  $1000$  个帧长。

图5所示为预约成功率的仿真结果。

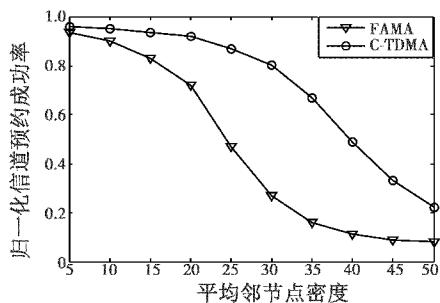


图5 两种算法的归一化预约成功率

Fig.5 The access efficiency comparison

由图5中曲线可以看出,使用了C-TDMA算法的协议和FAMA协议相比,节点的信道预约成功率大幅提高,这是由于算法中多组载波监听可以合理解决新节点的入网。

图6是使用固定时隙分配算法的单兵作战系统和

使用了C-TDMA算法的单兵系统信道吞吐量的比较图。

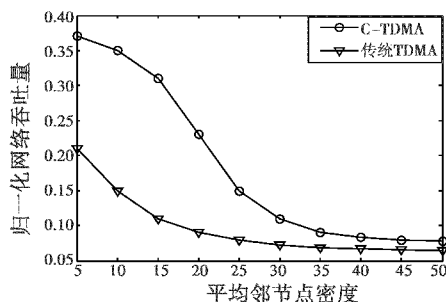


图6 两种算法的信道吞吐量

Fig.6 The throughput capacity comparison

由图可以看出,C-TDMA算法在业务量快速增加的环境下,可以保证较稳定的吞吐量(密度  $< 25$ ),而传统算法的吞吐量在节点密集、业务拥挤的环境下性能较差。

图7显示了采用C-TDMA算法后,混合业务平均分组时延的仿真结果。

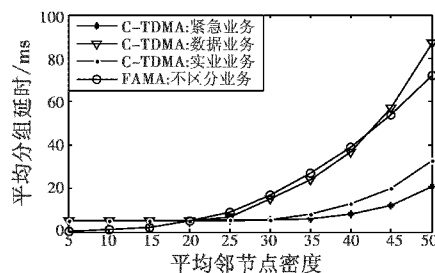


图7 不同业务的平均分组时延

Fig.7 The transfer delay comparison

在单兵系统网络节点密度较低条件下,实时业务时延可以维持在  $15 \text{ ms}$  以下,能够满足战场的传输质量要求。但随着节点密度的增加,数据业务的分组时延迅速增加,而语音业务可保持较小的时延,流媒体业务由于在消费算法中“零消费”,所以能够有更快的接入速度。仿真结果还指出,无论节点载荷多少,各业务分组的接入时延都不为零,这是由于算法的控制时隙和TDMA模式导致的,而对照协议,FAMA的时延性能略好于C-TDMA的数据业务,差于C-TDMA的实时业务。

### 4 结束语

本文针对下一代单兵作战系统通信需求,提出的C-TDMA算法实现了多级混合业务公平地接入信道,同时为实时业务提供了传输保障,并利用队列管理机制保证分布式运行,降低了预约开销。仿真结果表明,它在接入成功率、吞吐量、分组时延上和传统算法相比有一定的优势,能够满足未来单兵作战系统的业务传输要求。

(下转第33页)

很好地保留了图像的边缘和纹理等细节信息,实验也证明了该方法对红外与可见光图像融合的有效性。

### 参考文献

- [1] 葛小青. 红外与可见光图像融合的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [2] 彭海. 红外与可见光图像融合方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [3] DO M N, VETTERLI M. Contourlets: A directional multi-resolution image representation[C]//International Conference on Image Processing, 2002, 1: 357-360.
- [4] 李喆, 赵昊. Contourlet 变换在可见光与红外图像融合中的应用[J]. 现代电子技术, 2011, 34(24): 93-95.
- [5] CUNHA A L, ZHOU J P, DO M N. The nonsubsampling contourlet transform: Theory, design and applications [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(10): 3089-3101.
- [6] ZHOU J P, CUNHA A L, DO M N. Nonsubsampling contourlet transform: Construction and application in enhancement [C]//International Conference on Image Processing, 2005: 469-472.
- [7] 陈小林, 王延杰. 非下采样变换的红外与可见光图像融合[J]. 中国光学, 2011, 4(5): 489-496.
- [8] 孙艳忠, 李华锋, 李保顺. 非采样 Contourlet 变换的多尺度积图像融合算法[J]. 计算机仿真, 2011, 28(8): 250-255.
- [9] 王跃华, 陶忠祥. 基于 NSCT 的红外与可见光图像融合算法[J]. 四川兵工学报, 2012, 33(7): 117-119.
- [10] 何国栋, 梁栋, 姚红, 等. 基于非抽样 Contourlet 变换的红外图像和可见光图像融合算法[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(2): 8-11.
- [11] 叶传奇, 王宝树, 苗启广. 基于 NSCT 变换的红外与可见光图像融合算法[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(4): 593-596.
- [12] 孔韦韦, 雷英杰, 雷阳, 等. 基于改进型 NSCT 变换的灰度可见光与红外图像融合方法[J]. 控制与决策, 2010, 25(11): 1607-1612.
- [13] 曹喆. 一种区域特性的小波图像融合新算法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(26): 213-215.
- [14] 闫利伟, 任小康. 应用相关系数的小波变换图像融合算法[J]. 计算机工程与科学, 2011, 33(11): 103-107.
- [15] 杨亚. 基于 Contourlet 变换的多聚焦图像融合研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [16] LI Xingxiu, WEI Zhihui, XIAO Liang, et al. Compresses sensing images reconstruction based on morphological component analysis [C]// Proceeding of IEEE 16th International Conference on Image Processing, 2009: 2129-2132.
- [17] YUAN Yihui, ZHANG Junju, CHANG Benkang, et al. Objective quality evaluation of visible and infrared color fusion image [J]. Optical Engineering, 2011, 50(3): 033202.
- [18] 李栋. 基于 NSCT 变换的红外图像与可见光图像融合算法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.

(上接第 13 页)

### 参考文献

- [1] 王海涛. 移动 AdHoc 网络的 MAC 协议综述[J]. 数字通信世界, 2010(6): 59-65.
- [2] 彭革新, 谢胜利, 张剑. 战术 Ad hoc 网络研究[J]. 军事通信技术, 2002, 23(3): 34-40.
- [3] KIM J H, YOO S I. TMCMP: TDMA based multi-channel MAC protocol for improving channel efficiency in wireless Ad Hoc networks [C]//IEEE 9th Malaysia international conference on communications, 2009: 429-434.
- [4] GARCIA-LUNA-ACEVES J J, FULLMER C L. Floor Acquisition Multiple Access (FAMA) in single-channel wireless networks [J]. Mobile Networks and Applications, 1999, 4(3): 157-174.
- [5] CALI F, CONTI M, GREGORI E. IEEE 802. 11 protocol: Design and performance evaluation of an adaptive backoff mechanism [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(9): 1774-1786.
- [6] 杨海东, 李建海, 邓勇. 采用集总式冲突消除算法的 Ad + hoc 网络 MAC 协议[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(5): 1241-1245.
- [7] VERGADOS D J, KOUTSOGIANNAKI M, VERGADOS D D, et al. Enhanced end-to-end TDMA for wireless Ad-hoc networks [C]//IEEE 12th Symposium on Computer and Communications, 2007: 39-44.
- [8] CHEN Y L, ZENG Q A, AGAWAM D P. Analytical modeling of MAC protocol in ad hoc networks [J]. Wireless Communication and Mobile Computing, 2008, 8(1): 45-49.
- [9] ZHU C X, SCOTT C M. An Evolutionary-TDMA scheduling protocol (E-TDMA) for mobile Ad Hoc network [R]. Baltimore, University of Maryland Technical Research Report, 2000: 156-161.
- [10] DU Lin, SHANG Dan, ZHANG Yan. Chip-level synchronization for Ad Hoc enabled UTRA-TDD networks [C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2007: 1172-1176.
- [11] XIAO Yang. IEEE 802. 11e: QoS provisioning at the MAC layer [J]. IEEE Wireless Communications, 2004, 11(3): 72-79.
- [12] 魏小龙, 李建海, 杨海东. HTDMA 协议自协调分布式运行机制研究[J]. 电子技术应用, 2012, 38(8): 109-111.