

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.05.024

引用格式:张伟龙,吕娜,杜思深.应用于航空 Ad Hoc 网络的高负载优先级均衡 MAC 协议[J].电讯技术,2014,54(5):656-661. [ZHANG Wei-long, LV Na, DU Si-shen. A Balancing Priority MAC Protocol under High Load for Aviation Ad Hoc Network[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(5):656-661.]

应用于航空 Ad Hoc 网络的高负载优先级均衡 MAC 协议*

张伟龙**, 吕娜, 杜思深

(空军工程大学 信息与导航学院, 西安 710077)

摘要:针对航空 Ad Hoc 网络在高负载下的低时延信道接入问题,提出一种优先级与公平性协作的多信道 MAC 协议(PBLL/HL)。在多信道检测统计基础上加以改进,结合优先级机制,在高负载网络中适时截流低优先级业务,优化网络流量,保证高优先级业务低时延发送;设计公平性优先级阈值与冲突退避窗口算法(PCA),减小低优先级业务接入时延。仿真结果表明,PBLL/HL 能够在高负载网络有效控制信道接入,维持良好的网络流量,降低网络平均接入时延(低优先级业务时延过载时降低 10% 以上),稳定高负载网络吞吐量(最大吞吐量 88.1%,过载时吞吐量下滑平缓),解决了航空数据链高业务量带来的高时延和网络拥塞。

关键词:航空 Ad Hoc 网络;高负载数据链;多信道接入;优先级均衡;退避窗口

中图分类号:TN915;TP393 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)05-0656-06

A Balancing Priority MAC Protocol under High Load for Aviation Ad Hoc Network

ZHANG Wei-long, LV Na, DU Si-shen

(School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: For the low latency problem of channel access in aviation Ad Hoc network under high load, a multi-channel MAC protocol called PBLL/HL based on the priority and collaborative fairness is put forward. On the basis of statistical multi-channel detection, PBLL/HL optimizes the network traffic to ensure successful high priority data transmission with low latency by closing the low priority data. It also lowers the latency of low priority data with PCA (Priority Threshold and Conflict Back-off Algorithm). The simulation results prove that PBLL/HL maintains an optimized network traffic by effectively controlling channel access under high load, lowers the average access delay (Lowers the latency of low priority data more than 10% when the data overload), keeps the throughput steady under high load (Maximum throughput is 88.1%, the throughput falls flat when the data overload) and solves the problem of high latency and jam caused by high traffic in aviation data link.

Key words: aviation Ad Hoc network; high load datalink; multi-channel access; priority balancing; back-off window

* 收稿日期:2013-11-29;修回日期:2014-02-24 Received date:2013-11-29;Revised date:2014-02-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61302153);陕西省自然科学基金资助项目(2010JM8008)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61302153); The Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2010JM8008)

** 通讯作者: xuan yuzhudan@163.com Corresponding author: xuan yuzhudan@163.com

1 引言

Ad Hoc 网络多采用随机接入类 MAC 协议, 以实现网络拓扑变化的灵活适应, 但其协议固有的竞争碰撞造成接入时延以及接入公平性问题, 在高负载航空数据链环境中愈加突出^[1-4]。通过改进 RTS/CTS 握手机制、载波侦听机制、退避机制、交互预约机制、多信道机制等方法, 衍生出了大量的 MAC 协议, 以解决网络负载逐渐提升带来的时延和公平性问题。

CSMA^[5] 在 ALOHA 基础上利用信道检测初步解决碰撞问题, 减小了一定的时延, 但高负载时碰撞率依然较高; BTMA^[6] 协议利用多信道忙音一定程度上解决了 CSMA 节点隐藏问题带来的接入时延问题, 但会造成某些节点的饥饿问题, 导致节点接入不公平; 文献[7]在 IEEE 802.11 基础上引入博弈论思想, 使用户流获取公平性的最优信道竞争参数 CW_{min} , 但是忽略了高优先级业务的高实时性要求, 过分强调公平性。文献[8]在 IEEE 802.11e 基础上, 不同优先级业务采用不同的信道竞争能力, 保证高优先级业务低时延优先接入, 但低优先级业务在高负载时将会出现高时延问题。

在业务高负载、节点高密度网络中, 上述 MAC 协议虽然考虑了时延与公平性, 但当流量超过网络容量限时, 冲突碰撞增加, 网络会迅速拥塞, 实时性能将会急剧下降, 导致重要信息不能及时发送^[3]。基于信道统计优先的多址接入协议 (Statistical Priority-based Multiple Access, SPMA)^[9] 在多信道统计机制下, 利用优先级机制, 在网络负载超过容量限时对低优先级业务进行适时截流停发, 维持网络通畅且不迅速恶化, 保证高优先级业务低时延发送, 但此时低优先级业务时延较大。

本文基于 SPMA 协议思想, 改进信道占用统计及阈值-回退算法, 提出一种多信道 MAC 协议——基于低时延的高负载优先级均衡 (Priority Balancing based on Low Latency under High Load, PBL/HL), 以改善航空环境下业务高负载、节点高密度的网络性能: 网络流量未饱和时, 提升网络吞吐量, 保证高优先级业务低时延接入; 网络流量饱和和过载时, 优化网络流量, 尽可能维持最优网络吞吐量, 维持高优先级业务低时延发送, 降低低优先级业务由于截流带来的时延, 使网络不会迅速拥塞恶化。

2 收发信机制

MAC 协议的性能与物理层波形设计密切相

关^[10-12], 依据 SPMA 多信道机制, PBL/HL 协议与收发机制进行联合设计。

首先将物理收发信道扩展为 5 个, 在 5 个动态分配信道上同时进行发送或者接收, 即同时 1 路发送、4 路接收, 从物理设备上提供减小碰撞机率和增加用户数量的性能改善基础。

其次, 原业务数据包 MES 采用 LDPC 纠错扩展编码, 分割成 N 个待发送的子数据块 (SM), SM 在对应优先级队列排队等待, 根据 PBL/HL 选择信道发送, 数据块时频分布如图 1 所示, 从数据帧结构上减小数据碰撞概率。

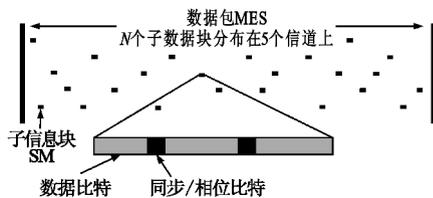


图 1 时间和频率上消息 MES 波形图

Fig. 1 Waveform of the MES in time and frequency

接收端多路接收子数据块, 部分子数据块的碰撞丢失仍能依靠强纠错解码正确恢复。从编码机制上提升误码纠正能力, 进而改善冲突分解能力。

通过上述收发信机制, 数据碰撞概率大为减小, 碰撞误码对接收数据正确恢复的影响大为减小, 数据传输容错性增强。

3 PBL/HL 协议

传统的竞争类 MAC 协议随着负载的增加, 吞吐量在过载时会急剧下降, 如图 2 曲线 A 所示, 然而理想需求的是曲线 B 所示的稳定性吞吐量, 即需要对信道接入进行有效控制。

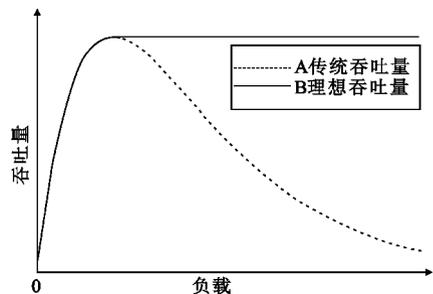


图 2 负载-吞吐量趋势

Fig. 2 Trend of load-throughput

CSMA 类接入控制, 传播时延大于分组帧长时, 会导致碰撞检测失真; TDMA 类接入控制, 由于固定时隙, 造成不必要的时延和资源浪费; 集中式控制类,

由于节点数量和业务数量,使得成本高且难实现。

因此,PBLL/HL 采用 SPMA 的分布式接入控制思想,利用多信道占用统计与优先级阈值判别,适时截流停发低优先级业务,尽可能实现理想曲线 B 的性能要求,确保高优先级业务的绝对实时发送(小于 2 ms)^[4]。由于 SPMA 截流机制使得低优先级业务接入时延较高,PBLL/HL 设计了公平性优先级阈值和冲突回退算法(Priority Threshold and Conflict Back off Algorithm,PCA),在高优先级业务低时延发送的前提下,改善低优先级业务的较高时延问题,提高网络吞吐量。

3.1 优先级发送判别机制

PBLL/HL 将业务进行优先级分类,在网络过载时,通过优先级阈值和信道占用统计比较,使低优先级业务停发等待,优化网络流量,保证高优先级业务成功传输,网络状态良好时,再对低优先级业务进行处理发送。既保证了重要业务通信的顺畅,又不会使网络过载,维持了比较稳定的吞吐量。

优先级阈值是各优先级对应的发送判别门限;信道占用统计是预定周期内信道上脉冲数量的累计,在此预定周期结束时,信道占用统计清零,再去生成新的信道占用统计。如图 3 所示,PBLL/HL 中 T/R 信道占用统计是对收发机数据在整个频率-时间有效空间进行计算,得到 5 个单信道的占用统计值。

SPMA 只对接收机进行统计,由于节点自身业务量会导致信道占用统计失真,业务量较小节点信道占用统计偏大,下一时刻业务接入机率较小,业务量大节点反之,出现节点不公平现象,且有可能导致碰撞增加。

请求发送某优先级数据包时,PBLL/HL 会将各信道占用统计与该优先级阈值进行比较,选择满足条件的信道进行数据发送。

协议判别如图 3 所示,检测优先级队列,无数据时持续检测,有数据时先从高优先级数据进行发送,将较高优先级队列数据包取出,判断是否期满,如果没有期满,将 5 个信道占用统计与对应优先级阈值比较,如果有满足条件的信道,即低于优先级阈值,则随机选择满足条件的信道发送;如果没有满足条件的信道,即都高于优先级阈值,节点将按照该优先级回退算法等待一个随机回退间隔,并再次检测信道占用统计。

如果在随机回退期间,比它低的优先级业务数据被排队等待发送,则将低优先级业务数据保存在对应优先级队列中,直到更高优先级队列数据发送为空;如果一个比它高的优先级业务数据在回退间隔期间被排队等待发送,则回退取消,立刻重新检测较高优先级业务阈值,与信道占用统计进行比较。随后再次进行以上过程,将允许发送的数据包从队列移除进行发送。

在预定周期内,由于局部突发性数据,会导致局部节点信道占用统计迅速增长并高于最高优先级阈值,所有业务数据将不能发送,造成接入时延增加、资源浪费。SPMA 未考虑这种情况,此时,如果剩余预定周期大于其值的一半,PBLL/HL 将使信道占用统计迅速归零,以应对突发数据带来的时延和资源浪费问题。

此优先级发送机制使得高优先级业务能够尽可能短时间地进行发送,保证重要数据的实时性,在网络高负载时可对低优先级进行截流控制,维持网络的通畅。

3.2 公平性 PCA 算法

信道占用统计失真、预定周期设置不合理、优先级阈值不匹配当前网络状态、网络的不确定性以及突发业务数据,都会使得信道占用统计达到一个门限,此时低优先级业务被禁止发送,造成时延加大,高优先级业务数量较小,造成信道资源的浪费,故而

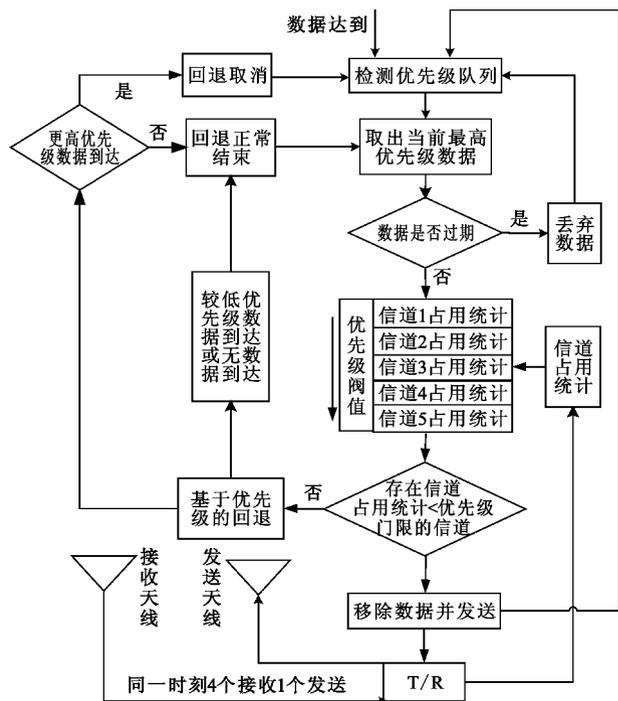


图 3 PBLL/HL 协议流程
Fig. 3 Flow chart of PBLL/HL

提出公平性的 PCA 算法。

各优先级阈值 F_i 按照优先级从高到低排列,高优先级业务阈值相对较大,同时每个阈值设置一个浮动窗口 $[F_{\min}, F_{\max}]$,各浮动窗口没有交集,鉴于业务优先级越高对高负载时在传信息量影响越大,为了稳定吞吐量,增加低优先级业务接入机率,高优先级浮动窗口较小,低优先级浮动窗口较大,例如,优先级 0 的初始值取 1 000,浮动窗口为 $[950, 1 050]$,优先级 1 的初始值取 800,浮动窗口为 $[700, 900]$ 。

F_i 初始化为浮动窗口的中值,按照流量拥塞控制机制,当成功发送一个数据时,其对应优先级阈值在原有基础上进行一个增加,使得下次接入机率增加;当发送失败时,即进行回退等待的情况,优先级阈值直接降到浮动窗口最小值与当前优先级阈值的中间值,以减少业务发送,保证网络的通畅。 F_i 数值变化如式(1)所示:

$$F_i = \begin{cases} \min(\frac{F_{\min} + F_i}{2}, F_{\max}), & \text{Fail} \\ \max(F_i + \frac{F_{\max} + F_{\min}}{10}, F_{\min}), & \text{Success} \end{cases} \quad (1)$$

在此基础上,回退等待机制也充分考虑低优先级问题。BEB 退避算法,竞争窗口采用二进制指数,冲突时 $CW = \min(2^i CW_{\min}, CW_{\max})$,成功时直接让窗口减小为 CW_{\min} ,造成小时间尺度的不公平性现象,发送时延抖动性强,不适用实时业务。MILD 退避算法,信息发送冲突回退时,竞争窗口的值增加为原来的 1.5 倍,直至 CW_{\max} ;发送成功时,竞争窗口 CW 值减 1,局限于信息量较少的网络。MIMD 退避算法,信息发送冲突回退时,竞争窗口的值增加为原来的 2 倍,直至 CW_{\max} ;发送成功时,竞争窗口 CW 变为原来的 0.5 倍,直至 CW_{\min} ,适用于节点多的场景,但没有考虑业务优先级问题^[2-3]。

本文考虑到网络信息量大、实时性要求高,以及公平性原则,某优先级业务进行回退时,对应回退竞争窗口为 $[0, CW_i]$, $[CW_{\min}, CW_{\max}]$ 是 CW_i 对应的窗口范围,高优先级窗口最小值 CW_{\min} 较大,但窗口范围较小,低优先级反之;因为高优先级发生碰撞回退时,说明信道负载过重趋于拥塞,需要对数据进行大量遏制截流,回退时间应该较大,但考虑到低时延要求,回退时间抖动应该较小。

CW_i 初始化为 CW_{\min} ,在发送冲突回退或者发送成功时, CW_i 按照回退次数和优先级在窗口中进

行优化选择。 CW_i 数值变化如式(2)所示:

$$CW_i = \begin{cases} \min(CW_{\max}, PF[i] \times CW_i), & \text{Fail} \\ \max(CW_{\min}, MF[i] \times CW_i), & \text{Success} \end{cases} \quad (2)$$

本文采用 4 个优先级的消息体制,分别为 0、1、2、3 级,0 代表最高级,式(2)中 $PF[i] = CO_i + 2 + i \times 0.1$, CO_i 代表 i 级优先级业务在预定周期内的回退次数,回退次数越多则回退时间越长; $MF[i] = (4 - i) \times 0.2$, i 代表优先级数,优先级越低回退时间越低,保证低优先级业务尽快发送。

由于截流机制,网络实际在传流量很难达到饱和和流量,高优先级业务回退的机率较小。考虑到公平性,PCA 算法重点考虑低优先级业务,在信道允许的情况下,既不影响高优先级业务的实时发送,又充分利用信道资源,增加低优先级业务接入成功率,提升网络整体实时性。

4 仿真分析

利用 Exata 仿真平台对 PBL/HL 协议性能进行仿真测试,场景及参数如图 4 所示,设置 8 组不同优先级业务流,分别为业务优先级为 3 的 1~10、7~15 数据流,业务优先级为 2 的 2~8、12~14 数据流,业务优先级为 1 的 3~9、6~13 数据流,业务优先级为 0 的 4~11、5~16 数据流,共用 5 个信道。

2 Mb/s 的信道速率满足大容量、高速率数据流传输,优先级数根据真实指令等级数确定,设置 8 组不同优先级的业务流,最大限度的逼近真实场景。为更加直观便捷地统计时延及吞吐量,每架飞机只有特定的优先级数据流,与真实场景有差异,但不影响性能参数的真实性、准确性。

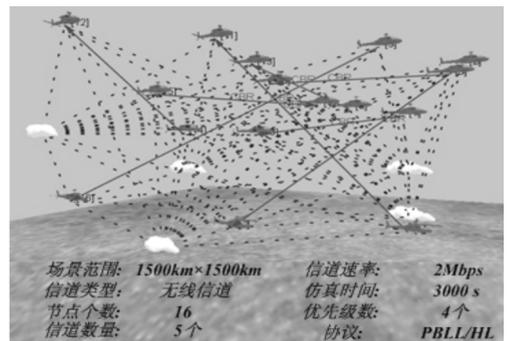


图 4 三维仿真场景

Fig. 4 3D simulation scenes

4.1 时延

网络的业务量为0.5 Mb/s、1 Mb/s、1.5 Mb/s、2 Mb/s、2.5 Mb/s、3 Mb/s,依次增加进行时延统计,得到业务量由低负载到过载过程中的时延变化趋势。仿真中使用 PBLL/HL、SPMA 两种协议,后者按照优先级采用固定的优先级阈值和回退窗口,仿真中其值取 PCA 算法的初始值。

端到端时延仿真结果如图 5 所示, PBLL/HL 协议时延大体分布在 0~1 s 之间。当网络流量不大、负载较轻时,各优先级业务的时延都接近于 0;随着网络负载不断加重,高优先级业务时延变化不大,其他优先级业务时延增加幅度较大,如 0 优先级业务基本不变,4 优先级业务时延上升明显,最高时达到了 1.02 s,说明协议通过对低优先级业务的截流遏制,维持良好的网络负载,实现了对高优先级业务的低时延要求。

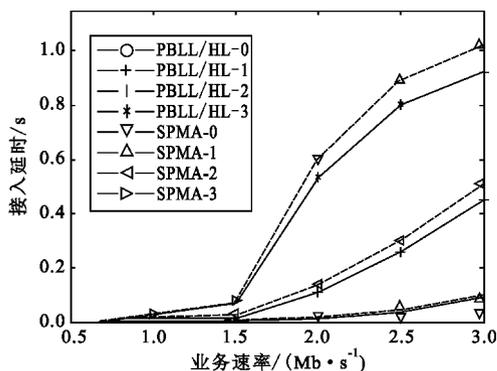


图 5 多节点多优先级业务的时延性能

Fig. 5 The latency performance of multiple nodes with multiple priority data

从图 5 还可以看出,对于高优先级业务,两条仿真曲线基本重合,差值最大为 0.002 s,说明 PCA 公平性算法基本不影响高优先级业务时延;而对于低优先级业务,SPMA 时延明显高于 PBLL/HL,而且优先级越低,两个协议时延差越大,例如 3 优先级业务在业务量为 3 Mb/s 时, PBLL/HL 时延比 SPMA 时延要低 0.11 s,而 2 优先级业务时延差 0.08 s,说明 PCA 算法对较低优先级业务作用明显;8 条曲线对比说明采用 PCA 算法,既保证了高优先级业务的低时延发送,又降低了低优先级业务的接入时延,减小了网络平均时延,更好地保证了网络的实时性。

4.2 归一化吞吐量

网络业务量从 0 开始,以 1 为单位增加至 30,进行吞吐量统计,得到 PBLL/HL 下业务量由低负载

到严重过载过程中的吞吐量曲线,同时引入 ALOHA、时隙 ALOHA 吞吐量曲线^[3-13],如图 6 所示。纯 ALOHA 当负载为 0.5 时,吞吐量最大达到 18.4%;时隙 ALOHA 当负载为 1 时,吞吐量最大达到 36.8%。由这两条曲线可看出,当吞吐量达到最大值后,随着负载继续增加,吞吐量急剧下降,说明过载时数据冲突急剧增加,协议碰撞回避机制弱,不适用高负载网络。

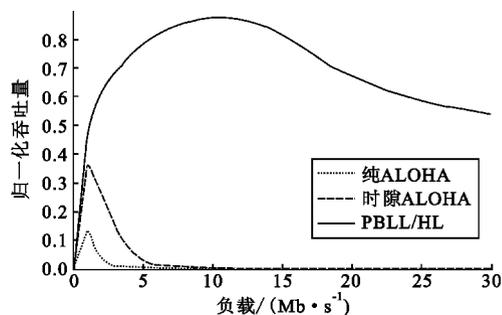


图 6 负载与吞吐量曲线

Fig. 6 Performance curve of load-throughput

如图 6 所示, PBLL/HL 仿真曲线随着负载增加快速升高,负载达到 10 时开始缓慢下滑,直至负载为 30 时,曲线仍未急剧下降,且趋于平滑,说明 PBLL/HL 协议碰撞回避机制优势明显,当网络超载时,不会迅速趋于拥塞,能够根据信道占用情况,遏制较低优先级业务数据发送,达到截流目的,保证较高优先级业务传输通畅,维持较稳定的吞吐量。PBLL/HL 流量为 10 时,吞吐量最大达到 88.1%,说明 PBLL/HL 的负载性能明显提升,吞吐量和信道利用率高。

5 结论

业务高负载、节点高密度的航空数据链网络中, PBLL/HL 区分不同业务等级,通过公平性优先级截流机制,优化网络流量,使网络实际在传流量很难达到饱和,确保业务低时延发送的成功率;弱化甚至避免了流量过载带来的高时延和网络拥塞,维持了较为稳定的吞吐量。本文中预定周期长度直接关系到信道占用统计的时效性,如何寻找最优的预定周期将是后续工作研究的重点。

参考文献:

- [1] Jurdak R, Lopes C V, Baldi P. A survey, classification and comparative analysis of medium access control protocols for ad hoc networks[J]. IEEE Communications Sur-

- veys & Tutorials, 2004, 6(1): 2-16.
- [2] 张棋飞. 无线自组织网络路由及 MAC 协议关键技术研究[M]. 武汉:湖北人民出版社, 2012.
ZHANG Qi-fei. Key Techniques of Routing and MAC Protocol in the Wireless Self-organized Network[M]. Wuhan: Hubei People's Publishing House, 2012. (in Chinese)
- [3] 吕娜, 杜思深. 数据链理论与系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
LV Na, DU Si-shen. Theory and System of Data Link [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011. (in Chinese)
- [4] 骆光明, 杨斌. 数据链——信息系统连接武器系统的捷径[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
LUO Guang-ming, YANG Bin. Data Link——The Shortcut between Information System and Weapon System[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [5] Kleinrock L, Tobagi F A. Packet switching in radio channels: part I——carrier sense multiple-access modes and their throughput-delay characteristics [J]. IEEE Transactions on Communications, 1975, 23(12): 1400-1416.
- [6] Tobagi F A, Kleinrock L. Packet switching in radio channels: part II——The hidden terminal problem in carrier sense multiple-access and the busy-tone solution [J]. IEEE Transactions on Communications, 1975, 23(12): 1417-1433.
- [7] 张国鹏, 张海林, 赵力强. WLAN 中基于协作博弈的比例公平性带宽分配机制[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2009, 36(1): 87-93.
ZHANG Guo-peng, ZHANG Hai-lin, ZHAO Li-qiang. Co-operative game theoretic bandwidth sharing scheme for proportional fairness in WLAN[J]. Journal of Xidian University (Natural Science), 2009, 36(1): 87-93. (in Chinese)
- [8] 李楠, 蔡跃明, 程乃平. Ad Hoc 网络中一种具有优先控制的自适应协同 MAC 协议[J]. 信号处理, 2011, 27(3): 450-455.
LI Nan, CAI Yue-ming, CHENG Nai-ping. An adaptive co-operative MAC with priority for Ad Hoc networks[J]. Signal Processing, 2011, 27(3): 450-455. (in Chinese)
- [9] Stephen M C, Hoback K A, Scott J F. Statistical priority-based multiple access: US, 768077B1 [P]. 2010-03-16.
- [10] Weingarten H T L, Viswanath P. The capacity region of the degraded multi-input multi-output compound broadcast Channel [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(11): 5011-5023.
- [11] Ekrem E, Ulukus S. The secrecy capacity region of the gaussian MIMO multi-receiver wiretap channel [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2011, 57(4): 2083-2114.
- [12] 宋煜, 左德承, 杨孝宗, 等. 一种用于多信道 Ad Hoc 网络 MAC 协议的匹配策略[J]. 计算机学报, 2012, 35(5): 1018-1030.
SONG Yu, ZUO De-cheng, YANG Xiao-zong, et al. A matching algorithm for multichannel Ad Hoc medium access control protocol[J]. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(5): 1018-1030. (in Chinese)
- [13] Goldsmith A J, Wicker S B. Design challenges for energy-constrained ad hoc wireless networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2002, 9(4): 8-27.

作者简介:



张伟龙(1988—),男,陕西宝鸡人,2012年于中国石油大学(华东)获学士学位,现为空军工程大学硕士研究生,主要研究方向为航空数据链;

ZHANG Wei-long was born in Baoji, Shaanxi Province, in 1988. He received the B.S degree from China University of Petroleum in 2012. He is now a graduate student. His research concerns aviation data link.

Email: xuan yuzhudan@163.com

吕娜(1970—),女,陕西西安人,1995年获博士学位,现为空军工程大学教授、硕士生导师,主要研究方向为军事航空通信;

LV Na was born in Xi'an, Shaanxi Province, in 1970. She received the Ph. D. degree in 1995. She is now a professor and also the instructor of graduate students. Her research concerns military aviation communication.

杜思深(1962—),男,陕西咸阳人,副教授,主要研究方向为通信理论与技术。

DU Si-shen was born in Xianyang, Shaanxi Province, in 1962. He is now an associate professor. His research concerns communication theory and technology.