

一种支持 QoS 的 D - TDMA 协议性能分析与仿真

梁 俊, 田 斌, 仝海波, 吕 娜, 朱子行

(空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘 要:数据链中的多址接入协议会直接影响其组网方式和性能指标。武器协同数据链中对信息传输的实时性有很高的要求,通过对动态时隙分配算法的改进,提出了一种适合武器协同数据链组网方式的 D - TDMA 协议,结合排队理论推导了该协议下不同优先级业务的平均端到端时延计算公式。利用 OPNET 软件搭建了武器协同数据链的仿真模型,比较了不同时隙长度对网络时延性能的影响,仿真结果表明,D - TDMA 协议不仅能满足武器数据链中的时延要求,而且能提供较高的信道利用率。

关键词:数据链;QoS;多址接入;动态时隙分配;OPNET

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2010.01.014

中图分类号: TN927⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:**1009-3516(2010)01-0059-05

随着战术数据链技术的发展,使得武器控制网络化成为可能。航空武器协同数据链可以为战斗机群提供一个协同作战信息池,从而实现多个平台大量探测信息的有效共享。该数据链的主要特点包括:亚秒级的平均端到端时延;无中心节点,分布式的网络结构;能够为部分信息的传输提供 QoS 保障;节点能够动态地入网和退网等。

目前,大多数数据链体系没有涉及到路由协议,因此,多址接入方式会直接影响到数据链组网特点和性能指标。文献[1]提出了 2 种动态时隙分配算法,即公平排队算法和严格优先级排队算法。两者主要区别是在截短列表时采用公平排队还是严格优先排队,公平排队不考虑优先级的影响,严格优先级基于业务的优先等级分配发送时隙,支持 QoS 保证,但存在低优先级业务长时间无法分配到时隙的“饿死”问题。文献[2]提出了一种有效的树状时隙分配算法,文献[3]基于有效竞争预约接入、无冲突轮询传输的思想,提出了一种依据用户妥善安排的多址接入协议,在该协议中仅有发送分组的节点才竞争接入使用信道资源,极大地提高了信道的使用效率。文献[4]采用概率周期的方法对民航数据链的时延性能进行了详细的理论分析,为数据链时延的分析提供许多参考之处。

1 一种支持 QoS 的 D - TDMA 协议

结合卫星通信中常用的 DAMA TDMA 协议^[5-9],对文献[2]提出的动态时隙分配算法进行了改进,使得算法既能满足高优先级优先处理的原则,又能根据情况调整低优先级的动态接入,从而避免高优先级的持续到达引起的低优先级无法接入信道的问题。所采用时隙结构与 Link16 类似,而接入方式为动态接入,本文中称之为 D - TDMA (Dynamic Time - Division Multiple Access)。D - TDMA 协议中采用的支持 QoS 的 DSA 算法 (Dynamic Slots Allocation, DSA) 基本流程见图 1。

* 收稿日期:2009-03-03

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2007F03)

作者简介:梁俊(1962-),男,江苏南京人,教授,博士生导师,主要从事微波、卫星通信以及高速数据链技术研究。

E-mail:tianbin0793@163.com

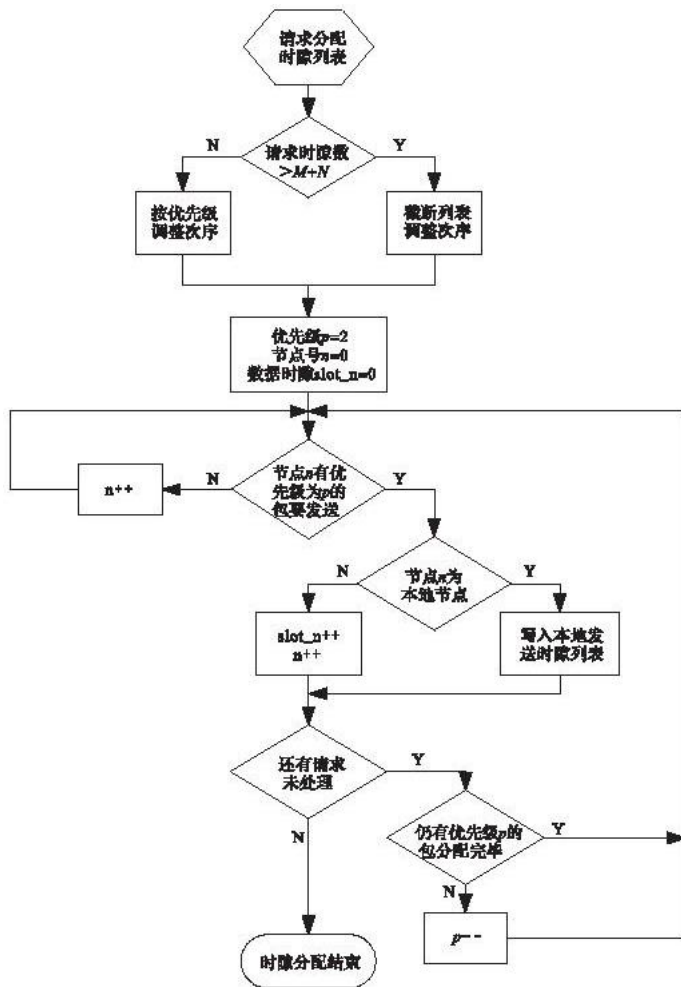


图1 DSA 算法流程

Fig.1 DSA algorithmic flow chart

首先,各个节点广播请求消息之后,形成一个请求分配时隙的列表,如果请求分配的时隙总数小于 n ,那么所有的请求时隙都将得到有效分配,只需要通过优先级的高低对请求列表进行次序调整,生成有序合理的待分配请求列表。否则,请求分配的时隙总数将会超过 1 帧内可用的发送时隙数,从而无法满足所有的发送请求,需要对列表中的请求进行取舍,生成截短的请求列表。

其次,根据合理的请求列表对最高优先级的请求按节点编号顺序询问并进行时隙分配,询问完毕后再对次高优先级的请求进行询问和分配直到最低优先级的请求分配完毕。

最后,根据时隙分配的情况生成本地发送时隙列表,以控制本节点的发射信息的时间。本地发送时隙到来时开始发射数据包,否则转入接收状态,接收网内其它节点的发射信息。

当所有请求发送的数据包数超过一帧中可用的数据时隙数时,部分数据包将无法分配到时隙,即存在列表请求取舍的问题。为解决该问题,文献[1]采用按比例截短请求列表的方法,为节点等比例分配时隙,在本地节点分配的多个时隙中,优先级高的数据包排在序号靠前的时隙中发送。

在本文设计的协议中,将所有预约时隙的数据包按优先级放入不同的请求队列,首先对优先级最高的队列进行遍历并分配时隙,高优先级队列的请求分配时隙后再用同样的方法处理优先级更低的请求队列,直到可用时隙分配完为止。采用这种机制后,不仅最大限度地保证了高优先级数据包的 QoS,而且尽可能避免了算法的歧义性。

2 排队模型及时延估计

通信网络中的时延通常包括 4 个部分^[10]:处理时延、排队时延、传输时延和传播时延。由于数据链采用

格式化消息、通信距离远等特点,尤其在采用 TDMA 体制的数据链中,数据包的排队时延成为影响网络时延的主要因素。

根据 M/G/1 排队模型的相关理论可知数据包在队列中的平均等待时间为:

$$W = \frac{\lambda \bar{X}^2 + (3 - \rho)A}{2(1 - \rho)} = \frac{\lambda \bar{X}^2 + (3 - \lambda/\mu)A}{2(1 - \lambda/\mu)} \quad (1)$$

式中:定义 $\rho = \lambda/\mu$, λ 为归一化的数据包到达率,即每个数据时隙内平均到达的数据包数;平均分组传送时间为 $\bar{X} = 1/\mu$, μ 为传输速率; A 表示 1 帧中用于预约的时间长度。

上述对平均等待时间的分析中,忽略了固定帧长的影响。如果所有预约的数据包发送完毕,下一帧预约还未开始,那么就存在帧间时隙空闲的情况。对于数据区域到达的数据包,要经历一个固定帧长协议特有的帧间等待后才能进入等候队列中。由泊松过程的性质知,在已知 $[0, t]$ 上有 n 个数据包到达的条件下,第 $n + 1$ 个数据包在 $[0, t]$ 间到达的概率是等可能性的。结合概率分析的方法^[10]可得:

$$\lim_{i \rightarrow \infty} E\{I_i\} = \frac{U - \lambda(A + U)}{2} \frac{U - \lambda(A + U)}{A + U} + [U - \lambda(A + U)] \left(1 - \frac{U - \lambda(A + U)}{A + U}\right) = U \left(1 - \frac{\lambda}{1 - r}\right) - \frac{U}{2(1 - r)} \left(1 - \frac{\lambda}{1 - r}\right)^2 \quad (2)$$

式中: $r = \frac{A}{A + U}$, A 表示 1 帧中用于预约时间长度; U 表示用于传输数据的时间长度。结合数据链通信的特点,本文用到的数据包均采用固定的格式,数据包的发送时隙为固定长度且假设为 1,则 $\bar{X} = \bar{X}^2 = 1$ 。这样,计算出来的就是归一化的平均时延(以数据时隙的长度为单位),结合式(2),修正后的平均等待时间为:

$$W' = \frac{\lambda + (3 - \lambda)A}{2(1 - \lambda)} + U \left(1 - \frac{\lambda}{1 - r}\right) - \frac{U}{2(1 - r)} \left(1 - \frac{\lambda}{1 - r}\right)^2 \quad (3)$$

考虑为数据包设置不同的优先级后,可得:

$$W_k = \frac{\sum_{i=1}^3 \lambda_i \bar{X}_i^2 + (3 - \sum_{i=1}^3 \rho_i)A}{2(1 - \rho_1 - \dots - \rho_{k-1})(1 - \rho_1 - \dots - \rho_k)} + U \left(1 - \frac{\lambda}{1 - r}\right) - \frac{U}{2(1 - r)} \left(1 - \frac{\lambda}{1 - r}\right)^2 \quad (4)$$

式中: $k = 1, 2, 3$, k 值越小优先级越高; \bar{X}_i 为优先级为 i 的分组平均传送时间。

以上主要是对排队时延的分析,而数据包的端到端的平均时延会比上述分析的值略大一些。如果采用 Link16 的时隙结构,时延估计时可将式(4)近似为对端到端平均时延的估计。

3 仿真与结果分析

OPNET 是美国 MIL3 公司开发的网络仿真软件,该软件具有模块化、层次化、面向对象和图形界面的特点,功能强大,在网络协议研发中得到了广泛的应用^[11]。

本文通过 OPNET 建立仿真模型,主要在机间链路模式(仅有机载端机节点之间的通信)下进行仿真分析,主要通过仿真分析不同时帧长度对网络时延性能的影响,从而进一步选择合理的帧长,网络拓扑见图 2。

20 架装有通信终端的飞机随机分布在 50×50 km 的空域中,每架飞机在全网内有唯一的平台编识号,通信终端的网络地址与平台编识号相对应,确保了网络地址的唯一性。假设每个节点的发射功率足够大,在该空域内,任意 2 个节点都可以直接进行通信。这样,20 个节点构成了一个全连通的无线分布式网络,网络结构形式类似于单跳的分布式 Ad hoc 无线通信网。

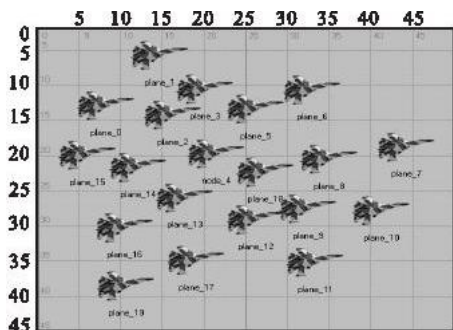


图 2 网络拓扑模型

Fig. 2 Network topology model

仿真参数配置见表1。为了比较不同业务量的情况下时帧周期长度对吞吐量和平均时延的影响,分别选取了4个时帧周期:0.125 s、0.25 s、0.5 s和1 s,分别对应图中的“slot16”、“slot32”、“slot64”和“slot128”。

图3为4个不同时帧长度下,全网的业务量与吞吐量的变化关系。横坐标表示业务量,即平均每秒生成的等待发送的数据包;纵坐标表示吞吐量,即平均每秒向无线信道发送的数据包数。从图中可以看出,随着业务量增大,吞吐量逐渐趋于饱和;相同的网络规模下,不同的时帧长度,吞吐量各不相同。时帧周期越长,吞吐量的饱和值越大,即信道的利用率越高。由于时隙长度为0.007 812 5 s,且每个时隙只发送一个数据包,所以每秒发送的数据包数不大于128。时帧周期越短,单位时间内用于发送预约信息的微时隙所占的比例就越大,即协议开销占用的信道资源越多,信道利用率就会下降,吞吐量的饱和值就会减小。

图4-6分别给出了不同优先级数据包的端到端平均时延随业务量的变化情况,高优先级的数据包平均时延随业务量的增加波动不明显,而优先级越低,随着业务量增大,平均时延增幅越显著。因此只有高优先级的数据包可以支持对时延要求高的业务,如目标位置,导弹引导指令等。参考协同空战的相关文献,高优先级数据包的平均时延小于200 ms,这样时帧周期小于0.25 s的高优先级数据包可以满足该性能指标要求。考虑到信道的利用率,将时帧设置为0.25 s,即图中的“slot32”。

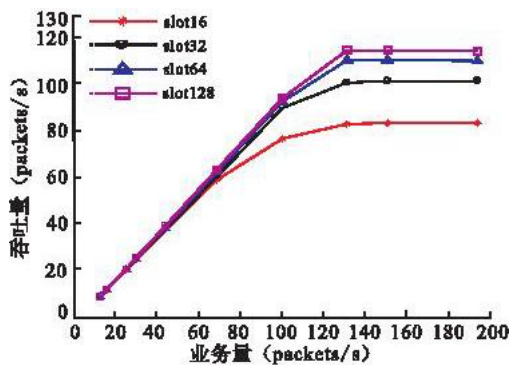


图3 吞吐量与业务量的变化关系

Fig. 3 Relationship between throughput and portfolio

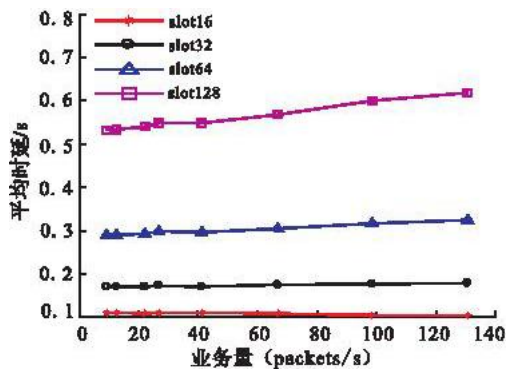


图4 高优先级平均时延变化

Fig. 4 Mean delay of high priority

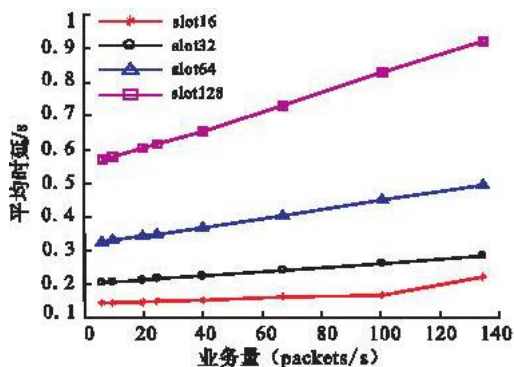


图5 中优先级时延变化

Fig. 5 Mean delay of middle priority

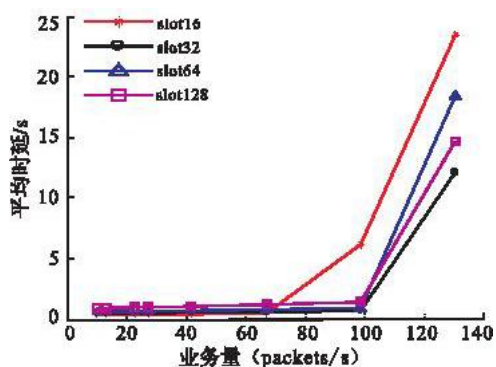


图6 低优先级时延变化

Fig. 6 Mean delay of low priority

4 结束语

本文提出了一种支持QoS的D-TDMA协议,以满足武器协同数据链对信息实时传输的要求。其中动

态时隙分配算法兼顾了高优先级数据包和低优先级数据包,使得高优先级的数据包具有最小的平均网络时延,低优先级具有较低的平均时延。采用排队论相关理论对时延的估计公式进行了推导,仿真结果进一步验证了理论分析的合理性。下一步的工作是研究如何与其它仿真环境的交互式仿真,从而在更加具体的业务模型下验证协议的性能指标。

参考文献:

- [1] Arianne Lewis, Steven Pizzi. Quality of Eervice for Tactical Data Links: TDMA with Dynamic Scheduling[J]. IEEE Military Communications Conference, 2005, 4: 2350 - 2359.
- [2] 梁爽, 毛玉泉, 赵伟光, 等. 地空数据链中的时隙分配算法[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2005, 6(3): 12 - 15.
LIANG Shuang, MAO Yuquan, ZHAO Weiguang, et al. The Timeslot Assignment Algorithm of Ground to Air Data Link[J]. Journal of Air Force Engineering University: Naural Science Edition, 2005, 6(3): 12 - 15. (in Chinese)
- [3] 张文柱, 李建东, 翁继伟, 等. 分布式无线网络中依据用户妥善安排的多址接入协议[J]. 计算机学报, 2003, 26(5): 530 - 537.
ZHANG Wenzhu, LI Jiandong, WENG Jiwei, et al. User Dependent Perfect Scheduling Multiple Access Protocol in Multihop Wireless Ad Hoc Networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2003, 26(5): 530 - 537. (in Chinese)
- [4] 张军, 李忠孝. 自组织时分多址甚高频数据链的延时分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(3): 222 - 226.
ZHANG Jun, LI Zhongxiao. Delay Analysis of Self - Organized TDMA VHF Datalink[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(3): 222 - 226. (in Chinese)
- [5] Garcia Roberto M, Han Joseph. DAMA Network Simulation Modules[C]//Military Communications Conference. San Diego, CA, USA: IEEE Press, 1995. 438 - 442.
- [6] James Norris A. Satellite TDMA Capabiliy[C]//Military Communications Conference. [S. l.]: IEEE Press, 2007: 1 - 5.
- [7] Axel Botttcher. Performance of TDMA and Demand Assignment Multiple Access Protocols in Mobile Radio Channels[C]//Telecommunications Symposium. Rio de Janeiro, Brazil: IEEE Press, 1990: 409 - 413.
- [8] Forcina G, Oei S, Simba S. The Intelsat DAMA System[J]. Digital Satellite Communications. Brighton, UK: IEEE Press, 1995: 571 - 577.
- [9] Griffith D, Johnson R, Unkauf G, et al. Modeling Performance Improvements in Milstar MDR Networks with DAMA[C]. IEEE Military Communications Conference Proceedings. NJ, USA: IEEE Press, 1999: 1353 - 1357.
- [10] 李建东, 盛敏. 通信网络基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
LI Jiandong, SHENG Min. Base of Communication Network[M]. Beijing: Advanced Education Press, 2004. (in Chinese)
- [11] 陈敏. OPNET 网络仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
CHEN Min. OPNET Network Simulation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)

(编辑: 徐楠楠)

Performance Analysis and Simulation of the D - TDMA Protocol Supporting QoS

LIANG Jun, TIAN Bin, TONG Hai - bo, LÜ Na, ZHU Zi - hang

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: The multiple access protocol in data link will directly influence its performance and the weapon data link requires higher real time in message transmitting, so this paper presents a D - TDMA (Dynamic Time - Division Multiple Access) protocol supporting QoS (Quality of Service) in Weapon Data link network topology by ameliorating dynamic slots allocation algorithm, gives out the average end to end (ETE) delay formulae of different priorities traffic. A simulation model of weapon data link is created by OPNET, and then the influences on network time delay performance of different frame lengths are compared. The simulation results show that the D - TDMA scheme can meet the requirement of time delay, and provide high channel utilization in Weapon Data link communication.

Key words: data link; QoS; multiple access; dynamic slots allocation; OPNET