

基于排队论的 TDMA 数据链报文传输时延分析

杨光^{1,2} 姚路¹ 任培²

(海军工程大学管理工程系 武汉 430033)¹ (国防科学技术大学信息系统与管理学院 长沙 410073)²

摘要 信息的时效性受多种因素的影响,包括数据链系统的资源分配、服务规则以及所传输信息的特点等。尽量降低数据链的报文传输时延,是使作战单元所接收到的信息具有较好的时效性的重要保证。首先采用排队模型研究了 TDMA 数据链点对点报文传输时延,分析了服务响应时延与报文到达强度以及报文服务强度的关系,在此基础上分析了 TDMA 数据链在中继和转发两种报文传输方式下的时延,并利用 OPNET 网络仿真平台对其进行了分析与仿真。

关键词 数据链,时延,TDMA,排队论,OPNET

中图分类号 TP391 文献标识码 A

Time Delay Analysis of TDMA Data Link Message Transmission Based on Queue Theory

YANG Guang^{1,2} YAO Lu¹ REN Pei²

(Department of Management Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)¹

(School of Information System&Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)²

Abstract Time-effectiveness of information is affected by so many factors such as resource distribution scheme, service rules and characters of information. Reducing the time of data link message transmission is guarantee of the time-effectiveness of the received information. The time delay of TDMA data link message transmission was researched by using queue theory, and the relation of the time of service response with message arrive intensity and message service intensity was analyzed, and then the time delay of TDMA data link message transmission in relaying and forwarding forms was studied and simulated by using OPNET network simulation model.

Keywords Data link, Time delay, Time division media access, Queue theory, OPNET

1 引言

数据链(Data Link)^[1]作为一种汇集通信、导航和识别功能的军用电子信息系统,是信息化作战中各种作战平台互联互通的基础。数据链的基本功能是在作战单元之间传输信息,包括作战单元状态信息、武器控制信息、指挥控制信息、定位信息、战场环境信息、话音信息等,这些信息的战术价值直接决定于其时效性。例如数据链力求提高数据传输的速率,缩短各种机动目标定位信息的更新周期,以便及时显示目标的运动轨迹;预警机指示战斗机取消武器发射的指令信息、各种告警信息等,这类信息对时效性的要求更高。作战过程中,只有及时掌握各种战术信息,才能达成信息优势,实施先敌发现、先敌打击。

信息的时效性受多种因素的影响,包括数据链系统的资源分配、服务规则以及所传输信息的特点等,尽量降低数据链的报文传输时延,是使作战单元所接收到的信息具有较好的时效性的重要保证。TDMA 数据链具有自组织、无中心节点、抗毁性强等优点,在军事上得到了广泛应用,美军 Link-16 和 Link-22 数据链都采用了 TDMA 协议。因此,研究 TDMA

数据链报文传输时延具有重要的理论意义和应用价值。

目前研究多是对数据链点对点报文传输时延进行仿真分析,缺乏对数据链中继、转发传输模式下的时延分析,且多采用仿真方法研究,缺乏解析模型研究^[3]。文献[2]分析了 STDMA 协议中长传输过程和短传输过程两种点对点通信的握手机制,并利用 OPNET 工具仿真分析 STDMA 数据链在不同的业务量及重传参数下点对点通信平均报文时延。文献[3]基于 QualNet 建立了数据链系统轮询协议模型,对不同系统之间跨网传输时的端到端时延、系统响应时间等性能指标进行了仿真分析,但较少考虑具体的作战背景,没有分析影响时间延迟指标的相关因素。文献[4]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,比较了不同时帧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。文献[5]提出了一种基于 TDMA 多址接入协议——正交域时频多址接入协议 ODTFMA。该协议根据机群内的飞机数以及载机

收稿日期:2013-05-14 返修日期:2013-09-05 本文受国家自然科学基金(71201172)资助。

杨光(1981-),男,博士,讲师,主要研究方向为数据链系统及装备仿真研究、电子信息系统及装备仿真研究;姚路(1979-),男,博士生,讲师,主要研究方向为系统管理、装备管理、信息管理。

同时制导的最大武器数预先分配时隙。机群内多个武器子网采用多个正交频段互不干扰地同时工作。通过 OPNET 仿真软件对协议中时敏信息的传输时延进行分析。分析结果表明,协议能够满足武器数据链的时延要求,能够较好地支持实时性业务的传输。

本文首先确定数据链的业务源模型,采用排队模型分析数据链点对点报文传输时延,采用解析方法分析了服务响应时延与报文到达强度的关系和服务响应时延与报文服务强度的关系,并在此基础上分析了数据链中继报文传输时延以及转发报文传输时延,并利用 OPNET 网络仿真平台对其进行分析与仿真。

2 数据链报文点对点传输时延分析

数据链点对点通信过程如图 1 所示,在数据链网络成员运行时,若该成员产生了某类战术数据报文,则报文首先在为该类报文创建的缓冲队列中排队,当分配给这类报文的时隙到达时,从相应的缓冲队列取出报文送往物理层,然后进行编码调制,最后通过无线信道发送给接收站。报文传输时延是指发送站生成报文与接收站接收到报文这两个时刻的时间间隔。服务响应时延则是指报文在发送缓冲队列中的排队时延。各种战术数据对服务响应的要求不同,如威胁警告类报文的服务响应时延要求为 1 秒,而 PPLI 类报文的服务响应时延要求为 10 秒。

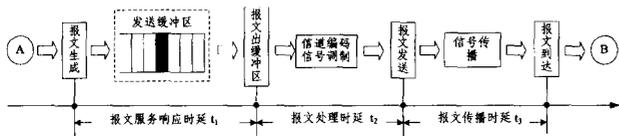


图 1 数据链系统报文传输过程

因此,报文传输时延 T_1 可以分解为服务响应时延 t_1 、报文处理时延 t_2 和报文传播时延 t_3 ,如式(1)所示。

$$T_1 = t_1 + t_2 + t_3 \quad (1)$$

式中,服务响应时延 t_1 取决于信道资源调度算法,由该类报文的业务量以及分配给该类报文的时隙数决定;报文处理时延 t_2 取决于系统硬件性能,这个时间非常短,相对于服务响应时延 t_1 可以忽略不计^[2];假设该数据链是视距系统,端机节点之间的距离一般不会超过 500 海里,因此报文的信号传播时间 t_3 也可以忽略不计。

对于采用固定时隙分配方式的 TDMA 数据链,根据固定时隙分配方式的原理,每个端机节点在每个时隙内只能发送一个报文,因此报文的服务强度为定长,又因为分配给每个端机节点的时隙是均匀分配在时帧上的,每个节点只能在分配给自己的时隙上发送报文,在其它时隙则处于静默状态,所以,假设每个节点的报文到达过程服从指数分布,到达强度为 λ ,则每个节点实际上是一个具有服务启动时间的 M/D/1 排队系统。假设每个节点的平均服务时间为 $\bar{X} = E(X)$,时隙长度为 t_s ,平均启动时间为 \bar{V} 。

由于数据链系统中报文长度为定长,因此服务时间为定长,设 $\bar{X} = \frac{1}{\mu}$, μ 为服务速率, $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$ 为服务强度且 $\rho < 1$,则

$$\bar{X}^2 = E(X^2) = [E(X)]^2 = \frac{1}{\mu^2} \quad (2)$$

剩余服务时间为

$$t_0 = \frac{\lambda \bar{X}^2}{2} \quad (3)$$

服务响应时延为

$$t_1 = \frac{t_0}{1-\rho} + \frac{\bar{V}^2}{2\bar{V}} \quad (4)$$

对于固定时隙分配方式,每个节点分配一组固定时隙,时隙重复率为 R ,则每个节点分配的固定时隙有

$$L = 2^{R-6}, 6 \leq R \leq 15 \quad (5)$$

时隙间隔为

$$I = 3 \times 2^{15-R} \quad (6)$$

则平均启动时间

$$\bar{V} = I = 3 \times 2^{15-R} \times t_s \quad (7)$$

因此,服务响应时延为

$$t_1 = \frac{\rho}{2\mu(1-\rho)} + 3 \times 2^{14-R} \times t_s \quad (8)$$

图 2 显示了服务响应时延与报文到达强度 λ 的关系。为了保证单个节点的吞吐量,避免拥塞造成的报文丢失,必须保证分配给每个节点的时隙够用,即报文服务速率 μ 要大于报文到达强度 λ ,即 $\rho < 1$ 。因此,对于给定的时隙重复率,报文到达强度 λ 都具有上限值。如图 2 所示,当 $R=10$ 时, $\lambda < 1.33$; 当 $R=11$ 时, $\lambda < 2.66$; 当 $R=12$ 时, $\lambda < 5.33$ 。此外,由图可知,当时隙重复率 R 确定时,随着报文到达强度 λ 的增长,服务响应时延缓慢增长,当报文到达强度 λ 达到一定值以后,服务响应时延急剧增长。另外,随着时隙重复率的提高,服务响应时延的增长速度随报文到达强度 λ 的增长而变缓。

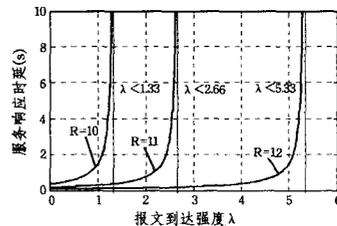


图 2 服务响应时延与报文到达强度的关系

图 3 显示了服务响应时延与报文服务强度 ρ 的关系。如图 3 所示,当时隙重复率 R 确定时,随着报文服务强度 ρ 的增长,服务响应时延缓慢增长,当报文服务强度 ρ 达到一定值以后,服务响应时延急剧增长。另外,随着时隙重复率的提高,服务响应时延的增长速度随报文服务强度的增长而变缓。

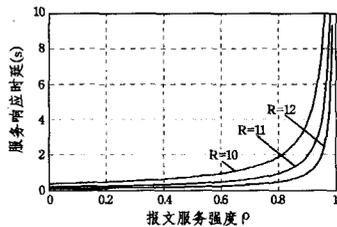


图 3 服务响应时延与报文服务强度的关系

TDMA 数据链中,站点对消息的服务时间为定长,较易建立排队模型;而对于多个互不兼容的数据链构成的多网数据链,消息时延受消息传输方式、站点转发策略、格式转换等多种随机因素影响,难以建立相关的排队或排队网络模型,即使建立起来也难以解析求解。

3 数据链报文中继传输时延分析

当作战单元之间不可视,需要通过中继站点进行中继传

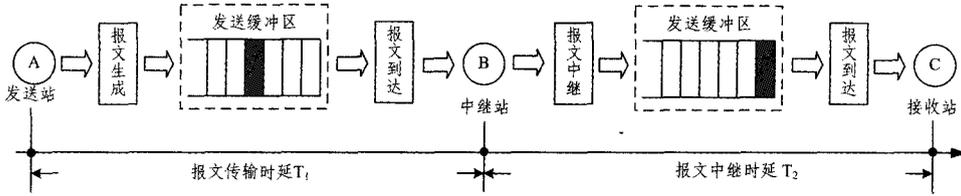


图4 两点之间通过中继站进行报文传输

设信息由发送站至中继站的时延为 T_1 ,由中继站至接收站的时延为 T_2 ,假设数据链采用双时隙泛洪中继策略^[2],则中继时延为固定时间长度,则两点之间通过中继进行信息传输的时延 T 为

$$T = T_1 + T_2 \quad (9)$$

假设中继时延的时隙间隔数在网络初始化中确定,时隙间隔数为 d ,则通过中继进行报文传输的时延 T 为

$$W = \frac{\rho}{2\mu(1-\rho)} + (3 \times 2^{14-R} + d_r) \times t_s \quad (10)$$

利用 OPNET 网络仿真平台对数据链中继报文传输过程进行仿真,可得图5所示的仿真结果。图5体现了报文传输时延与中继跳数之间的关系,随着中继跳数的增加,报文传输时延增大。当在无中继条件下,虽然报文到达概率最低,但是对于所有正确到达接收端的报文进行统计,由于没有中继时延,因此平均报文传输时延最低,在0.28秒趋于平稳。当中继跳数为一跳时,由于报文中继时延的存在,平均报文传输时延增大,最后在0.33秒趋于平稳。当中继跳数为二跳时,平均报文传输时延进一步增大,最后在0.37秒趋于平稳。

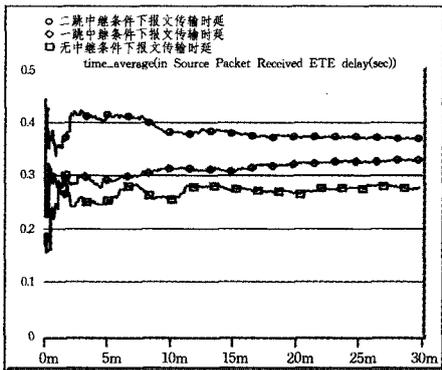


图5 不同中继条件下的传输时延

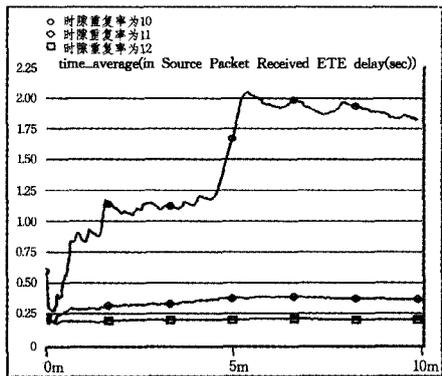


图6 不同时隙重复率下的中继传输时延

图6体现了中继条件下报文传输时延与时隙重复率之间

输时,其信息传输过程如图4所示,该过程由两个独立的信息传输过程构成,报文先由发送站A发送至中继站B,再由中继站B发送至接收站C。

的关系,随着时隙重复率的增加,报文传输时延增大。当时隙重复率为10时,虽然中继时延间隔固定,但是由于服务响应时延较高,因此中继传输时延最高,在1.8秒趋于平稳。当时隙重复率为11时,由于单位时隙内分配的时隙个数增多,时隙间隔减小,报文服务强度增大,服务响应时延降低,报文中继传输时延随之降低,在0.37秒趋于稳定。当时隙重复率为12时,单位时隙内分配的时隙个数进一步增多,时隙间隔减小,报文服务强度进一步增大,服务响应时延进一步降低,报文中继时延也进一步降低,在0.21秒趋于平稳。

图7体现了报文传输时延与中继时延间隔之间的关系,随着中继时延间隔的增大,报文中继传输时延增大。当中继时延间隔为6个时隙时,报文中继传输时延最低,在0.32秒趋于平稳。当中继时延间隔为12个时隙时,报文中继传输时延增大,最后在0.36秒趋于平稳。当中继时延间隔为30个时隙时,报文中继传输时延进一步增大,最后在0.51秒趋于平稳。

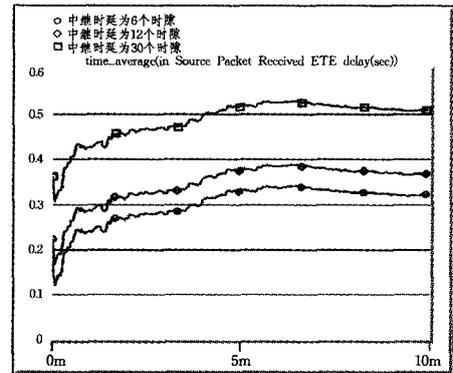


图7 不同中继时延间隔下的中继传输时延

4 数据链报文转发传输时延分析

数据转发操作使得采用不同通信协议和报文标准的数据链能够共享战术信息,形成多链协同的作战形式。在多链作战环境下,不同数据链中执行监视任务的平台间能够相互转发战场态势信息,实现战斗群监视功能,为战斗群中所有单元提供一致的综合战术态势图,从而增强战场态势感知能力,提高指挥控制系统的整体性能。

设报文由发送站至转发站的传输时延为 T_1 ,报文格式转换时延为 t_4 ,由转发站至接收站的转发时延为 T_3 ,其中,转发时延 t_4 相对于传输时延可以忽略不计,则两点之间通过转发站进行信息传输的时延 T 为

$$T = T_1 + T_3 \quad (11)$$

如图8所示,TDMA数据链端机节点发送的报文经过转发站发送至轮询数据链端机节点,此时相当于两个排队系统

组成的排队网络,假设 TDMA 数据链端机节点为 $M_1/G_1/1$ 排队系统,轮询数据链端机节点为 $M_2/G_2/1$ 排队系统,则该报文传输过程可抽象为 $M_1/G_1/1+M_2/G_2/1$ 系统。同理当轮询数据链端机节点发送的报文经过转发站发送至 TDMA 数据链端机节点时,则报文传输过程可抽象为 $M_1/G_1/1+$

$M_2/G_2/1$ 系统。由于 TDMA 数据链和轮询数据链的资源调度方式具有不确定性,因此对于这样的一个排队网络采用解析方法进行求解,工作量大且不易实现,另外不具有普遍适用性,所以,采用仿真的方法进行分析,通过对仿真模型重来减少工作量,使得仿真结果更具普遍性。

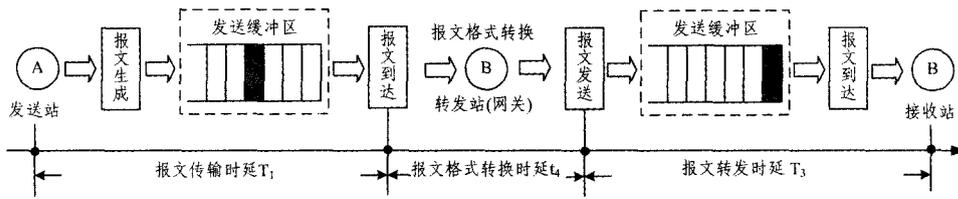


图 8 两点之间通过转发站进行报文传输

图 9 体现了报文转发传输时延与时隙重复率之间的关系,随着时隙重复率的增加,报文转发传输时延也增大。当时隙重复率为 10 时,虽然中继时延间隔固定,但是由于服务响应时延较高,导致中继传输时延最高,在 1.68 秒趋于平稳。当时隙重复率为 11 时,由于单位时帧内分配的时隙个数增多,时隙间隔减小,报文服务强度增大,服务响应时延降低,报文转发传输时延随之降低,在 0.60 秒趋于稳定。当时隙重复率为 12 时,单位时帧内分配的时隙个数进一步增多,时隙间隔减小,报文服务强度进一步增大,服务响应时延进一步降低,报文中继时延也进一步降低,在 0.50 秒趋于平稳。

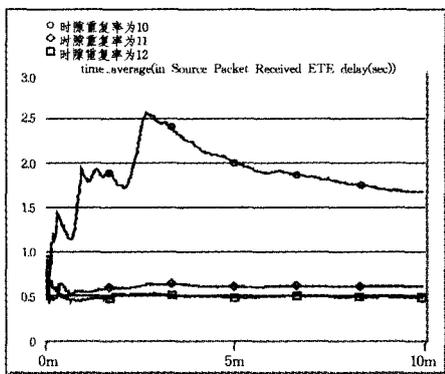


图 9 不同时段重复率下的转发传输时延

结束语 本文采用指数分布模型描述数据链的业务源,利用排队模型分析数据链点对点报文传输时延,采用解析方法分析了服务响应时延在不同报文到达强度和报文服务强度条件下的变化;在此基础上分析了数据链中继报文传输时延以及转发报文传输时延,并利用 OPNET 网络仿真平台对其进行分析与仿真,分析了不同中继条件下,时隙重复率以及中继时延间隔下的报文中继传输时延,以及不同时隙重复率下

的报文转发传输时延。

由以上分析可知,数据链的报文传输时延主要取决于发送站的报文到达强度和报文服务强度。报文到达强度主要取决于实际应用背景,为了减小传输时延,必须提高站点的报文服务强度,即分配给发送站点尽量多的时隙。但一个作战单元时隙分配过多,会使整个数据链网络容纳的作战单元个数减少。数据链包括各种类型的报文,不同类型报文的到达强度不同,对时延的要求也不同。例如对于执行远程拦截任务的战斗机,在 12.8 分的时元内,只需用 1 个时隙来发射其位置和状态信息;而对于传输目标航迹信息的报文,则需要较多的发送时隙,从而有较短的发送周期,能够较快地更新目标的航迹信息。但是针对此类报文的时隙分配也不是越多越好,时隙分配的数量要考虑到雷达的探测周期,若报文发送周期比雷达的一个探测周期小得多,则可能造成两个相邻的航迹信息报文传达了同一个航迹信息,从而造成时隙资源的浪费。

因此,需要综合考虑作战单元所承担的任务、发送报文的类别,以及该报文到达强度、报文对时延的要求等因素,确定分配一个作战单元的时隙个数,在将报文时延控制在可接受范围的前提下,尽量少占用时隙资源,容纳较多作战单元。

参考文献

- [1] Mei Wen-hua, Cai Shan-fa. JTIDS/Link16 Data Link (in Chinese)[M]. Beijing National Defense Industry Press, 2007
- [2] 李献昌,刘凯,张军. S-TDMA 协议点到点通信的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(13): 3079-3079
- [3] 田斌鹏. 战术数据链实时性研究[D]. 成都:西南交通大学, 2007
- [4] 梁俊,田斌,等. 一种支持 QoS 的 DTDMA 协议性能分析与仿真[J]. 空军工程大学学报, 2010, 11(1): 59-63
- [5] 王翔,吕娜,张岳彤. 武器数据链多址接入技术研究[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(5): 77-79

(上接第 104 页)

- [20] 杨娟,李颖,张志军,等. 移动 Ad hoc 网络容量非合作规划博弈模型的稳定性[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(1): 75-81
- [21] 龙飞,汪春霆,杨治安. 一种基于博弈论的无线网状网络路由与信道分配联合优化算法[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(2): 94-101
- [22] 姬文江,马建峰,田有亮,等. 无线 mesh 网中一种基于博弈论的公平性路由协议[J]. 通信学报, 2012, 33(11): 17-23
- [23] 先兴平,刘群,吴涛. 拍卖博弈模型在无线传感器网络路由中的应用研究[J]. 小型微型计算机系统, 2012, 33(5): 1083-1088

- [24] 施锡铨. 博弈论[M]. 上海:上海财经大学出版社, 2000: 1-9
- [25] Osborne M J. An introduction to game theory[M]. England: Oxford University Press Inc., 2004: 122-124
- [26] Su W, Lee S J, Gerla M. Mobility prediction and routing in ad hoc wireless networks[J]. Int. J. Netw. Manage, 2001, 1(11): 3-30
- [27] Perkins C, Belding-Royer E, Das S. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing [OL]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>, 2003