

基于 OPNET 的战术数据链系统时延仿真分析

任培 王文政 周经伦 罗鹏程

(国防科学技术大学信息系统与管理学院 长沙 410073)

摘要 以美军现役战术数据链为背景,分析了战术数据链系统的消息传输过程,归纳出4种消息传输方式;应用 OPNET 建立了战术数据链系统的网络模型、节点模型、进程模型,在此基础上实现了数据链系统仿真平台,仿真分析了系统内节点数量不同时,4种消息传输方式的消息时延和站点响应时间指标。仿真结果表明,上述指标受系统内站点数量及消息传输方式影响很大。作战过程中应依据作战需求合理确定站点数量,选择合适的消息传输方式,保证消息具有较好的时效性。最后指出了研究的意义。

关键词 战术数据链,时延,仿真

Time Delay Simulation and Analysis of Tactical Datalink System Using OPNET

REN Pei WANG Wen-zheng ZHOU Jing-lun LUO Peng-cheng

(College of Information Systems and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Backgrounded on the datalink system currently used by the U. S. Airforce, this paper analyzed the message transmit process within datalink system and formulated four types of message transmit ways. We established the network model, node model, process model of datalink system using OPNET and built a simulation platform based on the models. The time delay and node response time of the four types of message transmit ways with varying number of nodes were analyzed. Simulation results show that the above index is greatly influenced by the way of message transmit. So, an appropriate way of message transmit should be chosen according to the number of nodes in combat. The significance of this study was presented in the final part.

Keywords Tactical datalink, Timedelay, Simulation

战术数据链系统是指装备在作战单元上的数据通信与处理系统,它不仅具有通信设备的功能,能够按照约定的通信协议,通过有线或者无线信道实时、可靠、安全、保密的收发格式化消息,构成一个数据通信网络;还可以对接收的各种信息(本单元传感器信息、从其它作战单元接收的信息)进行融合处理,在一定程度上实现相对导航、敌我识别、武器引导、态势共享等功能^[1,2]。战术数据链的基本功能是在作战单元之间交互各种信息,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、战场环境信息等,时效性对这些信息的战术价值具有重要影响。在一些紧急情况下,作战单元还需立即发送某些特殊信息,例如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。时延过大,再准确的信息也会变得毫无价值。因此,分析战术数据链系统时延指标具有重要的军事价值。

OPNET 是一款优秀的通信协议建模和仿真工具,其建模分为网络层、节点层、进程层 3 个层次。每个层次都提供了图形化的编辑器,分别为网络编辑器、节点编辑器和进程编辑器。OPNET 网络模型规定通信网络的物理拓扑,定义节点的位置和链路的互连情况。每一个节点有一个结构化的数据

流方框图,或称 OPNET 节点模型描述,它描述了进程、协议和子系统之间的相互关系。节点模型由多个可编程模块构成,每一个模块包含多个进程模型,进程模型通过状态和状态转移描述模块的逻辑行为^[3]。

本文应用 OPNET 建立了战术数据链系统的网络模型、节点模型、进程模型,实现了数据链系统仿真平台;仿真分析了系统内站点数量不同时,4种消息传输方式的消息时延和站点响应时间指标。结果表明,上述指标受系统内站点数量及消息传输方式的影响很大,作战过程中应依据作战需求合理确定站点数量,选择合适的消息传输方式,保证消息具有较好的时效性。最后指出了本文的研究意义。

1 战术数据链系统网络模型

现有战术数据链系统大多是各军兵种根据自己的军事需求独立研制建设,数据链通信协议、消息标准不同,不能够直接互联互通,无法满足多军兵种联合作战的基本需求。在一个战场区域内,不同军兵种的战术数据链系统之间必须通过中间站进行链间消息转发,做到多战术数据链系统互联互通^[4,5]。为了便于协调消息的转发,各数据链系统通过中间

到稿日期:2008-07-10 返修日期:2008-09-16 本文受“十一五”装备预先研究项目(513040205)资助。

任培 博士研究生,主要研究方向为数据链建模与仿真、作战及应用及效能评估方法,E-mail:renbeibe626@hotmail.com;王文政 博士研究生,主要研究方向为数据链建模、仿真与优化;周经伦 教授,博士生导师,主要研究方向为装备系统工程。

站点构成主网-子网结构。主网由分属不同数据链系统的中间站点构成,一般采用轮询协议,子网则采用本数据链系统原有协议。本处假设子网、主网均采用轮询协议。由此,应用 OPNET 网络编辑工具建立数据链系统网络层模型,如图 1 所示。系统包括主网主控站、子网主控站和子网从属站 3 类节点,每个轮询子网(A, B, C, D)有一个主控站和多个从属站;各子网主控站(E_1, E_3, E_4)作为主网从属站,与主网主控站 E_2 构成主轮询网 E。一个子网就是一个军兵种的数据链系统,子网内所有的站点都配备有相同的战术数据链终端设备,能够在相同的频率、通信协议的控制下进行通信。不同子网、子网与主网间的通信参数不同,需通过中间站(E_1, E_2, E_3, E_4)进行消息转发。

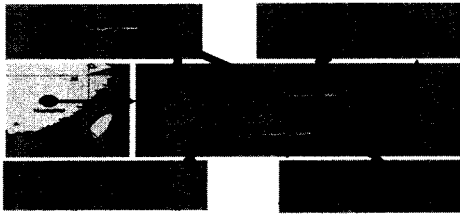


图 1 战术数据链系统网络层模型

分析多网数据链系统的消息传输过程,是时延分析的基础。依据具体的战场态势,消息可采用 4 种传输方式中的一种传输到目的站。下面以图 1 中子网 A 的从属站 A_1 生成的消息传输到系统中其它站点为例,说明其消息传输过程。

(1) 消息传输方式 1

子网 A 的从属站 A_1 在主控站 E_1 的控制下广播发送其消息,子网 A 中其它站点均能收到该消息。

(2) 消息传输方式 2

E_1 收到 A_1 的消息后进行格式转换操作,使其适应子网 B 的通信协议要求,在子网 B 中广播该消息。子网 B 中其它站点均能收到该消息。此处,子网 A 与子网 B 共用一个主控站 E_1 。

(3) 消息传输方式 3

E_1 收到 A_1 的消息后进行格式转换操作,使其适应主网 E 的通信协议要求,在 E_2 的控制下广播该消息。由于 E_3 在 E_1 的通信范围内, E_3 收到 E_1 的消息后进行格式转换操作,使其适应子网 C 的通信协议的要求,在子网 C 中广播该消息。子网 C 中其它站点均能接收到该消息。

(4) 消息传输方式 4

E_1 收到 A_1 的消息后进行格式转换操作,使其适应主网 E 的通信协议要求。由于 E_1 与子网 D 主控站 E_4 距离过远,需通过主网主控站 E_2 进行数据中继转发。在 E_2 的控制下, E_1 将消息转发给 E_2 , E_2 将消息转发给 E_4 。 E_4 对消息进行格式转换,使之适应子网 D 的通信协议的要求,在子网 D 中广播该消息。子网 D 中其它站点均能收到该消息。

经过上述 4 种消息传输方式,网络内所有的站点都能够收到 A_1 发送的消息。这 4 种消息传输方式对应着不同的作战背景。当单个兵种独立执行作战任务时,所有作战单元装备相同的数据链终端设备,能够直接互联互通,其消息传输方式为 1。当多兵种协同执行作战任务时,若各兵种的数据链互不兼容,则需通过中间站转发消息传输。若该中间站能够同时作为各兵种的主控站,则消息只需经过一次转发就可以到达目的站,其消息传输方式为 2。当各兵种有各自的主控

站,则需要更高级的主控站进行转发,此时消息需多次转发才能到达目的站,其消息传输方式为 3 和 4。

2 战术数据链系统节点模型

战术数据链系统网络模型中,主网主控站控制主网运行;子网主控站控制子网运行,同时作为主网从属站,在其控制下收发消息,子网从属站在子网主控站的管理下收发消息。数据转发功能均由主控站实现。以子网主控站为例,应用 OPNET 节点编辑器建立如图 2 所示的节点模型。该节点模型由信源模块、消息处理模块、3 对消息收发模块、3 个队列模块、信宿模块构成,不同模块通过数据流进行联系,完成不同的功能。

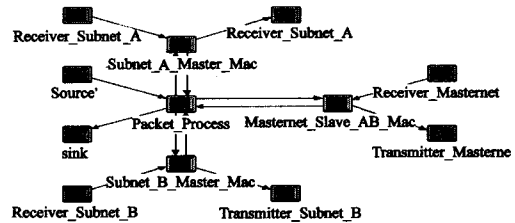


图 2 子网 A 主控站节点模型

1) 信源模块(Source): 模拟作战单元生成消息。

2) 消息处理模块(Packet_Process): 对本站生成或接收到的消息进行处理,主要功能有:①消息格式转换。按照需要对消息格式进行转换。②消息转发。将从一个子网收到的消息进行格式转换,转发到另外两个网络中。例如,收到子网 A 的消息后,进行格式转换,转发到子网 B 和主网的 Mac 层。③消息发送。本站生成消息后,进行格式转换,分别发送到子网 A、子网 B 和主网的 Mac 层进行处理。④消息接收。将从不同网络接收到的消息进行格式转换后,发送到信宿模块。

3) 子网 A 的 Mac 模块(Subnet_A_Mac): 控制节点在子网 A 内收发消息,主要功能有:①将从子网 A 接收的消息发送到消息处理器。②将消息处理器发送过来的消息存入队列,按照协议要求发送消息。③定时发送轮询控制消息,控制从属站收发数据。

子网 B 和主网 Mac 模块的功能与子网 A 的 Mac 模块类似。

4) 天线模块(Receiver/Transmitter): 用于收发消息,3 对天线分别连接到 3 个网络。

5) 信宿模块(Sink): 用于接收消息处理模块传递过来的消息,进行统计量分析,随后销毁消息,释放内存。

3 战术数据链系统进程模型

应用 OPNET 的进程编辑器,实现构成节点的每一个模块的功能。以消息处理模块为例,其进程模型如图 3 所示。

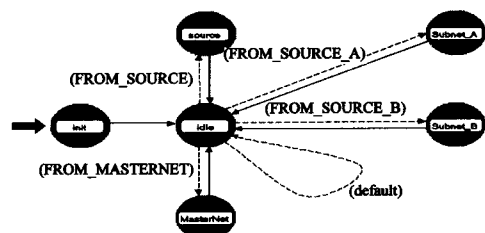


图 3 消息处理模块的进程模型

进程模型中各个状态的名称及其主要功能如表 1 所列。

表 1 子网主控节点消息处理模块状态名称及功能

状态名称	功能
init	进行初始化操作
Idle	捕获流中断,根据流的类型转移到下一个状态
source	流中断是由本节点产生消息引起,将消息处理后,发送到子网 A、子网 B、主网队列,返回 Idle 态
Subnet_A	流中断是由于接收到子网 A 的消息引起,将消息处理后,发送到子网 B、主网队列,返回 Idle 态
Subnet_B	流中断是由于接收到子网 B 的消息引起,将消息处理后,发送到子网 A、主网队列,返回 Idle 态
MasterNet	流中断是由于接收到主网的消息引起,将消息处理后,发送到子网 A、子网 B 队列,返回 Idle 态

4 时延仿真分析

仿真过程中,参考文献[6-8]关于战术数据链系统相关参数的说明,部分仿真参数设置如表 2 所列。

表 2 仿真参数设置(子网 A)

参数名称	参数说明
消息	长度:320bit;格式:FormatA
发送速率	10240bps
站点服务策略	主、从站均采用穷尽式服务
系统轮询策略	主站轮询一个站点后,先发送本站数据,发送完后后轮询下一个站点
站点消息生成	主控站、从属站消息生成分别服从参数为 0.5、2.5 的指数分布
消息有效期	从属站生成的消息等待发送时间超过 10 秒则删除

4.1 站点消息时延

站点消息时延是指从站点生成消息到其它站点收到该消息的时间间隔。图 4 给出了站点数量一定(各个子网有 32 个从属站)时,子网 A 从属站 A₁ 将其消息以 4 种消息传输方式传输到其它子网从属站的时间延迟。由图可见:

1)消息以方式 1 传输到子网 A 从属站的时延最小。

由于消息传输方式 1 中消息不需要经过转发、格式转换等操作,使得其时延最小。

2)消息以方式 2 传输到子网 B 从属站的时延要远远小于以方式 3 传输到子网 C 从属站和以方式 4 传输到子网 D 从属站的时延。

原因有两点:首先在消息传输方式 2 中,转发站 E₁ 同时是子网 A 与子网 B 主控站,E₁ 收到需要转发的消息后,可直接将此消息送往本站点内部与 B 网连接的 Mac 层进行处理,不需要经过主网转发;其次,E₁ 作为 B 网主控站,拥有较多的数据发送机会。

3)消息以方式 3 传输到子网 C 从属站的时延小于以方式 4 传输到子网 D 从属站的时延。

虽然消息传输方式 3 和 4 均需通过主网转发,但由于消息传输方式 3 中,子网 C 主控站 E₃ 在 E₁ 的无线通信范围内,可直接接收站点 E₁ 发送的转发消息,不需主网 E 主控站 E₂ 转发此消息;而消息传输方式 4 中,站点 E₃ 在 E₁ 的无线通信范围外,必须通过站点 E₂ 接收转发消息,与消息传输方式 3 相比多了一次消息转发,导致消息传输方式 4 的时延较大。

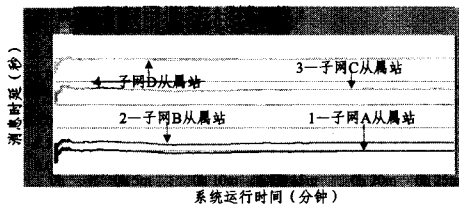


图 4 不同消息传输方式的消息时延

图 5 给出了站点数量对消息时延的影响。由图可见,随着站点数量的增加,不同消息传输方式的平均时延均逐渐增大。由于子网 A 采用了超时删除策略,当子网 A 从属站数量增加到 50 个左右时,站点 A₁ 生成的消息因超时而被丢弃,使得 A₁ 消息转发到其它子网时均有一个最大值。此后随着站点数量的增加,消息转发到各个子网的平均时延在某一中心值附近波动。

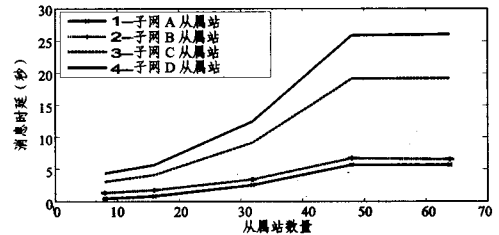


图 5 消息时延与站点数量的关系图

4.2 转发站点响应时间

转发站点响应时间是指转发站点收到需要转发的消息到将此消息转发出去的时间间隔。站点数量一定(各个子网有 32 个从属站)时,不同站点对转发消息的响应时间如图 6 所示。由图可见:

1)E₁ 作为主网 E 的从属站,将消息转发到主网 E 时的响应时间最大。而 E₁, E₂, E₃, E₄ 作为本子网主控站将消息转发到本子网从属站时,其响应时间较小。

2)E₁ 将消息转发到子网 B 的响应时间小于转发到主网 E 的响应时间,这与 E₁ 在转发消息时所担当的角色有关。转发到子网 B 时,E₁ 作为 B 网主控站,数据发送机会较多;而转发至主网 E 时,E₁ 作为主网 E 的从属站,消息收发受 E₂ 的控制,使得其响应时间较大。

3)E₁, E₂, E₃, E₄ 作为主控站转发消息时,其终端数据发送速率相同,转发消息响应时间却有一定区别。原因有 3 点:首先,仿真中 E₂ 的消息生成平均速率是 E₁, E₃, E₄ 的 5 倍,导致其响应时间最大;其次,虽然 E₁, E₃, E₄ 的消息生成模型及其参数相同,但 E₃, E₄ 对转发消息采取了优先处理的策略,而 E₁ 没有,使得其响应时间大于站点 E₃, E₄;最后, E₃, E₄ 的配置完全相同,其响应时间与曲线基本重合。

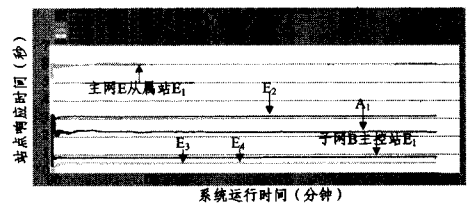


图 6 转发站点响应时间

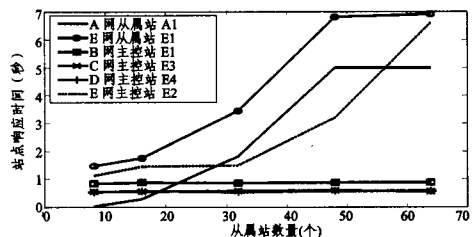


图 7 转发站点响应时间与站点数量的关系图

```

} // else
(委托情况二)
Attack(x,i);
Search(i,x,req);
Execute(x,req);
n = Coequal(req,r,bro); //与设备 req,r 同级的安全设备共 n 个
for(i=0; i<n; i++){
    Delegate(x,bro[i].agent,Pr); //Pr.act=req.a,Pr.res=bro[i]
    Produce(adm); //生成 DAP 并加密
    if((Credible(adm))&&(Valid(bro[i]))) {
        Produce(acc); //由 DAP 生成 SRP
        Add(bro[i].agent,acc);
        Execute(bro[i].agent,acc);
    }
}

```

结束语 本文基于 XACML Admin 规范语言描述了 SRP 和 DAP,将多级委托机制引入分布式安全联动系统中:在两种可能出现委托的情况下,通过委托联动有效地解决了单点服务失效的问题,同时初步实现了针对复杂攻击的协同响应;寻找更高级联动代理的多级委托机制大大提高了完成联动响应的成功机率,增强了联动系统的健壮性;非对称加密技术大大简化了委托是否可信的判断过程,不需要通过回溯寻找可信的消息发布者^[13]。文中用形式化的方法描述了委托链的组成和委托过程,并以伪代码的形式给出了委托联动算法。

委托机制涵盖的内容较多,例如,委托深度、主体的可信度、权限的有效时间等等。为了突出多级委托机制应用于分布式联动系统的原理,本文没有涉及或者简化上述问题,在今后的工作中,需要进一步从深度和广度上展开更加细致的研究。

参 考 文 献

[1] Rissanen E, Lockhart H, Moses T. XACML 3.0 administrative policy [OL]. http://www.oasis-open.org/committees/tc_home.php?wg_abbrev=xacml, 2005

- [2] Moses T. Extensible Access Control Markup Language (XACML) Version 2.0 [S]. OASIS Standard, 2005
- [3] 张宏,贺也平,石志国. 基于周期时间限制的自主访问控制委托模型[J]. 计算机学报, 2006, 29(8): 1427-1437
- [4] Barka E, Sandhu R. A role-based delegation model and some extensions[A] // Proceedings of 23rd National Information Systems Security Conference[C]. Baltimore, USA, 2000: 168-177
- [5] 徐震,李澜,冯登国. 基于角色的受限委托模型[J]. 软件学报, 2005, 16(5): 970-978
- [6] Ye C X, Wu Z F, Ff Y Q. An attribute-based delegation model and its extension[J]. Journal of Research and Practice in Information Technology, 2006, 38(1): 3-16
- [7] Barka E, Sandhu R. Framework for role-based delegation models [C] // Proc. of the 16th Annual Computer Security Application Conf. IEEE Computer Society Press, 2000: 168-176
- [8] Zhang X W, Oh S, Sandhu RS. PBDM: A flexible delegation model in RBAC[C] // Ferrari E, Ferraiolo D, eds. Proc. of the 8th ACM Symp. on Access Control Models and Technologies. New York: ACM Press, 2003: 149-157
- [9] Faulkner S, Dehousse S, Kolp M, et al. Delegation Mechanisms for Agent Architectural Design[C] // Proc. of the IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology (IAT'05). Washington, DC, USA, IEEE Computer Society, 2005: 503-507
- [10] Seitz L, Rissanen E, Sandholm T, et al. Policy administration control and delegation using XACML and delegent [C] // The 6th IEEE/ACM International Workshop on Grid Computing. Washington, 2005
- [11] 叶春晓,吴中福,符云清,等. 基于属性的扩展委托模型[J]. 计算机研究与发展, 2006, 43(6): 1050-1057
- [12] Bandmann O, Dam M, Firozabadi BS. Constrained delegation[C] // Proc. of the 23rd Annual IEEE Symp. on Security and Privacy. Oakland: IEEE Computer Society Press, 2002: 131-143
- [13] 李晓峰,冯登国,何永忠. XACML Admin 中的策略预处理研究[J]. 计算机研究与发展, 2007, 44(5): 729-736

(上接第 40 页)

站点数量对站点响应时间的影响如图 7 所示。由图可见:子网 A 从属站、A 网主站 E_1 、主网主控站的响应时间受站点数量的影响较大,且随着站点数量的增加而变大。原因是上述 3 个站点转发消息时,均是从属站,其消息的发送受主控站点的控制。随着站点数量的增加,被轮询到的周期也逐渐变大,使得响应时间变大。而主控站由于可以自主控制数据的发送,其响应时间较小且基本不受站点数量的影响。

结束语 战术数据链系统时延指标受系统资源分配、服务规则、网络容量、消息传输方式以及所传输消息的特点等多种因素影响,可以说时延指标在一定程度上反映了战术数据链系统的整体性能。作战单元通过战术数据链系统传输消息时,过大的时延会影响基于这些消息的特定应用。以现代空战为例,飞机飞行速度达到音速或亚音速时,如作战单元之间传输定位信息的延迟为 1s,则由此引起的定位误差可能达到数百米。因此,作战过程中应依据作战需求合理确定站点数

量,选择合适的消息传输方式,使消息具有较好的时效性。

参 考 文 献

- [1] 任培,周经伦,罗鹏程,等. 美军数据链发展概况与启示[J]. 装备指挥技术学院学报, 2008, 19(1): 43-47
- [2] 王文政,周经伦,罗鹏程,等. 战术数据链仿真综述[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(14)
- [3] 陈敏. OPNET 网络仿真[M]. 北京:清华大学出版社, 2004
- [4] 孙义明,杨丽萍. 信息化战争中的战术数据链[M]. 北京:北京邮电大学出版社, 2005
- [5] 崔昊,匡镜明,何遵文. Link16 与 VHF 数据链互连建模与仿真研究[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(5): 1119-1122
- [6] 梅文华,蔡善法. JTIDS/Link16 数据链[M]. 北京:国防工业出版社, 2007
- [7] 任培,周经伦,罗鹏程,等. 基于排队论的数据链系统信息传输时间延迟分析[J]. 计算机科学, 2008, 35(8): 93-94
- [8] 田斌鹏. 战术数据链实时性研究[D]. 成都:西南交通大学, 2007