

数据链系统消息传输时间延迟及其影响因素仿真分析

周忠宝¹ 任培² 马超群¹ 周经伦²

(湖南大学工商管理学院 长沙 410082)¹

(国防科学技术大学信息系统与管理学院 长沙 410073)²

摘要 数据链系统消息的时效性对其战术价值具有重要影响。设计了数据链系统仿真平台,基于该平台建立了多网数据链网络拓扑、通信协议、通信链路、消息生成等模型;分析了消息格式转换过程以及不同作战背景下的消息传输方式;仿真比较了不同传输方式下的消息时间延迟、站点响应时间、消息时间延迟抖动等指标。结果表明,上述指标受站点数量、消息传输方式、站点服务策略等因素的影响很大。

关键词 数据链系统,时间延迟,仿真,OPNET

中图分类号 TP393.01 **文献标识码** A

Simulation Analysis of Message Transmit Delay and Influencing Factors in Datalink Systems

ZHOU Zhong-bao¹ REN Pei² MA Chao-qun¹ ZHOU Jing-lun²

(School of Business Administration, Hunan University, Changsha 410082, China)¹

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

Abstract Transmit delay of message has great influence on its tactical value in datalink system. This paper analyzed the message transmit process in datalink system. A datalink system simulation platform was established and multi-net datalink topology, communication protocol, communication route and message generating were built. The transformation process of message format and ways of transmitting were analyzed in details. The message delay, response time and delay variation under different transmitting ways were compared using above models. Simulation results show that the indexes are significantly influenced by such factors as number of nodes, message transmitting way and service strategy of nodes.

Keywords Datalink system, Time delay, Simulation, OPNET

数据链系统是装备在作战单元上的数据通信与处理系统,不仅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、保密地收发格式化消息,构成一个数据通信网络;还可对收到的消息进行融合处理,实现相对导航、敌我识别、武器引导、态势共享等功能^[1,2]。数据链的基本功能是在作战单元之间传输各种消息,包括作战单元状态消息、指挥控制消息、航迹消息、战场环境消息等。时效性对这些消息的战术价值具有重要影响;时间延迟过大,再准确的消息也会变得毫无价值。

现有数据链多由各军兵种依据其军事需求独立研制,由于通信协议、消息标准不同,它们之间需通过转发站进行链间消息转发来实现互联互通,以满足多军兵种联合作战的需求^[3,4]。消息通过转发站传输时,其时间延迟受格式转换、站点转发策略、消息传输方式等多种因素影响,目前研究多是对同一数据链内部的消息传输时间延迟进行仿真分析^[5-7]。文献^[8,9]虽然考虑了消息的链间转发,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。因此,仿真分

析消息在多链间传输的时间延迟指标及其影响因素,确定消息时效性是否满足作战需求,具有重要的军事意义。

本文第1节分析了数据链消息传输过程;第2节设计了数据链仿真系统;第3节建立了多网数据链系统仿真模型;第4节对多网数据链时间延迟仿真结果进行了分析;最后总结全文。

1 数据链消息传输过程

数据链时间延迟是指从发送站生成消息到接收站收到该消息的时间长度。分析数据链消息传输过程是时间延迟分析的基础。作战单元通过数据链传输消息的过程如图1所示。

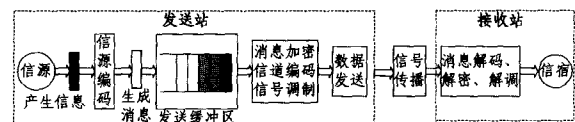


图1 数据链消息传输过程

作战单元生成信息后,通过信源编码将需要传输的图像、

到稿日期:2009-10-29 返修日期:2010-01-10 本文受国家自然科学基金(70901024),国家杰出青年科学基金(70825006),“十一五”国防预研项目(513040205)资助。

周忠宝(1977—),男,博士,副教授,主要研究方向为系统优化与综合集成,E-mail:Z. B. Zhou@163.com;任培(1978—),男,博士,主要研究方向为战术数据链系统性能评估;马超群(1963—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为管理系统工程;周经伦(1955—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为系统工程理论与方法。

视频、音频、文字等信息转换为格式化消息,送入发送缓冲区,按照排队规则排队等待发送。当消息位于缓冲区的第一位后,对消息进行编码、调制等处理,通过天线发送出去。电磁信号在空间进行传播,接收站通过天线接收无线信号。信号经过解密、解码、解调等处理后还原成消息,送到信宿。

2 数据链仿真平台设计

数据链时间延迟仿真分析需应用通信仿真软件构建一个完整的仿真系统,建立数据链网络拓扑、通信协议、通信链路、消息生成等模型,配置相关参数,准确描述数据链的消息传输过程。现有仿真软件中,OPNET 和 NS2 侧重于网络拓扑和通信协议的建模,通信链路描述能力较弱;而 Simulink 和 Systemview 通信链路建模能力较强。本文开发了一个总控程序,将上述仿真工具结合起来,设计了数据链时间延迟仿真分析平台(TDL_DSAP—Tactical DataLink Delay Simulation Analysis Platform)的原型系统(如图 2 所示),实现了部分功能。

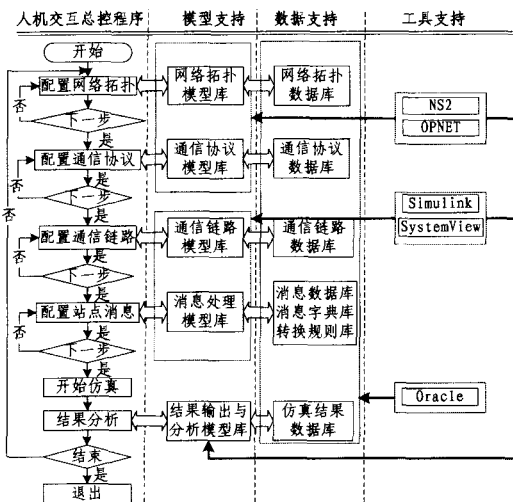


图 2 TDL_DSAP 原型系统结构

2.1 系统构成

TDL_DSAP 由人机交互总控程序、模型支持、数据支持、工具支持 4 个模块构成。

(1) 人机交互总控程序是整个系统的核心,它将系统的各个模块整合为一个有机整体,以完成仿真。通过调用工具支持模块中的工具维护模型库中的模型和数据库中的数据;通过调用不同模型库中的模型,构建一个完整的仿真系统,并控制仿真程序的运行;通过调用结果输出与分析模型库中的模型输出仿真结果,并对结果进行分析。

(2) 模型支持模块对整个仿真过程中需要的模型提供支持,包括网络拓扑模型库、通信协议模型库、通信链路模型库、消息处理模型库等。

(3) 数据支持模块对整个仿真过程中的数据存取提供支持。总控程序运行过程中调用不同模型库中的模型建模、控制仿真流程、输出分析结果等操作均需数据库的支持;模型库中模型在运行前的参数配置、运行后的输出结果也需存储在数据库中。数据库包括网络拓扑数据库、通信协议数据库、通信链路数据库、消息处理数据库、仿真结果数据库等。

(4) 工具支持模块用于对模型库和数据库进行有效的管理和维护,以便总控程序调用。其主要功能有:对各种模型同

数据库的接口进行定义和编辑;依据实际问题需要增加、删除、修改模型;对仿真结果呈现方法进行维护,以多种方式尤其是图形化的方式输出分析结果。

2.2 系统运行方式

在需求分析的基础上,总控程序调用网络拓扑模型库中的模型配制网络拓扑,确定数据链拓扑结构、站点角色、站点之间的连通关系等;调用通信协议数据库中的模型配置通信协议,确定通信频率、系统资源分配、系统服务方式等参数;调用通信链路模型库中的模型配置通信链路,确定通信信道、消息编码方案、加密方式、调制方式等;调用消息处理模型库中的模型配制站点消息,确定消息长度、格式、转换规则以及消息生成模型等;仿真示例构建完成后,总控程序控制仿真系统运行,并调用结果输出与分析模型库中的模型输出仿真结果,对结果进行分析。

3 多网数据链仿真系统建模

3.1 网络拓扑模型

美军早期数据链多采用轮询协议,这些互不兼容的数据链需通过中间站互联互通。为了便于协调消息的链间转发,各中间站构成一个轮询网。因此,以互不兼容的数据链为多个子网,中间站为主网,构成一个多网数据链。

本文建立的多网数据链系统假设子网、主网均采用轮询协议。系统中包括主网主控站、子网主控站和子网从属站 3 类站点,每个轮询子网(A,B,C,D)由一个主控站和多个从属站构成;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,子网内所有的站点都配有相同的数据链终端设备,可直接互联互通。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)转发消息。依据上述分析,总控程序调用网络拓扑数据库中的模型构建多网数据链网络拓扑模型,如图 3 所示。

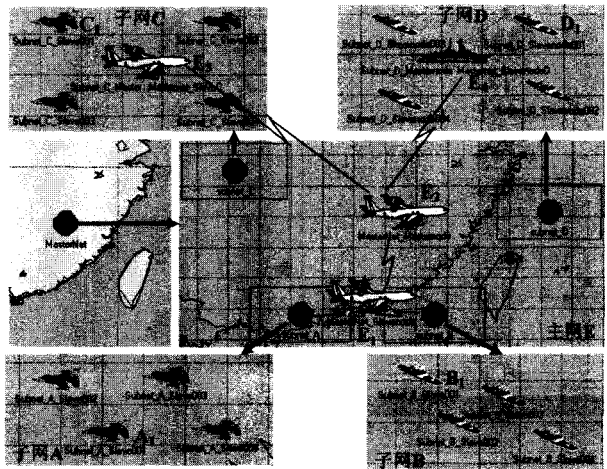


图 3 多网数据链网络拓扑模型

3.2 通信协议模型

确定网络拓扑后,需配置整个系统采用的通信协议,确保每一个站点在通信协议控制下收发消息,使系统正常工作。战场中的每一个作战单元,其通信协议模型的建立需考虑其在不同消息传输方式中担当的角色。在多网数据链中,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其它站点。下面以图 1 中子网 A 的从属站点 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)当单个兵种独立执行作战任务时,所有作战单元的数据链终端设备相同,可直接互联互通。该作战背景对应消息传输方式 1,即 A_1 在 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)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。若该中间站可同时作为各兵种的主控站,则消息经一次转发就可到达目的站。该作战背景对应消息传输方式 2,即 E_1 收到 A_1 的消息后进行格式转换,使其符合子网 B 的格式标准,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。

(3)消息传输方式 3: E_1 收到 A_1 的消息后进行格式转换,使其符合主网 E 的格式标准,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,使之符合子网 C 的格式标准,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,使其符合主网 E 的格式标准。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 中继转发消息。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,使之符合子网 D 的格式标准,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。

消息传输方式为 3 和 4 对应的作战背景为:当各兵种有各自的主控站,则需更高级别的主控站协调消息转发。此时消息需多次转发才能到达目的站。

建立站点通信协议模型,需考虑其在不同消息传输方式中所需完成的消息转发任务。以站点 E_1 为例,它既是主网 E 的从属站,也是子网 A、B 的主控站,其通信协议模型建立过程如图 4 所示。

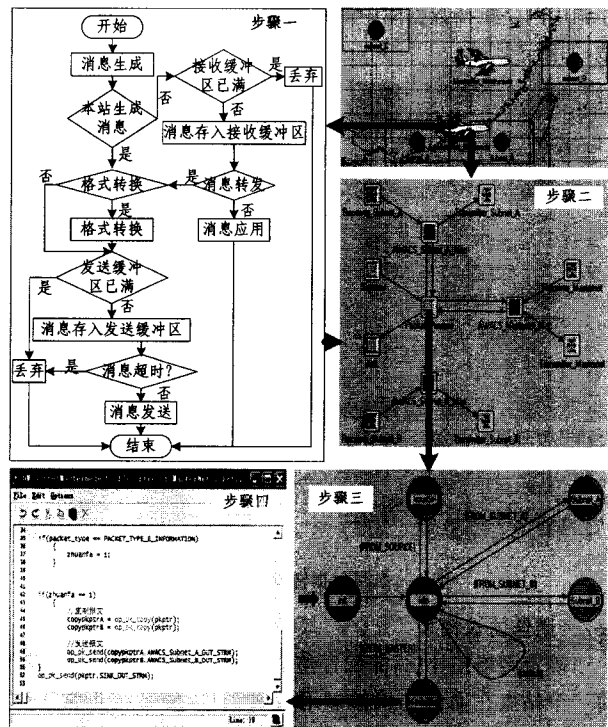


图 4 通信协议模型建立过程

步骤一 依据站点 E_1 在不同消息传输方式中所担当的角色,分析其消息处理过程。站点 E_1 的消息处理流程如图 4

步骤一所示,此处不再详述。

步骤二 依据站点 E_1 的消息处理流程,确定其节点模型。 E_1 的节点模型由信源 (Source)、消息处理 (Packet_Process)、3 对消息收发、3 个队列、信宿 (Sink) 等模块构成。上述模块互相协作,实现 E_1 的消息处理流程。

步骤三 对于构成节点模型中的每一个模块,依据其功能确定构成该模块的各个状态。以消息处理模块为例,其主要功能有: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转发到其它网络中。③消息发送,将本站生成的消息分别发送到子网 A、子网 B 和主网 E 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,随后发送到信宿模块。构成该模块的各个状态的名称及其主要功能如表 1 所列。

表 1 子网 A 主控站 E_1 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

步骤四 用 C 代码实现每一个状态的功能。

经过上述步骤,子网 A 主控站 E_1 通信协议模型建立完成。其余站点模型建立过程本文不再赘述。

3.3 通信链路模型

通信链路模型用于描述消息在物理层的传输过程,包括消息编码与解码、信号调制与解调以及传输信道等仿真模型。本文假设信道理想,不再详细阐述。

3.4 消息处理模型

消息处理模型用于描述消息生成及消息格式转换。

(1)消息生成模型

数据链消息生成建模对时间延迟指标有重要影响,基于不同消息生成模型的系统性能分析结果可能会相差较大。本文设所有站点的消息生成均服从指数分布。

(2)消息格式转换模型

当源站和目的站的消息格式存在差异时,需其中一方对格式进行转换,以便对方能识别该消息。格式转换会造成信息丢失以及附加时间延迟等影响,需在仿真过程中加以考虑。格式转换过程如图 5 所示。

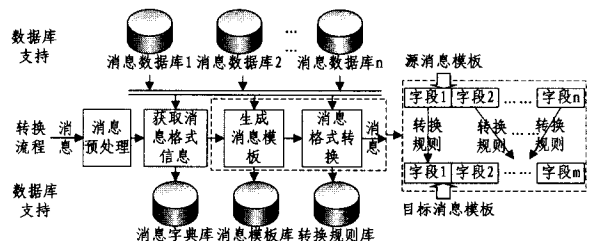


图 5 消息格式转换过程

步骤一 消息预处理。消息处理器收到消息后,读取消息中每一个字段的内容,获取消息类型、消息源地址、消息目的地址等消息说明信息。

步骤二 获得消息格式信息。依据消息预处理获得的消息说明信息,在消息字典库中查找源消息格式和目的消息格式的详细格式;在消息数据库库中查找构成消息的每一个字段的具体含义等信息。

步骤三 生成消息模板。依据源消息和目标消息的格式信息,调用消息模板数据库,生成一个空的消息模板。

步骤四 消息格式转换。对源消息的每一个字段进行分析,调用消息规则库的转换规则,转换成目的站消息格式相应字段,生成新的消息。该消息满足目的站消息格式。

消息格式转换过程中需多个数据库的支持,其中消息数据库用于存放同一格式的所有消息,包括消息类别、每一个字段的具体含义等信息;消息字典库用于详细说明各个消息数据库中的消息格式、不同格式消息之间的转换规则等,以便在格式转换时调用;转换规则库用于定义不同格式消息模板中字段之间的转换规则;消息模板库用于存放所有消息类型的模板。

4 多网数据链时间延迟仿真结果分析

本文仿真参数如表 2 所列(只给出了主网 E 的参数)。

表 2 仿真参数设置(主网 E)

网络配置	
主控站	E ₂
从属站	E ₁ 、E ₃ 、E ₄
地理位置	中心点:东经 117°、北纬 26.7°;跨度:经度为 49.76°、纬度为 26.52°
站点配置	
参数项	参数说明
消息格式及长度	格式:Format_E,长度:320bit
数据发送速率	10240bps
天线频率设置	带宽:1000KHz,最小频率:800MHz
主控站、从属站消息生成	主控站:服从参数为 0.05 的指数分布,平均每秒生成 20 个消息;从属站:服从参数为 0.5 的指数分布,平均每秒生成 2 个消息
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,发送完毕后轮询下一个站点;从属站被轮询后,发送完消息将控制权交回主控站
消息转发策略	转发消息比本站生成消息不具有更高的有优先级
消息有效期	本站生成的消息等待发送时间超过 10 秒则删除,对于转发消息,即使等待发送时间大于 10 秒,仍然转发

4.1 不同消息传输方式时间延迟

图 6 给出了站点数量一定时(各个子网有 32 个从属站),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 6 可见:

(1)由于消息传输方式 1 中消息不需转发、格式不需转换等,其时间延迟最小。

(2)消息以方式 2 传输到子网 B 从属站的时间延迟要远远小于以方式 3 传输到子网 C 从属站和以方式 4 传输到子网 D 从属站的时间延迟。原因在于:①方式 2 中只需一次格式转换;而方式 3 和方式 4 则需两次格式转换;②在方式 2 中, E₁ 收到消息后,可直接将消息送往本站内部与 B 网连接的 Mac 层进行处理;③ E₁ 作为 B 网主控站,拥有较多的信息发送机会。

(3)消息以方式 3 传输到子网 C 从属站的时间延迟小于以方式 4 传输到子网 D 从属站的时间延迟。虽然消息传输方式 3 和方式 4 均需通过主网转发,但在消息传输方式 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;而在消息传输方式 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,导致其时间延迟小于方式 4。

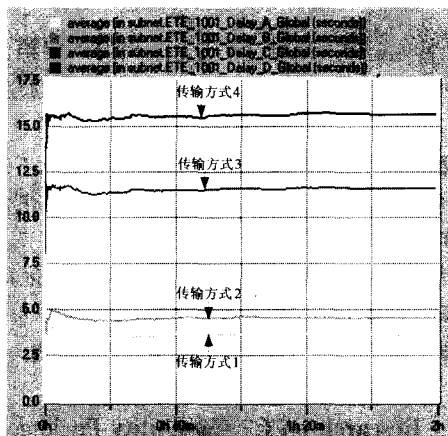


图 6 不同消息传输方式下的消息时间延迟比较

4.2 站点对转发消息的响应时间

假设各个子网有 32 个从属站,系统中不同站点对转发消息的响应时间如图 7 所示。由图 7 可见:

(1) E₁ 作为主网 E 从属站将消息转发到主网 E 时的响应时间最长。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,响应时间较短。

(2) E₁ 将消息转发到子网 B 的响应时间少于转发到主网 E 的响应时间。这是因为将消息转发到子网 B 时, E₁ 作为 B 网主控站拥有较多的数据发送机会,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,使得其对转发消息的响应时间较长。

(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,响应时间却存在区别。原因在于:① E₂ 的消息生成速度是其它主控站的 10 倍,因而响应时间最长;②与 E₃, E₄ 不同, E₁ 没有对转发消息采取优先处理策略,因此响应时间较长;③ E₃, E₄ 虽然配置相同,但由于消息产生的随机性,因而响应时间略有不同。

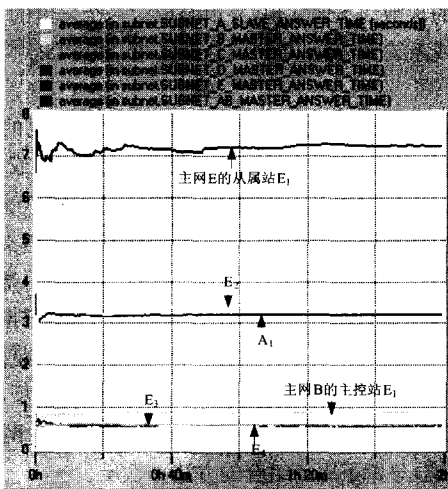


图 7 转发站响应时间比较

4.3 站点对转发消息的响应时间与时间延迟对比

表 3 给出了站点对转发消息的与不同消息传输方式的时 (下转第 84 页)

考价值。

参考文献

[1] Ellison R J, Fisher D A, Lingers R C, et al. Survivable Network System: An Emerging Discipline [R]. CMU/SEI-97-TR-013. Carnegie Mellon University, 1997

[2] Moitra Sourmyo D, Konda Suresh L. A Simulation Model for Managing Survivability of Networked Information Systems[R]. CMU/SEI-2000-TR-020, 2005

[3] Gao Zhi-xing, Ong Chen-hui, Tan Woon-kiong. Survivability Assessment: Modelling Dependencies in Information Systems[C]// The 4th IEEE/CMU/SEI Information Survivability Workshop (ISW-2001/2002). Vancouver, BC Canada, October 2001

[4] Lu Tun, Gu Ning. Survivability-Aware Configuration Manage-

ment of Service-Oriented System Based on Service Dependency [C]// IEEE/IFIP Symposium on Theoretical Aspects of Software Engineering(TASE'07). 2007

[5] Wang Jian, Wang Hui-qiang, Zhao Guo-sheng. ERAS— an Emergency Response Algorithm for Survivability of Critical Services[C]// Proceedings of the First International Multi-Symposiums on Computer and Computational Sciences(IMSCCS'06). 2006

[6] 田立勤, 林闯. 可行网络中一种基于行为信任预测的博弈控制机制[J]. 计算机学报, 2007, 30(11): 1030-1938

[7] Bell M. The use of game theory to measure the vulnerability of stochastic networks[J]. IEEE Transaction on Reliability, 2003, 52(1): 63-68

(上接第 47 页)

间延迟的对比情况。由表 3 可见,不同消息传输方式中,传输路径上站点对转发消息的响应时间之和与消息传输时间延迟有一定的差值,且随着转发次数的增多,差值逐渐增大。这是由于随着转发次数的增多,消息在空间传播的时间也逐渐加长。此外,天线发送消息、消息在站点内部的处理也需花费时间。

表 3 时间延迟抖动数据特征值(单位:秒)

消息传输方式	站点对转发消息的响应时间					响应时间之和	消息时间延迟	差值
	A ₁	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄			
1	3.36	▲	▲	▲	▲	3.36	3.59	0.23
2	3.36	0.84	▲	▲	▲	4.20	4.53	0.33
3	3.36	7.17	▲	0.56	▲	11.09	11.51	0.42
4	3.36	7.17	3.18	▲	0.57	14.28	15.55	1.27

注:表 3 中▲表示该消息传输方式中,消息不需对应的站点转发。

4.4 消息时间延迟抖动

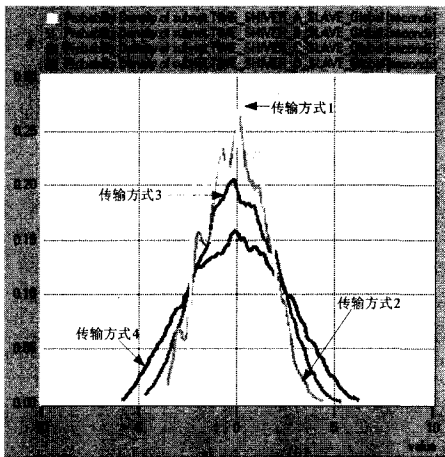


图 8 不同消息传输方式下的时间延迟抖动概率密度曲线比较

消息时间延迟抖动是指:对于某一特定站点发送的消息,其它站点收到的该消息的时间延迟与该站点消息时间延迟均值的差值。过大的时间延迟抖动不利于时间延迟误差的精确补偿,因此要求站点消息的时间延迟抖动必须较小且集中于某一数值。4种消息传输方式的时间延迟抖动概率密度曲线比较如图 8 所示。由图可见,消息以传输方式 1,2,3,4 传输到子网 A,B,C,D 从属站的时间延迟抖动数据越来越分散。这是由于不同传输方式的格式转换次数不同,消息转发次数也有差别,每一次格式转换和消息转发都会造成附加时间延

迟,其大小受转发站转发策略、格式转换能力等众多因素的影响,有一定的随机性。随着格式转换和消息转发次数的增多,这种随机性也被逐步放大,造成时间延迟抖动数据分布越来越分散。

结束语 本文分析了数据链消息传输过程,设计了 TDL_DSAP原型系统并实现了部分功能,以多网数据链为背景分析了其消息传输时间延迟。结果表明多网数据链中,消息以不同方式传输到目的站时,消息转发次数、站点转发消息时的角色、消息格式转换等因素对消息时间延迟、站点响应时间、时间延迟抖动等指标有重要影响。

消息时间延迟过大,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消息的时间延迟为 1s,则由此引起的定位误差可能达到数百米。虽然消息传输方式 1 的各项指标最好,但由于装备的限制,作战单元之间可能不得不使用其它消息传输方式。由于需转发消息的重要性较高,为了获得较小的时间延迟,应尽量减少消息的转发次数,同时转发站应将转发消息设置为高优先级,减小消息在转发站的附加时间延迟,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):3623-3627

[3] 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

[4] 梅文华,蔡善法. JTIDS/Link16 数据链[M].北京:国防工业出版社,2007

[5] Charlie I, Cruz M. Netwars Based Study of a Joint Stars Link-16 Network[R]. Rand, 2004

[6] 邢智,戴浩.基于 OPNET 的 Link-16 数据链建模与仿真[J].军事运筹与系统工程,2005,19(1):62-66

[7] 任培.战术数据链传输时延及其作战效果影响分析方法研究[D].长沙:国防科技大学,2008

[8] 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

[9] 田斌鹏.战术数据链实时性研究[D].成都:西南交通大学,2007