文章编号：1672-2892(2012)02-0152-05

战术数据链网络建模与仿真

杨方方，尹亚兰，圣钱生

(海军指挥学院 信息战研究系，江苏 南京 211800)

摘 要：网络性能的优劣直接关系到战术数据链系统作战效能的发挥，对数据链网络系统性能的仿真评估具有一定的现实意义。在 OMNeT++上搭建 Link-16 网络仿真模型，利用 MiXiM 对数据链网络系统节点的功能进行分层实现，并详细分析了各节点的系统响应时延、端到端时延及丢包率对网络整体效能的影响，对进一步研究数据链网络具有一定的参考价值。

关键词：战术数据链；OMNeT++软件；MiXiM 组件；时延

中图分类号：TN919.2 **文献标识码：**A

Modeling and simulation on the network of TADIL

YANG Fang-fang, YIN Ya-lan, SHENG Qian-sheng

(The Information Operation Research Department, Navy Command College, Nanjing Jiangsu 211800, China)

Abstract: The performance of network will directly influence the battle efficiency of the tactical data link system. Simulation and evaluation on the network system of Tactical Digital Link(TADIL) is of certain realistic meaning. This article builds a network model of Link-16 on OMNeT++, and finishes a layered realization according to the function of network nodes based on MiXiM. The influence of the system response time delay, end to end time delay and packets loss rate of every node on the unitary efficiency of network is analyzed in detail. It can provide certain reference for further research about military data link.

Key words: Tactical Digital Link; OMNeT++; MiXiM; time delay

数据链概念最早由美国海军于 20 世纪 50 年代提出，经过半个多世纪的发展，以美国为首的西方各国相继开发了各种常用数据链、宽带数据链和专用数据链，逐步形成了多频段覆盖、多功能兼备、多平台并用以及从单机到系统的比较成熟的战术数据链网络[1]。战术数据链网络系统，本质上是供战区联合作战中各军种共同使用的战术数据信息传输系统[2]，具有区分敌友，在恶劣的通信环境下为作战部队提供近实时的战场信息交互、态势感知，有利于提高部队的机动灵活性及生存能力[3]。在战术数据链的全寿命周期中，建模与仿真作为一种重要的支撑技术，正发挥着越来越重要的作用，已成为战术数据链网络系统开发与应用研究过程中不可或缺的关键技术[4]，而正确的模型建立和精确的结果分析，是对数据链网络性能分析的必要前提。目前，战术数据链比较主流的仿真软件主要有 OPNET[5],Simulink[6],OMNeT++[7]等。

1 OMNeT++建模机制及数据链网络分层模型

OMNeT++是一个面向对象的可视化离散事件仿真器，集编程、调试、结果输出和跟踪于一体，具有较强的运行环境适应性和可移植性，能够实现复杂电磁环境下的通信模拟，满足信息化战场的网络构架需求。OMNeT++提供了强力而清晰的仿真构架[8]，但其软件本身并不包含任何特定的用于通信仿真、系统仿真及其他相关领域仿真的组件。具体的仿真是由相关组件如 MiXiM[9],Mobility Framework 或 INET Framework 来支持，这些模型的开发独立于 OMNeT++，并拥有自己的更新周期。

1.1 MiXiM 节点模型

MiXiM 提供了对无线移动通信模拟仿真的直接支持，包含了无线信道(如信号衰减等)、无线连通、移动、MAC 层协议等模型，甚至支持复杂无线想定的定义和调试。可以说，MiXiM 在 OMNeT++中提供了一个简洁明

收稿日期：2011-04-20；修回日期：2011-05-25

了的关于无线、移动网络的图解式描述，已成为无线网络性能分析的有效工具。

在 MiXiM 中，节点模型是功能相对独立完善的中心模块，由对应于各个分层功能的简单模块复合而成，如图 1、图 2 所示。

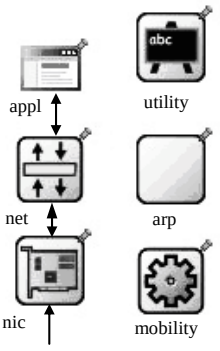

Fig.1 Model of MiXiM node
图 1 MiXiM 节点模型

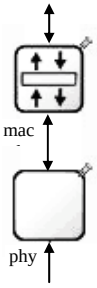

Fig.2. Nic model of node
图 2 节点 nic 层模型

节点模型由应用层模块(appl)、网络层模块(net)、网络接口层(nic)模块，以及效用模块(utility)、地址解析模块(arp)、移动模块(mobility)组成。其中，nic 模块由简单模块 phy 和 mac 复合而成，phy 和 mac 模块分别表示物理层与链路层，实现 PHY/MAC 协议。MiXiM 中，物理层是一个无线节点的核心部分，负责消息的传送与接收、冲突检测和比特误差计算。相邻层间的双向箭头表示 2 对连接上下层的 OMNeT++“门”。“门”是模块输入输出的接口，消息通过输出门发送，输入门接收。第 1 对“门”用于层间数据消息的传输，第 2 对“门”则用于交换层与层之间的控制信息，实现通信控制。utility 模块主要实现在 OMNeT++图形界面上动态显示输出信息；mobility 模块提供一个节点或对象的地理位置且操作它的移动；arp 模块处理地址解析协议。

1.2 战术数据链分层模型

参考 OSI 的经典 7 层协议栈模型[10]及 GIG 体系结构[11]，根据战术数据链 Link-16 的技术体制和运用特点，可将其分为 5 层，从下到上依次为物理层、链路层、网络层、处理层、应用层，如图 3 所示。

物理层：通过物理媒介实现网络通信节点间的连接，控制收发信机的工作频率，定义编码、调制、扩频方式等信息，完成数据的发送与接收。

链路层：实现信道访问控制协议，同时完成信道监控和网同步。Link-16 采用 TDMA 时隙分配模式，各网络节点在分配给其的时隙中占用信道进行数据发送，实现信道的充分利用。

网络层：完成上下层之间数据的传递、封装与解封装。当需要超视距传输时，网络层实现路由选择功能。

处理层：按照预先指定的报文标准，对来自应用层的各种战术消息进行格式化处理，并将来自下层的格式化消息送往应用层。

应用层：根据军事运用意图，产生相应初始数据信息送至网络层进行处理；接收来自下层的解封装数据以实现各战术数据的应用。

比较 Link-16 网络分层模型与 MiXiM 节点模型，两者网络分层基本相同，因此以 MiXiM 节点模型为基础，针对数据链网络各分层协议特性，对 MiXiM 源代码进行适当改写，建立战术数据链网络仿真模型，如图 4 所示。

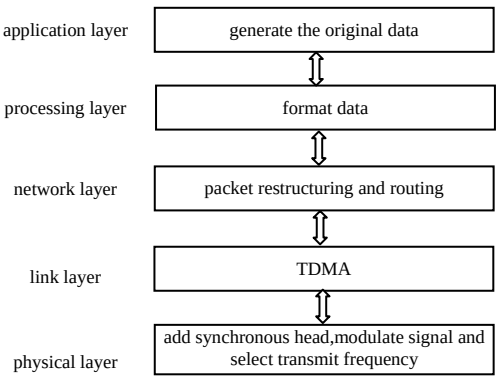

Fig.3 Function of each layer in network layered model
图 3 网络分层模型各层功能

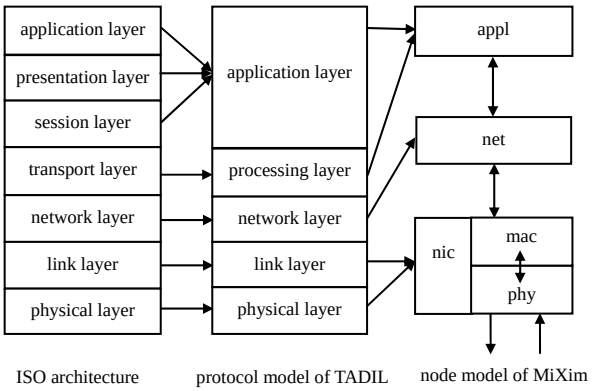

Fig.4 Simulated model of TADIL
图 4 战术数据链网络仿真模型

1.3 网络分层模型的软件实现

在 MiXiM 中，通过消息传递机制实现数据信息在不同协议层的分层传送。消息传递机制的实现采用了 2 类函数：handle*Msg( )函数和 Convenience( )函数。

MiXiM 提供 5 种不同的 handle*Msg( )函数，分别是 handleSelfMsg( ),handleUpperMsg( ),handleLowerMsg( ), handleLowerControl( ),handleUpperControl( )，每一次当消息到来时，相应的函数被调用，函数中包含所使用的处理方法和所需的前推信息。同样，MiXiM 包含了 sendUp( ),sendDown( ),sendDelayedUp( ),sendDelayedDown( ), encapsMsg( )和 decapsMsg( )共 6 个 Convenience( )函数,前 2 个函数分别在 handleLower-Msg( ),handleUpperMsg( )中被调用，sendDelayed*( )函数则实现消息的延迟发送，延迟时间可作为 1 个参数给出，模拟消息的处理延时，encapsMsg( )与 decapsMsg( )实现消息的封装与解封装。

仿真之初，各模块自动调用初始化函数 initialize( )，完成各模块、协议参数的初始化，以及对 Link-16 网络各节点进行时隙分配。appl 模块产生目标信息及附加控制信息，发送至 net 模块。net 模块从附加控制信息中获得目的地址，并利用 encapsMsg( )函数将其与消息本体一起封装，传输至 nic 模块中的 mac 子模块，进入排队队列，等待发送时隙的到来。在 mac 模块中定义 mac_time( )函数作为定时器，每间隔 1 个时隙发送 1 次自消息，触发 handleSelfMsg( )的调用，实现各节点自身时隙号与当前时隙号的比较，若相同，则启动 mac_check( )检测信道状态，并准备向网内发送广播包；若不同，则等待接收数据包。当发送时隙到来时，若信道繁忙，则继续检测，如果在设定超时等待时间 time_out 到达时，消息仍未发送，则做丢包处理；若信道空闲，则传输至 phy 模块向外广播发送。

节点 phy 模块接收到信息后，进行信噪比和误码率的判断，若信噪比低于灵敏度门限或者误码率高于接收门限，则视为噪声或错误包，作丢包处理。若满足要求，则由物理层送往 mac 层。mac 模块使用 decapsMsg( )函数解封信息包，将消息本体与目的地址信息送至 net 模块。比较自身节点地址与目的地址，若相同，则向上传输至 appl 模块进行处理；若不同，则做丢包处理。当仿真时间到达时，调用 finish( )，仿真结束，收集统计结果。

2 Link-16 网络仿真

2.1 战术数据链网络主要性能参数

战术数据链网络传输的是指控命令、战场态势等对实时性要求很高的战术信息，因此网络时延是衡量其网络性能的一个重要指标。网络端到端时延指的是从发送终端产生发送数据到接收终端收到全部信息的时间间隔，主要由系统响应时延、消息传输时延和设备处理时延组成，与组网模式、消息格式、传输距离等因素有关[12]。

系统响应时延表示消息产生后，直至被送至物理层发送出去的时间段，与链路层的时隙分配算法密切相关，而数据链网络的时隙分配由组网模式决定。

丢包率指测试中所丢失数据包数量占所发送数据包的比率,通常在吞吐量范围内进行测试[13]，可检测整个数据链路的信息传输可靠性。网络吞吐量与网络成员数量、接入方式及存在的干扰强度有关，且随着网络容量的变化而改变。各指标参数的影响因子如表 1 所示。

表 1 战术指标的影响因素

Table1 Impact factors of tactics index

index	influencing factors
end-to-end delay	number of members, transmission distance networking mode, message format
system response delay	number of members, traffic intensity, networking mode
packet loss rate	traffic of members, properties of the channel, interference intensity
network throughput	number of network members, access mode, interference intensity

2.2 仿真条件及结果分析

2.2.1 仿真条件设置

单网结构下，Link-16 网络仿真参数设置如下：范围 100 km×100 km，数据链定频 969 MHz 工作，仿真运行时间 100 s；节点数 10 个，节点 0(地面指控中心)作为网络时间基准，从站分别为 3 个机载(节点 1,2,7)，4 个舰载(节点 3,4,5,6)，1 个车载(节点 8)和 1 个单兵(节点 9)；各节点定向线性移动，移动速度在各自取值区间内随机选择，机载移动速度 300 m/s~400 m/s，舰载移动速度 10 m/s~20 m/s，车载移动速度 20 m/s~40 m/s，单兵移动速度 1 m/s~1.5 m/s。TDMA 固定时隙分配，每帧包含 12 个时隙(2 个时隙为可能的新入网单元预留时

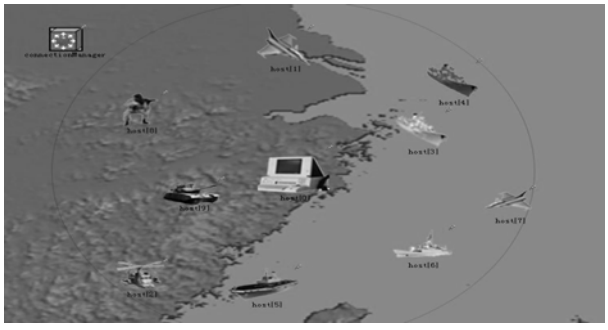

Fig.5 Simulation scenario in Link-16 network

图 5 Link-16 网络仿真场景

隙)，每时隙长度 7.812 5 ms，其中传输保护时间 4.458 5 ms，mac 最大队列长度 10；应用层产生的初始信息为 225 bit，网络层封装报头 16 bit；OMNeT++物理层抽象模型信道传输速率 0.5 Mbps，信号发射功率 100 W，接收机灵敏度–90 dBm；采用自由空间无线传播模型，最小路径损失系数 3.0。OMNeT++软件仿真场景见图 5。

2.2.2 结果分析

利用 OMNeT++提供的结果分析工具 Scave，对仿真结果进行统计分析。首先，分析网络中各节点消息的系统响应时延，结果如图 6 所示，纵轴表示系统响应时延，单位为秒(s)。

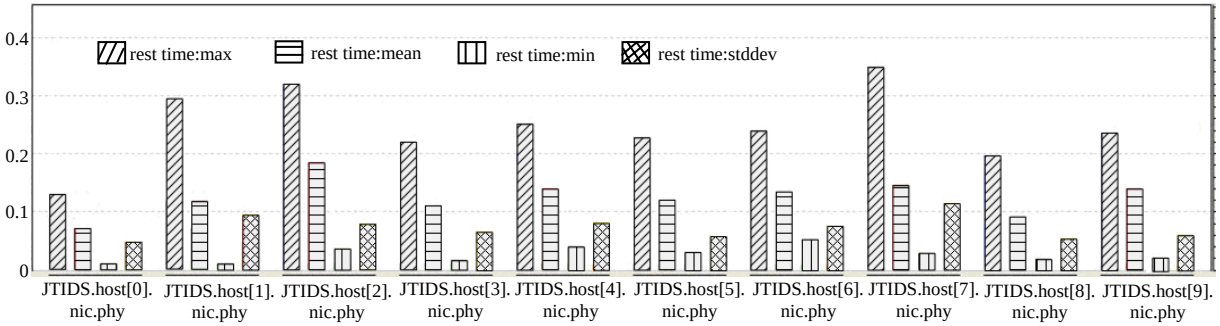

Fig.6 System response time delay of each node of Link-16 network
图 6 Link-16 网络各节点系统响应时延

由图 6 可知，各节点消息的平均系统响应时延控制在 0.2 s 以内，机载节点 1,2,7 系统响应时延最大值普遍较高，节点 7 更是达到了 3.5 s，这与其地理位置及移动速度等因素有关。系统响应时延方差可以反映其取值的稳定性，网络中机载节点 7 稳定性最差。节点 0 系统响应时延最大值仅为 0.13 s，且不到 0.6 s 的方差显示出其稳定性极好，选取它作为时间基准是网络稳定运行、有效发挥整体作战效能的可靠保证。

图 7 中，纵轴表示端到端时延参数 time delay 的大小，单位为秒(s)。网络中，机载节点 1,2,7 的移动速度远大于其他节点，且位于网络外围位置，导致产生的时延较大，其中节点 7 时延最大值超过 5 s；单兵节点 8 的端到端时延最低，其余节点也都控制在 1.5 s 以内，较好地保证了战术信息的实时传输。

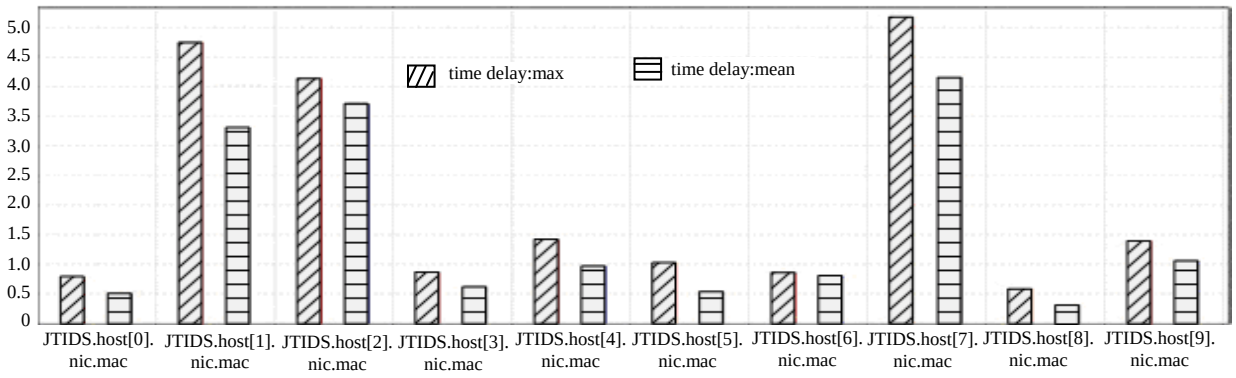

Fig.7 End-to-end time delay of each node of Link-16 network
图 7 Link-16 网络各节点端到端时延

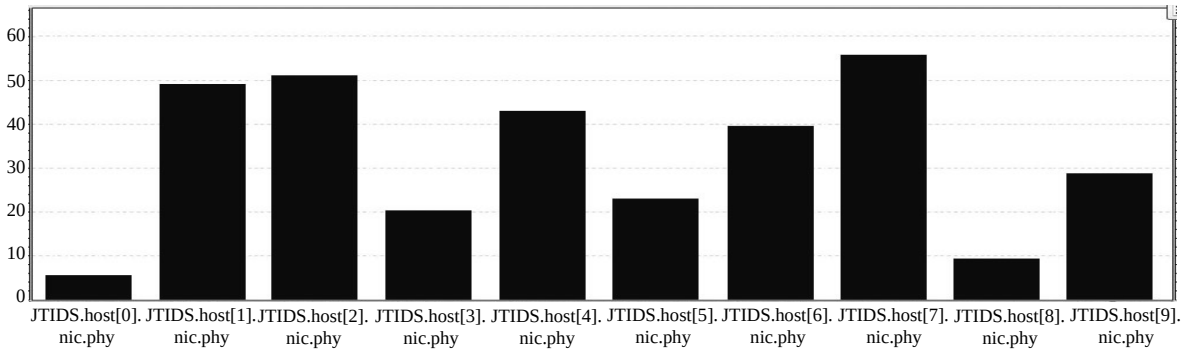

Fig.8 Packets loss rate of each node of Link-16 network
图 8 Link-16 网络各节点丢包率

图 8 给出了各节点丢包率的统计值，其中机载节点丢包率较高，节点 7 丢包率甚至达到了 56%，这与其较高的移动速度及偏离其他网络节点的移动方向有关；岸基指控中心节点 0 与单兵节点 8 丢包率控制在 10%以下，通信可靠性高；车载节点 9 移动速度高于舰载节点，故丢包率稍高于节点 3,5，但由于舰载节点 4,6 朝着远离网络中心的方向移动，导致其与网络中其他节点的距离拉大，数据包被正确接收的概率降低，丢包率增大至 40%左右。节点端到端时延和丢包率两者都受到节点地理位置及移动速度的影响，图 5、图 6 的仿真结果基本吻合。

3 结论

现代信息化作战中，战术数据链网络系统正发挥着越来越重要的作用。本文基于 Link-16 网络分层模型，在 OMNeT++环境下利用 MiXiM 进行战术数据链网络节点的建模设计，进而实现了在某一特定战术环境下的网络仿真，并对系统响应时延、丢包率等网络性能参数进行了详细分析，对于进一步研究战术数据链网络系统具有一定的参考价值。

参考文献：

[1] 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. (SUN Yiming,YANG Liping. Tactical Data Link within Information-based War[M]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2005.)

[2] James T Sturdy. Military Data Link Integration Application[EB/OL]. (2011-02-20). http://www.dodccrp.org/events/2004_CCRTS/CD/papers/046.pdf.

[3] 申振,徐志军,王华力,等. JTIDS 系统抗干扰性能的 Simulink 仿真与分析[J]. 信息与电子工程, 2008,6(5):359-362. (SHEN Zhen,XU Zhijun,WANG Huali,et al. Performance Simulation of JTIDS Based on Simulink[J]. Information and Electronic Engineering, 2008,6(5):359-362.)

[4] 王文政,周经伦,罗鹏程,等. 战术数据链仿真研究综述[J]. 系统仿真学报, 2008,20(14):3623-3627. (WANG Wenzheng, ZHOU Jinglun,LUO Pengcheng,et al. Survey of Tactical Data Link Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2008,20(14):3623-3627.)

[5] 陈岩,董淑福,蒋磊. OPNET 网络仿真技术及其应用研究[J]. 计算机技术与发展, 2009,19(2):199-201. (CHEN Yan, DONG Shufu,JIANG Lei. Research on OPNET Network Simulation Technology and Its Application[J]. Computer Technology and Development, 2009,19(2):199-201.)

[6] 刘武刚,杨建波,周瑞. 基于 Simulink 的联合战术信息分发系统仿真[J]. 信息与电子工程, 2010,8(1):15-18. (LIU Wugang,YANG Jianbo,ZHOU Rui. JTIDS signal simulation based on Simulink[J]. Information and Electronic Engineering, 2010,8(1):15-18.)

[7] VARGA A. OMNeT++ discrete event simulation system user manual[EB/OL]. (2009-06-26) [2009-08-10]. http://www.omnetpp.org/download/docs/papers/esm2001-meth48.pdf.

[8] Ahmet Y,Sekercioglu. Introduction to Discrete-Event Simulation and OMNeT++ Framework[EB/OL]. (2001-07-22) [2009-06-06]. http://titania.ctie.monash.edu.au/netperf/netperf-omnetpp-tictoc-01.pdf.

[9] MiXiM project. MiXiM simulator for wireless and mobile networks using OMNeT++[EB/OL]. (2008-08-10) [2010-10-06]. http://www.sourceforge.net/apps/trac/mixim.

[10] 谢希仁. 计算机网络[M]. 4 版. 北京:电子工业出版社, 2003. (XIE Xiren. Computer network[M]. 4th ed. Beijing:Electronic Industry Press, 2003.)

[11] White B E. Layered Communication Architecture for the Global Grid[C]// Proceedings of IEEE MILCOM. McLean,Virginia: [s.n.], 2001.

[12] 仝海波,梁俊,吕娜. 战术数据链时延特性的仿真分析[J]. 电光与控制, 2009,16(8):53-55.

[13] 李航. 数据链网络系统的评价方法研究[J]. 中国科技信息, 2010(3):123-125.

作者简介：

杨方方(1986-)，男，湖南省怀化市人，在读硕士研究生，研究方向为通信与信息系统. email:hz_yangff@126.com.

尹亚兰(1966-)，女，安徽省巢湖市人，副教授，研究方向为战术数据链网络作战.

圣钱生(1985-)，男，安徽省庐江县人，在读硕士研究生，研究方向为通信与信息系统.