

基于 HLA 的转发式数据链仿真平台架构

贾长江, 朱承, 张维明

(国防科学技术大学信息系统与管理学院, 长沙 410073)

摘要: 为构建具有良好扩展性和灵活性的数据链仿真平台, 提出基于高层体系结构的转发式数据链仿真架构, 实现数据链应用层仿真和数据链传输层仿真的分离。定量分析该架构在 HLA 时间管理服务下对接收顺序和时间戳交互数据的传输影响, 验证了该架构的可行性和合理性。建立的仿真平台原型表明, 该架构能支持数据链应用需求的快速变化, 提高核心模块的重用性和平台的扩展性。

关键词: 高层体系结构; 数据链仿真; 转发式架构; 时间管理

HLA-based Forwarding Data Link Simulation Platform Architecture

JIA Chang-jiang, ZHU Cheng, ZHANG Wei-ming

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

【Abstract】 In order to construct a data link simulation platform with good scalability and flexibility, this paper presents a forwarding data link simulation platform architecture based on High Level Architecture(HLA). It separates simulation of data link application layer from transport layer. With the purpose of verifying the feasibility and rationality of this architecture, it quantitatively analyzes the architecture influences on execution of time stamp interactions and received order interactions. Simulation platform prototype shows that this architecture has superior application adaptability, higher reusability of core simulation modules and good system scalability.

【Key words】 High Level Architecture(HLA); data link simulation; forwarding architecture; time management

1 概述

数据链是一种具有特殊应用背景的无线信息共享系统。随着计算机科学技术的发展, 建立数据链仿真平台、模拟运行不同数据链方案已成为数据链设计开发和应用研究中重要的技术之一^[1-2]。在各种数据链应用中, 与底层数据传输体制相比, 应用层场景处理通常差别较大, 而目前数据链 5 层网络协议仿真平台紧耦合了应用层与其他传输各层^[3-5], 不能有效地支持应用层功能的快速变化, 数据链报文传输核心模块的重用性不高, 整个平台的扩展性不强。鉴于这些问题, 本文提出一种转发式数据链仿真架构。

在 HLA 分布式仿真架构下^[6-8], 转发式架构使用应用层协议和其他传输层协议可被实现为单独的仿真联邦成员。相比传统数据链 5 层协议紧耦合仿真设计, 转发式架构降低了协议耦合性, 使其可以更好地支持应用层功能的快速变化, 对报文传输模块的重用性和整个平台的开发效率也有很大提高。单独存在的应用层仿真联邦成员使得平台实现方式从软件模型向半实物或者实物模型过渡, 从而增强平台的扩展性。本文介绍了转发式仿真平台架构, 对转发式架构中的核心模块——数据链协议传输邦员设计以及仿真平台原型进行了说明。

2 基于 HLA 的转发式数据链仿真平台架构

2.1 转发式数据链仿真平台架构

转发式数据链仿真平台基于 HLA 的分布式体系结构, 分布在不同节点上的联邦成员通过彼此之间的交互和控制共同推进数据链仿真的运行。其中包括 3 种联邦成员, 分别是数据链平台节点联邦成员、控制联邦成员、数据链协议传输联邦成员。转发式数据链仿真平台架构见图 1。

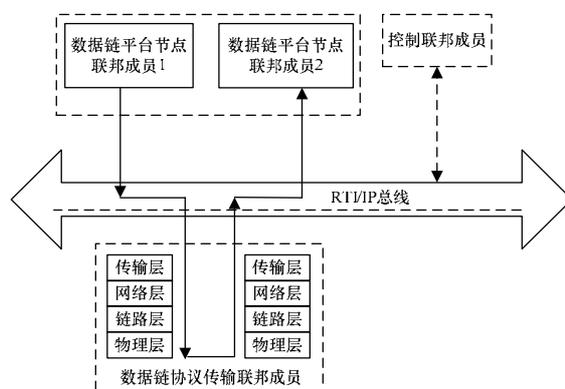


图 1 转发式数据链仿真平台架构

在图 1 中, 数据链平台节点联邦成员指搭载数据链终端设备的平台, 对应数据链协议体系中的应用层, 实现各种应用功能的处理过程。在后续半实物仿真扩展中, 可以用实体数据链终端替换该软件邦员, 无须调整仿真架构, 体现了较好的扩展性。控制联邦成员负责跟踪整个仿真平台的运行状态, 对仿真结束后的结果数据进行收集分析, 为下一步数据链模型优化设计提供支持, 其中, 带箭头的点划线表示控制邦员可以完整地监听收集各个邦员之间传输的所有报文。数据链协议传输联邦成员作为转发式架构中的报文转发邦员, 对应数据链协议体系中除应用层外的其他所有协议层, 模拟接收到的应用层报文排队、分配时隙信道、自由空间传输、

作者简介: 贾长江(1986 -), 男, 硕士, 主研方向: 数据链仿真; 朱承, 副教授; 张维明, 教授、博士生导师

收稿日期: 2010-02-07 **E-mail:** jiachangjiang.china@gmail.com

传输参数统计等过程,该邦员使用单独的网络仿真软件(如OPNet)进行建模实现,其中,带箭头的直线表示一个报文的完整转发过程。当数据链平台节点联邦成员1(数据链终端1应用层)产生一个应用报文时,RTI(Run Time Infrastructure)将该报文以交互的形式发送给数据链协议传输邦员,在其中数据链平台节点联邦成员1对应的传输模型(数据链终端1除应用层的其他各层)模拟交互报文的排队、分配时隙信道、通过物理层发送信号给数据链平台节点联邦成员2对应的传输模型(数据链终端2除应用层的其他各层),模拟从物理层接收信号、解码、向上层发送等过程,将应用层可以识别的报文通过RTI以交互形式发送给数据链平台节点联邦成员2(数据链终端2应用层)进行数据的应用处理。

2.2 转发式联邦成员

转发式架构指不同数据链节点邦员之间传递的交互不能够直接到达,需要经过传输邦员的转发。

数据链协议传输邦员通过OPNet仿真软件建模来实现,它基于OPNet3层建模机制,从网络域、节点域、进程域对数据链通信系统的拓扑结构、节点设备、协议功能进行建模,实现数据链网络到OPNet模型的映射,OPNet3层模型具体如下:

(1)网络域模型反映了数据链网络的拓扑结构特点。根据数据链系统中平台节点的轨迹特性,描述其移动的相关信息,包括节点个数、节点轨迹、节点移动信息(如速度、方位)。

(2)节点域模型描述网络层中各个节点设备中的协议层模型的相互关系,包括物理层模型的数据信号收发过程、链路层的时分信道接入、网络层的通信路由选择等。

(3)进程域模型是针对节点域模型中各个协议层模型的具体功能,采用有限状态机的方式设计相应的转移状态和转移条件,从而实现相应功能。进程域模型进程域时的时分信道接入(Time Division Multiple Access, TDMA)模型见图2。

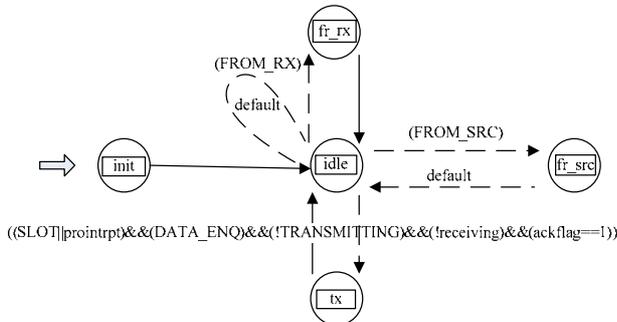


图2 时分信道接入模型

在图2中,各个状态机的含义如下:

(1)init 状态机:完成链路层的初始化,读取平台节点的时隙参数。

(2)fr_src 状态机:负责接收来自上层的消息并根据报文类型送往相应发送缓冲队列。

(3)idle 状态机:调用OPNet的自中断函数实现TDMA的时隙到达控制。

(4)tx 状态机:从与时隙对应的发送缓冲队列中读取报文并发送至物理层。

(5)fr_rx 状态机:负责接收来自物理层的报文并送往上层。

基于网络仿真软件OPNet设计开发的数据链协议传输邦员实现整个仿真联邦的报文转发功能。自顶向下完整模拟数

据链运行的场景状态,如平台个数、运动轨迹、报文格式、节点内部对报文传输的处理等。这些设置随不同的数据链测试方案而改变,但要保证OPNet内部处理报文与数据链节点邦员和控制邦员本身交互设计一致,否则无法进行相应的报文转换,从而无法实现各种应用报文的正确转发。

在完成各个联邦成员的独立设计后,明确转发式仿真平台中不同交互类型的传输情况和邦员之间的互连控制才能保证整个数据链仿真联邦正确、高效地运行。

3 转发式架构下的联邦成员时间管理分析

3.1 时间管理

由于本文数据链仿真平台中的各个联邦成员受到其他邦员交互数据的影响推动本地仿真的前进,因此所有联邦成员是既时间约束又时间受限。对于HLA中的RTI时间管理服务,邦员发送TSO(Time Stamp Order)交互和RO(Received Order)交互时采用不同的时间管理策略^[5]。因此,验证不同交互类型在转发式架构下的时间传输关系,选择合适的交互类型,对于正确执行仿真过程具有重要意义。

3.2 TSO交互

转发式平台架构指所有交互报文需要通过数据链协议传输邦员的转发,TSO交互的传输时间过程见图3。

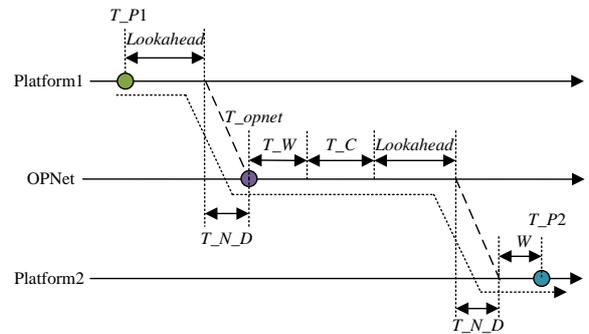


图3 TSO交互的传输时间过程

在图3中,Platform表示应用功能处理节点邦员,OPNet表示数据链报文传输邦员(平台原型系统中使用OPNet实现该邦员),带箭头的点划线表示交互报文的传输过程(后面图中的含义一致), T_{P1} 表示发送交互时平台邦员的本地逻辑时刻,Lookahead表示平台邦员的前瞻量(这里与步长相), T_{N_D} 表示数据链仿真平台测试网络的时延, T_{opnet} 表示OPNet邦员接收到交互时的本地逻辑时刻, T_W 表示报文在数据链路层排队、竞争分配信道所需要的时间, T_C 表示报文成功获得信道后,传输过程中获得的时间, W 表示交互报文到达平台节点后的时刻与临近的处理逻辑时刻的差值, T_{P2} 表示接收平台节点处理报文的逻辑时刻。

对于该过程,从Platform1向Platform2发送一个TSO交互,它的期望到达时刻 T_{expect} 、实际到达时刻 T_{actual} 、交互时间漂移量 T_{offset} 分别为

$$T_{expect}=T_{P1}+Lookahead+T_W+T_C$$

$$T_{actual}=T_{P1}+Lookahead+T_{N_D}+T_W+T_C+$$

$$Lookahead+T_{N_D}+W$$

$$T_{offset}=Lookahead+2 \cdot T_{N_D}+W$$

3.3 RO交互

使用RO类型的交互后能不受RTI时间管理服务的约束,即Lookahead的值对其没有影响,RTI按照接收RO报文的顺序立即转发给目的节点。RO交互的具体传输时间过程见图4。

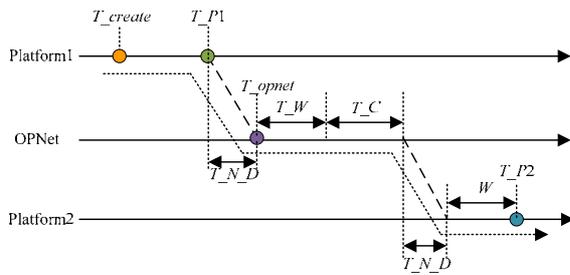


图4 RO交互的传输时间过程

在图4中与图3不同的参数有： T_{create} 表示本地平台邦员触发这个事件的逻辑时刻，然后产生相应的交互报文，在下一个时间步长点 T_{P1} 进行发送。采用RO交互后，期望到达时刻 T_{expect} 、实际到达时刻 T_{actual} 、交互时间漂移量 T_{offset} 分别为

$$T_{expect} = T_{P1} + T_W + T_C$$

$$T_{actual} = T_{P1} + T_{N_D} + T_W + T_C + T_{N_D} + W$$

$$T_{offset} = 2 \cdot T_{N_D} + W$$

3.4 交互时间漂移分析

比较TSO交互和RO交互的时间漂移表达式可以看出：TSO和RO都包括 T_{N_D} 和 W ，只差一个 $Lookahead$ 值，其原因是 T_{N_D} 由试验网络环境产生无法避免，但良好的测试环境下数量级较小，对结果没有太大影响； W 是由时间步长推进仿真本身的机制引起的，无法避免，但可以通过逐步减小仿真步长来减小 W 的取值； $Lookahead$ 值是HLA时间管理策略和转发式架构对不同交互类型共同作用的结果。转发式架构将数据链传输抽象为单独的联邦成员，使一次成功的交互传输需要在测试网络中传递2次才能到达，HLA时间管理策略约束TSO交互的发送时戳必须大于邦员当前时刻和 $Lookahead$ 值的和，因此，报文在数据链协议传输邦员中进行转发时，除了添加正常的传输准备延迟和自由电磁空间的传输延迟外，还添加了一个自身的 $Lookahead$ 值，这与实际情况不符。这种时间上的偏差可能会导致目的节点在处理接收报文和本地事件时产生逻辑错误，漂移量越大，这种错误的可能性越大。对于RO交互，不受HLA时间管理策略的约束，邦员按照接收顺序在下一个时间步长处理点直接将该类型交互发送，不再添加额外的 $Lookahead$ 值，从而解决了转发式架构下TSO交互报文的时间传输与实际不一致的问题。

4 仿真平台原型

在仿真原型中，数据链平台节点邦员、控制邦员以及各种编辑工具采用VC开发环境，图形界面基于MFC(Microsoft Foundation Classes)进行设计，数据链协议传输邦员采用网络仿真软件OPNet。整个系统运行于Windows微机平台，RTI采用DMSO\RTI1.3NG-V6，网络支持为局域网(LAN)。

仿真场景设置包括2个方面的参数：(1)数据链平台节点的运动轨迹，采用一组离散的地理坐标点描述，可以设置点的数目控制轨迹的描述精度；(2)数据链协议各层的初始化参数，如调制方式、中心频率、发射功率、抗干扰方式、可用带宽等。

对于仿真结果的统计，本平台设置4个参数反映数据链系统的性能指标，分别为：

(1)平均时延：所有传输报文在数据链系统中的平均传输延迟时间。

(2)丢包率：丢失的报文数占有传输报文的比值。

(3)吞吐量：数据链系统的传输吞吐能力。

(4)时隙利用率：报文占用的传输时隙占有所有时隙的比值。

该仿真原型的运行过程表明，它对于不同的仿真场景测试(不同的节点数和节点状态)和数据链应用功能的变化都给予了较好支持；在重用已有设计的基础上^[9-11]，各联邦成员由不同的开发小组分类进行实现，具有较高的同步开发效率，基本解决了传统数据链5层协议紧耦合仿真遇到的问题，达到初步设计时的要求。

5 结束语

本文针对以往数据链仿真存在问题的基础上，提出基于HLA的转发式数据链仿真架构，通过分离应用层仿真和其他传输各层仿真，提高对应用层功能快速变化的适应性和灵活性，降低协议之间的耦合性从而达到较好的核心模块重用，进一步提高开发效率，并研究了该架构下的不同联邦成员的互连设计，为进一步的数据链仿真研究提供借鉴。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 杨光, 周经伦, 罗鹏程. 基于Simulink的数据链通信系统仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(17): 4651-4654.
- [3] 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.
- [4] 陈春明, 王可人, 郭建蓬. 基于OPNET的Link16网络仿真平台设计[J]. 通信对抗, 2005, (2): 36-40.
- [5] 陈吉荣, 侯立华, 杨方廷, 等. 通用的基于HLA分布式交互仿真平台体系结构[J]. 计算机工程, 2004, 30(2): 47-49.
- [6] 刘强, 匡镜明, 王华. 基于HLA的分布式军事通信网仿真[J]. 计算机工程, 2006, 32(12): 96-98.
- [7] 丁丁, 王杉, 魏急波, 等. 基于HLA的OPNET仿真联邦成员设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(7): 1601-1605.
- [8] 章德宾, 马才学, 胡斌. 基于HLA/RTI的分布式组织活动建模研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(2): 542-545.
- [9] IEEE. IEEE Std 1516-2000 IEEE Standard for Modeling and Simulation(M & S) High Level Architecture(HLA)——Federate Interface Specification[S]. 2000.
- [10] 崔建江, 商云鹏, 龙德. 基于HLA和VR的防空导弹作战仿真系统研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(8): 2137-2141.
- [11] 吴微露, 丁亚飞. 通信对抗接收机建模与Simulink动态仿真[J]. 计算机工程, 2010, 36(2): 223-225.

编辑 陆燕菲