

# 高低轨混合卫星网络仿真技术研究

王志浩, 郎晓光, 肖双爱

(中国电子科技集团公司电子科学研究院, 北京 100041)

**摘要:** 通过分析高低轨混合卫星网络特点, 结合当前国内外先进卫星网络仿真技术发展趋势, 对比当前主流网络仿真软件的优缺点, 搭建基于QualNet网络仿真软件的高低轨混合卫星网络仿真平台。针对天基信息网络关键技术研究, 提出网络仿真技术解决方案, 对网络拓扑、协议模型体系和分析评估指标体系进行设计, 验证仿真技术解决高低轨混合卫星网络中组网、路由传输等问题的能力。

**关键词:** 高低轨混合卫星网络; 仿真技术; QualNet

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-8930.20200105

## Research on Simulation Technology in High and Low Orbit Hybrid Satellite Network

WANG Zhihao, LANG Xiaoguang, XIAO Shuangai

China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China

**Abstract:** By analyzed the characteristics of the space-integrated-ground information network, combined with the current development trend of advanced satellite network simulation technology at home and abroad, compared the advantages and disadvantages of current mainstream simulation software, a simulation platform based on QualNet was built. A solution for the space-integrated-ground information network simulation was proposed, the network topology, protocol model system and evaluation index system were designed, and the ability of the space-integrated-ground information network networking, routing and transmission was verified.

**Key Words:** high and low orbit hybrid satellite network, simulation technology, QualNet

### 1 引言

近年来,我国航天事业突飞猛进,空间任务不断丰富与完善,建立具备全球覆盖能力和一体化信息融合处理能力,以能够支持未来全空间军事与民用使命为目的的高低轨混合卫星网络,将成为空间活动、经济建设和国防安全的发展趋势和必然要求。高低轨混合卫星网络是将不同轨道(GEO、LEO等)、多种类型卫星(中继星、通信星、侦察星等)、临近空间平台、地面应用终端等,按空间信息资源的最大有效综合利用原则进行互联互通,有机地构成系统优化、功能完备的智能化体系,形成能与海基、陆基、空基的信息系统融为一体的信息获取、传输与综合应用网络<sup>[1]</sup>。高低轨混合卫星网络能够在远洋航行、应急救援、导航定位、航空运输、航天测控、热点区域监测等应用领域发挥重大作用,向下可支持地面态势快速感知,向上可支持深

空探测的超远程可靠传输,同时它的实现可提高通信的容量和时效性,增强信息网络的可靠性和抗毁伤性,将各种应用整合成一个有机整体。

高低轨混合卫星网络规模较大,网络结构复杂,通过传统的实验与数学分析设计网络,人力与物力成本过高,不能满足实际的需求。网络仿真作为一种客观可靠的网络规划和设计技术,通过仿真能够有效地分析网络的优缺点,并进行相应的改进,利用网络仿真工具进行网络设计成为高低轨混合卫星网络研究的发展趋势。

### 2 高低轨混合卫星网络仿真技术的发展现状及趋势

#### 2.1 高低轨混合卫星网络特点

高低轨混合卫星网络由空间星座节点、探测器节

点及地面节点构成,以满足数据可靠高效传输、网络覆盖范围大、组网灵活迅速、不受地理环境限制的发展需求,为各种空间探测任务提供通信支持服务。其中,卫星通信网具有以下特点。

(1) 网络拓扑动态变化、物理链路间歇中断、时延大,同时由于数据传输易受外界因素影响从而数据传输误码率较高。以上特性要求网络从系统架构上要有相应的策略来保证网络的连通性和可靠性。

(2) 网络高度异构、协议多样。深空通信网络需要整合现有的基础设施和现存空间探测通信网络互联互通,同时与现有的多种通信协议兼容。然而空间节点业务种类繁多,不同节点的功能、运行状态、接入及传输能力等方面的差异较大,使通信协议标准自成体系,深空通信网络成为一种高度异构的网络系统<sup>[9]</sup>。

(3) 资源受限。由于受到空间平台制约,星上通信设备通常要求体积小、重量轻、功耗低,各模块间功率资源分配受到严格的限制,同时,空间平台所使用的宇航级抗辐照器件性能远低于地面商用器件,要求组网过程中涉及的协议、算法和策略的复杂度要尽可能低。

(4) 数据量大且需要数据共享。未来深空探测会涉及多类航天器的协同工作,将会有大量多样的信息需要在卫星和航天器间共享,为深空通信网络的吞吐量、兼容性等带来挑战。

卫星通信网具有以上特点,并且地面Internet协议不适用,于是20世纪90年代,一些国家相继提出了一系列的星座网络计划,并开展网络体系架构设计及相关项目的演示验证。

## 2.2 仿真技术国内外现状

基于高低轨混合卫星网络独特的空间特性,实际设备在运行过程中相对较难把控。因此在网络部署之前需要将网络的相关技术进行试验验证,通过仿真进行前期的试验评估是高低轨混合卫星网络中的常用方法。

欧洲COST计划中的Action 253专门研究如何通过非同步轨道卫星进行网间互联,并对其进行定义、建模与仿真实验。其下设立了6个工作组(Work Group, WG),其中WG1专门进行业务建模工作,工作的主要内容包括业务源建模、业务流建模、业务特性描述以及LEO星座通信系统中存在的地理非均匀分布负载的区域业务模型的建立。WG1的工作目标是为WG6提供适当的业务源和业务流模型,以便其进行网络仿真和系统性能评估。

BISANTE是一项欧洲ESPRIT项目,主要研究低轨星座系统、静止轨道星座系统和地面蜂窝系统的网络特性。其主要目的是为网络和中介媒体服务商提供成熟的试验平

台和工具,便于其最佳地规划现有资源,管理系统容量。BISANTE首先对网络服务的类型和已有的业务建模方法进行详细的研究和分析,在此基础上,提出了一套基于用户行为描述法的业务分层建模方法,并称之为BISANTE分层用户模型。该模型将用户产生业务的过程进行分层描述,便于在不同的层次上对用户的行为进行量化。

美国马里兰大学(University of Mariland)系统研究所(Institution of System Research, ISR)下属的卫星及混合网研究中心(Center for Satellite and Hybrid Communication Networks, CSHCN),在美国军方及NASA的支持下,致力于研究包括卫星网在内的混合网建模仿真方法并开发性能评估试验平台,建立了一套建模与试验的框架体系。将异构的网络分解为网络模型(包括卫星网络模型、Ad-Hoc网络模型等)、业务源模型(服从Poisson和Normal分布)、信道模型(各种衰落信道模型),将计算机仿真与数学分析方法相结合,通过分层的方法进行建模,将下层的各种网络抽象为上层的节点,最顶层是数学模型,将仿真结果作为数学模型的输入,以得到整个网络的性能指标。该工具可分为两部分,一部分是算法结构,另一部分是软件结构,可以得出如端到端时延、吞吐量、阻塞概率和丢包率等指标。底层以离散事件驱动的方式产生静态的数据提供给高层。底层的离散事件驱动的仿真采用OPNET进行,一方面对网络协议等进行精确仿真,对实际产生的业务进行量化,得到局部网络的分析结果;另一方面为数字试验提供精确的数据。

ASIMUT项目力求解决多媒体卫星网络由于其系统庞大、复杂、高动态而造成仿真难度加大的问题,主要内容分为:通过仿真的方法来为卫星制造商明确业务需求;搭建模块可重用的分层仿真模型;定义一般的多媒体卫星网络模型,并以此为基础进行仿真;提出适合卫星多媒体网络的试验平台。最终实现试验平台模块化和可重用,并有效地将基于时间推进的仿真核心(如链路传播模型)与基于离散事件的仿真核心(如协议的仿真)结合在一起实现分布式的仿真,运用多处理器、多进程技术提高开发和运算的效率。

## 3 网络仿真技术在高低轨混合卫星网络中的应用

卫星网络仿真主要包括卫星网络拓扑设计、抽象建模(节点模型、协议模型、链路模型等)以及仿真结果的统计和可视化表示等。另外,对于卫星网络星座,需要根据仿真内容对卫星网络仿真软件进行扩展,添加具有卫星网络特点的功能模块。目前,在高低轨混合卫星网络中应用较为广泛的协议仿真平台包括:OPNET、

NS2、QualNet等。通过对仿真软件性能的比较,确定以QualNet为仿真引擎构建高低轨混合卫星网络试验平台,支撑高低轨混合卫星网络关键技术研究。

### 3.1 网络仿真平台性能比较

#### (1) OPNET Modeler

OPNET Modeler是OPNET Technology公司4个系列网络仿真软件产品的其中之一,它主要面向的用户为网络设计专业人士,能够满足大型复杂网络的仿真需要<sup>[3]</sup>。

OPNET Modeler有如下功能。

(a) 提供三层建模机制,最底层为Process模型,以状态机来描述协议;其次为Node模型,由相应的协议模型构成,反映设备特性;最上层为网络模型。

(b) 提供了一个比较齐全的基本模型库。

#### (2) NS2

NS2网络仿真软件可以对无线网、有线网、卫星网、局域网和广域网等不同的网络形式进行仿真,网络模拟器平台是一种离散事件网络仿真平台,可以运行在Linux或Windows操作系统上。作为一种可扩展、易配置、可编程的事件驱动的网络仿真软件,NS2能够近乎真实地在各个层次上模拟网络运行,并支持多种协议,包括TCP、UDP、FTP、Telnet、AODV、DSDV等。

NS2主要优势如下。

(a) 灵活的仿真环境: NS2所有源代码公开,任何人都可以获得、使用和修改其源代码。这对于利用NS2来构建特殊的网络仿真实验环境非常方便和迅速。

(b) 良好的可扩展性: NS2使用C++和OTCL两种程序设计语言,分别完成具体协议的模拟、实现与网络仿真环境的配置和建立<sup>[4]</sup>。

#### (3) QualNet

QualNet是美国Scalable Networks Technologies公司的产品<sup>[5]</sup>,前身是GloMoSim。QualNet基于已经过验证的PARSEC并行仿真内核,具有如下特点。

(a) QualNet的协议模块更加独立,更加模块化,可以方便屏蔽、增加、删除某些协议模块。

(b) 支持TCP/IP协议栈的标准层间接口,用户无须自己开发这种类型的层间接口;同时支持非标准协议栈的开发,即跨层交互(Cross Layer Interaction)。

几种网络仿真工具比较见表1。

### 3.2 高低轨混合卫星网络仿真平台架构设计

基于仿真的真实度区别,高低轨混合卫星网络仿真平台分为数字化网络仿真环境和半实物仿真平台两种类型,各个仿真平台的详细设计如下。

表1 几种网络仿真工具比较

| 网络仿真工具         | 特征                                              | 局限性                                                                                     |
|----------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| OPNET          | 仿真精确,界面友好,具备HLA体系接口                             | 收费的商业软件,不开源,限制了其在研究领域的应用                                                                |
| NS2            | 近乎真实地在各个层次上模拟网络运行,并支持多种协议,包括TCP、UDP、FTP、Telnet等 | (1) 更偏向于学术研究;<br>(2) 由于仿真器本身的不断升级,不同版本模块的兼容性问题比较突出;<br>(3) 仿真节点数据很多时,需要更多的内存资源,运行速度明显变慢 |
| QualNet        | 支持TCP/IP协议栈的标准层间接口                              | 美国军方所用,特定协议需要定制开发。                                                                      |
| 其他<br>(针对特定协议) | —                                               | 专门针对特定协议,局限性较大                                                                          |

#### (1) 数字化网络仿真环境

数字化网络仿真环境以QualNet网络协议仿真软件为平台,进行星间网络通信的协议仿真和网络仿真,完成网络协议建模,配置网络仿真场景,验证信息传输的协议性能,对一体化信息网络整体性能量化分析。数字化网络仿真环境的主要功能包括协议仿真、网络仿真和半实物仿真,具体模型和功能模块包括:组网协议模拟、星座拓扑模拟、业务数据模拟、链路模拟、协议仿真分析和半实物仿真接口。网络协议仿真软件采用离散事件驱动机制,网络行为通过事件的产生、处理进行描述,仿真运行产生的大量事件通过事件调度机制维持有序、高效运转,保障网络行为模拟的准确性。

数字化网络仿真环境结构如图1所示。

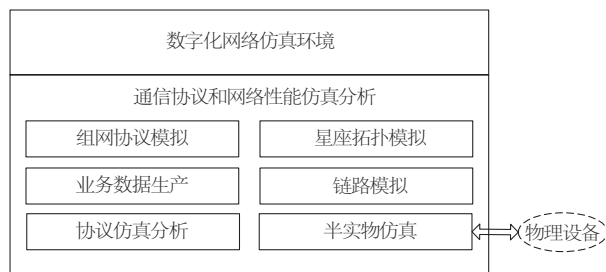


图1 数字化网络仿真环境结构

#### (2) 半实物仿真平台架构设计

半实物仿真可以在虚拟网络环境中连接真实物理设备甚至是在轨的卫星,通过地面或者真实空间链路进行连接与通信。半实物仿真为试验任务提供基本的仿真试验验证环境,并将结果输出至系统效能分析与评估系统中进行效能评估,其基本关系如图2所示。

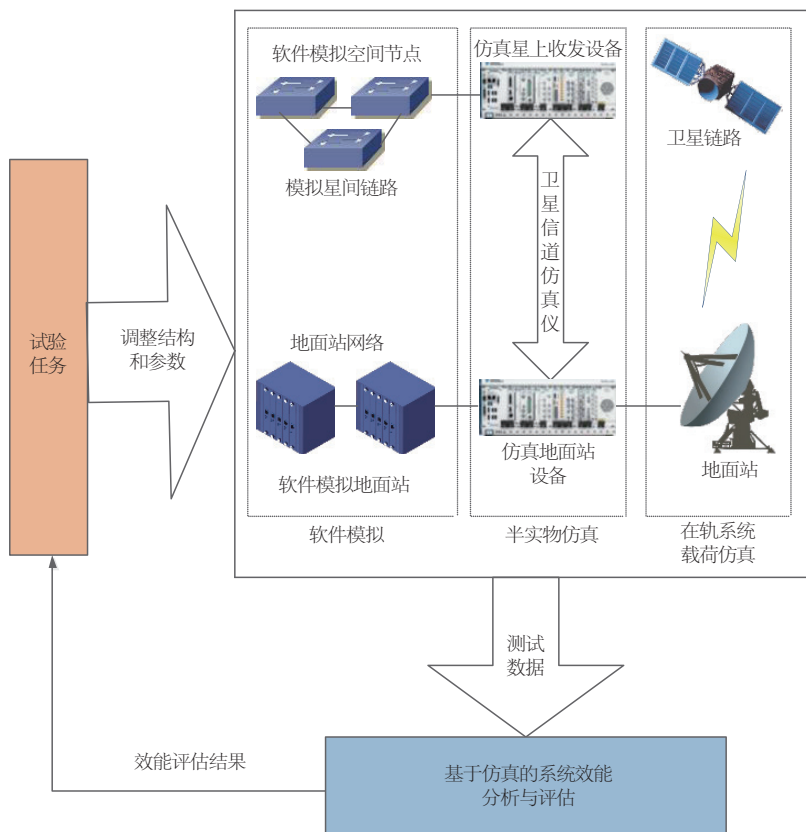


图2 半实物仿真平台架构设计

### 3.3 关键技术研究

当前高低轨混合卫星网络仿真技术的研究主要集中于以下几个方面。

#### (1) 卫星网络组网技术

自星座概念被提出，通过星座设计来克服单一卫星存在的缺陷成为卫星网络设计的趋势。卫星星座结构是空间信息网络路由技术的实施基础，对整个卫星系统的组网成本与网络性能有重要的影响。当前的卫星星座模型主要有铱星、Leosat、OneWeb、O3b等单层或多层混合组网星座模型<sup>[6]</sup>。

#### (2) 卫星网络路由技术

随着空间信息网络与地面网络的不断发展和融合，需要有统一、高效、兼容的空间信息网络路由体系作为保障。由于空间环境的特殊性，现有的地面网络体系无法直接移植到空间卫星网络中，需要为空间卫星网络设计新的路由方案，减小星上处理资源和传输资源消耗，增强传输性能。

#### (3) 卫星状态监控和资源管理

卫星所处的空间环境较为恶劣，容易受到强电磁环

境的影响，同时星上资源受限，因此需要对卫星进行状态监控和资源管理。

高低轨混合卫星网络的运行管理控制面向网内各类设施以及各类实体、逻辑等网络资源进行管理和控制，提供整个网络的数据采集、状态监控、参数控制（含天基节点的遥测遥控）、业务管理、资源调度、任务规划等功能，实现卫星测控、运控、网络管理等功能的集成与统一。

## 4 仿真技术试验验证

基于高低轨混合卫星网络仿真平台，面向网络中关键技术研究，搭建高低轨混合卫星网络典型应用场景，对网络拓扑、模型体系和分析评估指标体系进行设计，验证卫星网络仿真的关键技术。

### 4.1 仿真场景

搭建了高低轨混合卫星网络典型场景，初步验证了利用仿真技术解决高低轨混合卫星网络中的网络拓扑模拟、协议仿真以及网络性能分析评估的能力。其中，场

景包括天基骨干网节点、天基接入网节点、地基节点和用户节点，以及视频、语音等多种端到端传输业务。通过仿真与模拟相结合的方式，将两台软件路由器映射到仿真网络当中，初步搭建了虚实结合、要素完备的天基网络协议平台环境，具备开展仿真分析、协议集成、性能评估等工作的能力。

## 4.2 网络仿真技术解决方案

针对天基信息网络特点和典型场景，进行网络拓扑、网络协议模型体系和分析评估指标体系的设计，为高低轨混合卫星网络关键技术验证奠定基础。

### (1) 网络拓扑设计

高低轨混合卫星网络主要由6颗高轨卫星组成卫星环网；由48颗低轨卫星组成低轨卫星星座（6个轨道面，每个轨道面8颗卫星），以及5个地面站，通过地面网络互联。用户节点包括临近空间用户、海基用户和地面用户等。

仿真平台支持高低轨混合卫星网络星座设计和构型分析，同时具备可实时计算各节点的轨位信息的功能。

### (2) 网络协议模型体系构建

高低轨混合卫星网络仿真平台提供网络仿真引擎、TCP/IP等通用协议模型、卫星节点/用户节点/地面站模型、星间/星地链路模型、业务模型及外部接口，集成

星间/星地链路、天地路由传输、用户接入与移动切换等协议，根据配置实现网络协议仿真运行，支持典型业务传输。

仿真平台包括基础模型库与专用模型库。

基础模型库包含了网络仿真需加载的基本模型，如节点模型、拓扑模型、链路模型、移动模型和信道模型等。

专用模型库在基础模型库的基础上，根据高低轨混合卫星网络系统的特定需求进行定制，包括卫星/地面站/用户节点模型、星座模型、星间/星地链路模型和轨道模型等。

软件支持模型进行动态加载、配置、组合扩展以驱动和管理，完成不同的任务，并支持实体模型库的逐步完善，根据不同层次、不同角度及不同任务，支持各类应用模型架构的建立，满足不同粒度的仿真要求。

仿真系统运行模式如图3所示。

由图3可知，从链路层覆盖至应用层，仿真系统具有健全的协议体系和良好的可扩展性，非常适合进行新协议模型和协议技术的仿真试验集成，并通过对包括天线模型、大气模型和雨衰模型等组合成的链路模型集成，就可以进行接近真实特征的网络仿真。

### (3) 网络评估指标体系构建

评估指标是对高低轨混合卫星网络能力进行评估

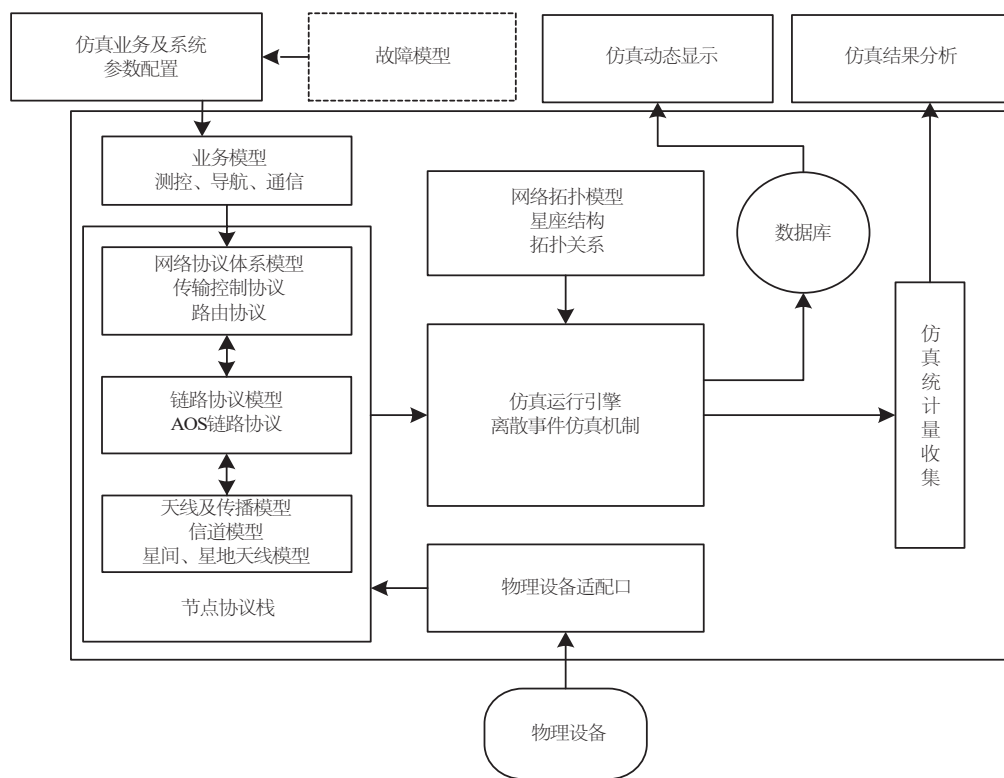


图3 仿真系统运行模式

的重要基础和依据,通过构建合理、完备、系统的评估指标体系,可以客观反映系统现状及发展趋势。构建高低轨混合卫星网络评估指标体系的三项基本原则为系统性原则、独立性原则和可度量原则。由于指标间相互影响,关系错综复杂,直接用这些指标对网络能力进行评估具有极大的复杂性,如果不理清各指标间的关联关系,必然会对最终评估结果的准确性造成极大的影响。因此,对评估高低轨混合卫星网络能力的指标进行详细的划分,建立层次的指标体系是十分必要的。

图4是基于仿真任务,为高低轨混合卫星网络进行综合评价而设计的指标体系,是从体系的视角,对高低轨混合卫星网络体系的综合能力进行多维度考察,而不是对构成体系的各个系统的能力进行分析和叠加。根据评估维度,将指标体系分为三个层次,由上到下逐渐细化。

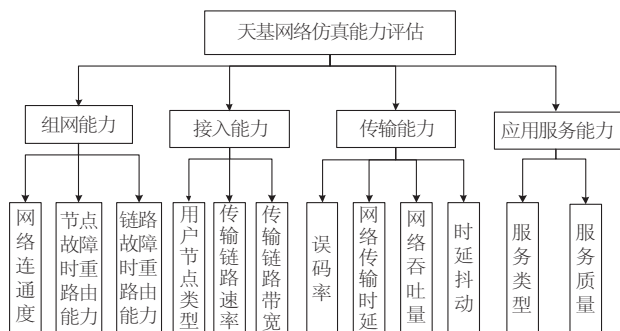


图4 高低轨混合卫星网络能力评价指标体系

高低轨混合卫星网络仿真试验的一级指标——综合能力主要由4个二级指标聚合而成,分别为组网能力、接入能力、传输能力和应用服务能力,这些能力缺一不可,全面反映了天基网络的总体效能,共同构成了高低轨混合卫星网络体系仿真评估的二级指标。

## 参考文献：

- [1] 朱辰,董银虎. 基于 OPNET 的网络仿真技术研究及其应用[J]. 无线电工程, 2013, 43(3): 12-15.  
ZHU C, DONG Y H. Network simulation technology and its application based on OPNET[J]. Radio Engineering of China, 2013, 43(3): 12-15.
- [2] 苏冰. 空天地网络路由协议的研究[D]. 成都:电子科技大学, 2016.  
SU B. Research on routing protocol of Air space network[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [3] 王文博. OPNET Modeler与网络仿真[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003.  
WANG W B. OPNET Modeler and network simulation[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2003.
- [4] 熊辉,朱倩. 浅析OPNET,NS2,Matlab网络仿真工具[J]. 科学时代, 2013(7):56-70.  
XIONG H, ZHU Q. Brief analysis of OPNET,NS2,Matlab network simulation tools[J]. KEXUE SHIDAI, 2013(7):56-70.
- [5] 徐以标,王兴建,尹建月. 基于Exata 的网络通信协议仿真[J]. 计算机与数字工程, 2014, 42(11): 2212-2216.  
XU Y B, WANG X J, YIN J Y. Simulation of network communication protocols based on exata[J]. Computer and Digital Engineering, 2014, 42(11): 2212-2216.
- [6] 童超,牛建伟,龙翔,等. 移动模型研究综述[J]. 计算机科学, 2009, 36(10):5-10.  
TONG C, NIU J W, LONG X. Survey on mobility model[J]. COMPUTER SCIENCE, 2009, 36(10):5-10.

## [作者简介]



王志浩 (1992-), 男, 河北人, 硕士, 主要研究方向为天基信息网络仿真技术。



郎晓光 (1993-), 男, 河北人, 硕士, 主要研究方向为天基信息网络仿真技术。



肖双爱 (1977-), 女, 河北人, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为系统仿真建模、多传感器数据融合、算法研究。