

## 面向作战仿真的多分辨率通信系统建模技术

李涛<sup>1,2</sup>, 柳林<sup>2</sup>, 周少平<sup>2</sup>

(1. 海军航空工程学院, 山东烟台 264001; 2. 海军装备研究院, 北京 100161)

**摘要:** 目前信息系统建模技术已成为作战仿真系统需要突破的关键技术, 重点研究通信系统的建模技术, 建立了通用的数据处理模型框架, 实现了战场信息传输、处理、存储、表示的规范性和一致性; 提出了完整的多分辨率通信系统建模方法, 实现了对作战仿真中通信网络、链路终端、通信节点、消息类型、通信方案的建模。在海军某作战仿真系统中得到了应用, 仿真实验表明, 通信系统模型满足作战仿真系统的作战需求, 提高了作战仿真的真实性和合理性。

**关键词:** 通信系统; 建模与仿真; 通信网络; 多分辨率

**中图分类号:** V271.4; TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)08-0010-05

## Modeling Technologies of Military Simulation Oriented Multi-Resolution Communication System

LI Tao<sup>1,2</sup>, LIU Lin<sup>2</sup>, ZHOU Shao-ping<sup>2</sup>

(1. Naval University of Aeronautics and Astronautics, Yantai 264001, China;

2. Naval Academy of Armament, Beijing 100161, China)

**Abstract:** The modeling technologies of information systems are the key technologies for military simulation system. The modeling technologies of communication system were studied and a new generalized data processing architecture was established, which realized the normality and consistency of the battlefield information transmission, processing, storage and representation. An integrated modeling method was proposed for multi-resolution communication systems, which could realize the modeling of communication networks, link terminals, communication nodes, messaging, communication plans in the military simulation. The algorithm has been applied in one naval military simulation system. The Simulation result shows that the model of communication system satisfies the operational requirements of the navy military simulation system, and improves the authenticity and rationality of military simulation.

**Key words:** communication system; modeling and simulation; communication network; multi-resolution

### 0 引言

随着武器装备信息系统的不断发展,“以信息系统为核心”已成为作战仿真系统建模的主要特征,通信系统作为信息的载体和传输者,是信息系统的重要组成部分。在武器装备体系中,通信系统是一个功能结构相当复杂的系统,对这个系统做出任何的改变都可能影响到整个武器装备体系的作战效能。因此,在作战仿真实验过程中,对通信系统的建模和仿真至关重要<sup>[1]</sup>,通信系统建模技术已成为作战仿真系统需要突

破的关键技术<sup>[2]</sup>。经过科研人员的不断探索与拓展,通信系统建模技术取得了一些突破性的进展。

### 1 “以信息系统为核心”的作战仿真系统

美国海军负责的NSS(海军仿真系统)是“以C<sup>4</sup>ISR为中心建模”的仿真系统,能够有效地评价C<sup>4</sup>ISR系统对武器装备作战效能以及战役结局的影响;兰德(RAND)公司开发的SEAS(系统效能分析仿真)同样是“以C<sup>4</sup>ISR为中心”的仿真系统,该系统在仿真结构上采用了集中服务方式的仿真体系结构,并通过闭环蒙特卡罗随机仿真来统计分析网络信息技术对作战效能的影响。为了支持“网络中心战”和“空海一体战”<sup>[3]</sup>理论的探索与实践,“以C<sup>4</sup>ISR为中心建模”已成为美国体系对抗仿真系统的主要特征。

收稿日期:2013-09-12 修回日期:2013-10-03

基金项目:总装预研基金(9140C910302120C91310)

作者简介:李涛(1982—),男,山东泰安人,博士生,研究方向为兵种战术、军事建模与仿真。

本文重点研究海军作战仿真系统中通信系统的建模技术,通过梳理作战仿真对通信系统建模的基本需求,提出完整的多分辨率通信系统建模方法,实现了对作战仿真中通信网络、链路终端、通信节点、消息类型、通信方案的建模,满足海军作战仿真系统的作战需求,提高作战仿真的真实性和合理性。

## 2 通信系统的建模与仿真需求

### 2.1 通信系统在海军作战中的重要作用

海军通信系统是海上武器装备体系作战中传输信息的重要设施,其主要任务是为海上联合作战部队提供实时或准实时的岸基与海上各作战平台的通信以及海上各作战平台之间的通信<sup>[4-5]</sup>,它可以把海战场上各作战单元有机地联系起来,以实现指挥系统畅通无阻的运作,对于夺取信息优势和作战优势、打赢海上战斗发挥着至关重要的作用。

在作战过程中,要求担负指挥通信、协同通信、预警通信和后勤支援通信的网络必须具有鲁棒性、快速性、多重性和可靠性,以保证联合作战部队在遂行水面、水下、空中和陆上的作战中对参战部队实施有效的指挥通信,同时,需要作战指挥和参谋人员对通信力量、通信手段、通信网络、通信系统进行组织,以及根据通信联络规定、通信安全防护措施等制定详细的行动设想,这些通信方案行动设想通常根据部队战备、作战方案拟制,是作战方案顺利进行和海上作战中包括海、陆、空、天、电磁多兵种联合协同作战的基础和关键。

### 2.2 定义与描述

海军目前所采用的通信频段范围涵盖了从 ELF 到 EHF 的几乎所有频段,如表 1 所示。

表 1 EM 波谱的使用、局限和特点  
Table 1 The application, limitations and characteristics of EM spectrum

频带	主要用途	关键局限和特点
ELF	岸潜通信	覆盖全球,高功率发射机,低数据传输率(小于 1 bps)。能穿透海面到 25~40 m 水深。只能用于单向传输
VLF、LF	潜潜通信	覆盖全球。需要高功率发射机,带宽有限。接收方潜艇需要释放有线浮标或漂浮的有线天线
MF、HF	全球范围岸舰、舰舰通信	覆盖全球。复杂的传播效应,受天气变化影响较大,需要进行复杂的消息编码调制
VHF、UHF	视线范围舰舰、岸舰通信。UHF 卫星通信	简单的传播效应,直接 LOS 直线路径传播卫星通信提供几乎覆盖全球的范围;不能覆盖两极。LOS 短距离。宽带,数据传输率较大。定向天线,需要与频率匹配
SHF	卫星通信	穿透电离层的直线传播,覆盖南纬 70°到北纬 70°,宽带传输
EHF	卫星通信	直线传播,覆盖南纬 70°到北纬 70°,宽带传输,低数据率

不同的频段具有各自典型的传播模型和使用特性,同时,海军作战还有可能用到特定的通信链路,不同的通信链路具有不同的工作特性,这些特性在海军作战仿真系统的通信系统模型中都应该得到一定程度的描述。本文建模方法主要用于描述作战仿真过程中通信系统的特性如何体现,下面对本文中将要提到的一些关键术语和概念进行定义。

**覆盖范围:**指通信系统发送者与接收者之间的最大通信距离。覆盖范围与发射机和接收机的天线增益、发射机功率、背景噪声、接收机输入噪声、接收机敏感度,以及带宽和链路容量相关。

**链路容量:**通常用来描述特定条件下对通信系统的能力要求,即在一定的传输错误率条件下的数据率。

**消息:**包括消息产生、更新以及消息内容建模的规则,包括消息产生、消息队列、消息优先级和消息的确认。

**通信方案:**每个作战方都必须有一个唯一的通信方案,通信方案由消息类型、发送者、中继者、接收者、路由和消息回执确认等要素组成。

**链路终端:**特指通信系统中,对消息进行接收和格式化的部分,这些消息经链路终端处理后,可能用于对外传输,也可能用于内部处理。

**通信节点:**特指通信系统中,负责消息实际发送和接收的部分。

**通信网络:**由链路终端和通信节点对(成对搭载于平台或设施上)、以及特定通信链路按照一定的入网规则参与组成的信息传输网络。

**分辨率:**是指物体可以被分辨的最小尺度。在作战仿真领域,分辨率主要是指仿真模型的分辨率,也称为仿真模型的粒度和详细度,其具体含义是指模型描述现实世界的详细程度,也就是指模型对事物细节描述的多少<sup>[6]</sup>。

### 2.3 通信系统的建模与仿真需求

由上文可知,若实现以信息系统为核心的仿真框架,充分体现卫星、雷达站、预警机等主要信息网络节点信息获取、信息处理和信息传输能力对作战效能的影响,必须对通信系统的以下能力进行建模。

#### 1) 全频段覆盖。

海军作战仿真系统应能进行全频军事行动,包括从战术级、战役级到战略级层次的战争进行模拟。这意味着海军作战仿真系统能对不同层次战争中空中、空间、地面、海面和海下的不同频段的通信系统进行建模与仿真。

#### 2) 通信设备匹配。

在作战过程中,链路终端和通信节点是成对出现

的。网络由链路终端和通信节点对、以及网络参与规则组成,所有作战过程中的通信,都在网络环境中进行,为了实现这一过程的模型,必须完成通信设备的匹配,即只有携带了相应链路终端的作战实体才能通过通信节点链接到相应的通信网络中去。

3) 多分辨率建模<sup>[7-8]</sup>。

海军作战仿真系统应能模拟全频军事行动,从小规模战术行动到大规模的体系作战,不同层次的作战仿真涉及的实体从几十个到几千个,因此通信模型系统必须足够简单,既要满足想定规模和快速运行的需求,又必须足够精细,以解决用户的业务分析问题。不同的应用对通信模型的分辨率要求也不同:对于低分辨率的通信模型,只需简单列出消息的发送者与接收者,设定延迟参数、成功完成传输和接收的概率,以及可能的其他因素;对于中分辨率的通信模型,需要对通信线路进行详细建模,包括备份线路和冗余线路、消息包大小和带宽、消息优先级、消息排队和出队规则、消息确认以及必须考虑的其他因素;对于高分辨率的通信模型,需要定义特定通信协议的消息格式和内容。

4) 通信方案设置。

任何一次作战行动,需要作战指挥和参谋人员对通信力量、通信手段、通信网络和通信系统进行组织,以及根据通信联络规定、通信安全防护措施等方面制定详细的行动设想,通信系统模型应该具有相应的能力,通常需要设置发送者送出的每一类消息的传输路线以及消息的接收者。

2.4 通用的信息处理框架

作战仿真过程中,为了体现战场信息传输、处理、存储、表示的规范性、一致性,形成统一的战场信息网络,构成一个无缝整体,本文设计了通用的数据处理框架,处理过程如图 1 所示,对于任何一个作战实体的输入、输出数据都有一个统一的数据格式和处理过程。

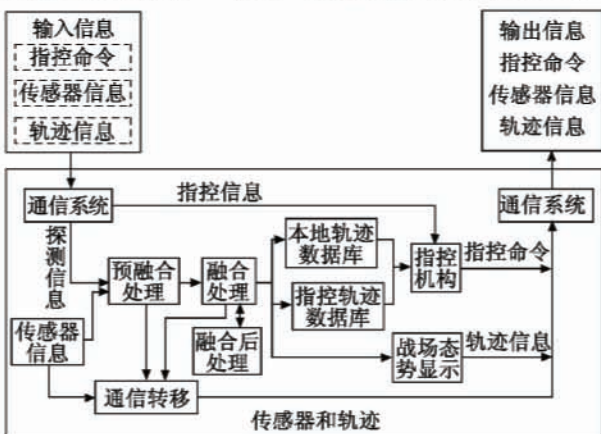


图 1 通用的信息处理框架

Fig. 1 General information processing framework

仿真实体的输入、输出数据都包括指令命令、传感器信息和轨迹信息,通用的信息处理框架中的通信系统将指令命令和轨迹信息传输给指挥机构,同时将轨迹信息保存到本地轨迹数据库,传感器信息传输到信息融合系统与本地传感器信息进行融合处理。此外,通用的信息处理框架还定义了通信转移模块,通信转移主要用于在预融合处理、融合处理或融合后处理的任一阶段将传感器信息和轨迹数据传输给其他需要的作战实体。

3 多分辨率通信系统建模

本文实现了“低”、“中”两个层次分辨率的通信模型和个别高分辨率的通信模型,并在理论上将保持一致性,针对不同的作战应用和研究对象,用户可在想定中选择不同的分辨率模型进行使用。下面对“低”、“中”、“高”3个层次分辨率的通信模型进行详细介绍。

3.1 低分辨率通信系统模型

对于大规模的作战仿真推演而言,通信关系复杂,通信量巨大,为了节省仿真带宽,仿真系统可以仅仅对通信能力进行建模,而不关注网络覆盖范围限制、网络资源竞争以及其他复杂因素的影响。通信能力主要包括:是否能通、通信延时、消息更新频率、通信误码率等几个主要因素。因此,低分辨率的通信系统模型可以由作战平台之间的通断矩阵、消息延时表、更新频率表组成,对于一些可靠性不高的通信节点,还可以加上相互间通信成功概率表。其中,通信延时如表 2 所示,更新频率如表 3 所示,通断矩阵如图 2 所示。其中,空格表示两个平台之间不具备通信能力,“X”表示发送者肯定能够与接受者通信,“T”表示发送者在一定的成功概率下与接受者能够通信。

表 2 通信延时表

Table 2 The list of communication delay

平台	最大延时/s	最小延时/s
XX 机场-1	5	1
XX 机场-2	5	1
XX 机场-3	5	1
XX 机场-4	5	1
XX 机场-5	5	1
XX 机场-6	5	1
飞机(1)	3	1
飞机(2)	3	1
预警机	3	1

表 3 更新频率表

Table 3 The update frequency

	空中	水面	水下	陆地
更新频率	0.001667	0.1	0.5	0.01667

h

发送方	接收方														
	ALL BLUE	XX 机场-1	XX 机场-5	XX 机场-2	XX 机场-4	XX 机场-6	XX 机场-3	飞机(1) 北部突击	飞机(1) 南部突击	飞机(1) 中部突击	预警机-1	预警机-2	飞机(2) 北部护航	飞机(2) 南部护航	飞机(2) 中部护航
ALL BLUE															
XX 机场-1				X							X	X			
XX 机场-5															
XX 机场-2		X	X								X	X			
XX 机场-4				X											
XX 机场-6					X										
XX 机场-3				X							X	X			
飞机(1) 北部突击											X	X			
飞机(1) 南部突击													X	X	
飞机(1) 中部突击															X
预警机-1											X	X			
预警机-2													X	X	
飞机(2) 北部护航													X	X	
飞机(2) 南部护航														X	X
飞机(2) 中部护航															X

图 2 作战平台之间的通断矩阵

Fig. 2 The connect-disconnect matrix of operational platforms

### 3.2 中分辨率通信系统模型

对于现在的信息化条件下的作战仿真推演,通信的连接性和可获得性不是很确定,而这种不确定性也不能用单一的概率不考虑重发的方式合理地模拟。通信仿真应用需要对以下要素进行详细描述:消息、多网通信方案、网络、平台层次的链路终端和通信节点及一般的通信协议,但不需要对特定通信系统协议进行模拟,这时候可以应用中分辨率的通信系统模型,该模型的主要建模内容如下。

1) 消息类型。作战过程中消息类型主要包括点迹信息、轨迹信息、指控信息和回执信息。其中探测信息是指各种传感器探测到的点迹信息,轨迹信息是指信息融合后的敌方平台的运行轨迹信息,指控信息是指指挥员下达的指控命令,一般接受到指控命令后会发回回执信息。

2) 链路终端与通信节点。链路终端与通信节点成对出现,并且与通信网络相对应。链路终端主要参数包括通信范围、覆盖面积、通信性能和工作环境等参数,通信节点主要包括最大连接数、通信深度/高度等参数。

3) 通信网络。根据不同的通信协议,可以将通信网络分为广播网络、IP 网络和点对点网络等。广播网络在任意时刻,网络中只能有一个参与者发送信息,其他参与者接收信息,传输一旦完成,从所有等待发送消息的参与者中以均匀分布的方式随机抽出一个来发送信息。美军 Link-16、Link-11、Link4A 等均为广播网络。IP 网络针对特定的 IP 号段进行联网,美军的 ISR 网络(情报、监视和侦察网络)为 IP 网络。对于点对点

通信,只能有一个发送者和一个接受者能在用户定义的独立“信道”上进行通信。在某个点对点通信通道上的传输完成后,如还有消息待发送,下一个网络传输参与者将是当前发送者或接收者。当前使用该信道的发送者和接收者都有数据要发送给对方,以均匀抽签的方式决定哪一方先发送数据,随后另一方发送,如果只有一方要发送数据,由该方发送,如果双方都没有数据发送,整个通道释放给网络。美军的 TCDL 为点对点网络。

4) 通信方案。由一系列通信方案要素组成,通信要素包括发送者、接受者(或广播)、消息内容、消息路由组成,每个路由由若干(至少一个)路由段组成。每个路由段可以位于不同网络上。通信指令传输的前提是建立通信方案要素,该要素中,轨迹消息和指挥消息必须通过非广播方式(可以是广播网络)进行传送。

5) 路由选择。在作战过程中,信息的传输可能有多条路由,并且某一个通信节点被击毁之后,信息的路由也将发生变化,因此需要制定一定的路由选择策略,本文的路由选择策略如图 3 所示。

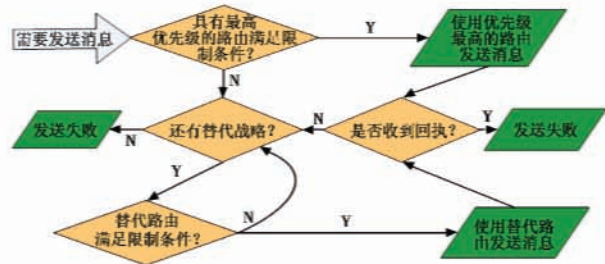


图 3 信息路由选择策略

Fig. 3 The information routing strategy

### 3.3 高分辨率通信系统模型

高分辨率通信模型与中分辨率通信模型相似,但对链路终端和网络基于特定的通信协议进行设计,如 Link-11、Link-16 和 TRAP/TRE 等。高分辨率的通信模型适合于针对某种通信的链路终端和网络进行效能评估的作战应用<sup>[9-11]</sup>,无法通过抽象为某一类模型进行统一表示。表 4 所示为本文实现的某一个通信模型的主要参数。

表 4 高分辨率通信模型的主要参数

Table 4 The parameters of the high resolution communication model

名称	属性	值
通信范围	最大通信范围/nm	数值
	基于范围的通信误码率	列表
	是否使用最大通信范围	是否
覆盖 - 面积	地球半径倍数	数值
	通视天线高度/m	数值

续表

名称	属性	值
工作	波束宽度/dB	数值度
	BER 表名	列表
	通信信道模板列表	模板
	装备兼容能力	列表
	跳频速率/Hz	数值
	最大波束数	数值
	最好的天线对抗模式	列表
	接收概率门限	数值
系统备份	备份激活计算方法	自动
	备份激活延迟均值/s	数值
	备份激活最小延迟/s	时间
	备份激活延迟标准方差	数值
	备份激活最大延迟/s	时间
	是否支持关键系统备份规划	是否
性能	一般传输最大延迟/s	时间
	一般传输最小延迟/s	时间
	入站速率/(bit · s <sup>-1</sup> )	数值
	是否使用独立入站、出站速率	是否
	出站速率/(bit · s <sup>-1</sup> )	数值
	传输延迟决定方法	列表
双向传输速率/(bit · s <sup>-1</sup> )	数值	

### 4 仿真验证

本文介绍的通信系统模型已经集成到海军某对抗仿真系统当中,使用中分辨率通信模型建立了实验案例的防御体系的通信网络(非真实),如图 4 所示。

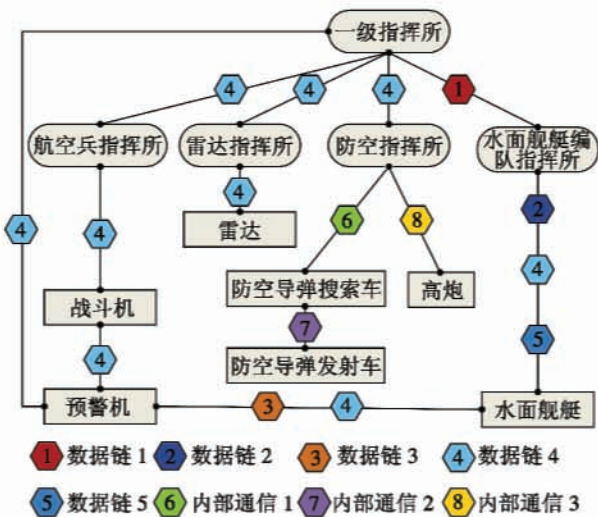


图 4 案例中的通信网络

Fig. 4 The communication network in a case

通过对通信网络的建模与仿真,实现了以信息系统为核心的仿真框架,能够充分体现卫星、雷达站、预警机等主要信息网络节点信息获取、信息处理和信息传输能力对作战效能的影响。该想定对案例中防御体系在通信和指控能力等信息作战方面存在的短板和瓶颈问题进行了研究,提出了该案例中现有防御体系下一步建设的方向和重点。

### 5 结束语

本文详细描述了一种“以 C<sup>4</sup>ISR 为中心建模”的作战仿真系统的建设思路,针对作战仿真系统中通信系统的建模与仿真展开了深入的研究,对通信系统的基本概念和术语进行了定义和描述,建立了通信系统的模型框架和通用数据处理模型框架,体现了战场信息传输、处理、存储、表示的规范性、一致性,形成统一的战场信息网络,构成一个无缝整体。在此基础上,提出了完整的多分辨率的通信系统建模方法,在作战仿真系统中实现了“低”、“中”两个层次分辨率的通信模型和个别高分辨率的通信模型。最后,在海军某仿真系统中对该模型进行了仿真验证,仿真试验表明,该通信系统模型满足海军某作战仿真系统的作战需求,提高了作战仿真的真实性和合理性。但本文提出的多分辨率的通信系统模型到目前为止主要实现了低分辨率的通信模型和中分辨率的通信模型,由于高分辨率通信模型中通信协议的复杂性和多样性,目前还无法对所有通信系统进行高分辨率建模。为了满足对某一通信系统对作战效能影响的论证,必须建立多种不同高分辨率的通信模型,因此,高分辨率通信模型的实现是将来工作的重点。

### 参考文献

- [1] 杨兰,贾连兴,李兴德. 军事通信系统仿真探讨[C]//系统仿真技术及其应用学术会议论文集,2009:410-413.  
YANG L, JIA L X, LI X D. Discussion on military communication system simulation[C]//System Simulation Technology and Application Conference, 2009:410-413.
- [2] 常路. 无中心军用数字通信系统的设计与实现[D]. 北京:北京邮电大学,2011.  
CHANG L. Design and implementation of no center of military digital communication system[D]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications, 2011.
- [3] 汪勇,张长春. 军兵种通信[M]. 武汉:中国人民解放军通信指挥学院,2008.  
WANG Y, ZHANG C C. Military communication[M]. Wuhan: The PLA Communication Command Institute, 2008.
- [4] TANG H, ZHANG J, SU K. On evaluation model of military information network based on multilevel gray evaluation method[C]//Proceedings of the 27th Chinese Control Conference, 2008:113-116.
- [5] RASHID A H Y, ELLIS G A, AWAN M. A simple propagation model for broadband powerline communications system[C]//The 4th International Conference on Intelligent and Advanced Systems, 2012:307-310.

(下转第 32 页)

- trol for simultaneous arrival of multiple UAVs [J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2010, 31(4): 797-805.
- [7] ZHAO S Y, ZHOU R. Cooperative guidance for multi-missile salvo attack [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2008, 21(6): 533-539.
- [8] 张庆杰. 基于一致性理论的多 UAV 分布式协同控制与状态估计方法 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.  
ZHANG Q J. Distributed cooperative control and state estimation for networked multiple UAVs based on consensus theory [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- [9] LI J, XU S, CHU Y, et al. Distributed average consensus control in networks of agents using outdated states [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2010, 4(5): 746-758.
- [10] SABER R O, MURRAY R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(9): 1520-1533.
- [11] 杨军, 朱学平, 朱苏朋, 等. 飞行器最优控制 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2011.  
YANG J, ZHU X P, ZHU S P, et al. Optimal control of aircraft [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2011.
- [12] 冯新磊. 符号矩阵和多智能体系统一致性研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2011.  
FENG X L. Study of sign pattern matrix and consensus of multi-agent systems [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2011.
- [13] CAO Y, REN W, CHEN Y Q. Multi-agent consensus using both current and outdated states [C] // IFAC World Congress, Seoul, Korea, 2008: 2874-2879.
- [14] 陈岩, 苏菲, 沈林成. 概率地图 UAV 航线规划的改进型蚁群算法 [J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(6): 1658-1666.  
CHEN Y, SU F, SHEN L C. Improved ant colony algorithm based on PRM for UAV route planning [J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(6): 1658-1666.

(上接第 14 页)

- [6] TOL J V, GUNZINGER M, KREPINEVICH A F, et al. Airsea battle: A point-of-departure operational concept [R]. The Center for Strategic and Budgetary Assessments, 2010.
- [7] 黄柯棣, 刘宝宏, 黄健, 等. 作战仿真技术综述 [J]. *系统仿真学报*, 2004, 16(9): 1887-1895.  
HUANG K L, LIU B H, HUANG J, et al. A survey of military simulation technologies [J]. *Journal of System Simulation*, 2004, 16(9): 1887-1895.
- [8] 军事科学院. 中国人民解放军军语 [M]. 北京: 军事科学出版社, 2011.  
Academy of Military Sciences. PLA military language [M]. Beijing: Military Science Press, 2011.
- [9] 丁笑亮, 陈树新, 毛玉泉. MC 法与 QA 法在通信系统仿真中的应用比较 [J]. *计算机仿真*, 2010, 20(7): 65-68.  
DING X L, CHEN S X, MAO Y Q. Application and comparison of MC method and QA method on simulation of communication system [J]. *Computer Simulation*, 2010, 20(7): 65-68.
- [10] 刘宝宏, 黄柯棣. 多分辨率建模的研究现状与发展 [J]. *系统仿真学报*, 2004, 16(6): 1150-1153.  
LIU B H, HUANG K L. Multi-resolution modeling: Present status and trends [J]. *Journal of System Simulation*, 2004, 16(6): 1150-1153.
- [11] 陈建华, 李刚强, 傅调平. 基于多分辨率的海军作战仿真建模研究 [J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(22): 7316-7319.  
CHEN J H, LI G Q, FU D P. Research of multi-distinguish modeling on warship formation operation simulation [J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(22): 7316-7319.

(上接第 19 页)

- IEEE International Symposium on Intelligent Control, 2001: 1-6.
- [7] SUJIT P B, GHOSE D L. Multiple UAV search using agent based negotiation scheme [C] // American Control Conference, 2005: 2995-3000.
- [8] WIERING M, SCHMIDHUBER J R. Fast online  $Q(\lambda)$  [J]. *Machine Learning*, 1998, 33(1): 105-115.
- [9] MILLAN J D R, POSENATO D, DEDIEU E. Continuous-action Q-learning [J]. *Machine Learning*, 2002, 49(2/3): 247-265.
- [10] TORRIERI D J. Statistical theory of passive location systems [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1984, AES-20(2): 183-198.
- [11] TSITSIKLIS J N, ROY B V. Feature-based methods for large scale dynamic programming [J]. *Machine Learning*, 1996, 22(1-3): 59-94.
- [12] GAO X, FANG Y W, HU S G, et al. Angle precision study on dual-aircraft cooperatively detecting remote target by passive locating method [C] // IEEE International Conference on Signal Processing, Communication and Computing, 2011: 1174-1178.
- [13] BUSONI L, BABUSKA R, SCHUTTER B D, et al. Reinforcement learning and dynamic programming using function approximators [M]. Florida: Automatic Control and Engineering Series, CRC Press, 2010: 49-51.