

8-5-2020

## Communication Model Modeling Method in Warfare Modeling and Simulation

Yuanfeng Li

*1. The 103rd Department, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China; ;*

Jianping Liu

*2. Unit 61683 of PLA, Beijing 100094, China;*

Chengying Shi

*1. The 103rd Department, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China; ;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Communication Model Modeling Method in Warfare Modeling and Simulation

### Abstract

**Abstract:** The limitation of the traditional communication model modeling methods was analyzed. On the basis of detailed analysis the requirements of communication modeling and simulation, the method of communication model modeling method was designed based on the communication effects. *It shows how to represent communication asset and combines the input and output of the model with the simulation verification scenario to illustrate the validity and applicability of the communication model. This method can effectively solve the impact analysis of communication problem for operational effectiveness, saves development costs and supplies the reference method of C<sup>4</sup>ISR model in warfare modeling and simulation.*

### Keywords

warfare simulation, communication model, based on effect, modeling method

### Recommended Citation

Li Yuanfeng, Liu Jianping, Shi Chengying. Communication Model Modeling Method in Warfare Modeling and Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(11): 2644-2651.

# 作战仿真通信模型建模方法

李元锋<sup>1</sup>, 刘建平<sup>2</sup>, 石成英<sup>1</sup>

(1.第二炮兵工程大学 103 教研室, 西安 710025; 2.中国人民解放军 61683 部队, 北京 100094)

**摘要:** 传统通信模型建模方法存在局限性, 分析了建模需求的基础上, 设计了基于通信效果的通信模型建模方法, 结合通信资产的表示, 从方法流程、模型输入、输出和仿真实验验证想定 4 个方面说明了通信模型的有效性和适用性。该方法能够有效的解决通信效果对于作战效能影响分析的问题, 节约了开发成本, 简化了模型设计, 为作战仿真指挥控制、通信、计算机、情报、监视和侦察 (Command, Control, Communication, Computer, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance, C<sup>4</sup>ISR) 模型设计提供了较好的参考方法。

**关键词:** 作战仿真; 通信模型; 基于效果; 建模方法

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2015) 11-2644-08

## Communication Model Modeling Method in Warfare Modeling and Simulation

Li Yuanfeng<sup>1</sup>, Liu Jianping<sup>2</sup>, Shi Chengying<sup>1</sup>

(1. The 103rd Department, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China; 2. Unit 61683 of PLA, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The limitation of the traditional communication model modeling methods was analyzed. On the basis of detailed analysis the requirements of communication modeling and simulation, the method of communication model modeling method was designed based on the communication effects. It shows how to represent communication asset and combines the input and output of the model with the simulation verification scenario to illustrate the validity and applicability of the communication model. This method can effectively solve the impact analysis of communication problem for operational effectiveness, saves development costs and supplies the reference method of C<sup>4</sup>ISR model in warfare modeling and simulation.

**Keywords:** warfare simulation; communication model; based on effect; modeling method

## 引言

C<sup>4</sup>ISR 模型是作战仿真<sup>[1-3]</sup>建模的重点和难点, 不仅需要对各类传感器、信息传输系统、信息处理系统进行建模, 还需要对指控行为进行建模, 构建观察、判断、决策、行动(Observe, Orient, Decide and Act, OODA)<sup>[4]</sup>的信息循环过程。通信是实现战

场态势信息和指挥控制数据传输的通道, 通信模型是作战仿真 C<sup>4</sup>ISR 模型的重要组成部分。

一般将通信建模与仿真的核心问题归结为“通信的重要作用是什么? ”。这一类问题实际上在某种程度上起了误导作用, 暗示着可以从一些物理属性的角度去寻找发现一些功能, 进而提供非物理的信息服务。传统建模方法通常对于通信网络本身进行详细的研究, 而对于分析诸如“通信的及时性、数量和质量对于作战效能的贡献度”的问题时较为困难。例如 SIMULINK<sup>[5]</sup>, OPNET<sup>[6]</sup>, NETWAR<sup>[7]</sup> 等通信网络仿真工具的建模重点在于对于网络本



收稿日期: 2014-06-23 修回日期: 2014-07-21;  
作者简介: 李元锋(1982-), 男, 江苏扬州, 博士生, 工程师, 研究方向为作战仿真; 刘建平(1966-), 男, 陕西蓝田, 硕士, 高工, 研究方向为作战仿真; 石成英(1964-), 男, 陕西西安, 博士, 教授, 研究方向为系统工程。

<http://www.china-simulation.com>

• 2644 •

身性能的研究分析, 文献[8-10]重点从物理通信网的装备组成去进行通信建模, 文献[11]基于 OPNET 仿真工具对于无线传感器的建模与仿真进行了研究, 文献[12]利用离散式事件规范<sup>[13]</sup>(Discrete Event System Specification, DEVS)进行网络建模的研究, 这些工具或研究方法在分析通信效果对于作战效能的影响局限性较大。传统建模方法另一个局限性是模型复杂, 建立复杂异构网络周期长且采集模型输入数据困难, 计算网络对于作战效能的影响运算量大, 大大降低了仿真的效率, 如文献[14]针对通信网络的覆盖范围的仿真进行了优化计算, 文献[15]针对城区军用地面高频段通信提取了评估分析指标。本文针对上述通信建模与仿真过程存在的问题, 提出了主要针对通信效果进行建模的方法, 该方法不是模拟整个通信系统, 不需要对具体的物理链路和节点体系结构进行模拟, 可以有效的解决通信对于作战影响效能分析问题, 同时简化了模型设计, 降低了模型的运算量, 且减少了开发周期和成本, 提高了经济效益和模型运行的效率。

## 1 建模需求

作战仿真通信模型的主要作用是模拟消息传递的时间延迟, 必须满足下列条件:

(1) 与通信系统物理特性相关的通信覆盖范围和速率, 在系统计算外确定, 作为通信系统的属性参数进行输入;

(2) 通信系统搭载的仿真实体可位于空间、空中、海面、海下或陆地, 每个通信系统的覆盖范围

随着搭载平台运动;

(3) 通信系统的建模精度达到消息层次, 能够仿真探测、目标跟踪轨迹更新、指控命令等消息的创建和传输, 包括消息的格式和内容。仿真实体的指控活动, 通过对消息的接收和处理进行驱动。

在建模过程中需要对挑选的消息进行处理, 消息挑选的标准为:

(1) 消息的延迟或传送失败会影响到战场空间实体的状态或感知, 如上级下达给下级的命令、情报监视侦察模型的传感器报告、战术弹道导弹发射警告等。如果传感器报告不能及时的传送到指控单元, 那么所包含的信息将会过时;

(2) 模拟消息传递过程出现的问题, 如网络流量负载、网络设备的吞吐量、所需通信设备由于调度不合理或毁伤造成的网络不可用, 部署时间或一些作战状态的改变而产生大量的网络数据传输或者无所需通信装备可用等。

## 2 建模方法

### 2.1 通信资产的表示

通信资产隶属于战场空间实体的一部分, 也可以作为独立的战场空间实体存在。战场空间实体表示真实世界中的实体, 可以表示的实体类型包括作战单位、指挥机构、基础设施、复杂系统等, 按照实体的功能构成分为指挥与控制、传感器、通信管理器、平台、资源管理器, 如图 1 所示。

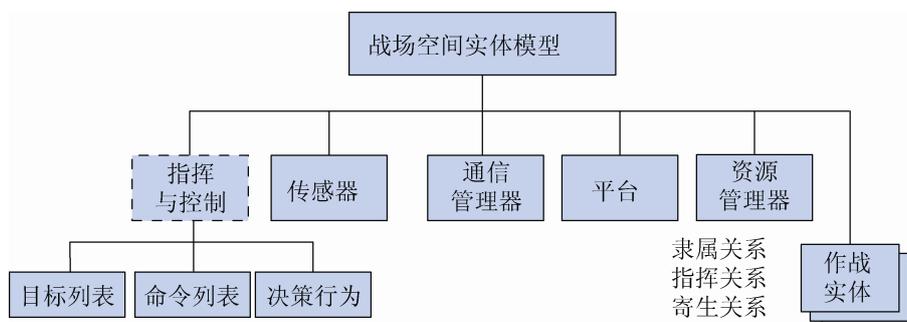


图 1 战场空间实体构成

指挥与控制是具有一定逻辑推理功能的软件组件，模拟战场空间实体的思考计划和决策能力，包括打击目标列表、命令列表和决策行为。传感器是战场空间实体的眼睛和耳斗，用于感知外界环境，具有探测、识别功能。资源管理器负责对战场空间实体的资源进行管理，资源决定了战场空间实体的能力，例如武器弹药和燃油都属于资源，缺少资源就无法完成相应的功能，就需要补充。平台模拟战场空间实体的运动特性，包括实体的位置、速度、方向等属性。通信管理器使用通信网络与其他战场空间实体进行通信，通信管理器提供下列功能：

(1) 消息提供者，提供通信网络传递消息；

(2) 消息订购者，订购(接收)相应种类的通信网络消息；

(3) 发送和接收消息的管理。

战场空间实体间的指挥与控制通过通信管理器创建和接收所有消息，通过消息提供和消息订购完成。消息发送实体的指挥与控制决定发送消息类型、发送时间和发送对象，通信管理器处理消息发送的细节，判断消息发送者和接收者之间有没有合适的网络连接，并选择最优化网络进行发送。如图 2 所示，为提供方战场空间实体和接收方战场空间实体通过一个逻辑通信网络建立连接，战场空间实体(提供)为消息提供方，战场空间实体(接收)为消息订购方。



图 2 战场空间实体通信的订购与提供

## 2.2 建模方法

### 2.2.1 方法流程

建模总体方法为建立基于通信效果(消息延迟)的通信网络，通过分析消息传递的及时性和可靠性完成通信网络对于作战效能贡献的分析。创建通信网络步骤为：

- (1) 用户根据需要建立通用的通信体系结构；
- (2) 创建关联的逻辑网络，将逻辑网络简化为全连接的“云”模式，将“云”用适当的参数进行表示，如网络容量、消息平均长度、消息订购者和提供者的信息等；
- (3) 通过静态结构选择或动态结构分配方式为战场空间实体分配响应的逻辑通信网络；
- (4) 为相应的战场空间实体选择通信机制和

通信数据，建立通信；

- (5) 通信资产的毁伤效果或外部环境对于网络能力下降的影响计算；
- (6) 计算网络总延迟，分析网络通信效果。

### 2.2.2 建立逻辑网络结构

仿真系统中表示通信的逻辑网络，不对具体的物理链路和网络节点进行建模，将逻辑网络简化为全连接的“云”，因此，可以表示任意数量的通信网络。例如，可以按指挥层次建立通信网络，来反映不同组织机构之间的控制信息流。也可以按照功能建立通信网络，来反映不同联合作战任务之间的信息流，网络与网络之间可以通过设置桥接参数项建立层次化的异构网络，建立的示例性逻辑网络如图 3 所示。

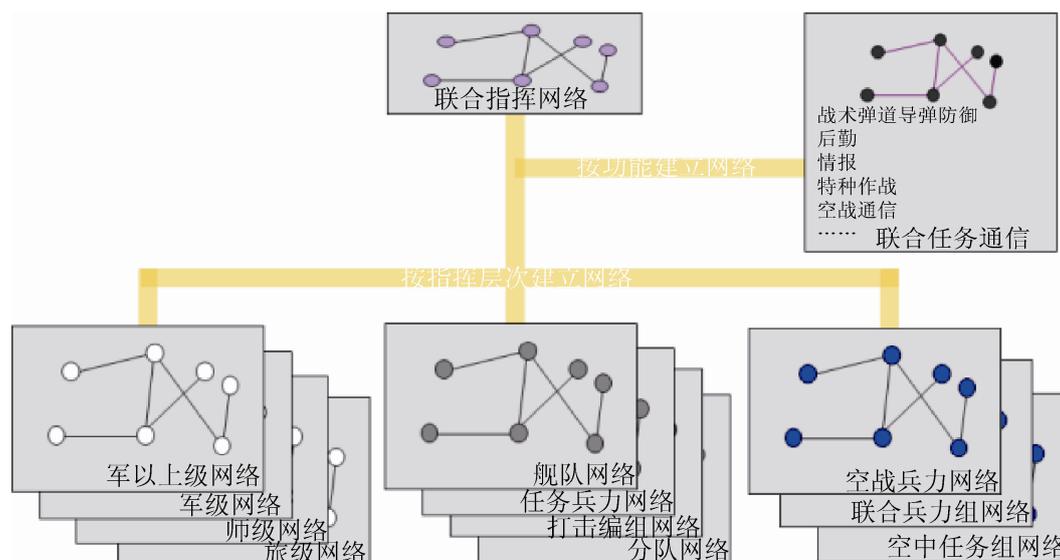


图 3 逻辑通信网络结构

逻辑通信网络结构根据战场空间实体的创建原则分为两类, 包括:

(1) 静态结构

在战场空间实体创建时, 分为静态战场空间实体(如指挥机构、舰船等)和动态战场空间实体(如空中飞行编队、两栖攻击波次部队等), 每个空间实体可以订购多个网络, 对静态战场空间实体指定相应的网络连接即为静态结构。

(2) 动态结构

动态的战场空间实体是在仿真过程中进行实例化的, 包括执行任务的空中任务编队、后勤运输和两栖攻击波次等实体, 通过两种方式来订购通信网络。一种方式是, 对于下级战场空间实体, 允许使用和隶属战场空间实体相同的网络。第二种方式用于空中作战编队网络, 可以根据设置的空中任务使用的网络映射来选择相应任务的任务编队并建立网络连接。

2.2.3 消息处理

(1) 消息类型的分类

战场空间实体向外发送适当类型的消息, 例如作战部队发送的位置报告, 当前状态及补给需求等, 将战场空间实体发送消息类型进行归类, 可根

据业务需要将消息进行具体分类。例如, 本文将消息分为 9 大类, 并且设置每类消息的需求速度, 如表 1 所示, 为示范性消息类型分类及消息需求速度的对应表。

表 1 消息类型分类及需求速度(示例)

序号	消息类别	消息需求速度
1	警告	<10 s
2	空中防御	<30 s
3	火力支援	<1 min
4	指控	<15 min
5	情报	<15 min
6	行动	<15 min
7	任务兵力状态	<1 h
8	后勤	>1 h
9	其他	>2 h

(2) 将消息类型分类映射到网络

每个消息类型分类可以与一个或多个网络关联, 并且要指定消息类型分类的优先级, 优先级范围为 1~99, 数字越小优先级越高。如表 2 所示, 有 2 个网络, 分别为网络 1 和网络 2, 网络 1 可以发送警告、情报和空中防御消息, 警告类消息优先级最高, 优先发送警告类消息。

表 2 消息类型分类映射通信网络

<http://www.china-simulation.com>

通信网络	消息类型								
	警告	空中防御	火力支援	指控	情报	行动	任务兵力状态	后勤	其他
网络 1	1	10	N/A	N/A	2	N/A	N/A	N/A	N/A
网络 2	N/A	2	N/A	1	N/A	5	N/A	N/A	N/A

### 2.2.4 对网络的订购与提供

分析研究通信设备对于网络性能的影响在通信建模中非常重要,实际上,任何通信网络的处理能力都来源于通信设备。通信网络容量的计算方法为:定义必需的通信资产,并制定响应资产的容量,当通信资产移动或遭受打击时,通信容量下降导致整个通信网络的容量下降。

在使用通信网络的战场空间实体中,通信资产分为两大类,分别为:

#### (1) 网络提供资产

每一个战场空间实体可以有多个网络提供资产,但每一个网络提供资产只能在一个网络中起作用。网络提供资产包括移动通信设备、卫星终端和天线等。随着这些通信设备在战场上的部署和配置,网络能力逐渐增强,当网络提供资产移动或遭受打击时,网络能力下降。

#### (2) 网络订购资产

每个使用网络的战场空间实体同时具有网络订购资产,像网络提供资产一样,每个网络订购资产需要定义在战场的配置和起效时间,在一个战场空间实体中,可以只有网络订购资产而没有网络提供资产。

### 2.2.5 通信资产的毁伤效果计算

网络提供资产的状态包括三种,分别为拥有完整能力、成功修复部分能力和无能力(正在维修)。当需要的网络提供资产可以工作时,每个资产对网络贡献相应的能力,当资产遭受打击时,提供资产在重新配置平均时间内(Mean Time To Reconfigure, MTTRc)的贡献为 0,在平均修复部分时间内资产的能力缩减用能力减少因子 CDF 表示,其中平均修复时间为从资产遭受打击到完全恢复所用的时

间(Mean Time To Repair, MTTR),在 MTTR 过后,资产能力恢复到 100%,如表达式(1)所示。

$$C_A = \begin{cases} 0 & t \leq \text{MTTRc} \\ C_{DF} & \text{MTTRc} < t \leq \text{MTTR} \\ 1 & t > \text{MTTR} \end{cases} \quad (1)$$

### 2.2.6 消息延迟的计算

网络中消息延迟包括 2 个部分:

- (1) 通信管理器通过订购资产导致的传输延迟;
- (2) 通信管理通过提供资产导致的传输延迟。

订购资产和提供资产计算传输延迟方法为:

$$T = \text{Uniform}[P_{\min}, P_{\max}] + \sum_{i=1}^N (T_i + R_i) \quad (2)$$

式中:  $P_{\min}$  表示提供/准备资产的最小准备时间;  $P_{\max}$  表示提供/准备资产的最大准备时间,时间服从均匀分布;  $N$  表示通信网络路径段总数;  $T_i$  表示提供资产路径段  $i$  的发送传输时间;  $R_i$  表示订购资产路径段  $i$  的接收传输时间。

图 4 显示了网络总延迟的计算方法,网络总延迟包括消息的传输延迟和网络的性能延迟两个部分,其中消息的传输延迟包括消息发送和接收延迟,网络性能延迟由消息负载量与网络容量能力共同决定。

## 3 模型输入输出数据

### 3.1 模型输入数据

模型输入数据主要包括通信网络的属性和通信网络的结构,通信网络定义包括通信网络消息类别、消息延迟、消息负荷、提供资产性能、订购资产性能等属性项,而通信网络结构则为订购资产和提供资产的映射表。

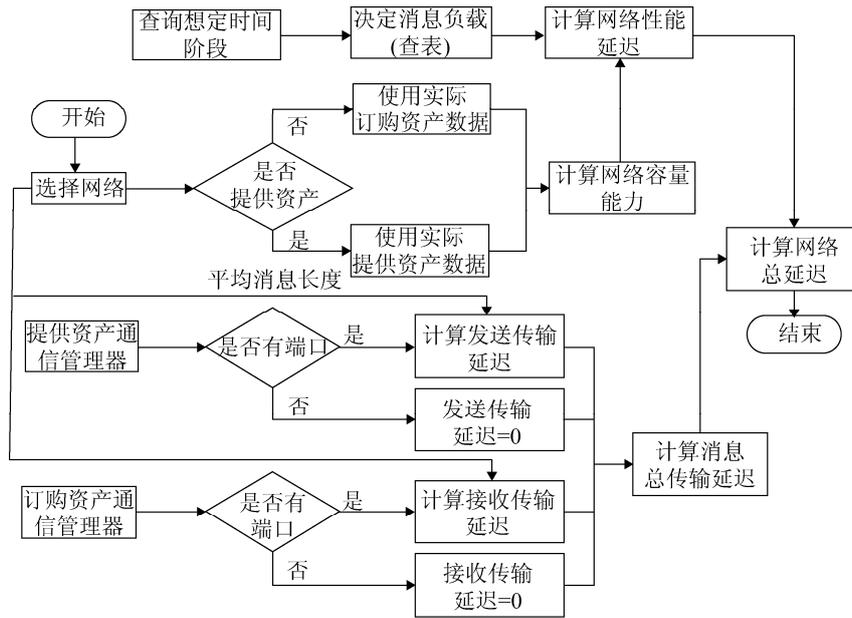


图 4 计算网络总延迟过程

### 3.2 模型输出数据

通信模型输出指标主要包括 2 类, 分别为:

- (1) 在单位时间内的事件数量统计, 如网络在某一时间阶段发送消息的数量;
- (2) 在单位时间内的事件状态均值, 如战场空间实体在单位时间内联系报告的接收/发送延迟;

输出数据的结构如图 5 所示, 包含上述 2 类输出指标。

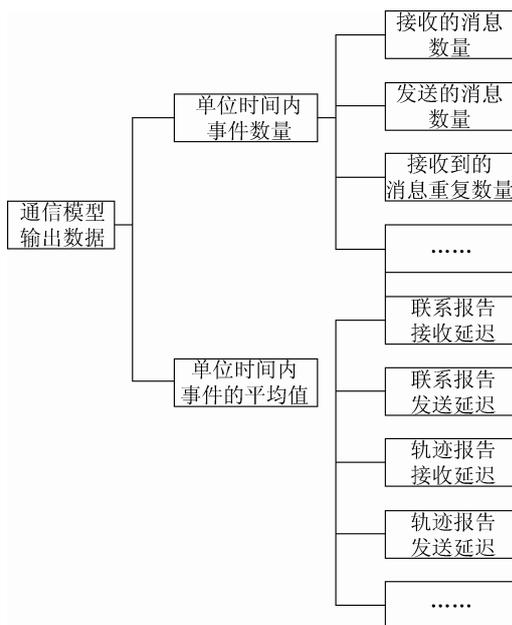


图 5 通信模型输出数据结构

### 4 仿真实验验证

为了验证通信模型的有效性, 将通信模型写入基于 Agent 的作战仿真系统, 该系统使用平台为 Windows 操作系统, 采用 VC++ 语言编写, 能够体现红蓝双方战场空间实体的对抗过程并采集相应的通信输出指标。建立如图 6 所示的实验验证想定, 参与仿真战场空间实体包括红蓝双方, 蓝方战场空间实体包括指挥所, 信息中心, 预警雷达站 1, 2, 3, 防空导弹实体 1, 2。红方战场空间实体包括两架来袭空地攻击机。主要仿真蓝方一体化防空网络通信连接情况, 通信网络分类包括指挥控制网、未融合目标轨迹网络和已融合的目标轨迹网络 3 类网络, 其中指挥控制消息为棕色箭头, 目标轨迹消息为红色箭头, 经过情报融合的目标轨迹消息为绿色箭头, 箭头指向表明消息传递的方向。预警雷达站 1 为防空导弹实体 1 提供目标轨迹信息, 预警雷达站 2, 3 为防空导弹实体 2 提供目标轨迹信息, 信息中心从预警雷达站 1, 2, 3 处接收目标轨迹信息, 并对信息进行融合, 将融合后的信息发送到防空导弹实体 1、防空导弹实体 2 和指挥所, 指挥所向所有仿真实体发送指挥控制消息, 如图 6 所示。

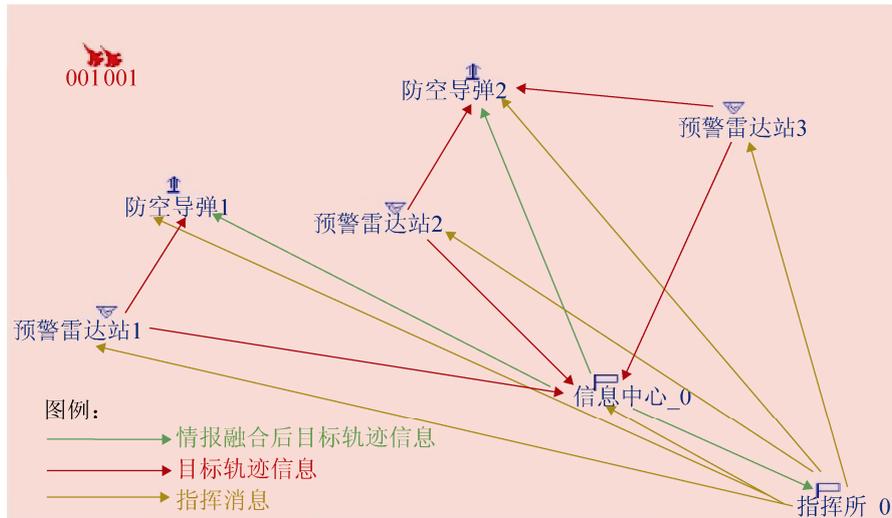


图 6 实验验证想定

该想定评估指标为单位时间内蓝方消息发送数量和接收数量，信息中心接收目标轨迹消息的延迟等指标。以蓝方消息发送数量为例，说明其计算过程。

假设  $C(t_q, r)$  是记录了  $r$  个样本数量时间间隔为  $[t_{q-1}, t_q]$  (或者  $q=1$  时时间间隔为  $[0, t_1]$ ) 内蓝方消息接收的数量，在运行过程中存储了下面的中间数据：

$$\begin{aligned}
 d_1(q, r) &= t_q \\
 d_2(q, r) &= 1 \\
 d_3(q, r) &= \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^r C(t_i, j) \\
 d_4(q, r) &= \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^r C^2(t_i, j) \\
 d_5(q, r) &= \sum_{j=1}^r C^2(t_q, j) \\
 d_6(q, r) &= r
 \end{aligned} \tag{3}$$

从这些中间数据计算最终的事件数量和报告时间  $t_q$  的关系， $t_q$  时刻  $r$  个运行样本评估指标的样本均值  $m$  计算公式如(4)式所示。

$$m(t_q, r) = \begin{cases} \frac{d_3(q, r)}{r} & r \geq 1, q = 1 \\ \frac{d_3(q, r) - d_3(q-1, r)}{r} & r \geq 1, q > 1 \end{cases} \tag{4}$$

$t_q$  时刻  $r$  个运行样本评估指标的样本标准差  $s$  的计算公式如(5)式所示。

$$s^2(t_q, r) = \begin{cases} \frac{1}{r-1} d_5(q, r) - \frac{1}{r(r-1)} [d_3(q, r)]^2 & r \geq 2, q = 1 \\ \frac{1}{r-1} d_5(q, r) - \frac{1}{r(r-1)} [d_3(q, r) - d_3(q-1, r)]^2 & r \geq 2, q > 1 \end{cases} \tag{5}$$

(5) 式中， $s(t_q, r)$  为标准差，评估指标一般报告  $s^2(t_q, r)$  的值。在 95% 置信度情况下样本均值  $m$  的样本标准方差计算公式为：

$$\frac{s(t_q, r)}{\sqrt{r}} \tag{6}$$

该实验想定持续时间为 1 h，想定采用事件触发结合时间步进方法，时间步长为 30 s，运行样本数量为 100 次。蓝方接收消息数量评估指标结果如表 3 所示。

表 3 蓝方接收消息数量

评估指标	蓝方接收消息数量		
样本数量	100		
时间/h	均值/个	标准方差	95% 置信度的样本标准方差
0.5	470.435	182.978	47.732 1
1	334.826	136.762	55.892 9

信息中心接收目标轨迹消息延迟指标结果如表 4 所示。

表 4 信息中心接收目标轨迹消息延迟

评估指标	信息中心接收目标轨迹消息延迟		
样本数量	100		
时间区间	均值/h	标准方差	95%置信度的 样本标准方差
0~0.5 h	0.000 423 87	0.000 697	0.000 127
0.5~1 h	0.000 426 23	0.000 671 2	0.000 123

通过实验验证想定,可以看出,该通信模型可以较好的采集信息的及时性、数量和质量指标,使用相应的实验设计分析方法(如部分因子设计法、拉丁方法),能够很好的针对信息的及时性、数量和质量分析对于作战效果造成的影响,可以针对作战效果不充分、提要提高能力的方面提出改进建议,可适用于作战方案的评估和装备体系的论证。

## 5 结论

本文从通信模型的重要性出发,阐明了传统通信模型建模和应用的局限性,针对存在的问题和弱点,提出了针对通信效果进行建模,详细说明了该套建模方法的流程及模型的输入输出数据,通过实验验证想定说明了模型的适用性,说明了本方法的有效性,同时,该方法可以为作战仿真 C<sup>4</sup>ISR 模型建模与仿真提供参考方法,为分析通信的及时性、消息质量和消息数量对于作战效果的影响提供了有效的实验工具。

## 参考文献:

- [1] Law A M. Simulation Modeling and Analysis [M]. New York, USA: The McGraw-Hill Companies, 2007: 5-8.
- [2] 黄柯棣, 邱晓刚, 查亚兵, 等. 建模与仿真技术 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2010: 1-6.
- [3] 胡晓峰, 罗批, 司光亚, 等. 战争复杂系统建模与仿真 [M]. 北京: 国防大学出版社, 2005: 9-30.
- [4] Brehmer B. The dynamic OODA loop: Amalgamating Boyd's OODA loop and the cybernetic approach to command and control [C]// Proceedings of the 10th International Command and Control Research Technology Symposium, 2005. Stockholm, Sweden: Department of War Studies, 2005: 1-5.
- [5] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. A survey on sensor networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102-114.
- [6] 孟晨. OPNET 通信仿真开发手册 [K]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 13-25.
- [7] Tran C V, Legaspi A K. Assessing impacts of communications on campaign-level warfare: online and offline co-simulations [C]// Military Communications Conference, 2005. USA: MILCOM, IEEE, 2005: 1179-1186.
- [8] 杨瑞平, 郭齐胜, 赵宏绪, 等. C<sup>3</sup>I 系统建模与仿真 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 80-116.
- [9] 王梦麟, 鲁学军. 一体化联合作战仿真通信兵模型体系研究与实践 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18(2): 66-72. (Wang M L, Lu X J. Study and Application on Model Architecture of Signal Corps in Integrative Joint Operations Simulation [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2006: 18(2): 66-72.)
- [10] Jeruchim M C, Balaban P, et al. Simulation of communication systems: modeling, methodology and techniques [M]. Germany: Springer, 2000: 11-32.
- [11] Cayirci E, Ersoy C. Simulation of tactical communications systems by inferring detailed data from the joint theater-level computer-aided exercises [J]. Simulation International, 2002, 78(8): 475-484.
- [12] 刘波. 基于 OPNET 的无线传感器网络建模与仿真 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010: 11-21. (Liu B. Modeling and Simulation of Wireless Network Based on OPNET [D]. Guangzhou, China: South China University of Technology, 2010: 11-21.)
- [13] Wainer G A, Broutin E, et al. Modelling Wireless Networks with the DEVS and Cell-DEVS Formalisms [C]// Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference. USA: WSC, 2013: 2923-2934.
- [14] 陈彬. 面向 DEVS 的多范式建模与仿真关键技术研究及实现 [D]. 长沙: 国防科技大学研究生院, 2010: 26-36.
- [15] Johnson B, Qi H R. Optimizing Coverage of three-dimensional Wireless Sensor Networks by Means of Photo Mapping [C]// Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference. USA: WSC, 2013: 2935-2946.
- [16] Hampton J R, Merheb N M, Lain W L, et al. Urban propagation measurements for ground based communication in the military UHF band [J]. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, 2006, 54(2): 644-654.