

一种基于分布式结构的雷达系统仿真引擎机制研究^{*}

王 磊^{a,b}, 卢显良^b, 陈明燕^a, 张 伟^a
(电子科技大学 a. 电子科学技术研究院; b. 计算机学院, 成都 610054)

摘 要: 随着系统规模的不断扩大,系统复杂度大大提高,采用单一的仿真程序已不能满足大规模复杂系统仿真的需求,采用分布式结构进行雷达系统仿真逐渐成为一种解决复杂系统仿真的主要方法。仿真引擎机制的研究是雷达仿真系统设计的关键,有利于深化和提升雷达仿真的效率。阐述了雷达仿真系统模型,采用分布式结构,提出了基于消息服务中心 MSC 和运行监控中心 SC 两层控制结构的仿真引擎机制,将用户接口服务与消息传递服务分离开来,增强了雷达仿真软件的灵活性和易操作性。在这种机制下,进一步提出了消息传递算法 MPA 并进行了系统性能测试和验证,仿真实验结果表明,MPA 算法可以快速、可靠地实现雷达系统内部各执行体间的互连互通,准确地完成雷达仿真过程的控制与监视。

关键词: 仿真引擎; 消息服务中心; 运行控制中心; 消息传递

中图分类号: TP311 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)01-0220-04
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.01.062

Study on engine mechanism of radar system simulation based on distributed architecture

WANG Lei^{a,b}, LU Xian-liang^b, CHEN Ming-yan^a, ZHANG Wei^a

(a. Research Institute of Electronic Science & Technology, b. School of Computer, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: With the expansion of the scale and the promotion of the complexity of system, using the single simulation program has not been able to meet the demand of large-scale complex system and the method of radar system simulation based on distributed architecture becomes a solution for complicated system simulation. Study on the engine mechanism in distributed architecture is the key for the design of radar simulation and more conducive to deepen and improve radar simulation efficiency. This paper firstly expounded the radar simulation system model and then proposed two level control structures of simulation engine mechanism based on the message service center and runtime monitor center in distributed architecture in order to detach user interface service from message passing service and to enhance the flexibility and usability of radar simulation software. Under this mechanism, it put forward the message passing algorithm (MPA) and made the system performance test and verification. The simulation results show that MPA in this mechanism can fleetly and reliably realize the interconnection and communication between executable processes of radar simulation system and can accurately monitor the course of radar simulation.

Key words: simulation engine; message service center; runtime monitor center; message passing

0 引言

雷达系统仿真是在计算机上模拟、再现真实雷达系统在不同场景中的工作机理和过程,从而求解、验证和评估真实雷达系统特性、效能等方面的一套方法。通过系统仿真能够达到缩短研制、装备周期等目的,为系统设计、系统实验提供必要的理论和实验依据。作为雷达仿真系统的核心组件,仿真引擎主要负责时间推进、调度运行、仿真控制、数据存储,并为仿真运行过程中的态势显示提供交互控制。文献[1]提出了一个与 SMP2 兼容的仿真引擎设计与实现,给出仿真引擎的运行过程、运行状态和组件构成,并通过仿真应用环境检验了其有效性。文献[2]针对 SMP2 仿真引擎目前只支持串行仿真,在多个核平台上无法充分利用多个处理器核的计算资源的问题,研究了并行 SMP2 仿真引擎的体系结构、运行过程及运行状态。文献[3~5]把仿真引擎看做 HLA 仿真联邦中的特殊成员,仿真引擎由仿真调度器、仿真控制器和数据记录器组成。文献[6]采用 JavaSniffer 收集所有智能体消息传递信息并实时输出显示。文献[7]在 Blue Gene/L 超级计算机设计中引入消息层结构实现低层次应用程序接口,消息层采用队列方式对接收和发送消息进行管理。由此可见,对仿真引擎的研究主要分为两类:a)针对特定应用开发(如与 SMP2 兼容的仿真引擎等),仿真引擎相对封闭,不具有通用性和扩展性;b)以国外仿真引擎(如 HLA/RTI)为基础开发的软件系统,虽然具有较好的通用性和扩展性,但是应用和技术上受制于人,无法形成核心技术和自主知识产权。

收稿日期: 2011-06-30; 修回日期: 2011-07-26 基金项目: 国防预研基金资助项目; 教育部重点实验室培育基金资助项目

作者简介: 王磊(1980-),男,河南鹤壁人,助理研究员,博士研究生,CCF 会员,主要研究方向为雷达系统仿真技术、并行计算技术(cmyan@uestc.edu.cn); 卢显良,男,教授,博导,主要研究方向为计算机体系结构、计算机网络; 陈明燕(1980-),女,河南南阳人,助理研究员,博士研究生,主要研究方向为雷达系统仿真、雷达数据处理技术; 张伟(1974-),男,四川成都人,副研究员,博士,主要研究方向为雷达系统仿真、雷达信号处理技术。

本文采用分布式结构对雷达进行系统级次仿真,把各功能模块分散地部署在一些节点机上,并通过以太网连接起来。各节点遵循一致的仿真通信接口标准,并由统一的仿真系统调度中心控制,协同完成仿真定制任务。仿真引擎划分为两层控制结构:上层提供用户使用接口和状态监控显示服务;下层提供消息路由服务,通过消息传递方式驱动各仿真线程正确执行仿真计算任务。相比传统的单机系统仿真而言,采用分布式结构进行系统仿真既可以充分扩展系统的 CPU 资源,提高系统的处理能力;又可以充分扩充系统的存储空间,有效解决系统的 I/O 瓶颈。本文介绍了雷达系统级次仿真模型的内涵,对分布式结构下仿真引擎控制机制进行研究,给出运行监控中心 SC 的结构框图和消息服务中心 MSC 树状层次链表结构,提出基于两层控制中心结构和树状层次三级链表的仿真引擎消息传递算法 MPA。通过仿真实验对某型雷达软件仿真系统和 MPA 进行性能测试和分析。

1 雷达仿真模型

1.1 基本构成

整个仿真系统划分为四个分系统:目标仿真环境系统、雷达信息处理系统、显示与评估系统和仿真系统引擎,如图 1 所示。目标环境仿真系统主要包括对各类目标(舰船、飞机、导弹等)的散射点模型和运动模型以及环境杂波、噪声建模和仿真;雷达信息处理系统主要包括对核心算法(资源调度、信号处理、数据处理、目标识别、宽带成像等)的建模和仿真;显示与评估系统主要包括作用距离、跟踪及检测精度、识别率、跟踪批次等指标的评估和雷达及环境中各类数据的显示;仿真引擎主要负责上述三个分系统的交互连接与通信,控制整个雷达仿真过程的准确推进,完成雷达系统仿真任务。

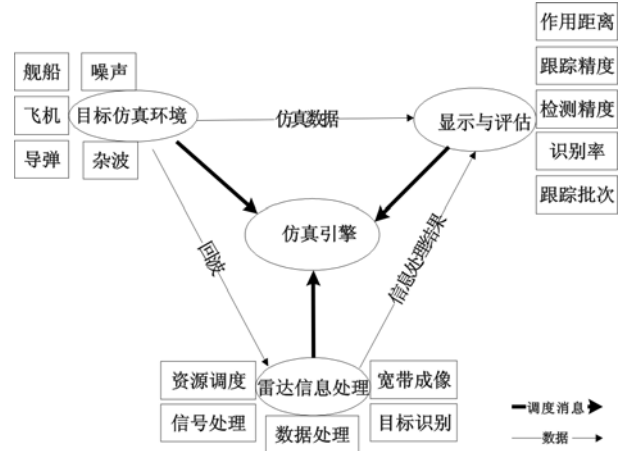


图1 雷达仿真系统构成

1.2 分布式结构

将雷达仿真系统看做是一个任务集,由多个功能不同的任务模块组成。每个任务模块可以布置在不同的节点机上,彼此通过模块间的通信机制进行一定的交互。从系统部署架构的角度上来看,雷达仿真系统表现为一个任务分散、位置分布、消息互连的分布式系统。任务的分布性将整体功能拆分为多个功能块,由不同的仿真子系统或仿真线程实施完成,这样可以大大降低系统设计的难度;位置的分布性便于将更多的节点资源引入到系统中,可以大大提高仿真系统处理的速度和效率。

采用分布式结构使系统具有良好的扩展性,有利于将已有仿真软件与第三方平台连接起来以构成规模更大的系统仿真平台,合理重用仿真资源。图 2 给出了基于分布式结构的雷达仿真系统结构框图,构成系统的各模块功能描述如表 1 所示。

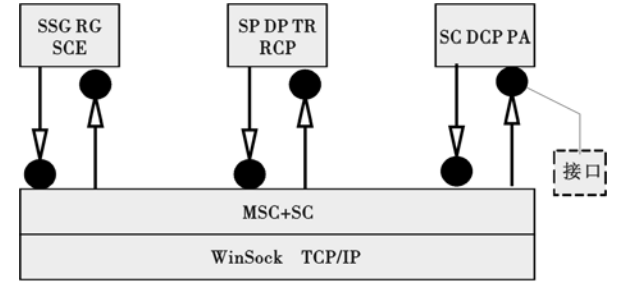


图2 基于分布式结构的雷达仿真系统结构框图

表 1 仿真成员功能列表

仿真成员	功能描述	分系统
SSG	仿真场景生成	目标仿真环境系统
RG	回波模拟生成	
SCE	目标散射中心提取	
RCP	雷达资源调度	雷达信息处理系统
SP	雷达信号处理	
DP	雷达数据处理	
TR	雷达目标识别	
DCP	雷达终端显示	显示与评估系统
PA	数据分析	
SC	运行监控中心	仿真系统引擎
MSC	消息服务中心	

2 仿真引擎

雷达仿真系统各功能模块通过软件方式实现,最终表现为由具有高内聚松耦合特性、拥有独立执行能力的多个仿真线程体聚合在一起所构成的雷达系统仿真软件。仿真引擎是整个雷达仿真软件的控制核心,负责各仿真线程体相互间的消息通信。仿真消息代表不同的计算步骤,由仿真引擎机制保障消息驱动步骤的准确执行。

2.1 引擎机制

仿真引擎如图 3 所示划分为两层控制结构:上层提供用户使用接口和状态监控显示服务;下层提供消息路由服务,通过消息传递方式驱动各仿真线程正确执行仿真计算任务。系统仿真平台搭建在 TCP/IP 协议之上,通过有可靠保证的 TCP 传输服务实现消息传递。消息服务中心(MSC)在整个系统中扮演着执行中心的角色,负责消息接收、消息解析、消息发送。消息路由是仿真模块消息发送和接收的关系折射,反映整个预警仿真软件系统执行流程。消息路由采用静态路由表配置方式,通过路由描述文件的载入、解析、映射,实现软件仿真系统的逻辑链路。作为整个雷达仿真系统的执行调度中心,消息服务中心实时监听接收来自其他仿真成员的消息请求,多种多样的消息代表多种多样的执行动作,成员间消息通过 MSC 链成一条条执行链,从而确定了雷达仿真系统内部多种多样的执行链路。

2.2 运行监控中心

运行监控中心 SC(图 4)的核心部件是消息接收器、消息解析器和消息发送器。消息接收器负责接收来自 MSC 的仿真

消息。消息解析器负责对 MSC 发送消息进行解析;消息发送器负责发送响应消息给 MSC。SC 的对外接口表现为用户操作服务和状态监视服务。用户通过 SC 可以实现对系统仿真过程的控制,包括系统初始化、生成场景、引导计算、仿真启动、仿真暂停、继续运行、仿真终止以及仿真重置。同时,SC 还通过图形化表征方式实时地显示当前系统各仿真执程的运行状态和系统间消息传递信息及过程。

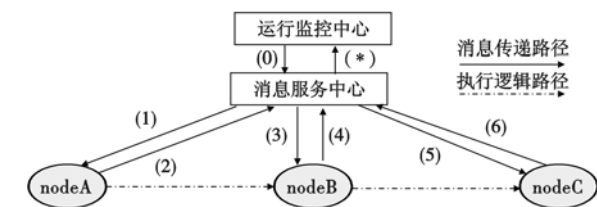


图3 仿真引擎结构

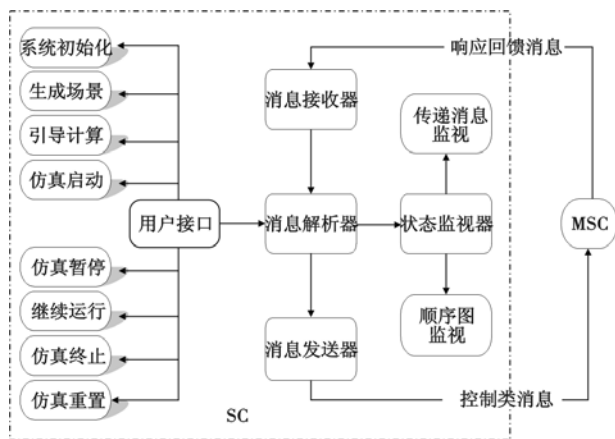


图4 运行监控中心SC结构框图

2.3 消息服务中心 MSC

消息服务中心 MSC 采用树状结构三级层次链表(仿真成员链表 MemberList、仿真消息链表 MessageList、目标成员链表 DestinationList)提供消息传递路由信息,如图 5 所示。仿真成员链表包含各仿真执程通信配置信息(如成员名、成员 IP 地址、成员通信套接字端口)以及传递消息的链表首地址;仿真消息链表包含消息字信息和消息传递去向即目标成员链表首地址;目标成员链表包含消息传递的目标成员。MSC 负责接收各仿真执程(包括 SC)的仿真消息,并通过消息传递算法(MPA)实现对仿真消息的路由。

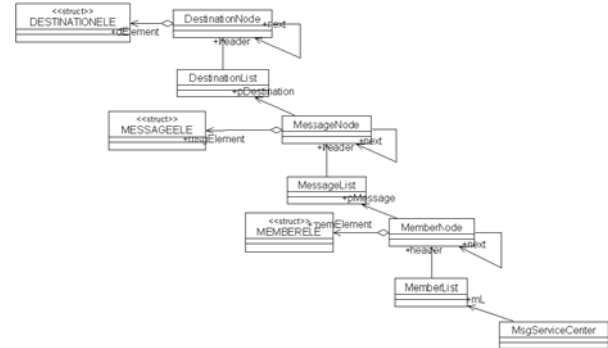


图5 消息服务中心MSC树状结构层次链表

2.4 消息传递算法 MPA

MPA 算法描述如下:
a) 接收从外部传递进来的仿真消息。
b) 从仿真消息中提取消息源名称和消息字,并用变量

membername 和 message 分别记录。
c) 对仿真消息进行判别,如果该仿真消息为非控制类消息,则置布尔控制变量 isToInterface 为 true(true 表示 MSC 将转发消息给系统监控中心,false 表示 MSC 可直接转发消息给目标执程),把 membername 和 message 分别转存至 simpartname 和 simpartmsg;如果该仿真消息为控制类消息则置布尔变量 isToInterface 为 false,并从 simpartname 和 simpartmsg 分别拷贝内容到 membername 和 message。

d) 根据消息源名称(即 membername 值)搜索仿真成员链表。如果不存在,则系统报错,进入 j)。

e) 根据消息字(即 message 值)搜索仿真成员 membername 的消息链表。如果不存在,则系统报错,进入 j)。

f) 搜索指定成员(即 membername 值)指定消息字(即 message 值)的目标链表首地址 pDes,并设游标指针 p 指向目标链表的首节点($p = pDes \rightarrow next$)。如果 pDes 不存在,则系统报错,进入 j)。

g) 判断游标指针 p 是否为空。如果为空,则跳出循环,进入 j);否则,取当前节点值(即消息转发目标成员名)赋给 destname。

h) 如果布尔变量 isToInterface 为 true,则转发反馈控制类消息[PART] + destname 给运行监控中心,告知运行监控中心更新目标成员状态;否则,转发 message 给目标成员,驱动目标成员完成指定计算。

i) 游标指针下移一个节点($p = p \rightarrow next$),返回 g)。

j) 传递消息结束。

3 仿真实验

a) 测试环境。在 Windows XP Professional 2002 操作系统平台上使用 Oracle 10g 作为仿真数据库;PC 机配置为 Pentium® Dual-Core CPU E5200 2.5 GHz,2 GB 内存,300 GB 硬盘;网卡为 Marvell Ynkon 88E8056 PCI-E Gigabit Ethernet。为了统一测量时钟,提高测量精确度,将 SSG、RG、SP、RCP、DP、TR、DCP、SC、MSC 部署在同一个节点机上对某型雷达软件仿真系统进行性能测试以及对 MPA 算法进行测试以验证仿真引擎机制的有效性。

b) 测试结果。将每个仿真执程处理操作划分为输入、计算和输出。采用 clock() 方法计算仿真执程各部分占用时间,得到以下测试结果。

图 6 给出了某型雷达仿真系统性能测试结果。其中,(a)~(f) 给出了各仿真执程运行时间开销,(g) 给出了仿真执程“输入—计算—输出”时间开销平均值对比结果。由此可见,由于仿真执程任务计算量的不同,RG 和 SP 的处理操作占用时间较长,RG“输入—计算—输出”操作占用时间平均值约为 5 s,SP“输入—计算—输出”操作占用时间平均值约为 1.7 s。其他各仿真执程“输入—计算—输出”操作占用时间平均值大约为几毫秒至几十毫秒。图 7 给出了 MPA 算法的测试结果。MPA 算法中,acceptTime 表示 MSC 阻塞等待外部仿真执程连接请求的占用时间,主要受外部仿真执程任务计算量影响;recvTime 表示 MSC 从通信套接字中接收仿真消息的占用时间;analysisTime 表示消息路由及消息转发的占用时间。测试结果

表明,recvTime 和 analysisTime 占用时间都在几毫秒以内,acceptTime 受 RG 和 SP 两个线程阻塞等待时间的影响,在某些时刻占用时间较长(接近 5 s),其他时间开销在几毫秒左右。通过仿真实验,MSC 可以较快地实现对接收消息的路由及转发。

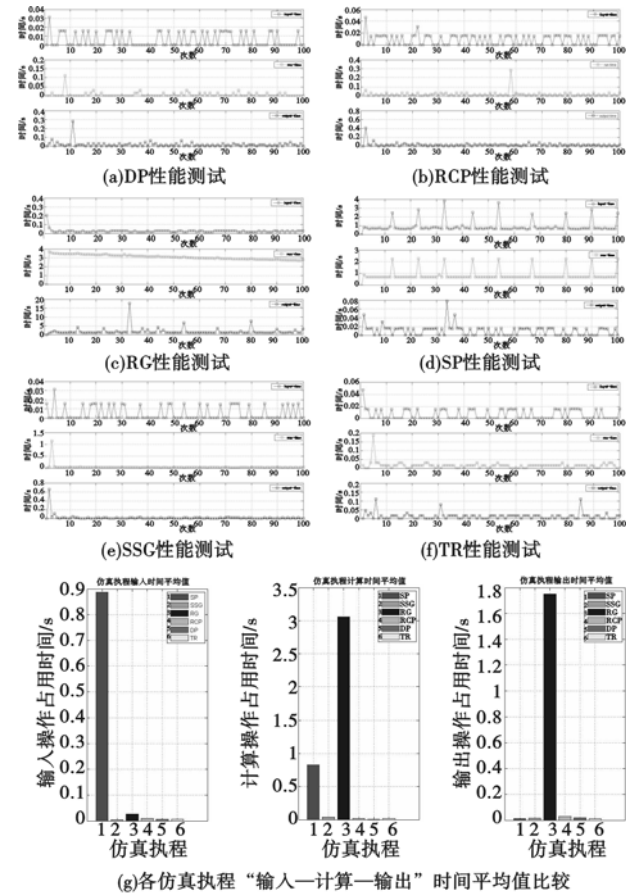


图6 某型雷达仿真系统性能测试

4 结束语

仿真引擎是雷达仿真软件的控制核心,采用分布式结构对雷达进行系统级次仿真,增强了系统的可扩展性。提出的基于消息服务中心和运行监控中心的两层控制结构,将用户接口服务与消息传递服务分离开来,增强了雷达仿真软件的灵活性和易操作性。在这种机制下采用的消息传递算法可以快速、可靠

地实现雷达系统内部各线程体间的互连互通,准确地完成雷达仿真过程的控制与监视。根据木桶原理,制约仿真系统效率的主要障碍在于 RG 和 SP 两个模块,前者是因为回波数据计算量庞大以及大数据量信息数据库存取时间耗费较长,后者是因为内部参数结构庞杂量大,从数据库读取数据范围较广造成时间占用较长。

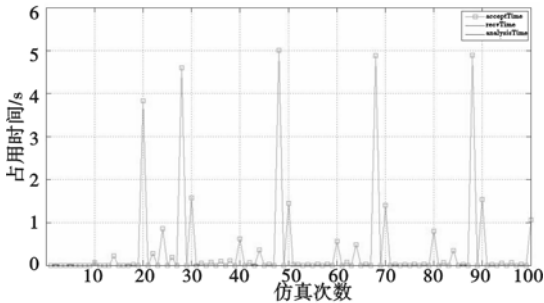


图7 MPA算法仿真结果

在下一步工作中,将对 RG 和 SP 两个仿真成员进一步优化,包括多核多线程处理技术、多线程数据存取方法等课题研究,从而提升现有仿真系统的运行效率。同时,也将进一步展开对现有雷达仿真引擎及系统结构并行化课题的研究。

参考文献:

[1] 李群,王超,王维平,等. SMP2 仿真引擎的设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2008,20(24):6622-6630.
[2] 苏年乐,周鸿伟,李群,等. SMP2 仿真引擎的多核并行化[J]. 宇航学报, 2010,31(7):1884-1890.
[3] 凌云翔,张小雷,廖虎雄,等. 基于 HLA 邦元结构的仿真引擎设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2005,17(11):2629-2632.
[4] 张立民,姜本清,王继武. 基于 HLA 的分布交互仿真模拟器的实现[J]. 海军航空工程学院学报, 2005,20(2):266-268.
[5] 凌云翔,邱涤珊,张小雷,等. 基于引擎成员的仿真调度问题[J]. 国防科技大学学报, 2005,27(3):106-109.
[6] KUBALIK J, TICHY P, SINDELA R, et al. Clustering methods for agent distribution optimization[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetic, Part C: Applications and Reviews, 2010, 50(1):78-79.
[7] ALMASI G, ARCHER C, CATARIOS J G, et al. Design and implementation of message-passing services for the Blue Gene/L supercomputer[J]. IBM Journal of Research & Development, 2005, 49(2/3):394-397.

(上接第 202 页)

[9] OZDAMAR L, EKINCI E, KUCUKYAZICI B. Emergency logistics planning in natural disasters[J]. Annals of Operations Research, 2004,129(1-4):217-245.
[10] YANG Sai-ni, HAMED M, HAGHANI A. An on-line emergency vehicle dispatching and routing model with area coverage constraints[J]. Transportation Research Record:Journal of the Transportation Research Board,2005(1923):1-9.
[11] VISWANATH K, PEETA S. Multicommodity maximal covering network design problem for planning critical routes for earthquake response[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,2003(1857):1-10.
[12] FIEDRICH F, GEHBAUER F, RICKERS U. Optimized resource al-

location for emergency response after earthquake disasters[J]. Safety Science,2000,35(1-3):41-57.
[13] CHEUNG R K, CHEN C Y. A two-stage stochastic network model and solution methods for the dynamic empty container allocation problem[J]. Transportation Science,1998,32(2):142.
[14] PSARAFTIS H N. Dynamic vehicle routing problems[M]//GOLDEN B L,ASSAD A A. Vehicle Routing: Methods and Studies. [S. l.]: North-Houand,1988:223-248.
[15] HAGHANI A, JUNG S. A dynamic vehicle routing problem with time-dependent travel times[J]. Computers and Operations Research,2005,32(11):2959-2986.
[16] HAGHANI A, SHAFABI Y. Bus maintenance systems and maintenance scheduling: model formulations and solutions[J]. Transportation Research,Part A:Policy & Practice,2002,36(5):453-482.