光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024052801

大阵列微波光子系统及器件跨域并行仿真技术研究

熊建伟[1,2]，孙　岩[1,2]，葛菊祥[1,2]，刘小勇[2]，
周　涛[1,2]，高　峰[2]，瞿鹏飞[3]，陈智宇[1,2*]

（1. 微波光子技术四川省重点实验室，成都 610036；2. 西南电子设备研究所，成都 610036；
3. 重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要： 针对大阵列微波光子系统和器件仿真难的问题，文章基于大阵列处理流程特性和微波光子技术特性，提出一种分布式跨域并行的仿真方法。该方法一是利用大阵列微波光子系统通道间独立传输特性，实现了跨系统结构域的流水线并行计算；二是利用大阵列微波光子系统前后处理时间的相对独立性，实现了跨时间域的数据并行计算。通过静态负载均衡策略分配计算资源使二者高效联合，实现了微波光子系统的快速仿真，解决了模型多、数据量大、仿真窗口长所导致的全系统仿真耗时长的问题。针对64阵列、400个模型的微波光子系统仿真，该技术将仿真时长从39小时缩短至23分钟，仿真效率提高了两个数量级，有望大幅度缩短微波光子工程样机的研制周期。

关键词： 微波光子；大阵列；系统仿真；分布式；跨域并行

中图分类号： TN29　**文章编号：** 1001－5868(2024)06－0939－06

Cross-Domain Parallel Simulation Technology for Massive Array Microwave Photonics Systems and Devices

XIONG Jianwei[1,2], SUN Yan[1,2], GE Juxiang[1,2], LIU Xiaoyong[2],
ZHOU Tao[1,2], GAO Feng[2], QU Pengfei[3], CHEN Zhiyu[1,2]

(1. Sichuan Provincial Key Laboratory of Microwave Photonics Technology, Chengdu 610036, CHN;
2. Southwest Electronic Equipment Research Institute, Chengdu 610036, CHN;
3. Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: To address the difficulty in simulations of massive array microwave photonics systems and devices, a distributed cross-domain parallel simulation method is proposed in this paper. First, the pipelined parallel computation across system structural domains is achieved based on the independent transmission between the channels of a massive array microwave photonics system. Second, parallel data computing across time domains is achieved by utilizing the relative independence of pre- and post-processing times. Furthermore, a static load balancing strategy is used to assist in allocating computational resources. These two approaches are effectively combined to achieve highly efficient simulation of microwave photonics systems, which addresses the issue of long simulation times caused by large amounts of data and models. For a 64-array microwave photonics system with more than 400 models, this technique reduces the simulation time from 39 hours to 23 minutes, resulting in a simulation efficiency improvement of two orders of magnitude. This advancement holds potential for significantly

收稿日期：2024－05－28.
基金项目：国家自然科学基金项目(U21A20507,62005228)；中央高校基本科研基金项目(2682021CX050).
* **通信作者：**陈智宇

reducing the development cycle of microwave photonics engineering prototypes.

Key words: microwave photonics; massive arrays; system simulation; distributed computing; cross-domain parallel

0 引言

微波光子属于多学科交叉的新兴领域，由于其具有长距离传输损耗低、大带宽、动态范围大、抗电磁干扰能力强等优点，已经逐步应用于雷达、精确测量等领域[1-4]。其中，大阵列微波光子系统可实现大带宽、高精度的信号检测，对其进行建模仿真是系统样机研制和关键技术参数验证中必不可少的环节。与传统微波和数字仿真系统不同，微波光子阵列系统仿真是由光学器件、微波器件、数字器件等多学科、跨域模型构成[5-7]，其仿真频率相差 3～4 个数量级，导致仿真数据量大。例如，对于典型大阵列微波光子系统，采样率为 100 GHz，则仿真 1 ms 时间窗口单个模型所产生的数据量高达 10^8。上述数据量会随着阵列规模和仿真模型数量的增加而成倍数增加，导致仿真系统数据的传递和计算负荷巨大。然而，由于微波光子系统复杂的系统拓扑和信号流传递方式，常用的分布式并行计算框架[8-12]无法直接应用到该系统仿真中。通常需要通过直接细分大量的时钟拍分步串行进行仿真，导致仿真耗时长达几十小时甚至上百小时，难以实现系统设计和仿真的快速验证。

针对大阵列微波光子系统，提出了一种跨域并行的分布式仿真方法。该方法充分结合大阵列处理流程特性和微波光子技术特性，一是基于大阵列微波光子系统通道间独立传输特性提出了跨系统结构域的流水线并行计算方法；二是基于微波光子系统前后处理时间的相对独立性提出了跨时间域的数据并行计算方法。通过静态负载均衡策略分配计算资源将上述两种方法高效联合，实现了微波光子系统的快速仿真，解决了基于信号流方式的宽带微波光子阵列系统仿真运行计算量大、耗时过长等问题，并将仿真窗口长达 1 ms 的 64 阵列微波光子系统的仿真时间从 39 小时缩短至 23 分钟，仿真效率提升了 2 个数量级，为大规模微波光子阵列系统的快速验证提供依据和指导。

1 系统组成与工作原理大阵列微波光子仿真系统构建

大阵列微波光子仿真系统由多个链路和基本器件串、并联而成，包括阵列天线、射频器件、光学器件和数字信号处理器件等，系统的原理图如图 1 所示。首先，64 阵元天线模型接收到雷达信号后发送给 64 路射频前端模型；接着，由光学前端模型将 64 路微波信号调制到 64 个波长不同的光载波上，并通过波分复用器合为 1 路信号；该信号通过放大器模型对光功率进行补偿后通过耦合器分成 8 路相同信号；每路信号通过色散系数不同的光纤后可形成 8 个不同指向的波束；最后通过光电探测器模型、隔直模型和变频模型实现光学信号到微波中频信号的转变，完成微波光子接收链路模型的构建。接下来，8 个波束的中频信号通过信号处理模型完成信号参数的检测。可以看出，在微波光子阵列仿真系统中，不同功能单元之间的信号流以串联的形式传递，而不同通道之间的信号流则以并联形式传输。系统中每个

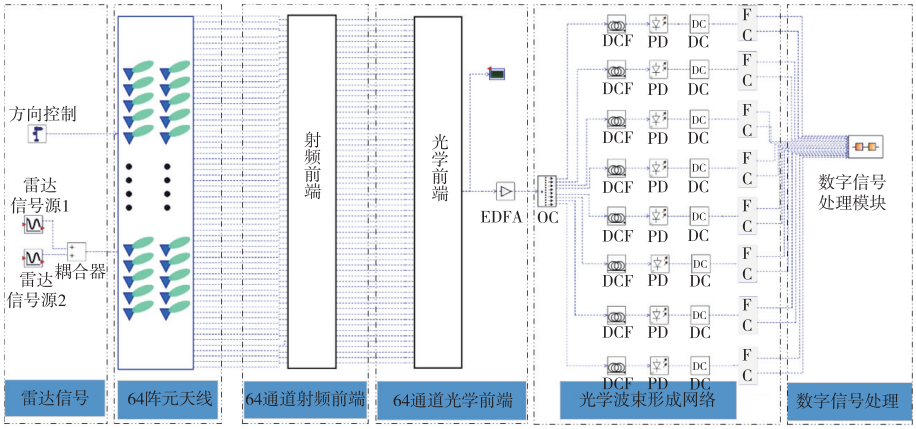


图 1 64 阵列微波光子系统仿真原理图

子链路都是由大量多层级模型组成的复杂系统，运行系统仿真时，信号数据流从雷达信号源开始，按照系统链路拓扑，历经各个层级的模型进行数值计算，直到系统拓扑的末端输出仿真计算后的信号，完成整个系统的一次信号仿真。

1.1　微波光子器件跨域并行仿真原理

微波光子器件是组成系统的基本单元，其仿真是基于时域的信号流仿真，其显著特点在于仿真过程在时间域和链路结构域存在大量数据相对独立的计算过程[13]，计算过程的数据独立性是实现仿真任务分解与并行执行的基础。因此，本文提出了时域和结构域联合的仿真任务分解与并行仿真，如图 2 所示。

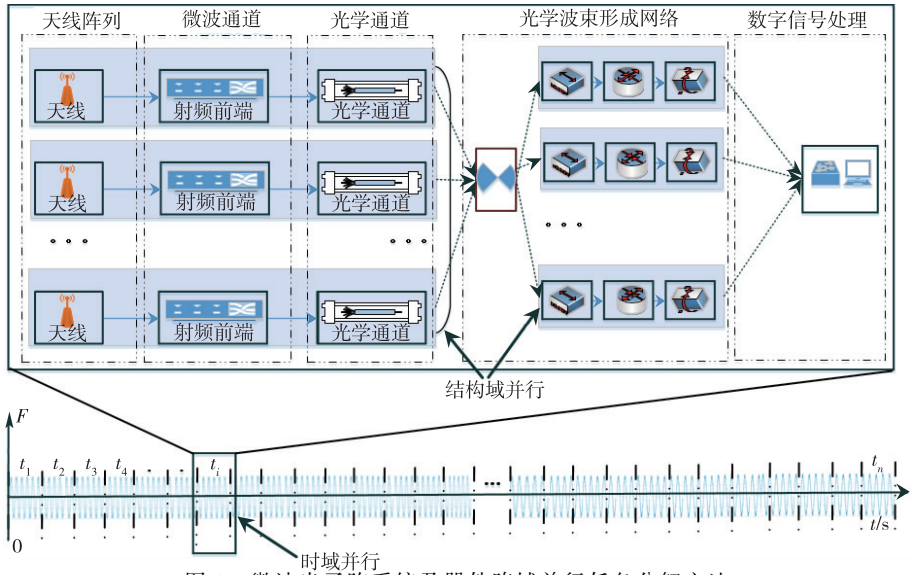


图 2　微波光子阵系统及器件跨域并行任务分解方法

在时间域上，微波光子阵列系统中除信号处理等少数功能单元之外，大部分射频与光学功能单元和器件内部无时序反馈回路结构。因此，对于此类无时序反馈回路的器件，在不同时间区间上的仿真过程互相独立、无耦合关系。所以可以在时间域上将全部仿真时间区间划分为细粒度的仿真节拍，同一器件模型在不同仿真节拍的计算过程互相独立、无数据依赖关系，从而可并行执行仿真[14]。对于具有 N 个逻辑核的并行仿真系统，时间窗均匀划分为 n 个时域信号段，设单个仿真时域信号段 t_i 的仿真耗时为 ΔT。则数据并行理论耗时为：$T(N)=\frac{n\cdot\Delta T}{N}(N\leqslant n)$，理论加速比为：$S(N)=N$。

在链路结构域上分为两方面，一是微波光子系统对信号的处理和传输分为接收天线、射频前端、光波合成、波束形成等多个阶段，两个相邻处理阶段可在同一时间段，分别执行两个相邻时间节拍的仿真。例如信号经阶段 1 处理后输出到阶段 2 进行处理，则在阶段 2 运行 t 时间节拍的仿真过程的同时，阶段 1 运行 $t+1$ 时间节拍的仿真过程，两个仿真阶段在相错节拍上的仿真过程同时运行，从而根据微波光子系统各处理阶段的连接先后关系，形成流水线式的并行处理仿真模式[15]。深度为 M 级的流水线系统，流水线各阶段仿真时长分别为 $\{T_1,T_2,T_3,\cdots,T_M\}$，则其流水并行耗时为：$T_f=\max\{T_1,T_2,T_3,\cdots,T_M\}$，则其理论加速比为：$S_f=\frac{\sum_1^M T_i}{\max\{T_t,T_2,T_3,\cdots,T_M\}}$。另一方面，微波光子系统仿真链路中存在大量平行链路结构，平行链路结构构成了互相独立的信号通道，也是链路中耗时最长的部分，各通道之间的信号在处理和传输过程中互相独立，且不存在数据依赖关系，因此可并行执行各个平行链路结构仿真。对于一个具有 L 个支路组成的平行结构阶段，并行执行的处理单元数量为 K，假设每个支路同构，且耗时均为 T_P。则其模型并行耗时为：$T(L)=\frac{L\cdot T_P}{K}(K\leqslant L)$，其理论加速比为：$S_P=K$。链路仿真在结构域上结合流水并行和模型并行两种模式，其综合加速比为：$S_S=\frac{K\cdot\sum_1^M T_i}{\max\{T_1,T_2,T_3,\cdots,T_M\}}$。

对于微波光子系统和器件仿真的跨域并行任务分解方法(图 2 所示),时间域与链路结构域呈现出正交关系,因此可联合使用数据并行、流水线并行与模型并行三种并行计算模式,对整个系统仿真进行多层并行任务分解,将复杂链路仿真分解为三个层级的并行仿真子任务。首先,根据仿真系统时间域的计算独立性,将仿真时间窗区间按一定并发度切分为一系列时间子区间,生成相应的雷达时域信号段(仿真数据),即采用数据并行的方式进行任务分解,形成第一层级仿真子任务;其次,根据仿真系统结构阶段性,采用流水线并行的模式,使相邻仿真阶段能够在错位的时间节拍上同时执行,时域信号段进一步均匀划分为流水处理子任务,形成第二层级仿真任务;最后,根据仿真系统阶段存在平行性(如微波通道),采用模型并行的模式,将本来串行执行的仿真阶段划分为平行执行的子任务,形成第三层级仿真任务。

设仿真系统按数据并行划分为 n 个第一级子任务,分配 N 个逻辑核的进行数据并行仿真;深度为 M 级的流水线并行划分为 m 个第二级子任务;按模型并行将耗时最长的流水阶段划分为 1 个第三级子任务,分配 K 处理单元并行仿真。设串行时流水线各阶段仿真时长分别为 $\{T_1, T_2, T_3, \cdots, T_M\}$,由于仿真系统中微波仿真阶段通道数最多且单通道耗时长,采用模型并行处理后该阶段所耗时长仍为所有仿真阶段中最长的仿真阶段。故联合三种并行模式的仿真理论加速比为:$S(N,K) = \dfrac{N \cdot K \cdot \sum_1^M T_i}{\max\{T_1, T_2, T_3, \cdots, T_M\}}$。

1.2 计算资源分配

本文建立的微波光子阵列仿真系统规模大、耗时长,若用单台普通工作站(单 CPU 16 核,32 G 内存)计算一个时间窗为 1 ms 的信号至少需要 1～2 天。利用微波光子阵列仿真系统跨域分解的特点,可采用分布式并行技术,将时域划分的子任务分配给多个计算节点并行计算,从而利用网络计算资源达到提高计算效率的目的。同时,将结构域划分的子任务分配给多子流水线进程进行计算,采用多线程技术缩短仿真耗时,从而实现整个系统仿真效率大幅提升。采用基于 Socket 网络通信的主节点/子节点结构,在局域网内建立工作站集群。可任选定一台工作站为主节点,其他计算工作站为计算子节点,其中,主节点与子节点之间通过心跳信号维护局域网内的计算资源列表,并实时监控系统内可用资源状态。

为了尽可能减少数据的通信耗时,避免由逻辑核的数据迁移带来的开销,本文基于静态负载均衡策略分配计算任务[16],如图 3 所示。在运行仿真实验项目之前,将仿真时间窗总时长按一定颗粒度划分为时域仿真任务序列。主节点可根据监控资源列表中各节点当前可用逻辑进程的数量和内存可用量,采用静态负载均衡策略计算各节点所需解算进

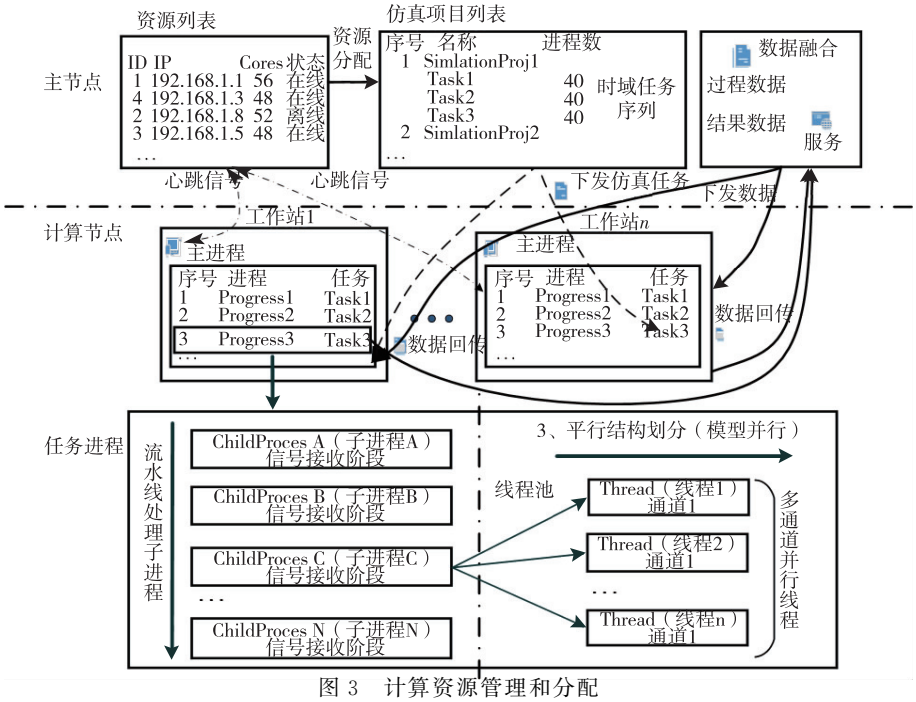


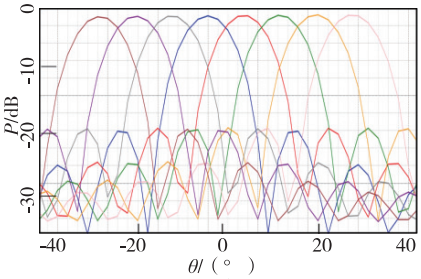
图 3 计算资源管理和分配

程(Process)数量，将时域仿真任务序列均匀分配至可用计算节点，将子任务(Task)与解算进程绑定，如果仿真任务总量超过解算进程总数，则将任务分批次进行均匀分配。

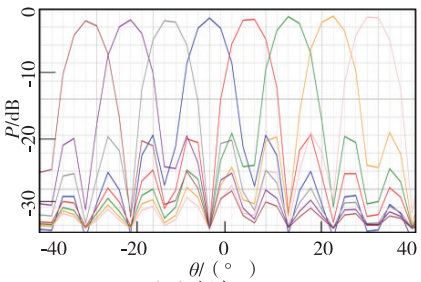
主节点完成时域任务分配后，通过网络下发仿真链路、资源部署设置指令至各个计算节点，在计算子节点按指令创建解算主进程并启动链路仿真，主进程按仿真流程将系统链路拓扑划分为多个仿真阶段，并为每个仿真阶段分别分配处理子进程，顺序执行的子进程按流水线方式运行，子进程之间通过共享内存传递信号数据；同时在具有大量平行结构的仿真阶段中，利用线程池技术为平行结构创建动态线程并行处理信号，缩短该仿真阶段的仿真时耗，本文采用保守同时间步机制[17]，为保证数据完整性和时序的准确性。

2　仿真实验

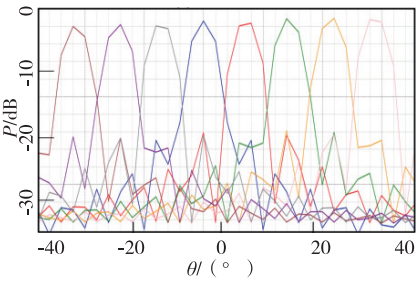
利用 5 台 Win7 系统的高性能工作站(双路 56 核，256 G 内存)，通过 TCP/IP 构建分布式并行仿真实验环境。以图 1 所示典型的 64 路信道微波光子阵列仿真系统作为测试案例，系统链路包含由器件、组件、模块等多层级模型组成的 400 余个模型，该系统的仿真波束如图 4 所示。从图中可以看出，在 6～18 GHz 的频率范围内，成功生成了指向 −30°，−22.5°，−15°，−7.5°，7.5°，15°，22.5°和 30°的 8 个波束，这与设计非常吻合，且没有出现波束发散现象。



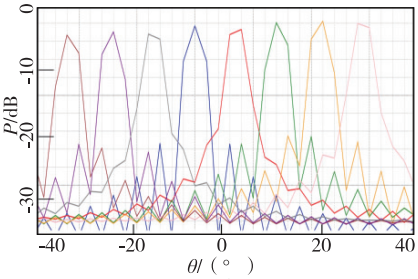
(a) 频率 6 GHz



(b) 频率 10 GHz



(c) 频率 14 GHz



(d) 频率 18 GHz

图 4　各个频点的波束

通过控制主进程数量对比各仿真模式总耗时如图 5 所示，在仿真时间窗口总时长为 1 ms 的情况下，随着核心数量的增加，串行仿真模式的总时间消耗保持不变，因为所有模型都仅使用一个核心运行；并行链路结构方法能够显著减少时间消耗(大约 15 小时)，但多核并行计算的利用率也不够高；时间并行方法将不同的时间间隔分配给不同的处理核心，并且随着核心数量的增加，仿真时间减少，在这种情况下，当使用 200 个核心时，仿真时间可以减少到 1 小时；所提出的方案结合了链路结构并行性和时间并行性，将仿真时间从 39 小时(串行模式)减少到 23 分钟，这种方法为大规模阵列微波光子学系统实现了两个数量级的效率提升。

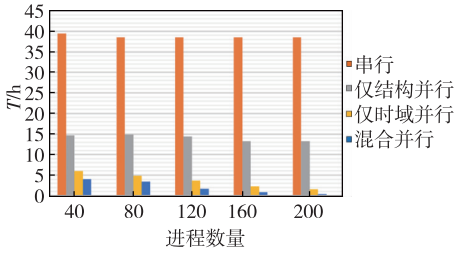


图 5　各仿真模式耗时随主进程数增加而变化

仿真时间窗口总时长为 1 ms 的仿真实验，纯串行仿真需要约 39 小时，本文的跨域联合仿真模式根据前文的理论加速比公式计算，加速度比约为 200。

$$S(N,K)=\frac{N\cdot K\cdot\sum_{1}^{M}T_i}{\max\{T_1,T_2,T_3,\cdots,T_M\}}\approx 200$$

经实验测试，本文的跨域联合仿真模式仿真耗

时约为23分钟，加速比约为101.7，实现了大阵列微波光子系统两个数量级的仿真效率提升，但与理论加速比相比低了近一半，这是由于系统仿真中数据IO与通信占据了相当高的消耗。

3 小结

针对由大量电光器件构建的大阵列微波光子系统，提出一种跨域并行的仿真方法，跨链路结构域实现了流水线并行，跨时间域实现了数据并行，并通过静态负载均衡策略将多个节点的计算能力进行整合，将数据和运算相应地分布到多个节点中，形成计算任务高效并行执行的状态，有效地克服单个工作站无法完成的数据密集型计算任务的限制，实现了微波光子链路的快速仿真，解决了由于模型多、数据量大、仿真窗口长而导致的全链路仿真耗时长的问题，为大阵列微波光子系统设计的快速验证提供理论参考。

参考文献：

[1] Ghelfi P, Laghezza F, Scotti F, et al. A fully photonics-based coherent radar system[J]. Nature, 2014, 507: 7492.

[2] Chen Z Y, Zhou T, Zhong X, et al. Stable downlinks for wideband radio frequencies in distributed noncooperative system[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(19): 4514-4518.

[3] Zhao J, Liu T, Wang B, et al. Distributed phase synchronization transmission based on fiber[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2019, 34(2): 64-67.

[4] Mao H. Information processing method of electronic warfare events based on communication technology[J]. Security and Communication Networks, 2022, 2022: 1939-0114.

[5] Chen Z Y, Yan L S, Pan Y, et al. Use of polarization freedom beyond polarization-division multiplexing to support high-speed and spectral-efficient data transmission[J]. Light: Science & Applications, 2017, 6: e16207.

[6] Chen Z Y, Yan L S, Pan W, et al. SFDR enhancement in analog photonic links by simultaneous compensation for dispersion and nonlinearity[J]. Optical Express, 2013, 21(17): 20999-21009.

[7] Chen Z Y, Zhong X, Jiang L, et al. Linearized microwave downconversion link based on fast and intelligent impairment equalization for noncooperative systems[J]. Chinese Optics Letters, 2023, 21(2): 023902.

[8] Robert F, Jun M, Kipp M. Optimization services: A framework for distributed optimization[J]. Operations Research, 2010, 58(6): 1624-1636.

[9] Gehlsen B, Page B. A framework for distributed simulation optimization[C]// Proceedings of the 33nd Conference on Winter Simulation, Proceeding of the 2001 Winter Simulation Conference, 2001: 508-514.

[10] Yücesan E, Luo Y C, Chen C H, et al. Distributed web-based simulation experiments for optimization[J]. Simulation Practice and Theory, 2001, 9(1/2): 73-90.

[11] Eldred M S, Hart W E, Schimel B D, et al. Multilevel parallelism for optimization on MP computers: Theory and experiment[C]// In Proc. 8th AIAA/USAF/-NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, 2000: 294-296.

[12] 任棕诜，任雄伟. DDS在分布式仿真中的应用探讨[J]. 舰船电子工程，2015，257(11)：106-108.
Ren Zongshen, Ren Xiongwei. Application of DDS in distributed simulation[J]. Ship Electronic Engineering, 2015, 257(11): 106-108.

[13] 周伟明. 多核计算与程序设计[M]. 武汉：华中科技大学出版社，2009.
Zhou Weiming. Multi-Core Computing and Programming[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2009.

[14] 郭彤城，慕春棣. 基于网络的并行仿真和分布式仿真[J]. 系统仿真学报，2002，14(5)：602-606.
Guo Tongcheng, Mu Chundi. Parallel and distributed simulation based on networks[J]. Journal of System Simulation, 2002, 14(5): 602-606.

[15] 钟红军，杨孟飞，卢 欣. 流水线并行处理提高星敏感器数据更新率[J]. 光学精密工程，2009，17(9)：2230-2235.
Zhong Hongjun, Yang Mengfei, Lu Xin. Increasing update rate for star sensor by pipelining processing method[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(9): 2230-2235.

[16] 苏年乐，黄丛山，李 群，等. 多核乐观并行仿真的负载均衡研究[J]. 系统仿真学报，2012，24(2)：324-331.
Su Lenian, Huang Congshan, Li Qun, et al. Load balancing for optimistic parallel simulation on multi-core platform[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(2): 324-331.

[17] 王学慧，李 革，刘保宏，等. 分布式集群并行仿真平台中的时间同步技术研究[J]. 计算机仿真，2006，23(10)：119-123.
Wang Xuehui, Li Ge, Liu Baohong, et al. Time synchronization in parallel simulation platform[J]. Computer Simulation, 2006, 23(10): 119-123.

作者简介：

熊建伟(1987—)，男，四川省遂宁市人，硕士，高级工程师，主要研究方向为微波光子计算、微系统设计仿真；

陈智宇(1986—)，男，四川省江油市人，博士，高级工程师，主要研究方向为微波光子系统设计。