

## 雷达仿真运行效率优化方法研究

王华兵, 蒙洁, 胡明明, 郑光勇

(电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 河南 洛阳 471003)

**摘要:** 以某逆合成孔径雷达串行仿真程序的优化为实例, 基于多核微机研究雷达仿真运行效率优化方法。首先总结了目前常用的雷达信号仿真并行算法, 指出了各自方法的优缺点, 同时分析了雷达信号仿真中的并行粒度; 然后研究了目标回波生成、仿真结果显示、脉冲压缩等各个计算单元的耗时情况和优化策略, 并对测试结果进行了分析。最后采用高性能函数库、多通道并行脉压、回波模拟快速递推算法、目标回波并行仿真和流水线并行等多种策略对 ISAR 串行仿真实例进行了优化, 综合优化后的程序运行速度提高为原来的 6.7 倍, 表明了优化策略的有效性和实用性。

**关键词:** 逆合成孔径雷达; 时间开销; 并行计算; 回波模拟; 傅里叶变换

**中图分类号:** TN956; O221.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)05-0029-05

## On Optimization Method for Radar Simulation Operating Efficiency

WANG Hua-bing, MENG Jie, HU Ming-ming, ZHENG Guang-yong

(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System (CEMEE), Luoyang 471003, China)

**Abstract:** Taking optimization of an ISAR serial simulation program as an example, the optimization method for radar simulation operating efficiency is studied based on multi-core computer. First, several commonly used parallel algorithms for radar signal simulation are summarized, including both the advantages and disadvantages of each algorithm, and the parallel granularity of radar simulation is also analyzed. Then, the time consumption of each computing unit, such as the computing unit for target echo generation, for simulation result display, and for pulse compression, is studied, as well as their optimizing strategy. The test results are analyzed. Finally, optimization of the ISAR serial simulation example is carried out by using various strategies, including high performance function library, multi-channel parallel pulse compression, fast recursive algorithm for echo simulation, target echo parallel simulation and pipeline parallelization. After comprehensive optimization, the program runs 6.7 times faster than before, showing the effectiveness and applicability of these optimization strategies.

**Key words:** ISAR; time overhead; parallel computing; echo simulation; Fourier transform

### 0 引言

雷达信号仿真计算量大, 其运行效率一直是业内学者十分关心的问题。并行计算将任务分解为多个子任务并行求解, 从而提高运行效率。传统的并行计算通常基于大型并行计算机, 成本较高, 雷达实时系统采用 DSP, FPGA 等芯片进行并行计算<sup>[1-3]</sup>, 成本也很高。

随着多核技术的快速发展和逐渐普及<sup>[4]</sup>, 多核微机可作为一种高性价比的并行计算硬件平台。然而, 传统的雷达信号仿真采用串行算法, 不能利用并行计算机的多核优势, 计算速度慢, 为此, 需要挖掘雷达信号仿真中的并行性, 设计并行算法。

从已有文献看, 基于多核微机的雷达并行仿真实例大多面向合成孔径雷达<sup>[5-6]</sup>, 有少量面向常规窄带雷达, 而面向宽/窄带交替工作的逆合成孔径雷达 (Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR) 的实例更是少见。ISAR 能对空中或水面的运动目标进行远距离高分辨率成像, 具有重大的民用和军事价值<sup>[7]</sup>。在分析雷达信号仿真

收稿日期: 2014-06-25

修回日期: 2014-07-25

基金项目: CEMEE 国家实验室主任基金 (CEMEE2014Z0303B)

作者简介: 王华兵 (1979—), 男, 云南陆良人, 硕士, 工程师, 研究方向为雷达仿真。

的并行性的基础上,以某 ISAR 串行仿真程序的并行化为实例,研究雷达仿真运行效率优化方法。首先通过时间开销测试,找出耗时的步骤,然后针对这些步骤采用多种策略进行优化,并针对线性调频目标回波模拟提出了一种快速递推算法,最后进行了综合测试与分析。

## 1 雷达信号仿真并行性分析

### 1.1 并行方法比较

已有文献主要从 4 个方面阐述了雷达信号仿真中的并行性:

1) 由于信号的矢量特性,不同信号相干叠加的物理过程是并行的,因此,到达接收机的不同类型的信号可以并行仿真,不同散射点的回波信号也可以并行仿真<sup>[8]</sup>;

2) 雷达信号处理主要是基于雷达三维数据块的计算,其中存在许多循环迭代操作,每次迭代针对不同的数据项进行相同的计算,由于不同迭代之间没有依赖性,因而可以并行计算<sup>[8]</sup>;

3) 对同一个雷达调度间隔内产生的多个雷达事件,某些雷达事件(如针对不同波位的搜索事件)之间没有依赖性,可以并行计算<sup>[9-10]</sup>;

4) 雷达信号仿真流程的前后相邻步骤存在依赖关系,可以采用流水线的方式并行计算<sup>[8,10]</sup>。

在上述方法中,前 2 种方法具有良好的可扩展性和普遍的适用性,第 3 种方法的可扩展性和适用范围有限,因为单个雷达调度间隔内的雷达事件数目通常不会很大。在雷达实时系统中,各个步骤以独占的方式使用各自的处理器资源,采用流水线并行可以减少资源的空置率,从而提高运行效率;然而在多核微机并行仿真中,各个步骤可以分时共享处理器资源,这种方式更灵活,因此在很多情况下,选择其他并行方法而不是流水线并行的方法会更有效。在实际应用中,可以综合采用多种方法。

### 1.2 并行粒度分析

作为对上述方法的有益补充,本文从并行粒度的角度分析常规雷达信号仿真中的并行性。并行粒度反映了并行执行任务之间交互数据量的大小<sup>[4]</sup>。从大到小,常规雷达信号仿真中存在 4 种并行粒度:

1) 以雷达事件为并行粒度,如前所述,单个雷达调度间隔内的多个雷达事件可并行处理;

2) 以脉冲为并行粒度,即单个波束驻留雷达事件内的多个脉冲之间没有依赖性,可并行处理;

3) 以通道为并行粒度,即针对单个脉冲回波的多通道接收和处理可并行执行,雷达实时系统即采用此

种方式;

4) 以分段数据为并行粒度,即针对单个通道的回波数据,可分段并行处理。

在上述 4 种并行粒度中:以雷达事件为并行粒度的仿真,通信开销较小,可采用通信延迟较大的硬件平台,如计算机机群;其他 3 种并行粒度均需要传递大量数字信号,通信开销大,宜采用通信延迟较小的硬件平台,如多核微机。

## 2 串行仿真时间开销测试与分析

针对某 ISAR 串行仿真实例进行时间开销测试与分析,测试结果将作为制定优化策略的依据。

### 2.1 测试实例说明

某 ISAR 仿真系统的运行流程如图 1 所示。系统采用迭代的方式推进仿真进程,通过雷达资源调度产生窄带或宽带事件,一次迭代处理一个雷达事件。首先根据引导信息搜索目标,在捕获目标并稳定跟踪之后,采取宽带和窄带交替的方式工作。窄带工作模式用于搜索、跟踪,并为宽带成像提供目标位置信息;宽带工作模式用于目标成像。仿真过程数据显示的步骤未在图 1 中列出。

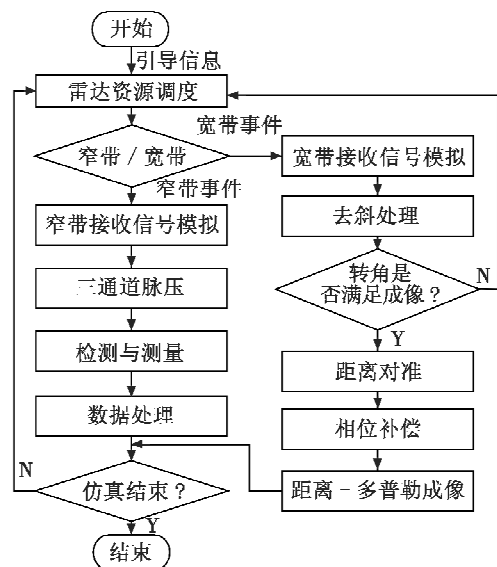


图 1 ISAR 仿真运行流程

Fig. 1 Running processes of ISAR simulation

为简化问题,设置目标数为 1,仿真从小区域搜索目标开始,至输出第一幅二维像时结束,捕获目标后不再进行搜索。捕获目标的时间非常短,可忽略不计。跟踪和搜索模式下关心区域内的采样点数分别为 12 万和 13 万。

测试平台为 1 台 4 核微机,软件和硬件参数详见表 1,下文的所有时间开销测试均基于该平台。

表1 测试平台参数

Table 1 Test platform's parameters

项目	内容
微机型号	Dell OptiPlex 9010
操作系统	32位 Windows 7 (SP1)
处理器数目	1
处理器型号	Intel Core i7-3770@3.40 GHz
核心数目	4
超线程	开启
二级缓存	256 kB×4
三级缓存	8 MB
内存	DDR3 SDRAM@1.6 GHz, 4 GB, 单通道
编译器	VC++9, 优化为 O2, 浮点模型为精确
并行编程	OpenMP

2.2 串行仿真测试结果与分析

串行仿真时间开销测试结果见表2,最后一列为各步骤的耗时占总时间开销的百分比。本文使用开源GSL(GNU Scientific Library)执行傅里叶变换(FFT),高斯白噪声采用在(0,1)上均匀分布的随机序列经余弦变换得到。由表2可知,生成目标回波、仿真结果显示、三通道脉压、去斜处理、生成白噪声等步骤耗时较多,需要重点优化,尤其是生成目标回波,耗时所占的百分比最大。

进一步统计FFT的时间开销得表3。显然,FFT消耗了约12%的时间资源,也需要重点优化。比较表2和表3可知,脉压和去斜处理的时间开销主要用于FFT。

表2 串行仿真时间开销

Table 2 Time overhead of the serial simulation

测试项	执行次数	耗时/s	百分比/%	
窄带处理	生成目标回波	177	2.2	1.9
	生成白噪声	177	3.0	2.5
	生成参考信号	177	2.2	1.8
	三通道脉压	177	10.3	8.6
	检测与测量	177	1.1	0.9
数据处理	177	0.5	0.4	
宽带处理	生成目标回波	142	78.2	65.2
	生成白噪声	142	1.8	1.5
	生成参考信号	142	1.1	0.9
	去斜处理	142	3.0	2.5
	二维成像处理	1	0.8	0.7
仿真结果显示	850	10.9	9.1	
总时间开销	-	120.1	100	

表3 FFT时间开销

Table 3 Time overhead of FFT

测试项	执行次数	耗时/s	百分比/%	
脉压	参考信号 FFT	177	1.6	1.4
	脉压 FFT	531	4.9	4.1
	脉压 IFFT	531	4.9	4.1
去斜	低通 FFT	142	1.4	1.2
	低通 IFFT	142	1.4	1.2
	去斜 FFT	142	0.004	0.003
距离对准 FFT	564	0.2	0.16	
合计	2 229	14.4	12	

3 优化策略分析与仿真实验

根据上文时间开销测试结果,对几个主要耗时步

骤或操作进行优化。

3.1 生成目标回波的优化策略

本实例可采用如下4种方法进行优化。1)多散射点并行法,即以散射点或目标为并行粒度的目标回波并行仿真。对于宽带目标回波模拟或者多目标窄带回波模拟,可采用此方法。2)通道并行法,即以通道为并行粒度,对同一个脉冲不同通道的回波信号并行仿真。3)分段并行采样法,即以分段数据为并行粒度,并行生成目标回波采样。4)快速递推算法。针对线性调频目标回波信号,易得复采样序列为

$$s_i[k] = s_2[k] \sum_{t=0}^{m-1} C_i s_1[k] \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (1)$$

$$\begin{cases} s_2[k] = e^{jmK(kt)^2} \\ s_1[k] = e^{2\pi(f_0 + f_d + K\Delta t)(kt)} \\ C_i = A_i e^{2\pi(f_0 + f_d)(t + \Delta t)} e^{jmK(\Delta t)^2} e^{j\theta_0} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $N$ 为有效采样点数; $m$ 为目标或散射点数目; $A_i$ 为回波信号幅度; $K$ 为调频斜率; $t_s$ 为采样间隔; $t_r$ 为时延; $f_0$ 为中心频率; $f_d$ 为目标多普勒频率; $\theta_0$ 为常数相位项; $\Delta t$ 为第一个有效采样点的时间与脉冲前沿的时间差; $s_2[k]$ 为关于快时间的二次项,仅与 $K$ 和 $t_s$ 有关; $s_1[k]$ 为关于快时间的一次项,与目标速度和时延等有关;针对 $i$ 号目标的某个脉冲回波序列, $C_i$ 只需计算一次。

$s_1[k]$ 的计算效率是优化的关键,尤其是 $m$ 值较大时。令 $\alpha = 2\pi(f_0 + f_d + K\Delta t)t_s$ ,易得

$$s_1[k] = \cos k\alpha + j \sin k\alpha \quad (3)$$

利用递推公式

$$\begin{cases} \cos(k+1)\alpha = \cos k\alpha \cos \alpha - \sin k\alpha \sin \alpha \\ \sin(k+1)\alpha = \sin k\alpha \cos \alpha + \cos k\alpha \sin \alpha \end{cases} \quad (4)$$

可将计算耗时的正、余弦计算转化为四则运算,如此可大大节省计算时间。

针对本实例,不同优化方法的时间开销测试结果见表4。在几种单一策略中,快速递推算法的性能最好,该方法与其他方法的组合策略能获得更优的性能。

表4 目标回波模拟方法效率比较

Table 4 Efficiency comparison of target echo simulation methods

	策略	耗时/s	相对于传统方法的加速比
宽带	传统串行方法	78.2	1.0
	多散射点并行法	17.5	4.5
	分段并行采样法	21.2	3.7
	快速递推算法	8.9	8.8
	多散射点并行法+快速递推算法	4.8	16.3
窄带	传统串行方法	2.2	1.0
	通道并行法	0.8	2.8
	分段并行采样法	0.7	3.1
	快速递推算法	0.6	3.7
	通道并行法+快速递推算法	0.5	4.4

### 3.2 仿真结果显示的优化

在迭代仿真的过程中,可采用流水线并行的方式,使得显示上一个仿真周期仿真结果的同时,执行当前仿真周期的计算任务,如此可提高处理器资源的利用率,节省总的的时间开销。

### 3.3 脉冲压缩的并行算法

主要有 2 种方法实现并行脉压:1) 通道并行法,即同时对多个通道的回波进行脉压;2) 脉冲并行法,即对一个驻留内的多个脉冲回波同时进行脉压处理。本实例有 3 个通道,一个驻留内只有一个脉冲,故采用第 1 种方法。测试结果见表 5,FFT 采用英特尔的 MKL 库。

表 5 脉压方法的效率比较

Table 5 Efficiency comparison of pulse compression methods

策略	耗时/s	相对于串行计算的加速比
串行计算	1.5	1.0
通道并行法	0.7	2.1

### 3.4 高性能函数库的应用

由上文分析可知,脉压和去斜处理的时间开销主要用于 FFT,因此,选用高性能 FFT 函数库是优化的关键。

提供 FFT 操作的常用科学计算库有英特尔付费软件包 NSP 和 MKL,以及免费的 GSL 和 FFTW<sup>[11]</sup>等。其中,前 3 个不支持 FFT 多线程并行计算,而 FFTW 支持,FFTW 可通过性能测试的方法自动选择适合硬件平台的优化算法。

FFT 的计算速度一般采用 MFLOP/s(每秒百万浮点指令)衡量<sup>[11]</sup>。在上述 ISAR 仿真实例中,变换长度为 131 072 的 FFT 消耗了大量时间。对此,测试比较了不同 FFT 库的性能,如图 2 所示,FFTW 和 MKL 表现出了优异的性能。FFTW 能使用更多的处理器资源,因而计算速度更快,不过从图 2 也能看出,它对处理器的使用效率并不理想。

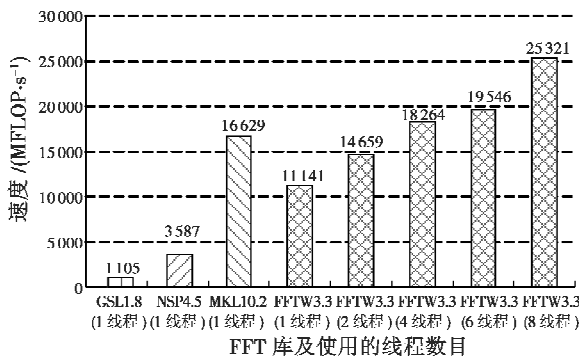


图 2 FFT 计算速度比较

Fig. 2 Speed comparison of FFTs

此外,对于生成白噪声信号,使用英特尔 MKL 库的计算效率远高于自编代码,测试结果见表 6。

表 6 白噪声计算效率比较

Table 6 Efficiency comparison of white noise generation methods

策略	耗时/s	相对于自编代码的加速比
自编代码	4.8	1
MKL 库	0.42	11.4

### 3.5 综合优化结果

综上,可综合采用多种方法对原串行仿真实例进行优化,即:1) 采用多散射点并行法 + 快速递推算法生成宽带目标回波;2) 采用通道并行法 + 快速递推算法生成窄带目标回波;3) 采用流水线并行的方式同时进行仿真计算和结果显示;4) 采用三通道并行脉压的方式进行脉冲压缩;5) 使用高性能函数库 MKL 进行 FFT 和产生高斯白噪声。

综合优化结果见表 7,部分结果比表 4 ~ 表 6 中的对应结果略大,主要是由于仿真结果显示抢占了一部分处理器资源,从而增加了仿真计算的时间开销。相对于原串行仿真版本,综合优化版本的加速比为 6.7。

表 7 综合优化结果

Table 7 Integrative optimization results

测试项	执行次数	耗时/s	百分比/%	相对串行仿真版本的加速比	
窄带处理	生成目标回波	177	0.5	2.8	4.4
	生成白噪声	177	0.3	1.7	10.0
	生成参考信号	177	0.8	4.5	2.8
	三通道脉压	177	0.9	5.1	11.4
	检测与测量	177	1.3	7.3	0.8
	数据处理	177	0.1	0.6	5.0
宽带处理	生成目标回波	142	5.1	28.7	15.3
	生成白噪声	142	0.2	1.1	9.0
	生成参考信号	142	1.1	6.2	1.0
	去斜处理	142	0.8	4.5	3.8
	二维成像处理	1	0.6	3.4	1.3
仿真结果显示	850	1.1	6.2	9.9	
总时间开销	-	17.8	100	6.7	

## 4 结束语

在雷达信号仿真并行性分析的基础上,以某 ISAR 串行仿真程序的并行化为实例,探讨了雷达仿真运行效率优化方法。主要针对信号产生、仿真结果显示、脉压等计算耗时的步骤,分析了各种优化方法的特点和适用性,并给出了测试结果。特别地,针对线性调频信号目标回波,提出了一种快速递推算法。最后,综合采用高性能函数库、多通道并行脉压、回波模拟快速递推算法、目标回波并行仿真和流水线并行等多种策略对 ISAR 串行仿真实例进行了优化,综合优化后的程序运行速度提高为原来的 6.7 倍,表明了优化方法的有效性和实用性。所采用的优化方法主要针对多核微机并行计算平台,下一步将针对多机并行计算平台和图形

处理单元(GPU)并行计算平台开展研究。

### 参考文献

- [1] 蒋留兵,赵菁菁. 电子战综合试验模拟系统信号处理机的实现[J]. 现代雷达, 2006, 28(4): 59-61. (JIANG L B, ZHAO J J. Realization of PSP in electronic warfare comprehensive simulation system[J]. Modern Radar, 2006, 28(4): 59-61.)
- [2] 付志红,马静,谢品芳,等. 基于高速数字信号处理平台的实时仿真技术[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(16): 3680-3683. (FU Z H, MA J, XIE P F, et al. Real-time simulation based on high-speed signal processing system[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(16): 3680-3683.)
- [3] 杨剑,杜琳琳,辛玉林,等. 基于多级并行处理的 R-D 方法的 ISAR 实时成像[J]. 宇航学报, 2010, 31(5): 1427-1432. (YANG J, DU L L, XIN Y L, et al. Real-time ISAR imaging of multilevel parallel processing based R-D method[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(5): 1427-1432.)
- [4] LIN C, SNYDER L. 并行程序设计原理[M]. 陆鑫达,林新华,译. 北京:机械工业出版社, 2009. (LIN C, SNYDER L. Principles of parallel programming[M]. Translated by LU X D, LIN X H. Beijing: China Machine Press, 2009.)
- [5] 汪连栋,杜静. 成像雷达并行仿真优化技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2012. (WANG L D, DU J. Efficiency optimization technology for imaging radar parallel simulation[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.)
- [6] 黄玉东,李洪平. 基于流水线的合成孔径雷达并行成像算法及实现[J]. 计算机应用, 2007, 27(3): 699-702. (HUANG Y D, LI H P. Parallel processing algorithm for synthetic aperture radar based on pipeline and its implementation[J]. Computer Applications, 2007, 27(3): 699-702.)
- [7] SULLIVAN R J. 成像与先进雷达技术基础[M]. 微波成像技术国家重点实验室,译. 北京:电子工业出版社, 2009. (SULLIVAN R J. Radar foundations for imaging and advanced concepts[M]. Translated by National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.)
- [8] 聂焱,汪连栋,曾勇虎,等. 电子信息系统复杂电磁环境效应[M]. 北京:国防工业出版社, 2013. (NIE H, WANG L D, ZENG Y H, et al. Complex electromagnetic environment effects on electronics and information system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.)
- [9] 徐雷,吴嗣亮,李海. 相控阵雷达仿真系统并行计算研究[J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(6): 517-520. (XU L, WU S L, LI H. Parallel computing in phased array radar system simulation technology[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2008, 28(6): 517-520.)
- [10] 王磊. 雷达系统标准化建模与仿真关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2013. (WANG L. The research on radar system standardization modeling and simulation technology[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.)
- [11] FRIGO M, JOHNSON S G. The design and implementation of FFTW3[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(2): 216-231.
- (上接第28页)
- 型与滤波方法研究[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(11): 48-50. (JIN G M, ZHANG G L, CHEN L P, et al. Research on filter method and model of MEMS gyrostatic drift[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2007, 26(11): 48-50.)
- [7] 冯智勇,曾瀚,张力,等. 基于陀螺仪及加速度计信号融合的姿态角度测量[J]. 西南师范大学学报:自然科学版, 2011, 36(4): 137-141. (FENG Z Y, ZENG H, ZHANG L, et al. Angle measurement based on gyroscope and accelerometer signal fusion[J]. Journal of Southwest China Normal University: Natural Science Edition, 2011, 36(4): 137-141.)
- [8] 王松,田波,战榆莉,等. 基于修正 EKF 的微小型飞行器姿态估计[J]. 高技术通讯, 2011, 21(6): 612-618. (WANG S, TIAN B, ZHAN Y L, et al. Flight attitude estimation for MAVs based on amended EKF[J]. Chinese High Technology Letters, 2011, 21(6): 612-618.)
- [9] 李艳芳,张佐理,郑可飙. 动态系统运动状态最优估计研究[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(2): 453-464. (LI Y F, ZHANG Z L, ZHENG K B. Best state estimation of dynamic systems[J]. Computer Engineering and Design, 2009, 30(2): 453-464.)
- [10] 秦永元. 惯性导航[M]. 北京:科学出版社, 2006. (QIN Y Y. Inertia navigation[M]. Beijing: Science Press, 2006.)
- [11] 秦永元,张红钺,汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安:西北工业大学出版社, 1998. (QIN Y Y, ZHANG H Y, WANG S H. Principle of Kalman filtering and integrated navigation[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1998.)
- [12] 杨涤,李立涛,杨旭,等. 系统实时仿真开发环境与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2002. (YANG D, LI L T, YANG X, et al. Real-time simulation system development environment and application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.)