

资源限制型可重构并行信息处理方法

陆智俊^{1,2}, 贲德¹, 毛博年³

- (1. 雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室 南京航空航天大学, 江苏 南京 210016;
2. 上海市空间智能控制技术重点实验室, 上海 201109;
3. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190)

摘要: 针对立方体纳卫星 GNC 信息处理系统高计算性能与低功率消耗相矛盾的问题, 提出了一种资源限制型可重构并行信息处理方法。该方法采用紧耦合可重构并行信息处理架构, 将 GNC 信息处理中需要多次迭代计算且不适合 CPU 处理的复杂软件算法, 以动态部分重构硬件电路单元(DPR)的方式实现, 采用基于互斥量的多核并行可重构资源调度算法, 通过多核 CPU 并行管理与调度共享的 DPR 单元, 完成软件算法的硬件加速与优化。实验结果表明, 该方法实现了立方星 GNC 信息处理系统的高效实时快速处理, 与传统信息处理方法相比, 可节约 50%左右的功耗, 可应用于计算资源极为有限的星上信息处理领域, 具有很好的工程应用前景。

关键词: 动态部分重构; 并行处理; 立方体纳卫星; GNC

中图分类号: V446+.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1126003

Resource-constrained parallel information processing methods based on reconfigurable technology

Lu Zhijun^{1,2}, Ben De¹, Mao Bonian³

- (1. Key Laboratory of Radar Imaging and Microwave Photonics, Ministry of Education, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Shanghai Key Laboratory of Space Intelligent Control Technology, Shanghai 201109, China;
3. National Space Science Centre, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: A method of reconfigurable parallel information processing in GNC was proposed for conflicting issues between high calculation performance and low power consumption in information processing of cubesats. An architecture of tightly coupled reconfigurable parallel processing was adopted in the method and complex algorithms which require many iterations and are not suitable for CPU operations in GNC information processing were achieved by dynamically partial reconfigurable unit of the hardware circuit (DPR). A multi-core parallel reconfigurable resource scheduling algorithm based on mutex was adopted in the method and optimized hardware acceleration of the software algorithms was

收稿日期: 2016-03-15; 修订日期: 2016-04-18

基金项目: 国家自然科学基金(61271327)

作者简介: 陆智俊(1981-), 男, 博士生, 主要从事卫星控制系统分布式仿真和星载计算机嵌入式系统开发方面的研究。

Email: luzhijun2004@sina.com

导师简介: 贲德(1938-), 男, 中国工程院院士, 教授, 博士生导师, 主要从事新体制雷达、雷达信号处理等方面的研究。

Email: bende@nuaa.ed.cn

completed through multi-core CPU parallel calls by DPR unit. The experimental results indicate that real-time information processing of GNC is effectively achieved in cubesats and reduces power consumption up to 50%. The method can be widely used in the field of information processing for resource-constrained satellites and possesses a great application prospect.

Key words: dynamically partial reconfiguration; parallel processing; Cubesat; guide navigation control

0 引言

立方体卫星(Cubesat)是近几年航天器领域的研究热点,因其体积小、质量轻、成本低、功能扩展性强等优点,应用十分广泛。由于 Cubesat 的体积限制,其信息处理系统一般仅具有星务管理、通信、热控与姿态确定与控制功能,而不包括自主导航及控制任务^[1-2]。

随着空间多点协同科学探测技术的不断发展,需要 Cubesat 具有自主导航与控制能力。Cubesat 的制导、导航与控制(GNC)信息处理模式难度大,且高度复杂化,对星载信息处理系统计算性能要求非常高,传统星载信息处理方法难以兼顾 GNC 信息处理系统高计算性能与低功耗的要求。国际上趋向于用具有高容错性能和高计算处理能力的可重构系统作为星载电子系统^[3-5],如 Platune、RAMP 等,但这些系统不适用于功耗与体积资源有限的 Cubesat 使用。

文中对资源限制型立方星的信息处理方法进行深入研究,采用新的信息处理方法来提高系统计算能力,同时减小体积、降低功耗,是十分必要的。

1 资源限制型可重构并行信息处理方法

1.1 可重构系统典型架构

可重构系统结合了可重构硬件处理单元和软件可编程处理器的计算系统,允许对可重构处理单元进行配置以满足不同应用的要求。系统中的可重构硬件单元常用来完成目标应用中数据密集型的计算任务,以提升系统处理速度。软件可编程通用处理器则实现应用中的控制密集型任务,综合性能优于通用处理器组成的系统。

在可重构系统的典型架构中,每个处理器核心均配有独立的若干个可重构协处理单元或阵列,有的可重构系统采用专用总线的紧耦合形式访问可重构资源,有的系统采用通用总线的松耦合形式访问

重构资源,多个处理器核心亦是如此。可重构器件与主处理器之间的耦合方式^[6]如图 1 所示。

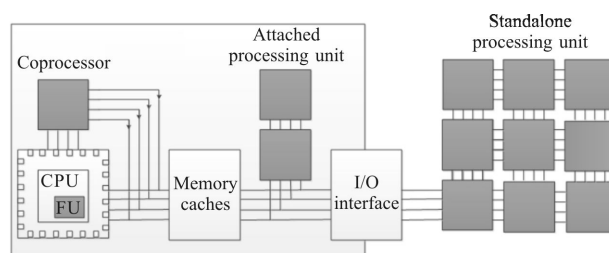


图 1 可重构器件与主处理器的耦合方式

Fig.1 Coupling mode of reconfigurable device and main processor

可重构处理系统的典型结构如图 2 所示,其中通用处理器用于控制和处理通用的计算任务,可重构协处理器用于处理专用领域的计算任务^[7-9]。在可重构计算典型架构中,每个处理器核心均配有独立的若干个可重构协处理单元或阵列,多个处理器核心亦是如此,即每个处理器都有专用的可重构计算资源,此架构固然计算性能高,但是是以高计算资源占用与高功率消耗为前提条件,并不适合计算资源高度紧张的 Cubesat 信息处理系统。

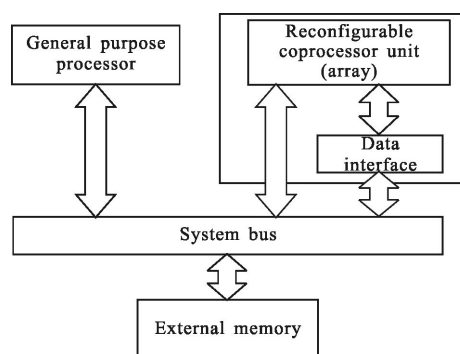


图 2 可重构系统典型架构

Fig.2 Typical architecture of reconfigurable system

1.2 紧耦合可重构并行信息处理架构

对于计算性能高且任务复杂的 Cubesat 信息处理系统来说,单处理器无法满足计算性能要求,需要

采用多核并行的方式,将可重构计算与多核并行处理技术相结合,将不适合 CPU 结构快速计算的算法在硬件电路上实现,进行硬件协处理加速,从而进行信息的高速处理,由于系统计算资源有限,因此,每个处理器核心没有自己专用的硬件协处理加速单元,而是多个处理器核心共享系统的硬件协处理加速单元。

由于处理器对于程序是逐条执行的,而每条计算机指令调用的硬件协处理加速单元可能不同,一种方法是将计算机指令可能调用的所有硬件协处理加速单元均固化至硬件电路中,按需取用,处理器采用这种方法只有指令参数的传递时间与硬件协处理单元的执行时间的开销,时间最短,但是占用系统资源最大。尤其对于多核 CPU 来说,为每个 CPU 配置独立的硬件协处理加速单元,Cubesat 基本上难以做到。

另一种方法是将计算机指令可能调用的所有硬件协处理加速单元的配置文件的存储在 ROM 中,当计算机指令需要调用该加速单元时,将存储的加速单元的配置文件的重构至系统中,以实现可重构硬件加速单元的时分复用,最大限度地使用所有可用的硬件计算逻辑资源。与传统方法相比,此法除了指令传递参数及硬件单元执行的时间开销,增加了硬件单元的释放与重构时间,但是显著降低了对计算资源的占用。

基于此,文中提出了一种适用于资源有限的 Cubesat 信息处理系统使用的紧耦合的可重构并行信息处理架构。该架构由 CPU 单元、DPR 管理与路由单元(动态部分重构单元简称 DPR)、DPR 动态重构区域及 DPR 动态重构执行控制单元四部分组成,如图 3 所示。

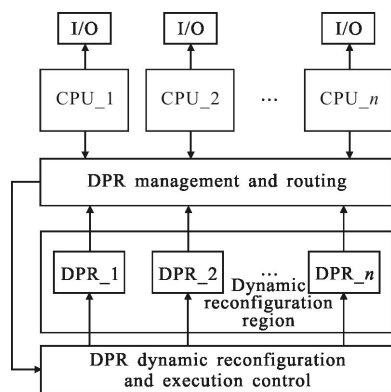


图 3 紧耦合可重构并行信息处理架构

Fig.3 Architecture of tightly coupled reconfigurable parallel processing

N 个 CPU 各自运行相同或不同的程序,均通过自己独享的 IO 与外界交换数据,CPU 之间可以通过某种形式进行任务级的同步,或每个 CPU 执行时均按照预定时序进行计算。此种方式不需要开发 CPU 并程序,可以保证粗粒度的并行计算。CPU 单元与 DPR 单元通过高速专用总线进行通信,由 DPR 管理与路由单元对 CPU 的 DPR 申请、DPR 的重构与释放及路由进行控制,保证按照一定的调度算法完成多个 CPU 对 DPR 的调用与执行。DPR 动态重构执行控制单元接收 DPR 管理与路由单元的指令,对动态重构区域中的 DPR 进行动态部分重构。

CPU 对 DPR 单元调用的算法为:

- (1) CPU 单元向 DPR 管理与路由单元提出某 DPR 单元使用申请;
- (2) DPR 管理与路由单元接到申请后,查询当前动态重构区域中是否存在该 DPR 单元;
- (3) 若申请的 DPR 单元存在于动态重构区域中,则按照基于互斥量的多核并行可重构资源管理方法分配 DPR 单元至 CPU;
- (4) 若动态重构区域中不存在申请的 DPR 单元,则查询动态重构区域;
- (5) 若存在空闲未重构区域,则由 DPR 管理与路由单元发出指令控制 DPR 动态重构执行控制单元,将申请的 DPR 重构至该区域;
- (6) 若不存在空闲未重构区域,则由 DPR 管理与路由单元根据 DPR 的优先级顺序,释放最低优先级的 DPR 资源至动态重构区域内。

1.3 基于互斥量多核并行可重构资源调度算法

针对多核 CPU 对 DPR 单元的调度存在冲突的问题,基于提出的紧耦合可重构并行信息处理架构,提出了基于互斥量的多核并行可重构资源调度算法,以实现多核 CPU 对共享的可重构计算资源的有效管理与有序调度,解决共享 DPR 单元调用冲突的问题。

在多核并行可重构资源互斥共享以及多互斥锁嵌套的复杂场景下,多组有向边以及任务节点具有清晰的链式结构,形成阻塞链。根据优先级继承链式提升的性质,在尾节点任务优先级改变时,系统需要根据有向边链式查找头节点任务并比较修改其动态优先级,文中称上溯查找过程中所经过的任务节点链为优先级继承链。任务 A 可能占有多个互斥锁

资源,多个任务可以通过不同的资源阻塞,从而支持任务 A,优先级继承链之间的头节点就将汇聚,形成树形的结构,称之为优先级继承树,如图 4 所示。

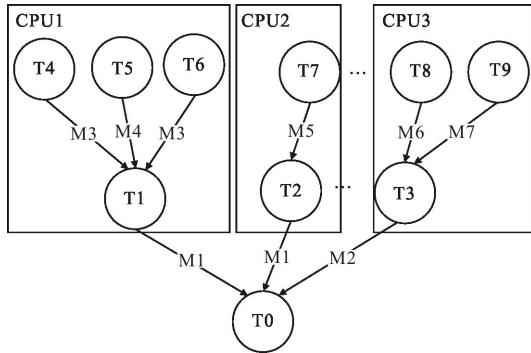


图 4 优先级继承树

Fig.4 Priority inheritance tree

T0 为总任务,运行在多核并行可重构资源管理单元中。任务 T1、任务 T2、任务 T3 分别为分配到 CPU1、CPU2、CPU3 上的子任务,各自占有互斥锁 M1、互斥锁 M2、互斥锁 M3 对应的资源。孙子任务 T4、T5、T6 为 CPU1 上的子任务,孙子任务 T7 为 CPU2 上的子任务,孙子任务 T8、T9 为 CPU3 上的子任务。任务 T4、T6 请求互斥锁 M3 而阻塞,支持 M3 占有任务 T1,任务 T5 请求互斥锁 M4 阻塞,支持 T1;任务 T7 阻塞申请 M5,支持 T2;任务 T8 阻塞申请 M6,支持 T3,任务 T9 阻塞申请 M7,支持 T3;任务 T1 占有互斥锁 M3、M4,申请 M1 阻塞,支持任务 T0;任务 T2 占有 M5,申请 M1 被阻塞;任务 T3 占有 M6、M7,申请 M2 被阻塞,支持 T0;任务 T0 占有互斥锁 M1、M2,处于就绪态。一个系统中可以同时存在多条独立的优先级继承链以及多棵优先级继承树,从而形成系统的优先级继承森林。

2 实验及分析

2.1 Cubesat GNC 信息处理系统

Cubesat 基于 FPGA 的可重构并行信息处理架构的信息处理系统如图 5 所示,由 SRAM 型 FPGA 与反熔丝 FPGA 两部分组成。SRAM 型 FPGA 进行 GNC 信息处理,其内部包含 3 个并行的 CPU 软核 Microblaze,其中 1 个 Microblaze 进行 GNC 星务管理,其余 2 个 Microblaze 进行 GNC 计算,3 个 Microblaze 各自运行相同或不同的程序,通过双口

RAM 与反熔丝 FPGA 内部的 CPU 通信接口单元交换数据, Microblaze 之间通过反熔丝 FPGA 内部的通信及接口控制进行任务级的同步。此种方式不需要开发 CPU 并行程序,可以保证粗粒度的并行计算。

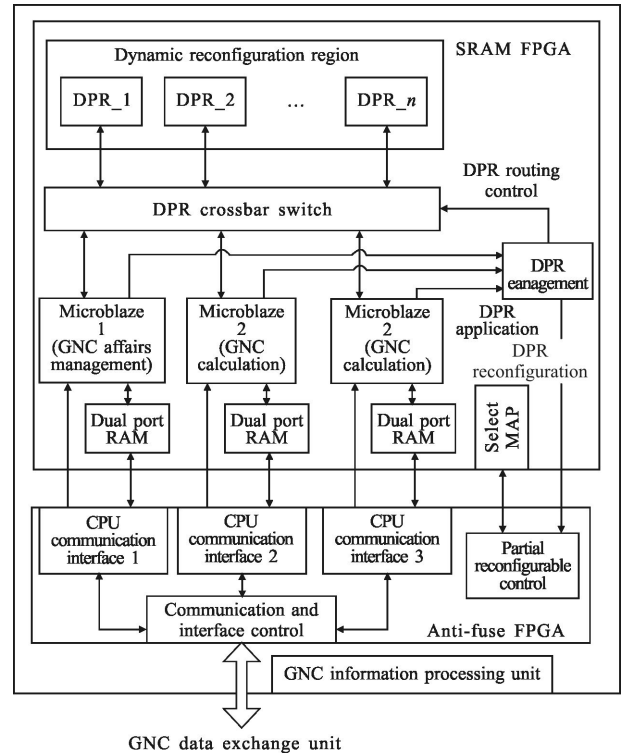


图 5 立方体纳卫星 GNC 信息处理系统

Fig.5 GNC information processing system of cubesat

Microblaze 与 DPR 单元通过高速专用总线进行通信,由 DPR 管理单元对 CPU 的 DPR 申请、DPR 的重构与释放及 DPR 交叉开关进行控制,保证按照一定的调度算法完成 3 个 Microblaze 对 DPR 的有序调用与执行。反熔丝 FPGA 内部部分重构控制单元接收 DPR 管理单元的指令,对动态重构区域中的 DPR 进行动态部分重构。

通常,具有自主导航功能的卫星信息处理系统包括星务管理计算机与 GNC 导航控制计算机,其中 GNC 导航控制计算机又由多块 DSP 或 POWERPC 高性能计算板组成^[9],整个卫星信息处理系统有多块处理板卡组成。文中提出基于资源限制型可重构并行信息处理方法的 Cubesat 的信息处理系统,只需单块 FPGA 信息处理板即可完成星务管理与 GNC 计算的所有功能,从而极大地提高了系统的计算效率,减小了系统体积,降低了系统的整体功耗。

2.2 卡尔曼滤波算法加速及系统性能分析

在基于 SOC 的紧耦合可重构并行信息处理架构的基础上,将可重构计算与多核并行处理技术相结合,将立方体钠卫星 GNC 信息处理算法中反复进行迭代运算且不适合普通 CPU 计算的部分进行硬件协处理算法加速,对接收的 GNC 信息及星务信息进行计算与处理。其中卡尔曼滤波算法的协处理算法加速的性能高低,直接影响 GNC 可重构并行信息处理方法的优劣。因此,对 Cubesat GNC 信息处理常用的卡尔曼滤波算法实现进行了仿真验证。

在一次卡尔曼滤波递推中一共涉及到 5 个部分的计算:(1) 计算一步预测 $\hat{x}(n|n-1)$; (2) 计算一步预测误差 $P(n|n-1)$; (3) 计算卡尔曼滤波增益 $K(n)$; (4) 计算状态估计 $\hat{x}(n|n)$; (5) 计算估计均方误差 $P(n|n)$ 。这 5 部分的计算是有一定的先后顺序的,但整体上可以分为两大支流:(1)和(4)作为第一支流,(2)、(3)和(5)作为第二支流,通过两个支流的重叠和交互可以快速有效地对模型进行估计。图 6 为两个支流的重叠和交互的示意图。

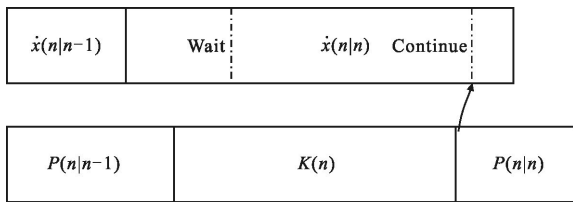


图 6 重叠和交互示意图

Fig.6 Overlap and interaction of two kinds branches

利用矩阵并行乘法和矩阵连乘重叠计算以及 kalman 滤波器两支流的结构,给出了滤波器的硬件实现框图,如图 7 所示。其中包括 3 个矩阵乘法器 MUL1、MUL2 和 MUL3,每个 MUL 中又包含 4 个相同的块矩阵乘法器,每个块矩阵乘法器包含 3 个 DSP 处理单元,用以实现 32 bit×32 bit 的乘法运算; ADD1、ADD2 是两个矩阵加法器,可以在一个时钟周期内完成两个矩阵对应元素的相加运算; M_INV 为矩阵求逆子模块,其中由 4 个 MUL 组成,使用重叠连乘的方式完成对矩阵的求逆运算;第一支流和第二支流控制逻辑用来对卡尔曼滤波算法的流程进行控制,并为 RAM 阵列提供相应的地址;算法的初始值和中间的递推结果均通过 RAM 阵列来管理。

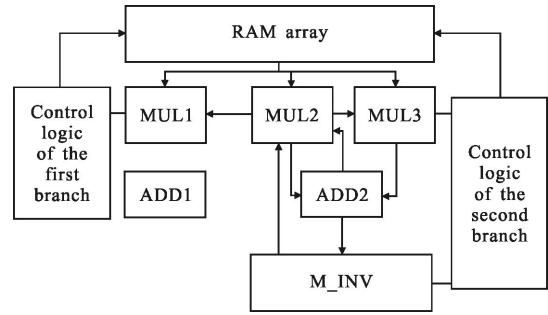


图 7 卡尔曼滤波器硬件实现框图

Fig.7 Hardware block diagram of Kalman filter

设计中卡尔曼滤波的状态转换矩阵为 6 阶的,该矩阵所表示的系统为时变的,每次递推都要更新;观测矩阵为 3×6 阶矩阵,非时变。经过实现,设计滤波器的具体技术指标如下所示:

- (1) 硬件开销为 2456 个 LUT 及 36 个 DSP48E 硬核;
- (2) 执行时间为 35 个时钟周期。

卡尔曼滤波算法在 SPARC V8(AT697F)、DSP (TMS320C6455) 及 FPGA (XC5VSX95T) 上进行卡尔曼滤波计算所需时间如图 8 所示。由图可知,DSP 与 FPGA 平台的卡尔曼滤波算法计算时间基本相同,均比 SPARC V8 架构的 CPU 平台的计算时间短。

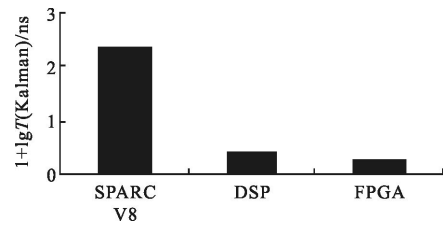


图 8 卡尔曼滤波计算时间

Fig.8 Kalman filtering computation time

卡尔曼滤波算法在 DSP 及 FPGA 平台上的执行时间及功率消耗如图 9 所示。由图可知,DSP 与 FPGA

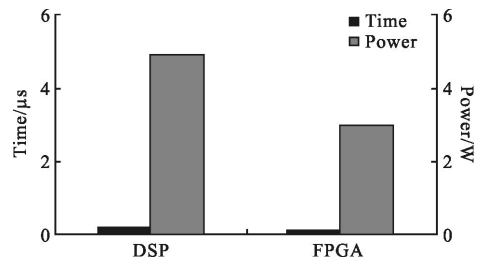


图 9 卡尔曼滤波计算时间与功耗对比分析

Fig.9 Kalman filtering execution time and power consumption analysis

的卡尔曼算法执行时间基本相同,但 FPGA 的功率消耗更低,节省了约 50%左右的功耗。因此,与 DSP 相比,文中通过 FPGA 对卡尔曼滤波算法进行硬件加速,可以更好地满足 Cubesat 对 GNC 信息处理系统高性能、低功耗的技术需求。

3 结 论

试验结果表明,采用资源限制性可重构并行信息处理方法,将可重构计算与多核 CPU 并行处理技术紧密耦合,采用可重构并行信息处理架构,将 GNC 信息处理中需要多次迭代计算且不适合 CPU 处理的复杂算法,以动态部分重构硬件电路单元(DPR)的方式实现,通过多核 CPU 并行调用 DPR 单元,可以在资源极为有限的 Cubesat 信息处理系统内完成软件算法的加速与优化,从而实现了 Cubesat GNC 信息的高效、实时、可靠、快速处理。

参考文献:

- [1] Yasir M, Grillmayer G, Roeser H P. Development of a safe mode attitude control for a FPGA based micro satellite[C]//IEEE International Multitopic Conference, 2008: 42-46.
- [2] Wang Weibing, Wang Tingfeng, Guo Jin. Analysis for opto-electrical acquisition tracking and pointing control technology on satellite[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(6): 879-888. (in Chinese)
王卫兵,王挺峰,郭劲. 星载光电捕获跟踪瞄准控制技术分析[J]. *中国光学*, 2014, 7(6): 879-888.
- [3] A reconfigurable multiprocessor architecture for space missions: The AFR-UNM HERC[Z]. 2008.
- [4] Dan Z, Guodong X, Yunhai G. Problems of Micro-satellite OBC and solving method based on reconfiguration technique [C]//2nd International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics, 2008: 1-4.
- [5] Hofmann A, Wansch R, Glein R, et al. An FPGA based on-board processor platform for space application [C]//2012 NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems, 2012: 17-22.
- [6] Kong Fanxin. Study and implementation of scheduling algorithm for real-time tasks on reconfigurable systems [D]. Shenyang: Northeastern University, 2008. (in Chinese)
孔繁鑫. 可重构系统中实时任务调度算法的研究及实现 [D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- [7] Garcia P C. Application and system support for reconfigurable coprocessors in multicore devices[D]. Wisconsin: University of Wisconsin-Madison, 2012.
- [8] Singh H, Lee M H, Lu G, et al. MorphoSys: an integrated reconfigurable system for data-parallel and computation-intensive applications[J]. *IEEE Trans Comput*, 2000: 49(5): 465-481.
- [9] Wang Weibing, Wang Tingfeng, Guo Jin. Orbit determination for space target based on opto-electrical imaging, tracking and ranging on satellite[J]. *Opt Precision Eng*, 2015(2): 528-539. (in Chinese)
王卫兵,王挺峰,郭劲. 基于星载光电成像跟踪测距的空间目标定轨[J]. *光学精密工程*, 2015(2): 528-539.