

文章编号 1004-924X(2008)09-1635-07

基于混合编程的空间相机控制器的自检方法

武星星,刘金国,孔德柱,徐 东,吕世良

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘要:针对空间相机控制器的高可靠性要求,提出了一种基于混合编程的 DSP 空间相机控制器的自检方法。该方法通过修改运行时支持库,解决了混合编程下变量换区存储这一难题,降低了像移匹配算法在 DSP 空间相机控制器上的实现难度,提高了代码的可维护性和可移植性。对指令系统、只读存储器、随机读写存储器和其他外设及接口自检算法在具体实现中的问题进行了分析和解决,改进了谷值检测法并应用于 RAM 自检。和原算法相比,运行速度基本不变,而检测到 RAM 故障的几率增加 1 倍以上。针对自检算法在不损害硬件的前提下难以验证的现状,给出了 DSP 空间相机控制器自检算法的验证方法。验证实验结果和工程实际应用效果表明,提出的自检算法实用有效。

关键词:空间相机;相机控制器;数字信号处理器;自检;混合编程

中图分类号:V475.3;P231 **文献标识码:**A

Self-testing method of space camera controller based on mixed language programming

WU Xing-xing, LIU Jin-guo, KONG De-zhu, XU Dong, LÜ Shi-liang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to meet the requirements for high reliability of space camera controller, a self-testing method of Digital Signal Processor(DSP) space camera controller based on mixed language programming was proposed. With this method, the difficult problem of changing variable locations in RAM according to self-testing results was solved under mixed language programming by modification of runtime-support library. Also, in this way, the image motion compensation algorithm could be realized easily in DSP space camera controller. Experimental results show that the maintainable and transplantable abilities of the codes are improved greatly. Several problems on realization of self-testing arithmetic on DSP repertoire, Read Only Memory(ROM), Random Access Memory(RAM) and other peripherals were analyzed and solved, and an improved peak value test algorithm of RAM was put forward, so that the probability to detect RAM fault with improved algorithm is at least twice as large as that of original algorithm in the same running time. As it is difficult to test self-testing algorithm itself without harming hardware, a method to validate self-testing algorithm was presented. The results of validation experiments and practical application effects in engineering prove that the self-testing al-

收稿日期:2008-04-23;修订日期:2008-06-25.

基金项目:中国科学院“优秀博士学位论文、院长奖获得者科研启动专项基金”资助项目

gorithm is practical and valid.

Key words: spatial camera; camera controller; Digital Signal Processor(DSP); self-testing; mixed language programming

1 引言

以电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)和红外焦平面阵列等光电器件为敏感器的光电传输型空间相机可以长时间在轨工作,能够弥补胶片型空间相机摄影时云影造成的漏洞,且重量轻,便于小卫星组网应用,提高时间分辨率,已迅速发展成为当前应用最广泛的空间光学遥感器之一。为了保证 CCD 相机成像清晰,要求每经过一个积分周期,景物的像恰好移动一个像元的长度,即 CCD 的行扫描速率与像移速度相匹配^[1-3]。由于像移速度和航天器的速度和轨道高度有关,需要相机控制器根据航天器数管计算机传来的数据,随着速度和轨道高度的变化实时计算像移速度以进行行扫描速率的匹配。当航天器载有多个载荷时,还需要相机控制器完成偏流角的实时计算和控制^[4]。

数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)一般都采用了哈佛结构、超标量流水线、多总线和专用硬件运算部件等技术,可以实现低功耗下的高速实时信号处理,是理想的空间相机控制器^[5]。由于空间相机对可靠性要求很高,要求相机控制器具有开机自检和故障诊断功能。目前国内外对于 DSP 系统自检算法的研究主要集中在如何用尽可能少的指令实现较大的覆盖性^[6-7]。本文针对实际工程需求,研究通过一种混合编程的方法,在完成系统自检功能的同时,降低复杂的像移匹配算法在 DSP 空间相机控制器上的实现难度,提高代码的可维护性和可移植性。对系统自检算法在工程实现中遇到的问题进行分析和解决,给出了自检算法的验证方法。

2 空间相机控制器的结构及原理

根据航天光学遥感器像移速度矢计算数学模型^[8-9],当考虑航天器姿态的影响时,像移速度矢量和摄影时刻航天器轨道运动相对于地心的角速率、航天器坐标系相对于轨道坐标系在摄影时

刻的姿态角、被摄景物的地物地形高度等 15 个因素呈复杂函数关系,采用 DSP 相机控制器能完成像移速度的实时高精度计算。

DSP 空间相机控制器的结构设计如图 1 所示,DSP 芯片 TMS320VC33 通过 CAN 总线控制器从航天器数据管理计算机接收轨道高度 H 、摄影时刻航天器轨道运动相对于地心的角速率 Ω 、轨道倾角 i_0 、航天器星下点经度 α 、星下点纬度 λ 、偏航角 ψ_0 、俯仰角 θ_0 、横滚角 φ_0 、偏航角速率 $\dot{\psi}_0$ 、俯仰角速率 $\dot{\theta}_0$ 和横滚角速率 $\dot{\varphi}_0$ 等信息。地球自转角速率 ω 、地球半径 R 和相机焦距 f 作为常量存储在外程序存储器 PROM 中,而被摄景物处航天器轨道高度 h 作为电子地图存储在 FLASH 中,可以通过星下点经度和纬度查找。由此可以按照像移速度矢计算数学模型,实时计算空间相机像面上前向和横向像移速度 V_{P_1} 和 V_{P_2} ,并进一步求得 CCD 行频时间 t_r 和偏流角 β_p ,实现像移速度的精确匹配。

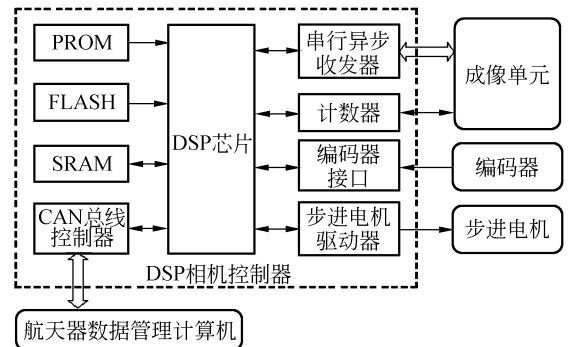


图 1 空间相机控制器结构原理图

Fig. 1 Scheme of space camera controller

为了能完成实时的复杂运算,系统扩展了数据存储器 SRAM,用于保存变量和堆栈等。相机控制器根据计算得到的行频时间通过外扩的计数器产生相应的行频周期信号给成像单元,并通过串行异步收发器和成像单元通讯,转发数据管理计算机发来的成像参数。为了完成调焦或偏流角控制功能,需要通过编码器接口读取编码器测量的调焦机构或偏流角调整机构当前位置,并通过

步进电机驱动器控制步进电机的步数和转速。

3 自检方法分析

由于空间相机对可靠性要求很高,相机控制器必须具有开机自检和故障诊断功能,以便地面人员掌控相机状态,甚至实现故障自动修复。DSP相机控制器的自检包括DSP芯片指令系统和片内寄存器自检、片外存储器自检和其他外设自检。

3.1 指令系统及片内寄存器自检

指令系统及片内寄存器自检要求在全面检查所用指令和寄存器的前提下,自检时间尽可能地短^[6-7]。TMS320 C3x指令系统包含113条指令,本文将其分为整型数操作指令、浮点数操作指令、逻辑及移位指令和流程控制指令4类。指令系统自检程序分为3个模块,首先检测整型数操作指令,如果失败跳过后续的模块直接置指令系统自检标志为0(失败);如果成功则将整型数操作模块自检运算的最终结果作为逻辑及移位指令自检模块的输入。同样如果逻辑及移位指令自检成功其最终结果也作为浮点数操作指令自检模块的输入,流程控制指令检测则穿插在这3个模块内进行,如果浮点数操作指令自测成功则认为指令系统自检成功。

为了排除访问的RAM出错导致指令系统自检失败,指令系统自检中的操作数只有片内寄存器和立即数,同时要覆盖所有可操作的片内寄存器。因此和堆栈相关的指令如PUSH、CALL等指令不能测试。对于条件指令Bcond、DBcond等在不同的条件下仅是5位条件码不同,仅需验证某一条件下指令是否正确执行。

3.2 PROM和FLASH自检

由于FLASH用来存储电子地图,在轨工作时只进行读操作,因此只需和PROM一样验证其中存储内容是否正确。具体的检测方法是将PROM或FLASH中的目的码逐个读出,计算累加和,如果和PROM中存储的预定值一致则认为自检成功,否则失败。

在PROM和FLASH自检中发现,由于PROM和FLASH容量较大,自检时间往往超过看门狗(Watch Dog)的监控时间,在自检程序中喂狗不要放在循环体内,这样会使自检时间增长

1倍以上。正确的做法是将整个存储区划分为几块,在每块自检的间隔喂狗。

3.3 RAM自检

RAM本身就是故障多发的器件,在空间环境下,由于单粒子事件导致RAM故障的情况更加频繁,采用合适的算法进行RAM自检非常必要。常用的RAM自检算法有固定模式自检、游动模式自检、图案平移自检和谷值检测法等^[10],其中谷值检测法具有执行时间短、能检测“粘连”和“连桥”故障等优点,本文在谷值检测法的基础上进行改进,第一个地址写入数据A5F05A0FH,以后每一个数据为前一个数据循环左移4位的结果,写完后逐个单元读出比较,判断RAM是否工作正常。

图2是采用改进算法时用CCS观察到的RAM自检图案,从图中可以看出,和标准算法全“1”背景下“0”的游动不同,改进后算法使得相邻位和相邻单元的0-1变化快和剧烈得多,在执行时间基本不变的情况下检测到RAM“粘连”和“连桥”的几率增加1倍以上。

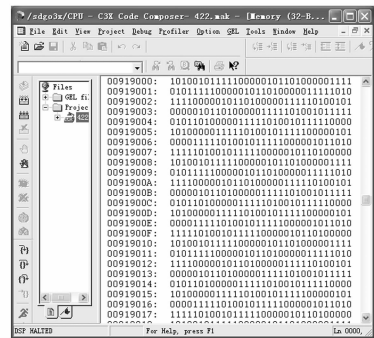


图2 RAM自检图案

Fig. 2 RAM self-testing pattern

3.4 其他外设及接口自检

相机控制器所使用的其它外设及接口包括片内定时/计数器、片外定时/计数器、串行异步收发器、CAN总线控制器、编码器接口、步进电机驱动器等。对于片内定时器和输入接恒定时钟信号的片外定时器,通过延时一段时间后,判断延时前后计数值的变化是否和延时的时间一致进行自检。对于串行异步收发器如8252等,可以利用其Loop Test自测模式,在不向总线上发送数据的同时检测收发功能是否正常。对于CAN总线控制器如SJA1000等,将其设置为自测模式,能够

在总线上没有其他活跃节点的情况下完成当前节点的完整自测。对于编码器接口和步进电机驱动器,可以先让电机正转一定步数,再反转相同步数,根据编码器的前后变化量可以确定两者是否正常。

在对外设和接口自检中需要注意的是,由于在自检过程中中断关闭,DSP 芯片内核通过查询方式访问各外设,为避免外设故障导致死机,必须加入超时判断。

4 混合编程实现 DSP 相机控制器自检

从前面的讨论可知,要实现像移速度的精确匹配,需要进行十分复杂的函数运算,采用 C 语言编制程序易于实现复杂算法、便于维护、且可移植性强。而汇编语言便于对底层硬件进行操作,适合自检算法的实现,某些功能如指令系统自检等只能通过汇编语言实现。如果系统自检采用汇编语言,而主程序框架和运算模块采用 C 语言,进行混合编程,则能结合两者的优点,实现系统的最优化。

然而在 RAM 的自检中,将整个 RAM 划分为几个区,要求能根据自检结果更改全局变量和系统堆栈的存储位置,避过故障区。在 DSP 系统中采用混合编程实现这一功能很困难,因为 C 语言中变量地址的分配在链接时由链接器自动完成,而且在系统启动时由自动加入的 `c_int00` 函数进行全局变量的初始化^[11]。若全部代码都用汇编语言编写,可以实现这一功能,但无疑增加了复杂像移匹配算法的实现难度,且可维护性和可移植性很差。

本文通过对运行时支持库进行修改来解决这一问题。其实现原理为,在小存储模式下,所有的变量被分配一个内存页(64k)以内,通过调用 LDP 指令改变 DP 指针,则在访问变量时访问的是另一页的对应位置。

如图 3 所示,在 C 程序中定义了一个变量 `Var1`,初始值为 5,RAM 分为两个区,900000H~91FFFFFH 为 RAM 一区,920000H~93FFFFFH 为 RAM 二区。每个区分为两页,前一页存放堆栈、stack 段,后一页存放局部变量、bss 段。假设

系统分配的地址是 910002H,当使用 LDP 指令修改数据页指针为 93H 时,`Var1` 实际的地址变为 930002H。由于在系统启动运行时,运行时支持库自动添加的 `c_int00` 函数将 PROM 中 .init 段中的变量初始值复制到 RAM 一区的 .bss 段,如果只是更改数据页指针,RAM 二区并未被初始化,会导致系统不能正常运行。为此修改运行时支持库,如图 3 中的虚线所示,使 `c_int00` 函数在将 .init 段复制到 RAM 一区时,同时复制到 RAM 二区对应位置。

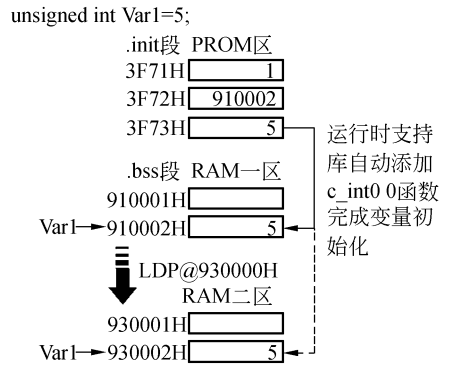


图 3 变量换区存储原理

Fig. 3 Principle of variable location change

按照上述方法进行修改后,在切换到二区时程序仍不能正常执行。图 4 为在硬仿真环境下用 CCS (Code Composer Studio) 查看经过初始化后变量存储区的结果,可以发现从 .init 段复制到变量存储区的初始值有“0x0091005F”等类似地址的形式。进行汇编代码走查,发现 C 源代码经过 C 编译器转化后的汇编源代码使用了间接寻址。这就会导致在切换为 RAM 二区后,有时会出现应该访问二区却访问了一区的情况,以至程序失败。

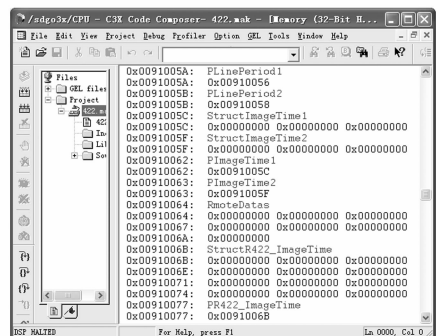


图 4 经过初始化后的变量存储区

Fig. 4 RAM after variable initialization

为此本文在 `c_int00` 函数中加入了对变量初始值的判断,由于在小存储器模式下变量被分配在 64 k 字长的一个数据页内,地址具有共同的特征,其高 8 位为 DP 指针的低 8 位。当判断变量初始值为一区内地址时,将其变换为二区地址后再复制到二区,如复制到一区 91005AH 处的变量初始值为 910056H,则将其变为 930056H 后再复制到二区 93005AH 处。

另外,由于自检程序仅在系统启动后,大循环之前执行一次,如果在 `c_int00` 函数中实现,可以使自检功能封装在运行时支持库中,同时简化 C 语言和汇编语言的接口。运行时支持库的具体修改办法如下:

(1) 使用命令“`ar30 x rts. src boot. asm`”从运行时支持库源文件中释放出包含 `c_int00` 函数的引导程序源文件 `boot. asm`。

(2) 修改 `boot. asm` 中 `c_int00` 函数如下:

```

_c_int00:
OR 4000H,ST ;关中断
..... ;系统自检
LDP init_addr ;获取.init段所在页
LDI @init_addr,AR0 ;获取.init段起始地址
CMPI -1,AR0
BEQ done ;RAM模式,跳过初始化
LDI *AR0++,R1 ;取初始化变量字数
BZD done
LDI *AR0++,AR1 ;取目的地址
LDI 2H,R5
LSH 16,R5
LDI R5,R4
SUBI 1,R5
LDI *AR0++,R0 ;取初始值
SUBI 1,R1 ;变量数减一
do_init:
LDI R1,RC
RPTB al_copy
STI R0,*AR1++ ;复制到一区
LDI R0,R2
LDI R2,R3
LSH -16,R3
AND 0FFFFH,R3

```

```

CMPI 91H,R3 ;判断初始值
BNE dgo
ADDI R4,R2 ;地址变换
dgo: LDI AR1,AR4
ADDI R5,AR4
STI R2,*AR4 ;复制到二区
al_copy: LDI *AR0++,R0
LDI R0,R1 ;取下一字数
BNZD do_init ;不为0,继续复制
LDI *AR0++,AR1
LDI *AR0++,R0
SUBI 1,R1
done:
.....

```

(3) 使用命令“`asm30 boot. asm`”将编译修改后的系统引导源代码,得到 `boot. obj`,再使用命令“`ar30 r rts30. lib boot. obj`”就得到了包含自检和变量换区存储功能的运行时支持库。

使用修改后的运行时支持库,像移匹配计算等复杂算法的实现都可以采用 C 语言来实现,显著降低了算法的实现难度和系统的复杂性,且代码易于在各个平台间移植。

5 自检算法的验证

由于自检算法的主要目的是硬件故障诊断,在不损坏硬件的前提下对自检算法进行验证一直是一个难点,本文利用 DSP 仿真器来进行指令系统和 RAM 自检算法的验证。实现方法为,在自检程序中加入断点,当程序运行到断点时,人为地修改断点前被自检程序更新过的寄存器或 RAM 中的数据为异常值,模拟指令系统或 RAM 故障时的情形,然后全速运行,根据自检标志判断自检算法是否有效,根据观察程序功能和堆栈及数据页指针地址判断变量换区存储功能是否正常。

图 5 为直接运行时自检结果,图 6 为人为修改 RAM 一区 91A000H 处为 99999999H,模拟 RAM 一区故障时的自检结果。对比两图可知,直接运行时 SP 和 DP 都设置在 RAM 一区, RAM 自检标志 R7.7~R7.6 为“01”,模拟 RAM 一区故障时 SP 和 DP 都设置在 RAM 二区, RAM 自检标志 R7.7~R7.6 为“10”,全速运行后程序功能正常,说明 RAM 自检算法和变量分区

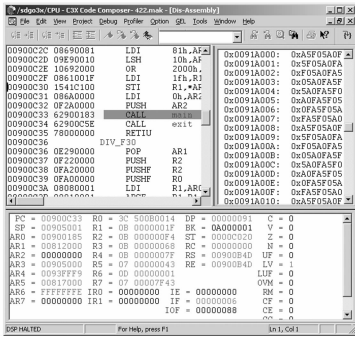


图 5 直接运行时自检结果

Fig. 5 Self-testing result of direct running

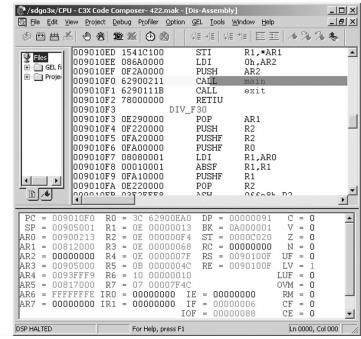


图 8 模拟指令系统故障时自检结果

Fig. 8 Self-testing result of simulating instruction system fault

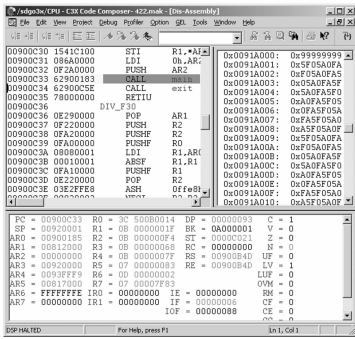


图 6 模拟 RAM 一区故障时自检结果

Fig. 6 Self-testing result of simulating RAM I fault

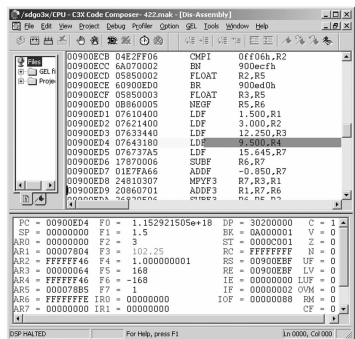


图 7 模拟指令系统故障

Fig. 7 Simulating instruction system fault

存储功能正常有效。图 7 为在“LDF 12.250,R3”指令后加入断点,人为修改 R3(F3)寄存器内容为 102.25,模拟 LDF 指令故障。图 8 为模拟指令系统故障时自检结果,对比图 5 和图 6 可知,模

拟指令系统故障时指令系统自检标志 R7.1~R7.0 为“00”,而正常运行时指令系统自检标志 R7.1~R7.0 为“00”,说明指令系统自检算法是有效的。

对于 PROM 和 FLASH,在写入时故意将某一地址的内容写错,判断自检算法能否检出错误。对于其他外设和接口,DIP 封装的接口芯片可以将芯片拔出,观察是否能检出超时引起的自检错误。

本文采取上述方法对 DSP 相机控制器自检算法进行了验证实验,准确检测出了所有故障,实验结果表明算法效果良好。目前本算法已成功应用于某空间相机的相机控制器中。

6 结论

本文提出了一种基于混合编程的相机控制器自检方法,该方法解决了混合编程下变量换区存储这一难题,降低了复杂的像移匹配算法在 DSP 空间相机控制器上的实现难度,提高了代码的可维护性和可移植性。改进后的谷值检测法和原算法相比,检测到 RAM“粘连”和“连桥”的几率增加 1 倍以上。论述了 DSP 空间相机控制器自检算法具体实现中的问题及解决方法,并给出了自检算法的验证方法。验证实验结果表明自检算法效果良好,目前该自检算法已成功应用于工程实际中。

参考文献:

[1] 贾平,张葆,孙辉.航空成像像移模糊恢复技术[J].光学精密工程,2006,14(4):697-703.

- JIA P,ZHANG B,SUN H. Restoration of motion-blurred aerial image[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(4):697-703. (in Chinese)
- [2] 赵贵军,陈长征,万志,等. 推扫型 TDI CCD 光学遥感器动态成像研究[J]. 光学精密工程,2006,14(2):291-296.
ZHAO G J,CHEN CH ZH,WAN ZH,*et al.*. Study on dynamic imaging on push-broom TDI CCD optical remote sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(2):291-296. (in Chinese)
- [3] 姜景山,王文魁,都亨. 空间科学与应用[M]. 北京:科学出版社,2001:113-114.
JIANG J SH,WANG W K,DU H. *Space Science and Application*[M]. Beijing: Science Press, 2001:113-114. (in Chinese)
- [4] 李友一. 空间相机中的偏流角控制[J]. 光学精密工程,2002,10(4):402-406.
LI Y Y. Study of the drift angle control in a space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(4):402-406. (in Chinese)
- [5] RABADI W, TALLURI R, ILLGNER K, *et al.*. Programmable DSP platform for digital still cameras[J]. *Texas Instruments Technical Journal*,2000,17(1):1-11.
- [6] RIZK H, PAPACHRISTOU C, WOLFF F. A self test program design technique for embedded DSP cores[J]. *Journal of Electronic Testing*,2006,22(1):71-87.
- [7] 李香,崔刚,杨孝宗,等. 探索一号小卫星星务计算机 CPU 自检方法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2001,33(3):273-275.
LI X,CUI G,YANG X Z,*et al.*. Self-testing of CPU in TS-1 micro-satellite housekeeping computer[J]. *Journal of Harbin University of Technology*,2001,33(3):273-275. (in Chinese)
- [8] 王家琪,于平,颜昌祥,等. 航天光学遥感器像移速度矢计算数学模型[J]. 光学学报,2004,24(12):1585-1589.
WANG J Q,YU P,YAN CH X, *et al.*. Space optical remote sensor image motion velocity vector computational modeling [J]. *Acta Optica Sinica*,2004,24(12):1585-1589. (in Chinese)
- [9] 翟林培,刘明,修吉宏. 考虑飞机姿态角时倾斜航空相机像移速度计算[J]. 光学精密工程,2006,14(3):490-494.
ZHAI L P,LIU M, XIU J H. Calculation of image motion velocity considering airplane gesture angle in oblique aerial camera[J]. *Opt. Precision Eng.*,2006,14(3):490-494. (in Chinese)
- [10] 李伯成. 嵌入式系统可靠性设计[M]. 北京:电子工业出版社,2006:55-58.
LI B CH. *Reliability Design of Embedded System*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 55-58. (in Chinese)
- [11] NIKOLIC Z, NGUYEN H, FRANTZ G S. Design and implementation of numerical linear algebra algorithms on fixed point DSPs[J]. *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing*, 2007(1):87046.

作者简介:武星星(1980—),男,助理研究员,博士研究生,主要研究方向为空间遥感成像技术与仪器。E-mail:starglare@126.com