

暗物质粒子探测卫星有效载荷自主探测管理方案设计与实现

梁耀明 马苗 王连国 沈卫华 朱岩

(中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190)

【摘要】暗物质粒子探测卫星有效载荷具有多种工作模式, 在轨探测时需要在各种模式之间不断进行切换, 以便获得探测器的最优工作状态; 每种模式切换时需要对有效载荷 28 个电子学前端电路、中子采集与处理电路、触发系统电路、高压供电机箱及载荷数管进行多种工作状态参数的配置。为了有效的开展暗物质粒子探测工作, 提高有效载荷探测模式转换的灵活性及降低模式切换时参数配置的复杂度, 本文对暗物质粒子探测卫星有效载荷在轨自主探测管理进行了研究, 对探测器有效载荷的工作模式进行了分析, 给出了由地面规划专家和星上自主探测执行机构相结合的基于事件驱动的有效载荷自主探测方案的设计和软件实现情况, 同时对自主探测中的可靠性措施进行了分析, 实现了探测器全天候、全时段、灵巧探测的功能, 并减少了对地面遥控注入的依赖。

【关键词】暗物质粒子探测卫星 有效载荷 自主探测管理

中图分类号: V447.2 文献标识码: A

Design and Implementing of Payload self-explore For The DAMPE

LIANG Yaoming MA Miao WANG Lianguo SHEN Weihua ZHU Yan

(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract: The managing project was researched on this paper for payload self-explore of DAMPE-Satellite, analyzing about payload's work-modes of the explorer. The designing method and the software realization result was given out for the payload's self-explore base on event-driven, which was conjoint by programming-experts on the ground and perform-units on the satellite. Meanwhile, the reliability & security measures was studied. The test results were provided: the function of anytime and anywhere for skillful exploring of the satellite was implemented. And it reduces the workload of the remote control.

Key Words: DAMPE Payload self-explore

0 引言

暗物质粒子探测卫星(简称 DAMPE 卫星)是我国自主建造和发射的空间科学战略性先导专项首批科学卫星项目之一, 其目标是通过在空间观测高能粒子(包括正电子)和伽玛射线能谱, 来寻找暗物质粒子的存在证据, 并开展宇宙射线起源及空间天文方面的相关研究。

暗物质粒子探测卫星有效载荷由硅阵列探测器、塑闪阵列探测器、BGO 量能器、中子探测器、高压供电机箱及载荷数管 6 部分组成; 其中, 硅阵列探测器由 8 个 FEE (电子学前端电路) 进行科学数据采集处理与设置、塑闪阵列探测器由 4 个 FEE 进行科学数据采集处理与设置、BGO 量能器由 16 个 FEE 进行科学数据采集处理与设置、中子探测器由中子采集与处理板电路进行科学数据采集处理与设置, 高压供电机箱负责对塑闪和 BGO 探测器的 FEE 提供所需的高压值(硅探测器可自身产生所需高压值)。4 种探测器协同工作完成科学探测任务, 探测到的科学数据最终由载荷数管组包后发送给卫星平台, 以便下载到地面。载荷数管负责整个有效载荷系统的电源管理、探测任务管理、科学数据管理及系统监控。

卫星在轨运行时, 根据不同的探测要求, 需要将有效载荷切换到不同的工作模式。工作模式的切换是通过执行一系列的指令序列来完成, 这些指令序列负责对各探测器电子学前端

电路的参数配置；配置过程具有一定的复杂性，且所需的时间开销比较大。此外，多情况下卫星需要在非测控区内进行探测，地面指令注入压力较大或无法实施。为了确保有效载荷在非测控区或测控时间有限的情况下完成探测任务，减轻地面指令注入压力，获得最优探测结果，要求有效载荷具有在轨自主探测管理的功能，这也是航天器向智能化、灵巧化方向发展的趋势^[1~3]。

本文对暗物质粒子探测卫星有效载荷自主探测管理进行了研究，给出了卫星有效载荷自主探测管理方案及其软件实现。同时，对有效载荷自主探测管理中的可靠性措施进行了分析。

1 有效载荷自主探测管理方案设计

1.1 有效载荷工作模式介绍

有效载荷在轨探测时共有五种探测模式：基线标定模式（硅原始数据）、基线标定模式（硅基线更新）、电子学线性刻度模式、MIPS 信号标定模式和观测模式。

基线标定模式（硅原始数据）：硅阵列探测器设置为原始数据下传模式，直接下传基线的原始探测数据，下传到地面后，由地面计算基线值和噪声值。触发系统以大于 200Hz 频率产生触发信号，完成有效载荷的基线标定。定标时间需 70s。

基线标定模式（硅基线更新）：硅阵列探测器设置为基线更新模式，在轨自主计算基线值，触发系统以 50Hz 的频率产生触发信号，完成有效载荷的基线标定。定标时间需 30s。

电子学线性刻度模式：共 20 种电子学线性刻度（DAC），除了对各探测器的公用工作参数进行管理设置外，对每种 DAC 值探测前需要对该 DAC 值下各探测器 DAC 参数进行设置，触发系统以 20Hz 的频率产生触发信号，每种 DAC 值探测需耗时 70s。

MIPS 信号标定模式：也叫探测器的精度标定，触发系统利用 BGO 量能器产生的击中信息生成触发信号。

观测模式：科学探测时的常规采集模式。可通过对探测到的科学数据进行分析来佐证暗物质粒子的存在情况。

此外，当卫星穿越南大西洋异常区时，可能会通过降低高压的方式来保护探测器，离开异常区时需要恢复之前的高压值；在降高压期间，探测器不进行探测。将这两种状态定义为降高压保护模式和升高压恢复模式，与五种探测模式一起组成广义有效载荷工作模式。

在轨探测时，探测器需要在各种模式之间不断进行切换，以便获得探测器的最优工作状态；工作模式切换时需要执行一系列的指令序列，以便完成对有效载荷 28 个 FEE、中子采集与处理电路、触发系统电路、高压供电机箱及载荷数管的多个工作状态进行参数配置。每种模式参数配置的指令条数和配置参数大小统计信息如表 1 所示，整个配置过程具有一定的复杂性。

表 1 有效载荷自主探测工作模式信息说明

Table1 The information explain of payload self-explore work mode

序号	模式名称	事件表基本格式			配置指令/条	配置参数/字节
		时间码/4 字节	标识/2 字节	参数/2 字节		
1	基线标定模式 (硅原始数据)	秒计数	0x1111	备用	37	118
2	基线标定模式 (硅基线更新)	秒计数	0x2222	备用	37	118

序号	模式名称	事件表基本格式			配置指令/条	配置参数/字节
		时间码/4字节	标识/2字节	参数/2字节		
3	电子学线性刻度	秒计数	0x3333	备用	638	2438
4	MIPS 信号标定模式	秒计数	0x4444	0xFFFF: 申请回传 FEE 大块配置参数 其他: 不需回传 FEE 大块配置参数	97	360
5	降高压保护模式	秒计数	0x5555	备用	14	98
6	升高压恢复模式	秒计数	0x6666	备用	14	98
7	观测模式	秒计数	0x7777	0xFFFF: 申请回传 FEE 大块配置参数 其他: 不需回传 FEE 大块配置参数	97	360

1.2 基于事件驱动的模式转换

有效载荷自主探测工作模式转换采用基于工作模式事件驱动的方式来实现。事件内容广义有效载荷工作模式中的七种模式，将每次探测所需的事件形成一张事件表。事件表的大小按一周探测最大需求进行设计，星上自主执行机构在空闲时查询事件表，当星上系统时间为事件表中所规定的时间时，按该事件中的事件标识自主执行相应的工作模式管理流程，同时从事务表中清除该事件。如表 1 中有效载荷自主探测事件表的基本格式所示，每个事件长度为 8 字节。

有效载荷自主探测管理由规划专家、地面系统、地面智能执行体、星地链路、航天器硬件及星上有效载荷自主探测执行机构组成。图 1 为有效载荷自主探测管理控制结构图。

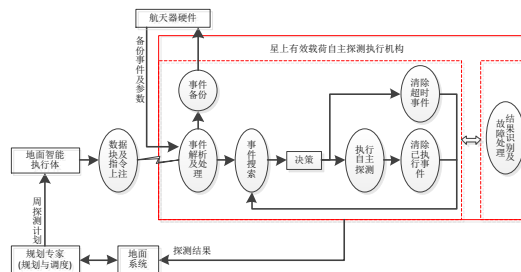


图 1 有效载荷自主探测管理控制结构

Fig1 The structure of payload self-explore

整个有效载荷自主探测系统是由规划专家和星上自主探测执行机构有机结合的基于事件驱动的自主探测系统。规划专家（科学应用专家、测控及运控专家等）负责整个科学探测任务的规划和调度，是有效载荷自主完成探测任务的重要组成部分。规划专家根据探测任务，确定各探测器的约束条件，并结合地面系统返回的探测结果，制定高层周探测计划；高层周探测计划经过进一步分解后，由地面智能执行体最终生成详细的上注数据块（事件表）和控制指令。上注数据块和控制指令经过星地链路发送给星上有效载荷自主探测执行机构，由星上有效载荷自主探测执行机构完成自主探测管理任务，并对探测结果进行识别及故障处理，确保探测任务损失最小。星上有效载荷自主探测执行机构将识别到的探测结果及系统工作状态参数返回给地面系统，为规划专家制定下一步探测计划提供依据。

1.3 软件实现

由于有效载荷数管分系统负责整个有效载荷系统的电源管理、探测任务管理、科学数据管理及系统监控，因此，有效载荷自主探测管理的软件实现由载荷数管软件来完成。

根据图 1 的有效载荷自主探测管理控制结构，划分软件层次结构，将软件实现分为上注数据块接收解析与处理、事件搜索与决策、自主工作模式切换及事件表管理四部分。有效载荷自主探测管理任务流程图如图 2 所示。

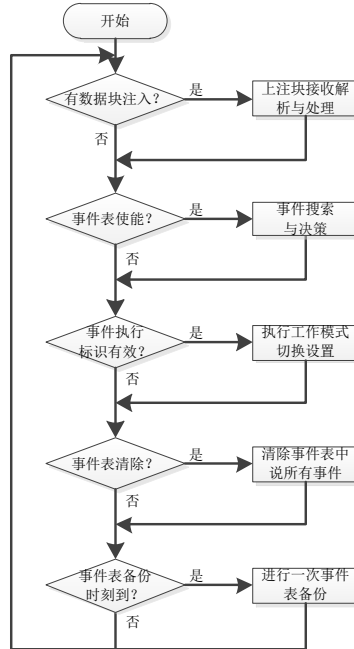


图 2 有效载荷自主探测管理任务流程图

Fig2 Task flow figure

(1) 上注数据块接收解析与处理

上注数据块包括依据探测计划形成的事件表数据和各事件设置参数块数据。上注数据块格式采用 CCSDS 分包遥控标准包格式，格式定义如下：

包标识符	包序控制	包长度	应用数据
2 字节	2 字节	2 字节	2*N 字节

- ✧ 包标识符：2 字节，标识上注的数据块类型。
- ✧ 包序控制：2 字节，分组标志（D15，D14）和包顺序计数（D13~D0）
- ✧ 包长度：2 字节，变长，等于该数据域后的应用数据域中的第一个字节到最后一个数据字节的字节数减 1。
- ✧ 应用数据：地面上注的数据块信息，规定为偶数字节。最后两个字节为应用数据域其他数据按字做累加和校验的结果。

载荷数管软件接收到上注数据块后，根据数据块格式逐步进行解析和校验，丢弃格式非法或校验错误的注入数据块，将格式合法且校验正确的注入数据块进行缓存。对于非事件表注入块，将数据内容存入内存中相应的缓存区中，待模式转换时有效载荷工作参数设置使用。对于事件表注入数据块，按照事件表基本格式（8 字节）将新的事件追加加入系统事件表中。软件实现时还需考虑对同一注入块重复上传的影响，可通过包顺序计数前后两包应不一致来控制。

(2) 事件搜索与决策

软件在空闲时刻,对工作模式事件表缓存区进行搜索查询,每次搜索最大为对整个事件表进行一次搜索查询。当某一事件缓存区中事件标识为规定的7种事件标识时,认为该缓存区中的事件为有效事件,可继续对该事件进行决策。决策情况如下:

TS: 系统当前时刻;

TE: 事件表中时间码所指示的时刻。

- ① $TS < TE-5s$: 即事件执行时刻未到达,跳过该事件,继续搜索事件表中其他事件。
- ② $TE-5s \leq TS \leq TE+5s$: 即事件执行时刻到达,可以执行该事件,置事件执行标识,跳出本次事件搜索流程。同时清除该事件内容。
- ③ $TE+5s \leq TS$: 即系统时刻超过事件所要执行的时刻,判定该事件为一超时事件,跳过该事件,不执行,继续搜索事件表中其他事件;同时,清除该事件内容,并记录超时事件标识。

(3) 自主工作模式切换

根据事件搜索与决策结果,软件自主完成各探测器工作模式切换设置指令序列。为了保证探测数据的正确性,在设置指令序列执行前先关闭有效载荷的触发,停止产生探测数据。然后根据载荷数管与各探测器之间的接口协议,将相应工作模式设置参数按要求先后对各探测器进行设置。设置完毕后,重新打开触发,完成一次工作模式切换。

对于两种基线标定模式,只要完成一次设置即进入该模式探测。对于电子学线性刻度模式,每一种刻度探测约70s,探测完毕之后自动切换到下一刻度。对于MIPS信号标定模式和观测模式,先根据事件表基本格式中的备用参数来确定是否需要申请FEE大块配置参数;若需要申请FEE大块配置参数,则先进行大块配置参数设置;然后进行各探测器设置。

(4) 事件表管理

事件表管理包括事件表使能\禁止、事件表清除、事件表排序、事件表备份等。

事件表使能\禁止 事件表可通过地面间接指令进行使能或禁止。当事件表禁止时,软件不搜索查询事件表。有效载荷工作需通过地面间接指令注入来切换。

事件表清除 当地面专家系统改变探测计划时,需要清除星上所有事件,则可通过发送事件表清除间接指令来实现将事件表中所有事件清空。

事件表排序 为了方便搜索查询事件表,软件按事件表中的时间码从小到大的顺序将事件进行排序,时间码小的排在事件表的头部,时间码大的排在事件表的尾部。当有新事件加入时,将新事件插入其时间码所处的位置;当事件执行完毕后,其他事件依次往前移。

事件表备份 为了防止载荷数管计算机重新加电或复位后事件表丢失,将事件表周期性(30min)地在星务计算机端进行备份。载荷数管计算机重新加电或复位后从星务计算机取回备份的事件表。

2 自主探测管理中的可靠性设计

针对暗物质粒子探测卫星的特点,为保证有效载荷具备全天候、全时段的探测能力,要求在有效载荷自主探测管理设计时必须进行相应的可靠性设计^[4-5]。主要有以下几点。

2.1 南大西洋异常区处理

卫星在穿越南大西洋异常区时,为了保护有效载荷探测器,可采用入异常区前降低高压

设置、出异常区后恢复高压设置的设计措施。由于卫星无法自主获得出入南大西洋异常区的信息，需要规划专家和地面智能执行体在地面提前通过轨道计算来获得；然后以降高压保护模式事件和升高压恢复模式事件的形式上注到星上有效载荷自主探测执行机构。

2.2 高压供电机箱周期性维护

暗物质粒子探测卫星中，高压供电机箱负责对塑闪和 BGO 探测器 FEE 中光电倍增管提供工作的高压值，受资源的限制高压供电机箱无法实时存储在轨运行时的相关单机配置信息。一旦出现复位时，高压供电机箱会把高压输出设定到第 0 档，从而导致该高压供电机箱负责的 FEE 中光电倍增管无法正常工作。为了避免高压供电机箱在非测控区对探测器观测的长时间影响，增加周期性自主维护高压供电机箱“工作时的高压值”的可靠性设计，确保高压供电机箱发生故障时能够尽快恢复到正常工作状态。

载荷数管每接收到一组高压供电机箱设置指令时，除了转发给相应的高压供电机箱外，在内存中备份一份最新的高压供电机箱注入指令参数。在高压供电机箱周期性维护使能的情况下，每 60 分钟维护一次高压值，即将保留在载荷数管中的当前高压供电机箱注入指令参数，重新转发给高压供电机箱。为了保证指令的传输正确与可靠，每个维护指令转发 2 遍。此外，考虑到南大西洋异常区需对探测器进行降高压保护操作，高压供电机箱周期性维护应避免南大西洋异常区，即在南大西洋异常区时，不进行维护。同时，为了方便地面根据实际运行情况控制，该功能可通过地面注入指令禁止或使能。

2.3 FEE 电流异常监控

为了保证各 FEE 工作的安全性，软件设计了对 FEE 工作状态的自主监控功能。监测每秒实时采集的各 FEE 电流遥测参数，若某 FEE 电流遥测连续出现 3 次异常（超过给定阈值），则执行对该 FEE 关机操作，并通过工程参数返回监控结果。对于 BGO 和塑闪 FEE 需先将对提供高压的高压供电机箱断电后，再将该 FEE 电源断电，且两次断电间隔 300ms。对于 SI 探测器 FEE（探测器内部自主提供高压）只需要将该 SI 探测器 FEE 电源断电即可。为了保证断电指令执行的可靠性，每条断电指令执行两遍。FEE 电流异常监控功能可通过地面注入指令使能或禁止。

此外，作为关键参数的 FEE 电流阈值可通过地面注入进行修改，且在内存中保留三份，采用三取二冗余设计，可以有效地抵抗单粒子翻转，造成监控误动作。

2.4 内部存储器 EDAC 纠错处理^[5]

事件表和工作模式管理参数均保存在星载计算机的内部存储器中。受空间高能粒子辐射的影响，内部存储器会出现单粒子翻转现象，一旦发生单粒子事件，内存中某一位的“0”或“1”将翻转成“1”或“0”。存储器中数据的变化将直接影响到系统的正常运行。为此，采用了对内存区的 EDAC 纠错处理技术，能发现并纠错一位单粒子错误。当发现某内存地址中的数据错误时，对该地址进行数据回写，实现纠错功能。

3 结束语

针对暗物质粒子探测卫星的特殊性，本文研究并介绍了暗物质粒子探测卫星有效载荷自主探测管理技术的设计及其软件实现情况。采用基于事件驱动的有效载荷工作模式自主切换技术，使探测器具备了全天候、全时段、灵巧探测的能力，并减轻了地面遥控注入的工作量。

软件实现时采用的可靠性措施，能有效地确保有效载荷的安全性和自主探测管理的可靠性。

参考文献：

- [1] 代树武,孙辉先. 航天器自主运行技术的进展[J]. 宇航学报, 2003.1 24(1):17-24.
- [2] 崔平远,徐瑞,等. 深空探测自主技术发展现状与趋势[J]. 航空学报, 2014.1 35(1):13-28.
- [3] 李智斌,李果. 航天器自主控制与智能信息处理技术[J]. 航天控制, 2004.10 22(5):20-25.
- [3] 李芳华. 星载软件可靠性设计方法[J]. 上海航天, 2003(3):24-27.
- [4] 刘小汇,伍微,欧钢. 软件错误检测与纠正技术可靠性研究[J]. 信号处理, 2011.8 27(8):1140-1146.

基金项目：中科院空间战略性科学先导科技专项工程（XDA04040202-5）

作者简介：梁耀明（1982-），男，硕士，电路与系统专业，主要从事空间数据系统及软件平台的研究工作。

电话：010-62582825（88） 13811093764 Email: liangym1208@nssc.ac.cn

通信地址：北京市海淀区中关村南二条 1 号