

风云二号卫星空间天气监测预警系统开发及其应用^{* 1}

单海滨¹⁾ 关敏²⁾ 刘玉洁²⁾ 余涛²⁾ 戎志国²⁾

¹⁾(广州气象卫星地面站,广州 510640) ²⁾(国家卫星气象中心,北京 100081)

摘 要

风云二号卫星载有太阳 X 射线监测仪及空间粒子探测器,空间粒子探测器实时监测轨道空间的质子、电子及 α 粒子的能谱及通量变化,太阳 X 射线监测仪实时监测太阳软硬 X 射线暴。这些监测数据直接反映了太阳的活动水平,可对 X 射线暴、质子事件及电子事件进行实时监测。同时,利用风云二号 X 射线探测器的数据,可对一些空间环境灾害进行预警。该文介绍了中国气象局“空间天气监测预警系统一期工程”中有关风云二号静止气象卫星(B 星)空间环境监测资料软件处理系统的设计思路,以及高能粒子探测器和太阳 X 射线监测仪的数据处理方法,并通过一些实例,介绍了该系统在利用风云二号卫星空间环境监测数据进行空间天气监测预警业务的情况。

关键词: 风云二号; 空间天气; 空间环境监测仪; 高能粒子; X 射线

引 言

空间天气是指太阳活动引发的近地空间环境变化状况,它可引起地球空间环境灾变,最终影响人类活动。据统计,几乎每年都有重大的空间灾害性事件发生,40% 以上的航天故障、电力和通信事故均与日地空间环境中的灾变有关^[1-4]。地球平均气温变化^[5]、臭氧含量变化以及人类健康和心血管疾病等与空间天气变化也有密切关系,这些都引起国际社会的高度重视。空间天气学及其业务正迅速成为国际科技活动的热点之一^[6-9]。

中国气象局开展空间天气业务服务,就是要满足科技发展需求,从大气层向上拓展空间相互作用与影响机理研究,进行从地面到空间直至太阳整个日地空间无缝隙的观测,提供空间天气日常业务服务^[10-13]。现阶段首先需要利用风云气象卫星进行空间环境监测,开发利用卫星星载空间环境监测仪器数据处理系统,进行空间天气预警预报服务。

风云二号为静止气象卫星,携带有空间环境监测仪,它由空间粒子探测器和太阳 X 射线监测仪两台仪器组成^[14]。空间粒子探测器实时探测轨道空间的质子、电子及 α 粒子的能谱及通量变化;太阳 X 射线监测仪实时监测太阳软硬 X 射线暴,直接反映太阳活动水平。空间天气监测预警系统就是要利用

风云二号空间环境监测数据进行实时的接收、数据处理、资料监视与预警服务。系统建立在 Windows XP 操作系统平台,软件开发环境为 Visual Studio. NET 2003,其中实时接收及监测、数据预处理部分采用 Visual C++,对存盘数据分析处理部分采用 Visual Basic。

在中国气象局空间天气监测预警系统一期工程建成后发生的一系列空间天气事件中,风云二号静止气象卫星空间天气监测预警系统都及时监测到了空间环境的急剧变化,利用太阳 X 射线预警指示的特性,及时向有关部门发布了预警预报信息,取得了很好的服务效益。

1 系统功能及数据处理流程

风云二号静止气象卫星空间天气监测预警系统基本功能包括:实时接收空间环境监测数据;实时监测太阳软硬 X 射线暴;实时监测轨道空间的质子、电子及 α 粒子的能谱及通量变化;对灾害性空间天气的分析及预警;对数据进行预处理并以统一的格式存档;对存档数据的分析处理。

风云二号气象卫星空间环境探测数据包含在卫星的遥测数据流中。本系统所接收的数据源为:北京气象卫星地面站将所接收的遥测数据实时发送到国家卫星气象中心运控室(简称运控室),由运控室

* 2006-12-13 收到,2007-09-24 收到再改稿。

再将数据实时转发到国家空间天气监测预警中心机房的风云二号静止气象卫星空间天气监测预警系统。该系统接收到实时遥测数据后,首先提取出空

间环境探测数据,对数据进行显示、预处理及存档,然后对数据进行分析处理,当有灾害性空间天气出现时,发出预警。数据处理流程如图 1 所示。

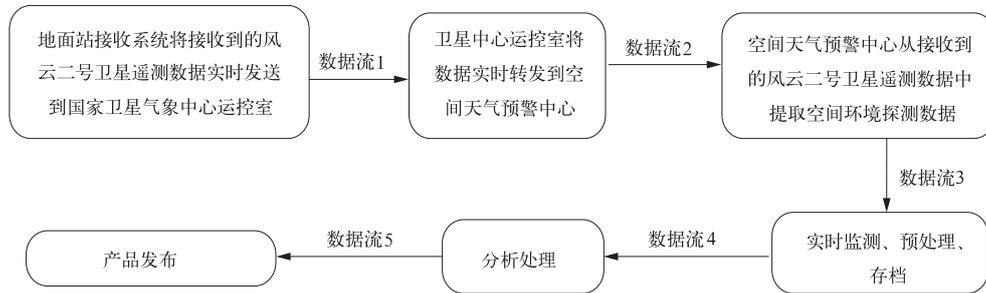


图 1 风云二号静止气象卫星空间天气监测预警系统流程图

Fig. 1 The flow chart of space weather monitoring and warning based on FY-2

2 遥测数据的实时接收和提取

空间天气预警中心实时接收由国家卫星气象中心运控室转发的遥测数据:预警中心微机作为客户

机通过业务网与运控室的服务器建立连接,连接建立后,服务器将实时接收的数据发送到客户机,客户机收到数据后进行处理。实时接收的遥测数据每 0.5 s 一帧,每帧数据为 138 字节,其详细内容列在表 1 中。

表 1 实时接收的遥测数据内容

Table 1 The real-time telemetry data content

字节序号	字节数	内容	说明
1 ~ 2	2	质量控制	第 1 个字节的低 3 位为 000 表示遥测数据有效,为 111 表示遥测数据无效。
3 ~ 7	5	时间码	时间码为 5 个字节的 BCD 码,分别表示秒、分、时、日计数低位、日计数高位。
8	1	付帧计数	付帧计数为 1 个字节,取值 0 ~ 127,通过付帧计数可分类空间环境探测数据。
9 ~ 136	128	遥测原码	遥测数据部分为 128 字节,为 128 路遥测原码。

实时接收的遥测数据每一帧中包括了 128 字节的遥测原码,其中的第 128 字节为空间环境探测数据。首先要从接收到的数据中挑出空间环境探测数据。空间环境探测数据共 32 路,通过付帧计数可判断其为哪 1 路。连续接收满 32 路遥测数据可提取完整的 1 帧空间环境探测数据,对其进行转换、存档,数据处理流程如图 2 所示。

空间环境探测数据包括空间粒子探测器和太阳 X 射线监测仪两台仪器的探测数据及空间噪声检测、高压检测、温度测量的数据共 32 路。空间粒子探测器实时监测 7 道高能带电粒子:α 粒子, ³He, P1, P2, P3, P4 和 E。太阳 X 射线监测仪监测太阳软、硬 X 射线暴,共分 10 个能道: X1 ~ X10。32 路空间环境探测数据的详细内容列在表 2 中。

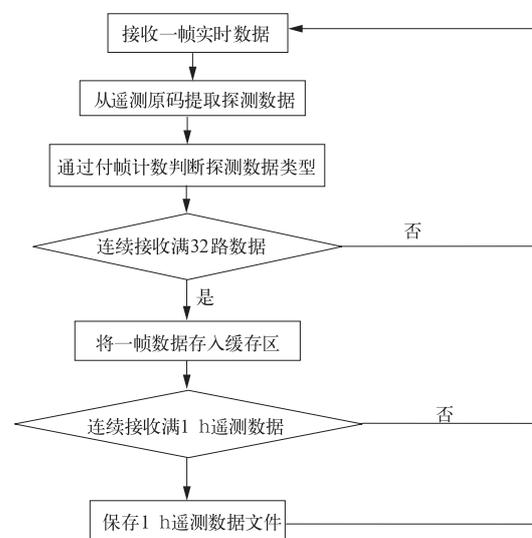


图 2 数据处理流程图

Fig. 2 Data processing flow chart

表2 空间环境监测数据格式

Table 2 The space environment monitoring data format

序号	付帧计数	参数名称	内容
1	0,32,64,96	⁴ He(α粒子)	空间α粒子探测
2	1,33,65,97	³ He(氦三)	空间氦三探测
3	2,34,66,98	P1(质子)	空间质子探测
4	3,35,67,99	P2(质子)	空间质子探测
5	4,36,68,100	P3(质子)	空间质子探测
6	5,37,69,101	P4(质子)	空间质子探测
7	6,38,70,102	X10	X射线探测
8	7,39,71,103	X9	X射线探测
9	8,40,72,104	X8	X射线探测
10	9,41,73,105	X7	X射线探测
11	10,42,74,106	X6	X射线探测
12	11,43,75,107	X5	X射线探测
13	12,44,76,108	X4	X射线探测
14	13,45,77,109	X3	X射线探测
15	14,46,78,110	X2	X射线探测
16	15,47,79,111	X1	X射线探测
17	16,48,80,112	E(电子)	空间电子检测
18	17,49,81,113	D1	空间噪声检测
19	18,50,82,114	D2	空间噪声检测
20	19,51,83,115	D3	空间噪声检测
21	20,52,84,116	V	高压检测
22	21,53,85,117	T	温度测量
23	22,54,86,118	X10	X射线探测
24	23,55,87,119	X9	X射线探测
25	24,56,88,120	X8	X射线探测
26	25,57,89,121	X7	X射线探测
27	26,58,90,122	X6	X射线探测
28	27,59,91,123	X5	X射线探测
29	28,60,92,124	X4	X射线探测
30	29,61,93,125	X3	X射线探测
31	30,62,94,126	X2	X射线探测
32	31,63,95,127	X1	X射线探测

3 数据转换

实时收到的空间环境监测数据为压缩原码,首先必须将其转换为相应的物理量,才能作进一步分析处理。

3.1 X射线探测数据转换

太阳X射线监测仪数据采集周期为8.2 s,监测太阳软、硬X射线暴,共分10个能道^[15-17]。测量的X射线能量范围为:4~100 keV。

软X射线:X1(4.0~5.5 keV);X2(5.5~7.6 keV);X3(7.6~10.5 keV);X4(10.5~14.5 keV);X5(14.5~20.0 keV)。

硬X射线:X6(20.0~27.6 keV);X7(27.6~

38.1 keV);X8(38.1~52.6 keV);X9(52.6~72.6 keV);X10(72.6~100 keV)。

X射线探测数据的原码为压缩的8位二进制码,其中低5位为数据,高3位为标志位。8位数据原码与太阳X射线探测器的计数值关系如下:设8位数据原码分别为 $b_7, b_6, b_5, b_4, b_3, b_2, b_1, b_0$,其值为“0”或“1”,则数据位部分的值为 $D = 2^0 b_0 + 2^1 b_1 + 2^2 b_2 + 2^3 b_3 + 2^4 b_4$,标志位部分的值为 $n = 2^0 b_5 + 2^1 b_6 + 2^2 b_7$ 。当标志位为“111”时,该通道的太阳X射线探测器计数值为: $N = D$,当标志位为“000~110”时,该通道的太阳X射线监测仪计数值为: $N = 2^{6-n} (32 + D)$ 。

在实际处理中发现,事件发生期间,X射线的实际光子通量有时可能超出X射线监测仪所能探测的最大值好几倍,导致饱和现象,必须对事件发生期间的数据作进一步的处理。首先在峰值时刻前的各点,光子通量依次累加,峰值时刻后的各点,光子通量依次递减。

3.2 带电粒子数据转换

空间粒子探测器数据采集周期为16.384 s,探测器输出为粒子计数率,实时监测7道高能带电粒子:⁴He(α),³He,P1,P2,P3,P4和E。其中前5道用于监测太阳质子事件,并且由P1,P2,P3组成质子能谱;P4监测风云二号卫星轨道空间大于1.1 MeV的质子;E监测大于1.4 MeV的高能电子。

外辐射带电子E: >1.4 MeV的电子。

外辐射带质子P4: >1.1 MeV的质子。

太阳爆发质子能谱P1:3.5~26 MeV质子,P2:10~26 MeV质子,P3:26~300 MeV质子。

同位素及成分测量³He:3.5~26 MeV,⁴He:3.5~26 MeV。

空间粒子探测器数据的转换流程为,首先将十进制探测器原码数据转换成0~5 V探测器测量电压值,再将探测器测量电压值转换成粒子的科学计数^[15-17]。

3.2.1 原码数据转换成电压值

探测器测量电压值与十进制探测器原码数据之间的转换关系是:将5 V电压平均分成255份,每份为19.6 mV,也就是用0~255的十进制数(8位二进制数)表示0~5 V的电压值。因此,十进制探测器原码数据乘以19.6 mV得到的就是0~5 V间的探测器测量电压值。即

$$U = 19.6D_c \quad (1)$$

D_c 表示十进制的原始数据, U 表示探测器测量电压值。

3.2.2 电压值转换成科学计数

带电粒子探测中,粒子的科学计数与探测器测量电压值是形如式(2)的对数线性关系:

$$\lg C = a_0 + a_1 U + a_2 U^2 + \dots + a_m U^m \quad (2)$$

式(2)中,多项式的系数 a_0, a_1, \dots, a_m 是根据仪器的地面定标数据得到的,阶数 $m = 4$ 。将式(1)得到的电压值代入由式(2)确定的多项式求得粒子的科学计数 C 。

4 数据的分析处理

将空间环境探测数据的原码转换为相应的物理量之后,其数值就直接反映空间环境状态及太阳的活动水平。通过对这些数据的分析处理,可以研究太阳磁暴、粒子事件等的一些规律,对粒子事件进行监测及预警。

4.1 数据的图像处理及显示

将空间环境探测数据的物理量按时间序列显示出来,可直观地反映探测结果。本系统的数据处理软件可将带电粒子的计数值及 X 射线通量按对数坐标或线性坐标显示。为了方便进一步分析,显示数据的内容、坐标、分辨率等都是可调的。通过选择适当的分辨率,既能观测一个小时内太阳 X 射线及带电粒子的辐射数据细节,也能观测几个月来太阳 X 射线及带电粒子的辐射数据的变化趋势,还能在几个窗口中同时显示数据的不同时段、不同内容,对数据进行直观的比较分析。

4.2 事件处理分析

当有事件发生时,系统可根据设定的门限值作出判断,并对事件发生期间的数据作进一步处理,以便更精确直观地描述事件。

在事件发生期间, X 射线的实际光子通量有可能超出 X 射线监测仪所能探测的最大值好几倍,导致饱和现象,这时常规显示中 X 射线通量图上几个连续的光子通量峰实际上只表示一次事件。为了显示事件的实际情况,必须对事件发生期间的数据作进一步处理。首先在峰值时刻前的各点,光子通量依次累加,峰值时刻后的各点,光子通量依次递减。这样就将常规显示中的几个射线峰还原为一个

峰。对于空间粒子探测器的数据,在事件发生期间数据较大,可采用对数坐标进行直观显示,平时数据较小,则采用比例坐标显示。

4.3 事件处理分析实例

从 2003 年 10 月 22 日开始,太阳表面出现了多个强大的活动区,这些区域频繁的活动导致了 10 月 28 日—11 月 4 日,太阳表面一系列的大爆发事件,并引起强烈的近地空间环境扰动,对空间飞行器以及地面通讯造成极大的危害。据相关报道显示,这一段时间的太阳爆发已经造成多颗卫星通讯中断,部分卫星的太阳能电池板发电能力也基本丧失。由于太阳爆发引起的电离层效应,国内部分地区出现很强的高频无线电波吸收现象,使部分城市的通讯受到严重影响。另外,我国风云二号卫星云图资料也在 10 月 31 日下午出现误码和干扰现象,初步分析可能与空间天气事件有关。

中国气象局国家空间天气监测预警中心利用风云二号静止气象卫星空间天气监测预警系统实时监测到了这一期间的太阳爆发现象,并发布了 3 次《重大气象信息专报》(第 39, 40, 42 期),为相关部门提供了及时的空间天气变化情况,为卫星运控部门提供了准实时的监测预警服务,为卫星安全保障提供了一定参考作用。在后来的一系列太阳 X 射线爆发和质子事件中,风云二号静止气象卫星空间天气监测预警系统都发挥了很好的作用。

4.3.1 2003 年 10 月 28 日的质子耀斑分析

图 3 为风云二号气象卫星监测到的 2003 年 10 月 28—29 日太阳剧烈活动引起的 X 射线爆发和高能质子事件。显示的数据从 2003 年 10 月 28 日 09:00(世界时,下同)至 29 日 16:00,图中横坐标为时间,纵坐标为 X 射线监测仪的正比计数器输出值,该值与 X 射线流量成正比。图中黑线表示软 X 射线流量大小,红线表示硬 X 射线流量大小,紫线表示 P1 能道的质子流量大小。其中, X 射线流量采用比例坐标,质子流量采用对数坐标。

从图 3 分析,在 10 月 28 日 09:40—10:56,软、硬 X 射线通量值都较低,但硬 X 射线已开始有较小的爆发。在 10:57—11:49,发生了 X 射线暴,其中硬 X 射线的爆发比软 X 射线强烈。28 日 12:40 至 29 日 13:51,出现了一次大爆发, X 射线流量维持在较高的流量达 20 h 左右,从 X 射线能谱特征看,硬 X 射线在爆发期间变化强烈,其能谱分量会出现爆发性的增强。28 日 13:55 开始发生质子事件,并持

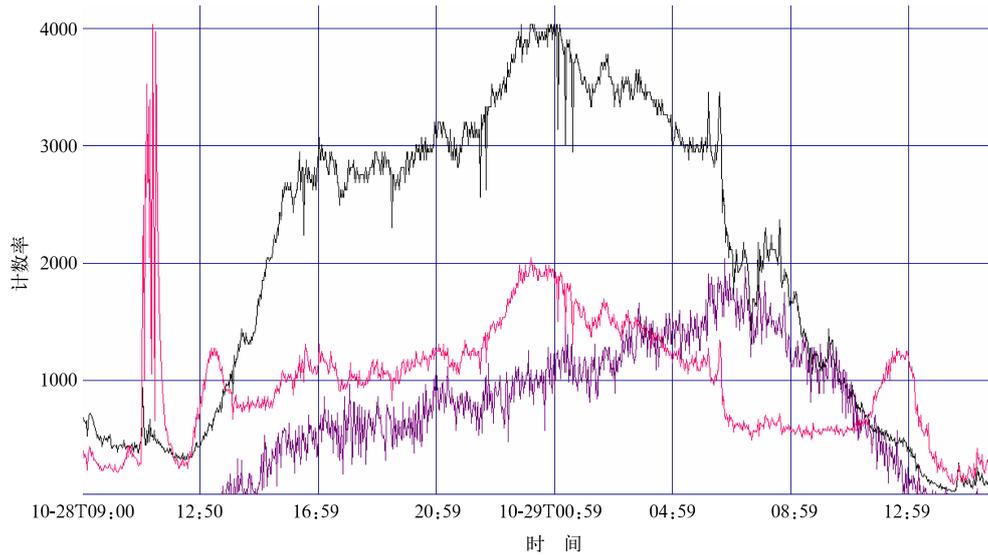


图3 风云二号气象卫星 2003 年 10 月 28 日 09:00 至 29 日 16:00 数据
 (黑线为软 X 射线, 红线为硬 X 射线, 紫线为 P1 能道的质子)
 Fig. 3 Observing result of FY-2 satellite solar X-ray detector from 09:00
 on Oct 28 to 16:00 on Oct 29, 2003
 (black line: the soft X-ray; red line: the hard X-ray; purple line: the
 high-energy particles channel P1)

续了 24 h。

4.3.2 2003 年 11 月 1 日至 3 日的连续 2 次耀斑分析

2003 年 11 月 1—3 日风云二号气象卫星监测到连续 2 次的太阳耀斑, 其中第 1 次为非质子耀斑, 第 2 次为质子耀斑。图 4 显示的数据从 11 月 1 日

21:00 至 3 日 23:00, 通过数据分析可发现 2 次耀斑的一些不同规律: ① 从耀斑整个爆发过程看, 非质子耀斑的软、硬 X 射线在爆发相期间辐射快速升高, 衰变相期间以接近指数规律衰减, 中间的波动较小, 而质子耀斑在整个爆发期间还叠加了 3 次短时间的 X 射线暴, 变化比较强烈; ② 从 X 射线能谱特

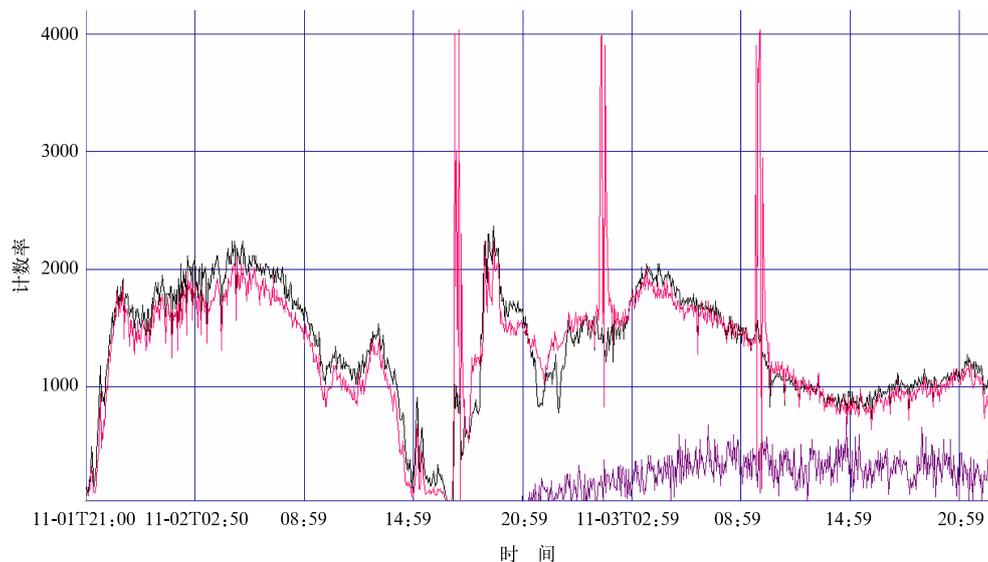


图4 风云二号气象卫星 2003 年 11 月 1 日 21:00 至 3 日 23:00 数据
 (黑线为软 X 射线, 红线为硬 X 射线, 紫线为 P1 能道的质子)
 Fig. 4 Observing result of FY-2 satellite solar X-ray detector from 21:00 on
 Nov 1 to 3 23:00 on Nov 3, 2003
 (black line: the soft X-ray; red line: the hard X-ray; purple line: the
 high-energy particles channel P1)

征看,非质子耀斑的 X 射线频谱在整个爆发过程中基本稳定,软、硬 X 射线在整个爆发过程中的变化基本一样。而质子耀斑在整个爆发期间的 X 射线频谱变化强烈,硬 X 射线在整个爆发过程中的变化比软 X 射线强烈,其能谱分量会出现爆发性的增强。

从上面的实例分析看,在质子耀斑爆发前,软、硬 X 射线通量往往会有几分钟至几小时的低值。在主爆发之前的几分钟到几十分钟常出现小爆发,其特点是峰值很高,时间为十几分钟左右。从 X 射线能谱特征看,硬 X 射线在爆发期间变化强烈,其能谱分量会出现爆发性的增强。11 月 1 日 21:00 开始至 11 月 2 日 14:00 结束的非质子耀斑长达十几小时,但其 X 射线频谱在整个爆发过程中基本稳定,软、硬 X 射线在整个爆发过程中的变化基本一样,整个爆发过程没有质子事件。而从 11 月 2 日 17:13 至 11 月 2 日 17:43,出现了一次 X 射线暴,其硬 X 射线比软 X 射线强烈。至 11 月 2 日 18:20 左右,已经可以分析出 X 射线流量在持续增强,且硬 X 射线比软 X 射线强烈,此时,可以预见新的一次太阳耀斑已经开始,在 20:40 开始出现质子事件。

5 小 结

风云二号卫星的空间环境监测数据反映了太阳的活动水平,通过对这些数据的接收处理,可对一些空间天气灾害进行监测预警。在风云二号静止气象卫星空间天气监测预警系统中主要体现的研究工作包括:如何准确地对实时数据进行事件判断及预警,这需要通过事件前后的数据分析处理,总结其规律,同时对不同能道数据进行相关性分析,在不同的时间尺度上分析数据的变化。但这些工作还有待进

一步进行研究开发。另外,风云二号气象卫星上搭载的空间环境监测仪器还无法完全满足空间天气业务发展的需求,需要在今后风云三号、四号卫星上搭载更多、更全面探测空间天气预警预报所需要的仪器。

参 考 文 献

- [1] 焦维新. 空间天气学. 北京:气象出版社,2003:1-22.
- [2] 冯学尚. 空间天气学——21 世纪的新兴学科. 世界科技研究与发展, 2000,22(2):50-53.
- [3] 张元东,王家龙. 太阳风暴. 北京:气象出版社,2003.
- [4] 刘玉洁,房静欣. 空间天气灾害——人类的无形敌人. 现代军事,2003(9):59-61.
- [5] 杨羨敏,曾燕,邱新法,等. 1960~2000 年黄河流域太阳总辐射气候变化规律研究. 应用气象学报,2005,16(2):243-248.
- [6] 魏奉思,朱志文. 空间天气学. 科学,1999,51(1):30-33.
- [7] 魏奉思. 空间天气学. 地球物理学进展,1999,14(增刊):1-7.
- [8] 焦维新,濮祖荫. 地球空间环境及预报. 地球物理学报,1996,39(6):853-859.
- [9] 方成. 蓬勃发展的空间天气学. 科技潮,2004(6):30-31.
- [10] 秦大河,孙鸿烈,孙枢,等. 中国气象事业发展战略研究总论卷. 北京:气象出版社,2004:51-52.
- [11] 丑纪范,赵柏林,章国材,等. 中国气象事业发展战略研究现代气象业务卷. 北京:气象出版社,2004:113-114.
- [12] 许健民,孙家栋,邵立勤,等. 中国气象事业发展战略研究气象与国家安全卷. 北京:气象出版社,2004:141-167.
- [13] 刘英金,董文杰,邓勇,等. 中国气象事业发展战略研究辅导读本. 北京:气象出版社,2005:125-126.
- [14] 朱光武,李保田,王世金,等. 风云二号卫星空间环境监测器. 中国科学(G 辑),2004,34(3):354-360.
- [15] 龚德铸,孙越强,刘一鸣,等. FY_2 卫星的空间环境数据接收及警报系统. 空间科学学报,2003,23(2):142-148.
- [16] 林华安,朱光武,王世金. FY_2 卫星太阳质子事件监测警报系统及质子事件警报的尝试. 空间科学学报,2000,20(3):251-256.
- [17] 孔令高,王世金,林华安,等. FY_2C 卫星太阳 X 射线探测器性能定标. 空间科学学报,2006,26(5):370-376.

The System Development and Applications for Space Weather Monitoring and Warning Based on FY-2 Geostationary Meteorological Satellite

Shan Haibin¹⁾ Guan Min²⁾ Liu Yujie²⁾ Yu Tao²⁾ Rong Zhiguo²⁾

¹⁾ (*Guangzhou Meteorological Satellite Ground Station, Guangzhou 510640*)

²⁾ (*National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081*)

Abstract

The FY-2 satellites are a series of geosynchronous meteorological satellites, which are instrumented to observe high-energy particles and solar X-ray fluxes except for meteorological observation. The spatial particle detector and solar X-ray detector are carried by the satellites. The high-energy particles detector has 7 energy channels to detect ^3He (3.5—26 MeV), ^4He (3.5—26 MeV), P1 (3.5—26 MeV), P2 (10—26 MeV), P3 (26—100 MeV), P4 (>1.1 MeV) and E (>1.4 MeV). And the solar X-ray detector has 10 energy channels which range from 4 keV to 100 keV to detect the solar X-ray fluxes. The solar activity level is directly revealed by these observations, and a real-time monitor of the X-ray storm, proton event and electronic event is provided. Additionally, these X-ray detection data can be used to make early-warnings of space environment disasters. The design of the FY-2 geostationary meteorological satellites data processing software for space environment monitor is introduced, which is a part of the first-phase project of space weather monitoring and warning system, supported by China Meteorological Administration. It is presented how to process the data from energetic particle detector and solar X-ray monitor. Through some examples, the X-ray energetic spectrum characteristics of proton events and the hard X-ray change characteristics during whole proton event are analyzed. Several proton event forecast rules are also summarized. It is detected by the FY-2 satellite that there are X-ray storm and high-energy proton event caused by the solar strong activities from Oct 28, 2003 to Oct 29, 2003. The first X-ray storm is on from 10:57 to 11:49 on Oct 28, and the hard X-ray storm is stronger than the soft. A strong storm lasts from 12:40 to 13:51 on Oct 28, during which the high current of X-ray is kept about 20 hours. From the X-ray power spectrum, it is found that the hard X-ray flux has an impulsive increase corresponding to the hard X-ray flux. The proton event begins on Oct 28, 13:55, and lasts for 24 hours. From Nov 1 to Nov 3, 2003, two solar flares are found by the FY-2 satellites, one of which is not a proton flare, and the other is. Some different rules of the two flares can be found from the FY-2 data. The no-proton flare lasts for more than ten hours from 21:00 on Nov 1 to 14:00 on Nov 2, but its X-ray spectrum is stable, and the hard X-ray has similar changes to the soft. The X-ray current enhances on Nov 2, 18:20, and the hard X-ray becomes stronger than the soft. Then, the proton event happens at 20:40 on Nov 2. The X-ray power spectrum shows that the hard X-ray has an impulsive increase corresponding to the hard X-ray flux.

Key words: FY-2; space weather; space environmental monitor; energetic particle; X-ray