

风云二号卫星资料在空间天气监测预警中的应用研究

单海滨¹⁾ 王劲松²⁾ 赵文化¹⁾ 唐云秋²⁾

①广州气象卫星地面站, 广州 510640; ②国家空间天气监测预警中心(国家卫星气象中心), 北京 100081

摘要: 风云二号卫星载有太阳 X 射线探测器及空间粒子探测器。其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的监测。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。本文介绍了风云二号气象卫星空间环境探测资料的处理、显示技术及其在空间环境灾害监测预警中的一些应用。研究了利用风云二号 X 射线探测器数据进行质子事件预报及计算短波通讯最低可用频率及电离层 D 层的电波吸收的方法。

在质子事件预报方面, 通过一些实例, 分析了质子耀斑的 X 射线能谱特征及软、硬 X 射线在整个爆发过程中的变化特征, 总结出几点质子事件的预报经验。

在利用风云二号 X 射线探测器数据计算短波通讯最低可用频率及电离层 D 层的电波吸收的方法研究方面, 通过一组经验公式, 设计了一个基于风云二号 X 射线探测器数据的经验预报模式。该模式的输入数据为风云二号 X 射线探测器数据, 根据 X 射线通量的变化趋势, 输出当前及未来 12 小时的全球日面 LUF 分部图。同时, 输入某地的经纬度及拟使用的频率, 可输出未来 12 小时该频率的衰减系数。

The application of FY-2 space sensor data in the space weather monitoring and forecast

Haibin Shan¹, Jinsong Wang², Wenhua Zhao¹, Yunqiu Tang²

¹The Meteorological satellite ground station ²National space weather monitoring and alerting center

Abstract There are two space detectors on board FY-2 satellite, solar X-ray detector and space particle detector. These observations reflect the level of solar activity directly. The X-ray storm, proton event and electronic event can be monitored by develop a space environment data receiving and processing system of FY-2 satellite. Further more, some of the disaster on the space environment could be predicted and perform an early warning. This paper introduce the technique of processing and displaying of FY-2 satellite space environment data. Some applications of these space data on space environment disaster have discussed also. For example, how to predict the proton event based on the FY-2 satellite X-ray flux data and the way to get the shortwave communication LUF(Lowest Usable Frequency) and the ionosphere D-region absorption.

In the proton event forecast aspect, through some examples, we have analyzed the X beam power spectrum characteristic on solar flare and summarizes several protons events forecast experience .

The FY-2 satellite X-ray flux data can be used for computation the lowest may use frequency on short-wave communication and computation the short-wave absorbs by the ionized layer. With a group of empirical formulas, we have designed an experience method which can be used for forecast the lowest may use frequency on short-wave communication and computation the short-wave absorbs by the ionized layer.

风云二号卫星资料在空间天气监测预警中的应用研究

单海滨¹⁾ 王劲松²⁾ 赵文化¹⁾ 唐云秋²⁾

①广州气象卫星地面站, 广州 510640; ②国家空间天气监测预警中心(国家卫星气象中心), 北京 100081

1. 引言

风云二号卫星载有太阳 X 射线探测器及空间粒子探测器。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 射线探测器实时监测太阳软硬 X 射线暴。这些监测数据直接反映了太阳的活动水平, 通过建立风云二号气象卫星空间环境监测数据的接收处理系统, 可对 X 射线暴、质子事件及电子事件进行实时的监测。同时, 利用风云二号 X 射线探测器的数据, 可对一些空间天气灾害进行预警。本文将通过一些实例, 分析质子耀斑时的 X 射线能谱特征, 探讨预报质子事件的方法。同时研究了如何利用 X 射线通量计算短波通讯最低可用频率及电离层 D 层的电波吸收, 并设计了一个基于风云二号 X 射线探测器数据的经验预报模式。

2. FY-2 空间环境监测器的组成

FY-2 空间环境监测器由空间粒子探测器和太阳 X 射线探测器两台仪器组成。

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。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 FY-2 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。具体探测能档如下:

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/n
	$^4\text{He}(\alpha)$: 3.5~26 MeV/n

探测器输出为粒子计数率, 数据采样周期为 16.384 秒。

太阳 X 射线探测器监测太阳软、硬 X 射线流量, 共分 10 个能道。测量的 X 射线能量范围为: 4~100 KeV。具体内容如下:

软 X 射线	X1~X5 : 4.0~5.5~7.6~10.5~14.5~20.0 KeV
硬 X 射线	X6~X10: 20.0~27.6~38.1~52.6~72.6~100 KeV
数据采样周期	为 8.2 秒

3. X 射线及带电粒子监测数据的分析处理及显示

从接收机收到的 FY-2 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, 才能作进一步的分析处理。

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 位码与计数的关系如下:

设低 5 位分别为 b1、b2、b3、b4、b5, b1~b5 的值为“0”或“1”, 当标志位为“111”时, 该通道的计数为: $2^0 b1 + 2^1 b2 + 2^2 b3 + 2^3 b4 + 2^4 b5$

当标志位为“000~110”时，该通道的计数为： $(32+2^0 b_1+2^1 b_2+2^2 b_3+2^3 b_4+2^4 b_5) * 2^{6-n}$
式中 n 为标志位的十进制数，取值范围为 0~6。

空间粒子探测器数据的转换流程为，首先把十进制探测器原码数据转换成 0~5 伏探测器测量电压值，再将探测器测量电压值转换成粒子的科学计数。电压与十进制数之间的转换关系是：把 5 伏电压平均分成 255 份，每份为 19.6 毫伏，也就是用 0~255 的十进制数（8 位二进制数）表示 0~5 伏的电压值。因此，十进制数乘以 19.6 毫伏得到的就是 0~5 伏间的电压值。即：

$$V = 19.6 * DC \quad (1)$$

式（1）中， V 表示电压值， DC 表示十进制的原始数据。

从式（1）得到探测器测量电压值 V 之后，就可将探测器测量电压值转换成粒子的科学计数，粒子的科学计数与探测器测量电压值是形如：

$$\log C = a_0 + a_1 v + a_2 v^2 + \cdots + a_n v^n \quad (2)$$

的对数线性关系。其中，系数多项式的系数 a_0 、 a_1 、 $a_2 \cdots a_n$ 是根据仪器的地面定标数据得到的，阶数 $n=4$ 。把（1）得到的电压值代入由（2）确定的多项式求得粒子的科学计数 C 。

FY-2 空间环境监测数据的压缩原码转换为相应的物理量之后，数据本身就直接反映了太阳的活动水平，将其按时间序列显示出来，可直观地反映探测结果。我们为 FY-2 空间环境监测数据开发了数据数据处理软件，该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。为了方便进一步的分析，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，我们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的时段、不同内容，对数据进行直观的比较分析。

在太阳耀斑暴发时，由于 X 射线的实际光子通量有时可能超出 X 射线探测仪所能探测的最大值好几倍，导致饱和现象，所以必须对数据作进一步的处理，以便更精确直观地描述事件。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。这样就把常规显示中的几个射线峰还原成一个峰。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. 质子事件的监测预警

当太阳耀斑暴发时，伴随着各种谱段的电磁辐射。其中耀斑硬 X 射线辐射，是耀斑粒子加速的非热过程产生，携带耀斑粒子加速重要信息。由于 X 射线光子以光速前进，到达近地空间的时间仅须 8 分钟，而耀斑加速粒子会相对滞后几十分钟甚至几十小时抵达近地空间，如果能够有效识别质子耀斑和非质子耀斑的能谱特征，利用这一时间差就能够警报质子事件的发生^[1]。

典型的太阳耀斑爆发过程在时间上可分为耀斑预相、爆发相和衰变相三个位相。耀斑预相期间，在主爆发之前的几分钟到几十分钟常出现小爆发。在爆发相期间，软、硬 X 射线波段的辐射快速升高。在衰变相期间，软、硬 X 射线波段的辐射以指数规律衰减^{[2][3]}。下面通过一些实例，分析质子耀斑时的 X 射线能谱特征，探讨预报质子事件的方法。

4.1 2003 年 10 月 28 日的质子耀斑分析

图 1 为风云二号气象卫星监测到的 2003 年 10 月 28 日到 10 月 29 日太阳剧烈活动引起的 X 射线爆发和高能质子事件。图中显示的数据从世界时 2003 年 10 月 28 日 9 时至 29 日 16 时。图中黑、绿、蓝线分别表示 X2、X3、X4 软 X 射线流量大小，红线表示 X9 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。

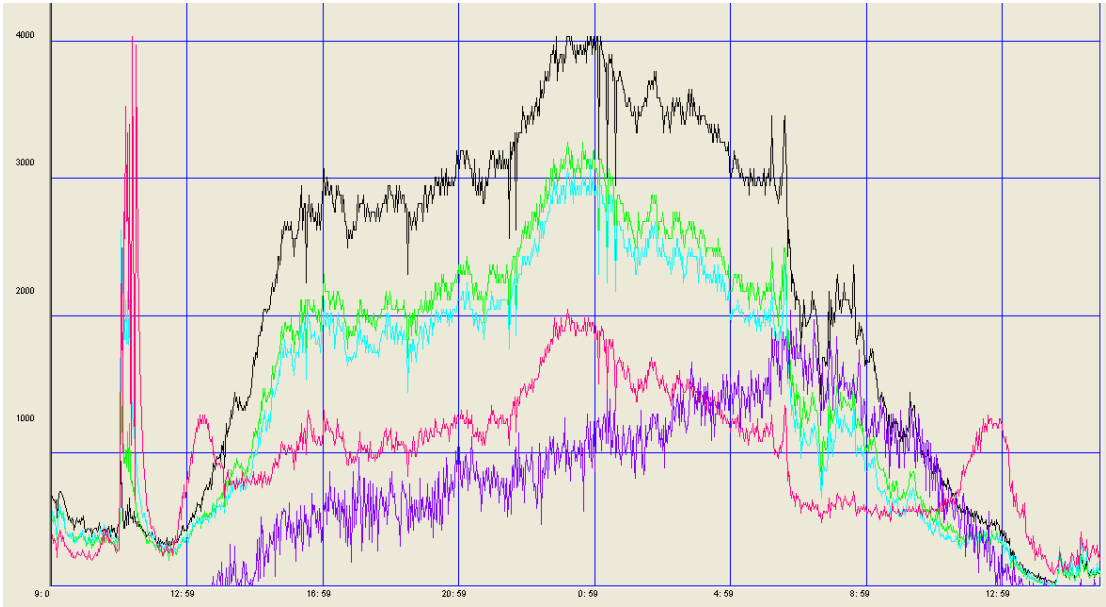


图 1 风云二号气象卫星 2003 年 10 月 28 日 9 时至 29 日 16 时数据
(黑、绿、蓝分别为 X2、X3、X4 软 X 射线，红为 X9 硬 X 射线，紫为 P1 能道的质子)

从图 1 分析，在 10 月 28 日世界时 9:40 至 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 至 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。紧接着，从 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 小时左右，从 X 射线能谱特征看，硬 X 射线在爆发期间变化强烈，其能谱份量会出现爆发性的增强。从 28 日 13:55 开始发生质子事件，并持续了 24 小时。

4.2 2003 年 11 月 1 日至 3 日的连续 2 次耀斑分析

世界时 2003 年 11 月 1 日至 3 日风云二号气象卫星监测到连续 2 次的太阳耀斑，其中第一次为非质子耀斑，第二次为质子耀斑。图 2 显示的数据从 11 月 1 日 21 时至 3 日 23 时。图中黑、绿、蓝线分别表示 X2、X3、X4 软 X 射线流量大小，红线表示 X9 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。

通过数据分析可发现 2 次耀斑的一些不同规律：

- 1) 从耀斑的整个暴发过程看，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 射线能谱特征看，非质子耀斑的 X 射线频谱在整个暴发过程中基本稳定，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较

X 射线强烈，其能谱份量会出现爆发性的增强。

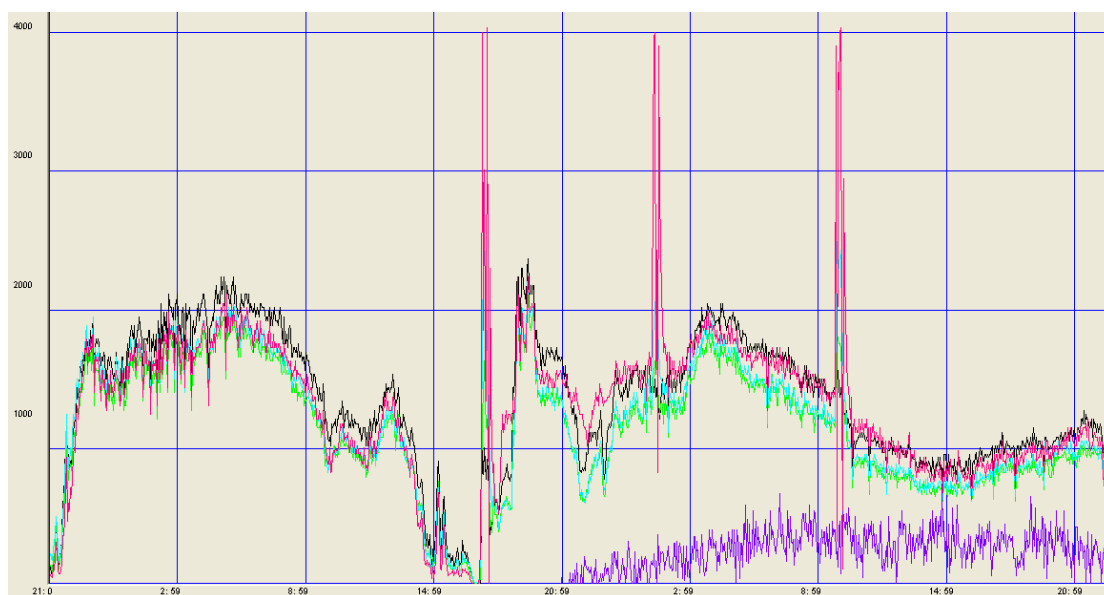


图2 风云二号气象卫星 2003 年 11 月 1 日 21 时至 3 日 23 时数据
(黑、绿、蓝分别为 X2、X3、X4 软 X 射线，红为 X9 硬 X 射线，紫为 P1 能道的质子)

4.3 质子耀斑预报的一些经验总结

从上面的实例分析看，在质子耀斑暴发前，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，其能谱份量会出现爆发性的增强。

从 2003 年 11 月 1 日至 3 日的连续 2 次耀斑分析，11 月 1 日 21 时开设至 21 日 14 时结束的非质子耀斑长达十几小时，但其 X 射线频谱在整个暴发过程中基本稳定，软、硬 X 射线在整个暴发过程中的变化基本一样，整个暴发过程没有质子事件。而从 2 日 17:13 至 17:43，出现了一次 X 射线暴，其硬 X 射线比软 X 射线强烈。紧接着，至 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，且具有质子耀斑的特征，应发出质子事件预报。在 20:40 开始出现质子事件。

对于 2003 年 10 月 28 日的质子耀斑分析，从 28 日 10:54 至 11:56，出现了一次 X 射线暴，其硬 X 射线比软 X 射线强烈。紧接着，12:52 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，且具有质子耀斑的特征，应发出质子事件预报。在 13:51 开始出现质子事件。

5. 利用 X 射线通量计算短波通讯最低可用频率及电离层 D 层的电波吸收

短波通讯(3~30 兆赫)可以沿地面以地波方式传播，也可通过电离层反射以天波方式传播。天波传播受电离层特性的影响，在实际应用中，人们需要知道可用频率的范围。

电离层能反射的电波最大频率称为最高可用频率(MUF)。另外，电波经电离层传播的能量还会被电离层吸收，吸收大小通常与频率平方成反比。频率较低，则信号电平因吸收增大

而降低。当电平降低到刚能满足最低接收信噪比要求时，所用的频率称为最低可用频率 (LUF)。

关于 MUF 将在另文讨论，这里主要探讨利用 FY2 卫星的 X 射线探测数据对 LUF 进行预报的方法。电波传播到电离层并被电离层反射的过程中会因电离层吸收而造成信号衰减，这种吸收主要因电离层电子与中性大气的碰撞而引起。大部分吸收发生在电离层 D 层 (50-90KM)。D 层高度的中性大气密度随时间的变化基本是确定的，因此电子浓度的变化决定了总吸收的变化。当太阳耀斑爆发时，电离层电子浓度发生剧烈变化从而导致对电波吸收的增加。太阳耀斑 X 射线波长界于 0.1~0.8nm，正是这一波段导致 D 区电离，因此太阳耀斑爆发会导致吸收的加剧。

将电波垂直上行经过反射后垂直下行衰减为 1DB 的频率作为本地的 LUF。小于 LUF 的频率衰减加大，通讯所受影响显著。大于 LUF 的频率衰减少，通讯所受影响相对较小。实验表明，对于日下点，太阳 X 射线通量与 LUF 的经验关系为：

$$LUF_{SUBSOLAR} = 10 * \log X_{flux} + 65 \quad (3)$$

式 (3) 中 $LUF_{SUBSOLAR}$ 为日下点的最低可用频率，单位为 MHz， X_{flux} 为 X 射线总通量，单位为每平方米瓦特 ($W m^{-2}$)。

其他地区的 LUF 随日下点距离增大而减小。日下点的 D 区电离度最大，远离日下点电离度逐渐减小并在日夜交界处达到 0，而地球夜面则不受太阳 X 射线的影响。根据几何关系，由日下点的最低可用频率及某地区的太阳高度角，可计算该地区的最低可用频率，计算公式如下：

$$LUF = LUF_{SUBSOLAR} * [1 - \cos^{0.75} \alpha] \quad (4)$$

式 (4) 中 LUF 为某地区的最低可用频率，单位为 MHz， α 为该地区的太阳高度角。

得出某地的 LUF 之后，可计算出电离层 D 区对其他频率的衰减，在垂直传播条件下 LUF 的衰减为 1DB，其他频率在垂直传播条件下的衰减使用如下公式计算：

$$absorption[f] = (LUF)^2 / f^2 \quad (5)$$

式 (5) 中 $absorption[f]$ 是频率为 f 的衰减，单位为 dB。

在非垂直传播情况下的吸收根据路径仰角的正弦递减获得：

$$absorption[f] (dB) = [(LUF)^2 / f^2] / \sin \beta \quad (6)$$

式 (6) 中 β 为路径仰角。

根据式 (3) 至 (6)，我们就可以建立一个基于风云二号 X 射线探测器数据的经验预报模式。该模式的输入数据为风云二号 X 射线探测器数据，根据 X 射线通量的变化趋势，输出当前及未来 12 小时的全球日面 LUF 分部图。同时，输入某地的经纬度及拟使用的频率，可输出未来 12 小时该频率的衰减系数。

6. 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。本文通过一些实例，分析质子耀斑时的 X 射线能谱特征，探讨预报质子事件的方法。从效果看，可提前几小时对质子事件做出预报。但由于条件所限，仅对几个实例进行了分析，其普遍性有待进一步的检验。同样，利用风云二号卫星监测的 X 射线通量数据及经验模式，可计算短波通讯最低可用频率及电离层 D 层的电波吸收，但其靠性有待进一步的验证。

参考文献

- [1] 朱光武, 李保田, 王世金, 林华安, 梁金宝, 孙越强, 吴炜奇. 风云二号卫星空间环境监测器. 中国科学 G 辑, 2004, 34 (3): 354~360.
- [2] 焦维新. 空间天气学. 北京: 气象出版社, 2003: 7-5029-3519-3.
- [3] 张元东, 王家龙. 太阳风暴. 北京: 气象出版社, 2003: 7-5029-3542-8.