

单海滨,王劲松,张效信,等. 利用风云二号卫星信号进行电离层闪烁监测的方法[J]. 气象, 2010, 36(6): 112-116.

利用风云二号卫星信号进行电离层闪烁监测的方法^{*}

单海滨¹ 王劲松² 张效信² 张荣楷¹ 徐杰¹ 曹静¹ 赵文化¹

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

提 要: 利用风云二号卫星业务遥测信号进行电离层闪烁监测, 根据其信号特点研究开发了监测仪。该监测仪用于实时监测分析风云二号卫星信号因电离层不规则结构引起的幅度闪烁和相位闪烁。风云二号业务遥测信号是一个 1.7 GHz 的调相信号, 其发射振幅稳定, 负载的信号精确可知, 在中国及周边地区可以被用来进行电离层闪烁监测研究。由于风云二号是静止卫星, 其监测结果将不存在卫星运动所附带的变化, 容易将时间和空间变化分离开, 因而比 GPS 闪烁监测更具优越性。该仪器将基于目前遍布全国的风云卫星展宽云图接收设备, 在使用风云卫星展宽云图接收机天线、高频及第一中频通道的情况下进行设计, 因此有利于未来的在全国范围内进行推广和组网监测。另外, 风云二号已经实现双星、组网观测, 其提供的两个不同方向的同频信号源将大大提高监测仪的应用价值。该仪器与 GPS 双频闪烁监测配合, 还将能获得电离层闪烁特性的谱特征。

关键词: 风云二号卫星, 电离层闪烁, 监测

A Method of the Ionospheric Scintillation Monitoring Based on the FY-2 Satellite Signals

SHAN Haibin¹ WANG Jinsong² ZHANG Xiaoxin²
ZHANG Rongkai¹ XU Jie¹ CAO Jing¹ ZHAO Wenhua¹

1 Guangzhou Meteorological Satellite Station, Guangzhou 510640

2 National Center for Space Weather Monitoring and Warning, National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081

Abstract: This paper describes the principles and methods of monitoring the ionospheric scintillation based on the FY-2 Satellite operational telemetry signals and how the monitor works. The monitor watches real-time satellite signals for scintillation in both amplitude and phase. The telemetry signal from the satellite is one of phase modulation at 1.7 GHz, which is stable in the emission amplitudes and accessible and accurate in the signals loaded. It can be used in the research on ionospheric scintillation in and around China. As the FY-2 Satellite is geostationary and monitors without changes inherent with the motion of the satellite, it is easy to separate the temporal changes from the spatial ones, making it more advantageous than the monitoring with GPS. Designed on the basis of the receivers for broadened cloud imagery that are widely installed across China and with the use of their antenna and channels and high and first intermediate frequencies, the monitoring instrument in question will be readily accepted nationwide and joined in network monitoring. In addition, it will be much more useful due to the availability of signal sources emitting the same frequency in two different directions from the existing networked twin satellites. When combined with the GPS-based dual-frequency scintillation monitors, this monitoring device will also be able to have access to the spectral characteristics of the ionospheric scintillation.

Key words: FY-2 Satellite, ionospheric scintillation, monitoring

* 国家 863 高技术研究发展计划资助项目(2009AA12Z137、2007AA12Z314), 国家自然科学基金委员会资助项目(40674077), 中国气象局气象新技术推广项目(CMATG2008M24)共同资助

2008年9月20日收稿; 2010年1月24日收修定稿

第一作者: 单海滨, 主要从事卫星遥感技术应用研究. Email: shb2003@126.com

引言

电离层闪烁是指无线电信号穿越电离层时,由于电离层不规则结构引起信号强度、相位的快速随机起伏,它会导致穿越电离层的通信出现误码和信号畸变,从而影响导航和通信系统的可靠性和精度。因此,要提高通信质量和卫星导航的精度,观测研究电离层闪烁是重要的基础。观测研究电离层闪烁也是研究电离层不规则结构及变化特性的重要手段,它有助于研究电离层中的各种现象,探索其物理机制。随着全球范围导航和通信系统对空间平台的依赖性日益增长,观测研究电离层闪烁并进一步预报电离层骚扰情况,以便采取措施、避免地面通信和卫星通信等设施受到破坏,对繁荣国民经济与参与国际竞争是十分重要的,因此如何对电离层闪烁进行有效的观测、建模与分析已成为电离层研究领域的一个重要科学问题,也是该领域国内外的研究热点^[1-2]。

进行电离层闪烁监测最理想的方法是由同步卫星发出单色的信标,在地面建立监测网的方式进行监测,20世纪80年代中国电波传播研究所、武汉大学等单位利用 ETS-2 同步卫星的 136 MHz 信标进行电离层闪烁研究^[3-8]。但由于专门由同步卫星发出单色的信标源成本太高,随着80年代末 ETS-2 卫星关闭,国内外开始利用 GPS 信号及卫星电视信号进行电离层闪烁监测。中国科学院光电研究院及武汉大学分别研制了 GPS 电离层闪烁监测设备。李国主等^[1]、陈风华等^[9]研制了 GPS 电离层闪烁实时监测系统,该接收机可实时监测分析幅度闪烁和相位闪烁指数。中国电波传播研究所及武汉大学等单位利用卫星电视信号进行电离层闪烁研究;朱太平等^[10-11]研制了 C 频段卫星电视信号幅度闪烁的监测设备,雷源汉等^[12]研制了应用苏联广播电视卫星信号进行 UHF 电离层闪烁研究的接收系统。康奈尔大学空间物理组在 GEC Plessey GPS Builder22 系统的基础上,对软件源码进行了修改开发了 GPS 电离层闪烁监测仪,国内多个单位利用该设备进行监测,研究赤道地区 L2 波段电离层闪烁的形态特性^[13]。国内还有一些单位利用美国空军开发了 GPS 电离层闪烁监测仪 ISM (Ionospheric Scintillation Monitor) 进行电离层闪烁研究^[2]。

目前国内外对电离层闪烁的监测方法主要是利

用 GPS 信号及卫星电视信号。由于不需要专门的信标源,可有效地降低监测成本。GPS 电离层闪烁监测仪可监测分析幅度闪烁和相位闪烁。但是, GPS 信号及卫星电视信号的特点造成了这种监测手段不够理想。由于 GPS 卫星相对地球运动,其闪烁的变化同时包括了时间及空间的因素,数据的处理相对复杂。利用卫星电视信号的电离层闪烁监测,由于电视信号本身的相位变化比较复杂,所以只能对幅度闪烁进行监测。

基于以上情况,我们开发了基于风云二号卫星^[14]业务遥测信号的电离层闪烁监测仪。从信号的特点分析,利用风云二号卫星业务遥测信号进行电离层闪烁监测有二个主要优点:(1)与 GPS 信号比较,由于是静止卫星信号,其闪烁的变化只包含时间因素;(2)与卫星电视信号比较,由于遥测信号的码速率仅为 2 K,且实际上精确可知,因此可以通过复现遥测信号的原始相位,剔除调制信号的成分,得到相位闪烁信息。可见,利用风云二号卫星业务遥测信号进行电离层闪烁监测同时具有利用 GPS 信号及卫星电视信号监测的优点,效果接近单色信标源的水平。在设计中我们充分考虑到与目前遍布全国的风云二号展宽云图接收站整合的问题,电离层闪烁监测仪能与风云二号展宽云图接收机共用相同的天线、高频及第一中频通道。只要在云图接收机中增加相应的模块,就可将其改造为可同时接收云图及监测闪烁的设备,有利于将来在全国范围布点监测。

1 利用 FY2 业务遥测信号监测电离层闪烁的原理

当卫星信号穿越电离层时,电离层不规则结构会引起信号幅度和相位的变化。如果能测量到信号到达地面时的幅度和相位,并知道信号的原始相位,就可以获得电离层闪烁的幅度和相位信息。

风云二号卫星下行信号包括原始云图、展宽云图、业务遥测、工程遥测、测距信号等。其中的业务遥测信号是一个连续不间断的信号,比较适合进行电离层闪烁测量。风云二号卫星业务遥测信号采用二次调制的方式,将 2 Kbps 码速率的数据以 DPSK 的方式调制到的 32 KHz 的副载波,再将副载波以 PM 方式调制到频率为 1702.5 MHz 的载波中。信号有效全向辐射功率(EIRP)为 45 dBm,从卫星发射时为等幅调角信号,到达接收端时因电离层不规则结构会引

起信号幅度、相位的快速随机起伏,也就是闪烁。将接收信号经检波后就得到幅度闪烁信息。由于遥测数据原码的码速率仅为 2 K,而闪烁引起的信号延迟在纳秒级,所以数据原码可从 DSP 采集的相位信息的解出。解出了数据原码,就可在本地频钟的控制下,由 DSP 数值模拟出被调制信号,从而复现遥测信号的原始相位并解出相位的随机起伏。

2 电离层闪烁监测仪的组成

电离层闪烁监测仪的组成包括闪烁信号接收机及数据处理计算机。闪烁信号接收机的功能是:接收风云二号卫星业务遥测信号;检测信号的幅度及相位;从检测的相位信号中剔除被调制信号的成分,提取相位闪烁信息;将幅度及相位的闪烁信息经 USB 接口送到数据处理计算机。数据处理计算机的功能是:经 USB 接口接收闪烁信号接收机送来的幅度及相位的闪烁信息;对数据进行分析处理并计算幅度及相位的闪烁指数;数据显示及存储。

由于信号从卫星发射时为等幅信号,将接收信号经检波后就得到幅度闪烁信息。检波器的输出再经 A/D 变换,由 DSP 进行数据处理,计算出电离层幅度闪烁 S_4 指数。相位闪烁的测量方法相对要复杂些,由于风云二号卫星业务遥测信号采用二次调制的方式调制了遥测数据,从鉴相器输出的相位信息包括了被调制信号的成分。为了获取信号在传输过程产生相位变化,就必须剔除被调制信号的成分,为此需要复现遥测信号的原始相位。其关键是通过解出遥测数据原码再生被调制信号。由于遥测数据原码的码速率仅为 2 K,而闪烁引起的信号延迟在纳秒级,所以数据原码可从 DSP 采集的相位信息解出。解出了数据原码,就可在本地频钟的控制下,由 DSP 数值模拟出被调制信号,从而复现遥测信号的原始相位。

由鉴相器输出的相位信息和通过解出遥测数据原码再生的调制信号,就可解出相位的随机起伏,其方法有时域法及频域法:时域法是将二路相位数据同步,从鉴相器输出的相位信息中减去调制相位,得到相位快速随机起伏的信息;频域法是将二路相位数据进行快速傅里叶变换,再从鉴相器输出信号的频谱中滤除调制信号的频谱分量,得到相位快速随机变化的频谱。解出了信号相位的随机起伏数据,就可算出信号的相位闪烁指数。

图 1 为整个测量的信号及数据处理流程。从天线接收的 1702.5 MHz 风云二号卫星业务遥测信号经二次下变频。为了与展宽云图接收机整合,天线选用展宽云图接收机常用的 3 m 抛物面天线,第一中频选为 152.5 M,第一中频放大器不带自动增益控制,其输出包涵了信号的幅度随机起伏信息,信号经检波及 A/D 变换后,输入 DSP 进行数据处理。第二中频信号经鉴相器后,输出的相位信息包括了被调制信号及相位闪烁的叠加成分,经 A/D 变换后,输入 DSP。由 DSP 通过数据处理,剔除被调制信号的成分,解出相位的随机起伏信息。DSP 将处理出来的相位及幅度随机起伏信息通过 USB 接口送到数据处理计算机,由数据处理计算机完成对数据的进一步分析处理、计算幅度及相位的闪烁指数、数据显示及存储等。图 2 为 DSP 的数据处理逻辑框图,功能包括:解出遥测数据原码;再生被调制信号;复现遥测信号的原始相位;剔除被调制信号的成分等。

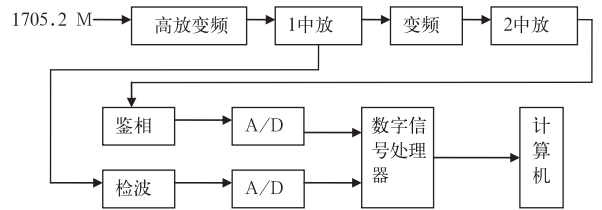


图 1 数据处理流程

Fig. 1 Data processing flow chart

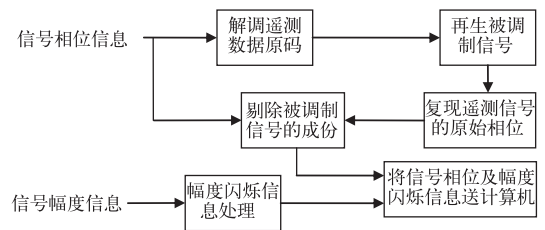


图 2 DSP 的数据处理逻辑框图

Fig. 2 Data processing logic diagram of DSP

3 数据处理

3.1 幅度闪烁指数及相位闪烁指数

闪烁信号接收机采集的资料内容包括信号幅度及已剔除被调制信号的成分的相位信息。资料经 USB 接口送到数据处理计算机,由数据处理计算机进一步处理。其处理流程包括:将幅度及相位信息分离并叠加时间信息;计算幅度闪烁 S_4 指数及相位

闪烁的载波相位标准差 σ_ϕ ; 幅度闪烁及相位闪烁指数的实时显示; 根据门限值监测闪烁事件; 资料的存档。

电离层幅度闪烁一般利用 S_4 指数来定量描述, 包括环境噪音的 S_4 指数的定义如下:

$$S_{4T} = \sqrt{\frac{\langle P^2 \rangle - \langle P \rangle^2}{\langle P \rangle^2}} \quad (1)$$

式(1)中 P 是信号的强度, $\langle \rangle$ 表示 60 秒信号的平均。引入平均的信噪比来消除环境噪音后的 S_4 指数为:

$$S_{4N_0} = \sqrt{\frac{100}{S/N_0} \left[1 + \frac{500}{19S/N_0} \right]} \quad (2)$$

式(2)中 S/N_0 是信噪比, 最后得到可计算的指数为:

$$S_4 = \sqrt{\frac{\langle P^2 \rangle - \langle P \rangle^2}{\langle P \rangle^2} - \frac{100}{S/N_0} \left[1 + \frac{500}{19S/N_0} \right]} \quad (3)$$

当闪烁增强时, S_4 指数增大, 当 S_4 指数等于 1 时, 称这时的闪烁达到饱和。在一定的情况下, 闪烁指数 S_4 可以大于 1, 称这时的闪烁出现聚焦。

电波相位闪烁一般利用使用载波相位的标准差 σ_ϕ 来表示, 定义如下:

$$\sigma_\phi^2 = \langle \Phi^2 \rangle - \langle \Phi \rangle^2 \quad (4)$$

式(4)中 Φ 为载波相位, $\langle \rangle$ 表示 60 秒信号的平均。

为了方便进一步的分析研究, 数据处理软件可将存档资料按不同的分辨率进行显示, 通过选择适当的分辨率, 我们既能观测短时间内电离层闪烁的细节, 也能观测长时间的变化趋势。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。

3.2 风云二号卫星空间环境探测资料与电离层闪烁资料的联合监测

电离层闪烁主要是由电离层电子密度不规则体引起的, 与太阳的活动密切相关。风云二号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。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, 这些数据直接反映了太阳的活动水平。同时对风云二号卫星空间环境探测资料与电离层闪烁资料进行监测, 有助于进一步研究太阳活动对电

离层的影响。

风云二号气象卫星空间环境探测数据包含在卫星的业务遥测信号中, 在监测信号电离层闪烁的同时, 可对业务遥测信号进行解码, 并提取空间环境探测数据, 实现对资料的联合监测。图 3 为 2009 年 6 月 2 日风云二号业务遥测信号 S_4 指数及载波相位标准差的监测资料。图中横轴为时间, 单位为小时, 纵轴 S_4 指数及载波相位标准差。图 4 为太阳 X 射线监测仪资料, 其中上方曲线为软 X 射线流量, 下方曲线为硬 X 射线流量。图中横轴为时间, 单位为小时, 纵轴为 X 射线流量。

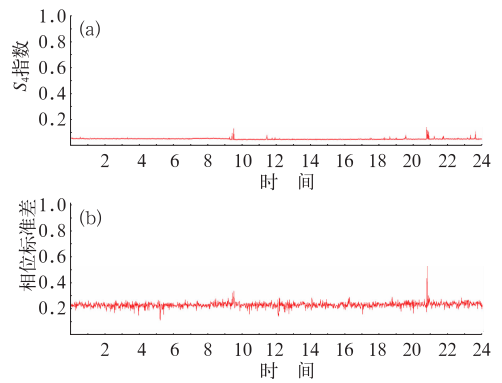


图 3 风云二号卫星信号 S_4 指数(a)及载波相位标准差(b)

Fig. 3 FY2 Satellite signal S_4 index (a) and carrier wave phase standard deviation (b)

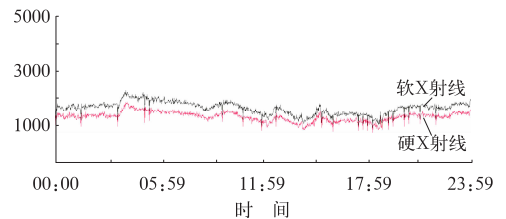


图 4 风云二号卫星太阳 X 射线监测仪资料显示

Fig. 4 FY2 Satellite monitoring the solar X-ray information

4 结束语

基于风云二号卫星业务遥测信号的闪烁监测仪于 2008 年 7 月开始在广州气象卫星地面站进行测试和联调。试验结果表明, 风云二号业务遥测信号是一个连续不间断的信号, 其信号稳定, 在中国及周边地区可以被用来进行电离层闪烁监测研究。由于

风云二号是静止卫星,其监测结果将不存在卫星运动所附带的变化,容易将时间和空间变化分离开,因而比 GPS 闪烁监测更具优越性。另外,风云二号已经实现双星组网观测,其提供的两个不同方向的同频信号源将大大提高监测数据的应用价值。该仪器在 1.7 GHz 上进行监测,与 GPS 双频闪烁监测配合,还将能获得电离层闪烁特性的谱特征。

参考文献

- [1] 李国主,宁百齐,袁洪. GPS 电离层闪烁实时监测系统的设计与实现[J]. 科学学报,2005,20(6):758-764.
- [2] 李青华.“电离层闪烁及不规则体参数反演方法的研究”[D]. 中国优秀硕士学位论文全文数据库(西安电子科技大学)
- [3] 龙其利. 新乡站电离层闪烁谱特征[J]. 电波科学学报,1994,9(2):60-64.
- [4] 龙其利,马健敏. 新乡电离层总电子含量观测结果[J]. 电波科学学报,1994,9(3):65-71.
- [5] 马健敏,龙其利. 1984 年 4 月 24 日太阳耀斑爆发对电离层总电子含量的影响[J]. 空间科学学报,1986,6(4):184-192.
- [6] 雷源汉,张凌,马淑英,等. 武昌同步卫星信号振幅闪烁功率谱[J]. 地球物理学报,1988,31(6):630-636.
- [7] 雷源汉,皮晓青,叶冬英. 同步卫星讯号显示的电离层闪烁特性[J]. 空间科学学报,1986,6(4):303-309.
- [8] 任晓飞. 基于 UHF 卫星信号闪烁测量的低纬度电离层漂移测量[D]. 中国优秀硕士学位论文全文数据库(中国电波传播研究所)
- [9] 陈风华,袁洪. 基于 GPS 信号的电离层 S_i 指数计算方法研究[J]. 空间科学学报,2007,27(1):23-28.
- [10] 朱太平. 利用 C 频段卫星电视信号研究电离层闪烁[J]. 空间科学学报,1995,15(2):137-142.
- [11] 朱太平,王椿年,孙环凤,等. 4GHz 卫星电视信号低纬电离层闪烁特征[J]. 电波科学学报,1994,9(1):83-86.
- [12] 雷源汉,林伟民,方一明,等. 应用广播电视卫星信号进行电离层闪烁研究[G].
- [13] 尚社平,史建魁,甄卫民,等. 赤道地区 L2 波段电离层闪烁的形态特性[J]. 电波科学学报,2006,21(3):410-415.
- [14] 宏观,张文建. 我国气象卫星及应用发展与展望[J]. 气象,2008;34(9):3-10.