

卫星低频电磁辐射在轨探测研究

曹晋滨^{①②*}, 杨俊英^①, 袁仕耿^③, 申旭辉^④, 刘元默^③, 燕春晓^②, 李文曾^②, 陈涛^②

① 北京航空航天大学宇航学院, 北京 100191;

② 中国科学院空间中心空间天气学国家重点实验室, 北京 100190;

③ 中国航天东方红卫星有限公司, 北京 100094;

④ 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

* E-mail: jbcao@cssar.ac.cn

收稿日期: 2008-06-16; 接受日期: 2009-11-13

国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(批准号: 2008AA12A216)

摘要 利用地球空间探测双星计划探测一号卫星上的磁场波动分析仪的原始数据, 分析了探测一号卫星在轨电磁辐射的特性. 结果显示卫星的电磁辐射主要集中在 30 Hz 以下. 在 30 Hz 以上, 卫星的电磁辐射最多延伸到 190 Hz 左右, 而且强度明显减弱. 在 190 Hz 以下的卫星电磁辐射具有与卫星姿态相关的长周期变化. 在 190~830 Hz 的范围的电磁辐射有不明显的长周期变化特征. 830~3990 Hz 范围的电磁辐射没有长周期变化特征. 卫星电磁辐射的长周期变化是由卫星姿态变化造成的. 卫星姿态变化引起卫星太阳方位角变化. 卫星太阳方位角越大, 卫星电磁辐射越大. 卫星太阳方位角从 90.6 增加到 93.6, 低于 10 Hz 以下的电磁辐射约增大为原来的 9 倍, 10~190 Hz 范围的电磁辐射大约增加到原来的 1.6 倍. 卫星在 < 10 和 10~190 Hz 范围内的电磁辐射强度与卫星太阳方位角的相关系数分别达到 0.90 和 0.91. 卫星在光照情况下的电磁辐射要比卫星在阴影情况下大. 卫星太阳能帆板电流产生的电磁辐射是卫星电磁辐射主要来源, 约占整个卫星电磁辐射的 87% (低频段 < 150 Hz) 和 94% (高频段 > 150 Hz). 这些中国首次对卫星电磁辐射的在轨探测结果对于我国未来相关科学和应用卫星的设计方案的优化具有重要的参考价值.

关键词

双星计划
电磁辐射
磁场波动分析仪
卫星姿态
太阳方位角

卫星在轨运行期间, 对卫星平台和有效载荷供电不可避免会产生微弱的电流. 此外太阳能电池帆板在接收太阳光照射, 提供电源的同时, 也会有电流的流动. 这些电流必然会产生磁场的扰动. 这些磁场的扰动可以从静态磁场一直延伸到甚低频波(VLF, Very Low Frequency)的频率范围. 这些卫星的低频电磁辐射虽然并不影响卫星的姿态控制, 但会对空间环境磁场测量有重要影响. 因此在某些以空间环境

磁场扰动为探测目标的卫星计划中, 都是通过伸杆技术和地面数据处理相结合的方法来解决这个问题.

严格来说, 在地面实验室内测量卫星实际运行中产生的电磁辐射是不可能的. 这是因为卫星太阳能帆板的在空间的实际工作状况和卫星表面电流很难在地面准确地再现. 再者, 来自于周围环境(工业、电器、地面地磁扰动)的干扰也很难剔除掉. 因此要想了解卫星在轨工作时电磁辐射, 实地原位探测就成

引用格式: 曹晋滨, 杨俊英, 袁仕耿, 等. 卫星低频电磁辐射在轨探测研究. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39(9): 1544—1550

Cao J B, Yang J Y, Yuan S G, et al. In-flight observations of electromagnetic interferences emitted by satellite. Sci China Ser E-Tech Sci, 2009, 52(7): 2112—2118, doi: 10.1007/s11431-009-0101-9

了一个重要选择. 可是在地球空间探测双星计划以前, 我国卫星从没有安装高精度低频电磁波探测器.

地球空间探测双星计划是我国首次安装有高精度磁场扰动探测器的卫星计划^[1,21]. 因此为在空间实地探测卫星的电磁辐射提供了一个良好的机会. 双星探测一号和探测二号卫星分别安装了欧洲空间局法国和英国联合研制的磁场波动分析仪 STAFF^[3]和中国科学院空间科学应用研究中心研制的低频电磁波探测器 LFEW^[4]. 双星计划中的磁场波动分析仪和低频电磁波探测器在轨运行良好. 他们和双星中的磁通门磁强计一起探测到了大量的空间环境中发生的低频和超低频电磁波辐射, 如磁层中阿尔芬波、合声、等离子体层嘶声、狮子吼、哨声等^[5-11]. 这些低频的电磁波在磁层能量的输运, 辐射带高能电子加速, 地磁脉动和磁场重联触发等方面起着重要作用^[12-22].

本文将利用对双星计划中探测一号卫星磁场波动分析仪探测数据, 研究卫星在轨运行时产生的电磁辐射特性, 以及长期变化的过程和原因, 与卫星太阳方位角的关系等等. 希望我们的研究结果对未来空间科学和地震卫星设计和数据处理提供一些重要的启示.

这里我们没有用 TC-2 卫星上的低频电磁波探测器来研究卫星低频电磁辐射. 双星 TC-1 上的 STAFF 和 TC-2 的低频波探测器各有所长. 从两者在法国同一实验室的标定结果来看(参见图 1), 双星 TC-2 的 LFEW 在 300~10000 Hz 范围内灵敏度高于 STAFF, 但在 10~300 Hz 范围内, LFEW 的灵敏度要显著低于 STAFF, 噪音比较大. 而从下面的研究结果可以看出卫星低频电磁辐射主要集中在 190 Hz 以下. 所以 TC-2 的 LFEW 不适合于研究卫星的低频电磁辐射. 此外 TC-2 的 LFEW 探头所在的伸杆

已打开, LFEW 的探头距离卫星较远. 所以由于以上两个原因, TC-2 卫星上的低频电磁波探测器不适合研究卫星低频电磁辐射.

1 探测一号卫星和磁场波动分析仪简介

探测一号卫星是我国地球空间探测双星计划中的赤道卫星. 其轨道是倾角为 28.5° 的大椭圆轨道. 近地点高度 480 km, 远地点高度 79000 km. 主要探测近地磁尾区的磁层空间暴过程及向阳面磁层顶区太阳风能量向磁层中的传输过程; 卫星重约 330 kg, 采用体装式太阳电池阵, 姿态为自旋稳定, 自旋轴垂直于黄道平面. 在理想情况下, 太阳光线与卫星自旋轴的夹角为 90°. 卫星的外形如图 2 所示.

探测一号卫星的磁场波动分析仪是感应式磁力仪, 可以探测频率在 4000 Hz 以下的磁场扰动信号. 它由三维磁场波动搜索线圈, 高灵敏超低噪声前置放大器、卫星舱内的电子数据处理单元 DWP 构成. 当空间等离子体波到达传感器(三维磁场波动搜索线圈)时, 其波动的磁场分量在搜索线圈中感应出电动势. 电子数据处理单元记录下感应电动势, 并根据地面标定数据, 反推出空间磁场的波动功率谱. 此外磁场波动分析仪还包含有一个磁场波阵分析器, 可以提供静态磁场的信息. 磁场波动分析仪(含磁场波阵分析器)探测的频率范围是 0~4000 Hz.

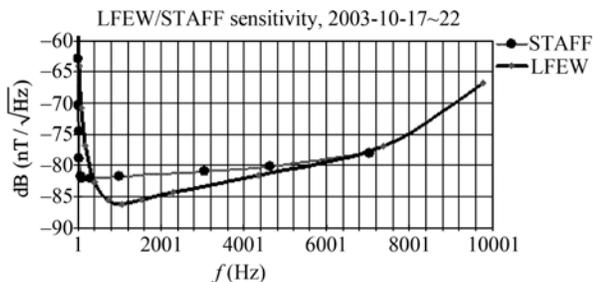


图 1 探测一号上的 STAFF 和探测二号上的 LFEW 灵敏度

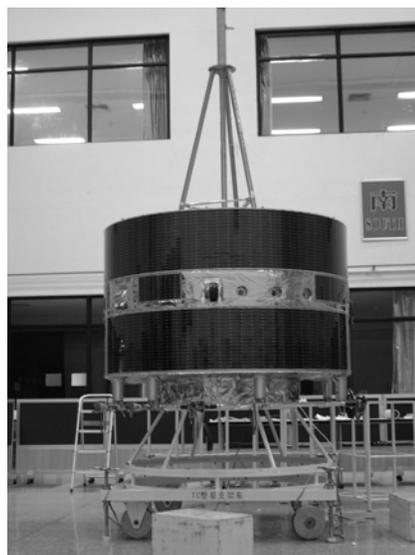


图 2 探测 1 号卫星

2 观测结果和讨论

卫星在轨运行, 产生电磁辐射是不可避免的. 但由于卫星的大部分电磁辐射或多或少都呈现出一定的规律性, 很多来自卫星的电磁辐射可以通过在地面数据处理方法来部分剔除掉. 为了分析卫星电磁辐射, 我们在分析中没有使用已经剔除干扰的标定数据, 而是使用了原始数据, 这些原始数据包含了卫星电磁辐射的重要信息^[4]. 图3给出了TC-1卫星磁场波动分析仪探测到的10~4000 Hz频率范围内磁场波动功率谱原始数据. 从图3中可以看出卫星的电磁辐射主要集中在30 Hz以下. 在30 Hz以上, 卫星的电磁辐射最多延伸到190 Hz左右, 而且强度明显减弱. 分析表明, 在30~190 Hz范围内的卫星电磁辐射虽然通过程序的自动化剔除较为困难, 但是针对某一个具体事例, 可以通过人工来有效剔除. 图3还可以看出卫星的电磁辐射对较高频率的波动探测没有太大的影响. 空间环境中极低频和甚低频磁场波动可以清楚地探测到. 图3显示在15:40 UT左右的合声和18:30~18:50 UT的嘶声都被清楚地探测到. 即使在30 Hz以下的超低频, 如果空间环境真实扰动强度足够大, 也可以清楚地探测到. 例如在08:58 UT左右, 一个超低频扰动就被清楚地探测到. 需要注意的是图1中在15:39 UT的从10 Hz一直到4000 Hz的电磁辐射脉冲不是由于卫星产生的, 而是由于仪器本身产生的.

卫星在轨运行期间卫星的电磁辐射并非保持不变, 它还会随着卫星的姿态, 卫星仪器的工作状态和太阳光入射角的变化而变化. 图4给出了TC-1卫星磁场波动分析仪在2004年8月31日和2004年11月11日21:00~22:30 UT的探测数据. 卫星的电磁辐射特性与图3类似. 比较这两天的探测数据, 可以看出在10~30 Hz范围内, 卫星电磁辐射的功率谱密度基本相同. 但在30~190 Hz的高频范围内, 2004年11月11日的电磁辐射要比2004年8月31日的要强.

为了更加准确地给出卫星电磁辐射, 我们给出了磁场波动分析仪在2005年1月1日至11月2日将近一年的时间在4个频段的卫星电磁辐射强度(图5). 从图5中可以看出卫星在低于10 Hz以下的电磁辐射最强(注意低于10 Hz以下的电磁辐射单位与其它不

一样). 在大部分时间里, 10~190 Hz范围的电磁辐射要大于190~830 Hz的电磁辐射. 830~3990 Hz范围的电磁辐射最弱. 这与图3和图4的结论是一致的. 此外在一年的时间里, 卫星电磁辐射显示出一个长周期的变化特性. 卫星电磁辐射在2005年3月~5月最低, 在2005年8月~9月最高. 其中, 低于10 Hz以下的电磁辐射长周期变化最显著. 最高电磁辐射与最低电磁辐射的比值大约为4.5/0.5, 约9倍. 10~190 Hz范围的电磁辐射也有明显的长周期变化, 其最高和最低的电磁辐射比约为2.1 dB, 约为1.6倍. 在190~830 Hz的范围的电磁辐射有不明显的长周期变化特征. 830~3990 Hz范围的电磁辐射基本不随时间变化.

卫星电磁辐射的长周期变化的原因主要来源于卫星姿态的漂移. 图6给出了在2005年1月1日至11月1日期间卫星自旋轴在地心太阳黄道坐标系(GSE)的仰角和方位角, 以及卫星太阳方位角的变化. 这些卫星姿态的数据是利用磁强计磁场探测数据确定的. 仰角定义为卫星自旋轴与黄道面的夹角, 向北偏离为正. 方位角是指卫星自旋轴在黄道面的投影与日地连线的夹角, 指向太阳时为0°. 从黄北极向下看逆时针旋转为正. 卫星太阳方位角是指卫星自旋轴与日地连线的夹角, 指向太阳时为0°.

比较图5和图6, 可以看出卫星电磁辐射强度与卫星太阳方位角密切相关. 而太阳方位角是由卫星姿态决定. 卫星太阳方位角越大, 卫星电磁辐射越大. 卫星太阳方位角从90.6°增加到93.6°, 低于10 Hz以下的电磁辐射约增大为原来的9倍, 10~190 Hz范围的电磁辐射大约增加到原来的1.6倍. 所以卫星电磁辐射的长周期变化主要是由卫星姿态的变化造成的. 一个非常可能的原因是卫星姿态变化导致卫星太阳方位角(solar aspect angle)变化. 太阳方位角的变化将导致卫星太阳能帆板上电流的变化, 从而导致卫星电磁辐射发生了改变.

为了更加可靠地确定磁场波动分析仪探测的电磁辐射的长周期变化不是由于仪器本身变化产生的, 我们对磁场波动分析仪的工作状况进行了分析. 磁场波动分析仪由星外的探头和星内的用于数据处理的电子箱DWP组成. 关于磁场波动分析仪星外的探头, 由于使用的是感应式探测原理, 与磁通门磁强计

**图 3 2004年3月27日低频电磁波探测的3个时间段
(08:30~09:00, 15:30~16:00和18:30~19:00 UT)的
功率谱密度原始数据**

不同, 探头受温度影响很小, 没有温度漂移. 地面实验表明在 $-50^{\circ}\sim 150^{\circ}$ 的范围内, 探头本身的噪声只有不到5%的变化. 关于星内的用于数据处理的电子箱

**图 4 2004年8月31日和11月11日两天磁场波动分析仪
探测到的卫星电磁辐射功率谱密度**

DWP, 其温度变化导致仪器工作状态变化可能性不大. 但为了完全排除温度影响, 我们在图 7 给出了 2006 年和 2007 年磁场波动分析仪探测的电磁辐射和电子箱的温度. 从图 7 中可以看出, 电磁辐射与电子箱温度没有任何相关性. 所以图 6 显示的磁场波动分析仪探测的电磁辐射不是由于电子箱温度变化引起的. 所以磁场波动分析仪探测到的电磁辐射变化是来自于卫星的电磁辐射变化, 而不是来自于仪器本身的影响.

**图 5 磁场波动分析仪 2005年1月1日至 11月2日探测的 4 个频段(0~10, 10~190, 190~830, 830~3990 Hz)
的电磁辐射强度变化**

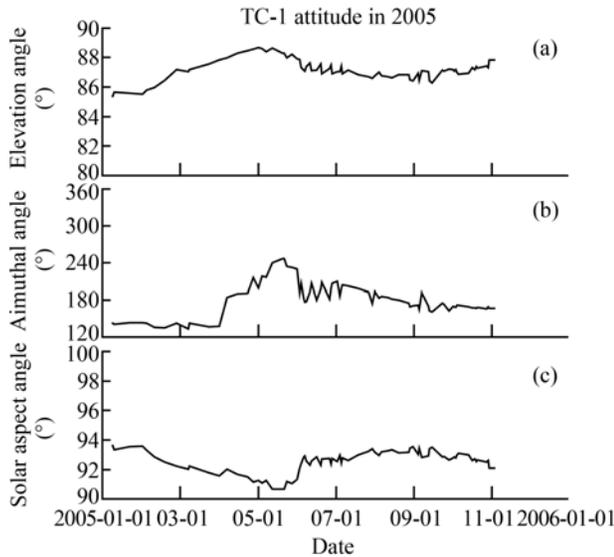


图 6 在 2005 年 1 月 1 日至 11 月 1 日期间卫星自旋轴在地心太阳黄道坐标系(GSE)的仰角(a)和方位角(b), 以及卫星太阳方位角(c)的变化

图 8 给出了卫星在 2006 年 1 月 1 日至 2007 年 11 月 1 日期间卫星自旋轴在地心太阳黄道坐标系(GSE)的仰角和方位角, 以及卫星太阳方位角的变化. 磁场波动分析仪探测的电磁辐射与卫星自旋轴仰角没有什么相关性. 在 2006 年和 2007 年, 卫星自旋轴

是在向黄道面漂移, 其仰角基本上是逐渐降低(见图 8(a)), 但磁场波动分析仪探测的电磁辐射却在 2006 年 5~6 月间和 2007 年 3~7 月间有两个明显的峰值(见图 7). 相反磁场波动分析仪探测的电磁辐射与太阳方位角相关性非常好. 特别是在 2007 年 4~5 月期间, 当太阳方位角有微弱的降低, 磁场波动分析仪探测的电磁辐射同样显示出相应的降低.

为了定量的研究卫星电磁辐射与 STAFF 电子箱的温度和卫星太阳方位角的相关性, 我们计算了图 8 中卫星电磁辐射与 STAFF 电子箱的温度和卫星太阳方位角的相关系数. 结果显示卫星在 <10 和 10~190 Hz 范围内的电磁辐射强度与卫星太阳方位角的相关系数分别达到 0.90 和 0.91. 相反卫星在 <10 和 10~190 Hz 范围内的电磁辐射强度与 STAFF 仪器的温度相关系数只是 0.06 和 0.14. 所以可以断定卫星太阳方位角的变化是造成卫星电磁辐射变化的主要原因.

为了更清楚地显示光照对卫星电磁辐射的影响, 我们比较了磁场波动分析仪在光照和阴影区电磁辐射. 图 9 给出了 2004 年 1 月磁场波动分析仪在地面、光照和阴影区(无光照)测量到的卫星电磁辐射的功率谱密度. 可以看出卫星电磁辐射在低频最强, 大于 90 Hz 以后, 随频率增高而降低. 在低频段(90 Hz 附

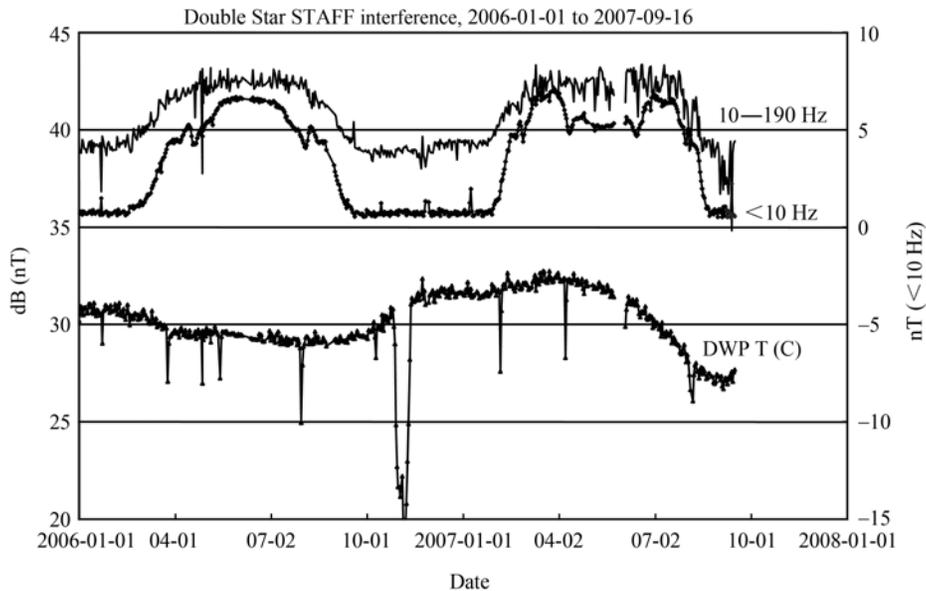


图 7 磁场波动分析仪 2006 年 1 月 1 日至 2007 年 10 月 1 日探测的两个频段(0~10, 10~190 Hz)的电磁辐射强度以及电子箱温度变化

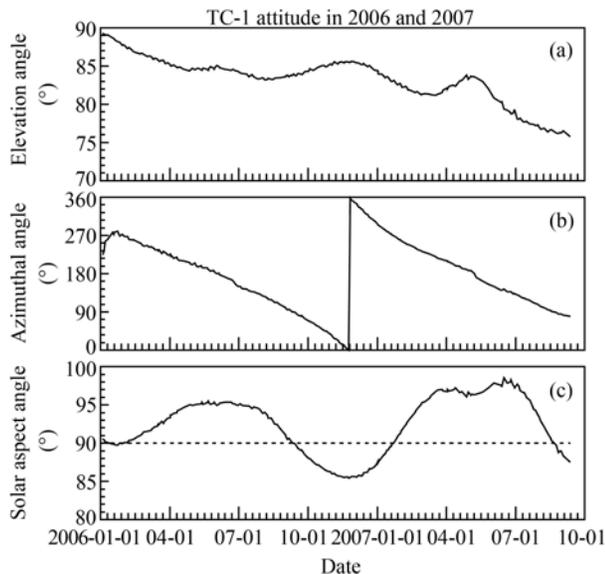


图 8 在 2006 年 1 月 1 日至 2007 年 10 月 1 日期间卫星自旋轴在地心太阳黄道坐标系(GSE)的仰角(a)和方位角(b), 以及卫星太阳方位角(c)的变化

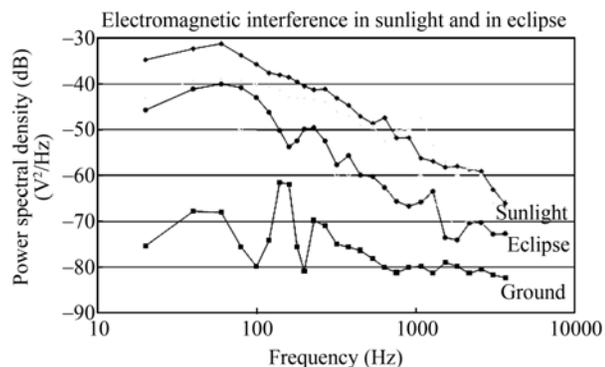


图 9 磁场波动分析仪在地面、光照和阴影区(无光照)测量到的卫星电磁辐射的功率谱密度(原始数据)

近)的电磁辐射强度要比在高频段(4000 Hz 附近)的电磁辐射强度高 63 倍。此外还可以明显看出, 卫星在光照情况下的电磁辐射要比卫星在阴影情况下大。在低频段(10~150 Hz), 光照情况下的卫星电磁辐射要比阴影情况下卫星电磁辐射大 9 dB, 约为 7.9 倍。在高频段(>150 Hz), 光照情况下的卫星电磁辐射要比阴影情况下卫星电磁辐射大 12 dB, 约为 15.8 倍。这是因为卫星在阴影情况时, 太阳能帆板没有接收日光, 不能提供电源, 所以来自太阳能帆板的电流产生的电磁辐射没有了。以上结果显示卫星太阳能帆板电流产生的电磁辐射是卫星电磁辐射主要来源, 约

占整个卫星电磁辐射的 87%(低频段)和 94%(高频段)。

3 结论

本文利用地球空间探测双星计划探测一号卫星上的磁场波动分析仪探测数据首次分析了中国科学卫星在轨电磁辐射的特性。结果显示卫星的电磁辐射主要集中在 30 Hz 以下。在 30 Hz 以上, 卫星的电磁辐射最多延伸到 190 Hz 左右, 而且强度明显减弱。在 190 Hz 以下的卫星电磁辐射具有与卫星太阳方位角相关的长周期变化。在 190~830 Hz 的范围的电磁辐射有不明显的长周期变化特征。830~3990 Hz 范围的电磁辐射没有长周期变化特征。卫星太阳方位角越大, 卫星电磁辐射越大。卫星太阳方位角从 90.6° 增加到 93.6°, 低于 10 Hz 以下的电磁辐射约增大为原来的 9 倍, 10~190 Hz 范围的电磁辐射大约增加到原来的 1.6 倍。卫星在 <10 和 10~190 Hz 范围内的电磁辐射强度与卫星太阳方位角的相关系数分别达到 0.90 和 0.91。卫星在光照情况下的电磁辐射要比卫星在阴影情况下大。卫星太阳能帆板电流产生的电磁辐射是卫星电磁辐射主要来源, 约占整个卫星电磁辐射的 87%(低频段 <100 Hz)和 94%(高频段 >100 Hz)。

实际探测中, 卫星、仪器以及空间环境背景的低频电磁辐射是混在一起的。但是从图 9 的结果, 我们可以容易地了解各个成分的相对大小。其中地面观测的看成是仪器本身产生的噪音谱。阴影可以看成是太阳能帆板不提供电源, 仅卫星工作时卫星电磁辐射。光照可以看成太阳能帆板提供电源, 卫星工作时卫星电磁辐射。从图 9 中, 可以看出仪器本身的噪声功率谱在低频段比阴影时卫星电磁辐射功率谱低 28 dB, 比光照时低 36 dB。也就是说仪器本身的噪声功率谱是阴影时卫星电磁辐射功率谱的 0.16%, 是光照时卫星电磁辐射功率谱的 0.025%。所以我们可以看到仪器本身的功率谱与卫星产生的电磁辐射功率谱相比可以忽略不计。

至于空间环境变化造成的低频电磁辐射, 由于它是瞬态的, 不是长时间存在的, 我们只要选择一个没有来自于空间环境低频电磁波的时刻的数据, 就可以很容易地将其排除掉。例如在图 3 中, 2004 年 3 月 27 日 08:30~08:40 UT 的时间段。

本文所介绍的探测结果对于我国未来空间环境探测卫星设计有很多有益的启示。例如对于探测地

震前兆电磁信号的地震卫星来说, 探测低频电磁波动的感应式磁力仪是卫星重要载荷. 现有的卫星观测结果显示许多地震前, 在空间都发现的磁场的扰动. 它们的频率可以从超低频(0.01 Hz)一直到甚高频

(几十MHz)^[23]. 我们的结果显示卫星平台电磁辐射对探测信号影响的主要是在小于 100 Hz 的低频段. 对于低频段的卫星电磁辐射干扰可以通过磁强计的磁场测量的差分技术来部分剔除.

致谢 感谢探测一号磁场波动分析仪工作队提供数据.

参考文献

- 1 Liu Z X, Escoubet P, Pu Z Y. The Double Star mission. *Ann Geophys*, 2005, 23(8): 2707—2712
- 2 Liu Z X, Pu Z Y, Cao J B, et al. New progress of Double Star-Cluster joint exploration and study. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2008, 51(10): 1565—1579
- 3 Cornilleau-Wehrin N, Alleyne H, Yearby K, et al. The STAFF-DWP wave instrument on the DSP equatorial spacecraft: description and first results. *Ann Geophys*, 2005, 23(8): 2785—2801
- 4 Cao J B, Liu Z X, Yang J Y, et al. First results of Low Frequency Electromagnetic Wave Detector (LFEW). *Ann Geophys*, 2005, 23(8): 2803—2811
- 5 Cao J B, Yang J Y, Yan C, et al. The observations of high energy electrons and associated waves by DSP satellites during substorm. *Nucl Phys B(Suppl)*, 2007, 166(1): 56—61
- 6 Yearby K. Observations of lion roars in the magnetosheath by the STAFF/DWP experiment on the Double Star TC-1 spacecraft. *Ann Geophys*, 2005, 23(8): 2861—2866
- 7 Yang J Y, Cao J B, Yan C X, et al. The mid-high latitude whistler mode chorus waves observed around substorm onsets. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2008, 51(10): 1648—1658
- 8 Santolik O. Radial variation of whistler-mode chorus: first results from the STAFF/DWP instrument on board the Double Star TC-1 spacecraft. *Ann Geophys*, 2005, 23(8): 2937—2942
- 9 Yang J, Cao J, Yan C, et al. The acceleration of energetic electrons associated with chorus observed by TC-2. *Nucl Phys B(Suppl)*, 2007, 166(1): 276—278[[doi](#)]
- 10 Cornilleau-Wehrin N, Grison B, Attie D, et al. Latitude and local time dependence of ULF wave power at the magnetopause: A Cluster-Double Star study. *J Geophys Res*, 2008, A07S09[[doi](#)]
- 11 路立, Mckenea Lawlor S, Barabash S, 等. TC-2/中性原子或像仪观测到等离子体片纵向振荡. *科学通报*, 2007, 52(5): 502—506
- 12 Li L. Acceleration of seed electrons by whistler turbulences near the geosynchronous orbit. *Chin J Geophys*, 2004, 47(5): 857—862
- 13 Zolotukhina N, Cao J B. Transformation of structured Pc1 into IPDP-like emission under enhanced magnetospheric convection: A case study. *J Atmos Sol-Terr Phys*, 2007, 69(14): 1668—1679[[doi](#)]
- 14 Cao J B, Zhou G C. Wave-particle transports from electromagnetic instabilities in the plasma sheet boundary layer. *Chin J Geophys*, 1995, 37(4): 527—538
- 15 Kozlov D A. The structure of standing Alfvén waves in a dipole magnetosphere with moving plasma. *Ann Geophys*, 2006, 24(1): 263—274
- 16 Wei X H. Cluster observations of waves in the whistler frequency range during magnetic reconnection in the Earth's magnetotail. *J Geophys Res*, 2007, 112[[doi](#)]
- 17 Li L, Cao J B, Zhou G C. Combined acceleration of electrons by whistler-mode and compressional ULF turbulences near the geosynchronous orbit. *J Geophys Res*, 2005, 110: A03203[[doi](#)]
- 18 Cai C L. Whistler turbulence at the magnetopause: A nonlinear generation mechanism. *Phys Plasmas*, 2001, 8(1): 272—276[[doi](#)]
- 19 Zong Q G. Ultralow frequency modulation of energetic particles in the dayside magnetosphere. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L12105. [[doi](#)]
- 20 Leonovich A S. Penetration of magnetosonic waves from the solar wind into the magnetosphere through the transition layer. *Ann Geophys*, 2003, 21(5): 1083—1093
- 21 Leonovich A S. Standing Alfvén waves with $m \gg 1$ in a dipole magnetosphere with moving plasma and aurora. *Adv Space Res*, 2008, 42(5): 970—978[[doi](#)]
- 22 Wei X H. Whistle and Hall magnetic field associated with near-Earth magnetotail reconnection observed by Cluster. *Chinese J Geophys*, 2007, 50(3): 575—585
- 23 Parrot M. Statistical study of ELF/VLF emissions recorded by a low-altitude satellite during seismic events. *J Geophys Res*, 1994, 99(12): 23339—23347