第7卷 第2期 空间科学学报 Vol. 7, No. 2
1987年4月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Apr., 1987

DE-1卫星对千米波辐射和极光嘶声的部分观测结果及分析

王元殿 刘庆令
（中国科学院空间物理研究所）

摘 要

对DE-1卫星等离子体波的部分观测数据进行了处理，本文主要给出关于千米波辐射及极光嘶声的观测结果及分析．仅就带宽而言，千米波辐射可以从50kHz到大于400 kHz，但峰值强度处于200kHz左右．电场谱密度可达$10^{-11}V^2m^{-2}Hz^{-1}$或更大．其频率范围和强度随着卫星的观测地点而变化，但具有一个共同特征，就是在其频率范围内强度通常存在多个峰值．峰值的相对强度在迅速变化，峰值所对应的频率也在移动．极光嘶声则有明显的上截止频率和下截止频率．上截止频率或者是等离子体频率，或者是电子回旋频率，看哪一个更小而定．而下截止频率主要是由于传播效应造成的．

一、引 言

通常认为，极光区上空径向距离2—4R_e范围内为带电粒子加速区，同时也是千米波辐射、极光嘶声等一些波动现象的源区，而DE-1卫星对这个区域进行了较好的覆盖．并且，其所携带的等离子体波接收机可以对波谱及相关函数等有关波的参量和特征数据进行较精细的测量，从而对波的形态特征、源区位置及传播特点可以获得进一步的理解．

DE-1卫星是1981年8月3日发射的，近地点为1.09R_e，远地点为4.65R_e．近地点的纬度每年进动108°，因此可以对每条磁力线上的径向距离范围1.09—4.65R_e提供一个全扫描．星上携带两个等离子体波接收机，覆盖频率范围为1.78—400kHz，共分成136个波段，每32秒给出一个完整的谱．天线有电偶极天线和磁环形天线两种，程控或者必要时的遥控可以使每个接收机接向不同的天线．除了每32秒每个接收机给出136个点谱外，两个接收机的输出在星上并做相关函数．对所得到的相关矩阵进行分析可以获得波的更多信息．关于接收机的介绍可以参照文献[1]，这里不再详述．

本文所给出的是关于等离子体波的部分观测结果，且着重于千米波辐射及极光嘶声谱的形态及变化．并对观测结果进行了某些分析和讨论．

本文于1985年7月16日收到．

二、观 测 结 果

图 1 和图 2 所给出的是基于对部分观测数据的分析所做出来的谱图．二者所对应的时间范围分别为 1981 年 10 月 2 日 5:15—7:15 UT 和同年10 月 5 日 13:20—15:20 UT．这两个图是这样做出来的，首先把接收机每个波段的数字输出信号根据天线的有效高度及接收机的标定数据转换成场强，进而转换成场谱密度．根据场谱密度转换成灰度图，波场愈强则愈黑．这两个图所给出的是电场谱密度随时间的变化，相应的磁场谱密度图这里没有给出．我们只是根据有无磁场分量来判断所观测到的波是电磁模还是静电模．

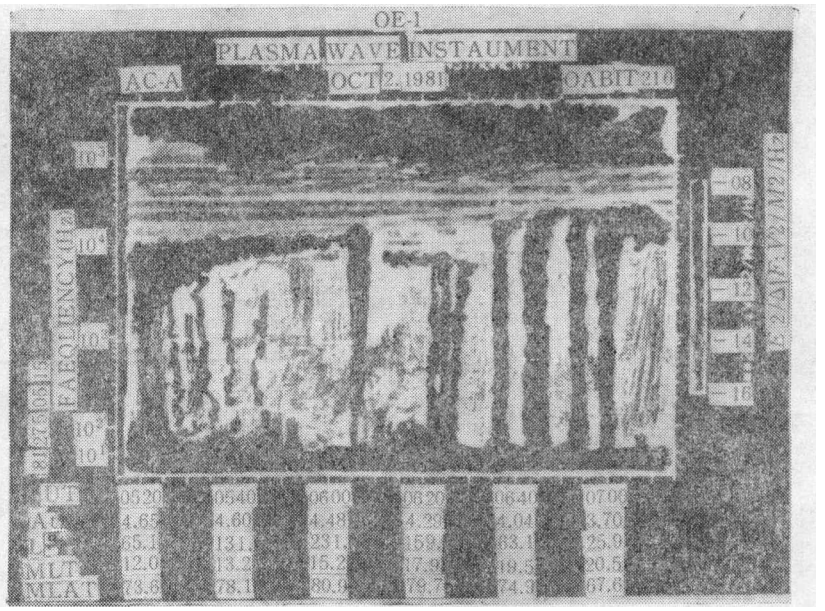


图 1　电场谱密度图

Fig. 1　Spectry density of electric field

由图 1 可以看出，在5:15—7:15 UT 的整个时间范围内都存在较强的千米波辐射，总的频率范围为 50—400kHz 或以上．但在不同时间（或卫星的不同位置）频率范围是很不一样的，强度的变化也较大．5:20—6:00 UT 则观测到极光嘶声．我们是根据其上截止频率和下截止频率的特征而做出极光嘶声的判断的．在这个区域里，电子等离子体频率小于电子回旋频率，极光嘶声的上截止频率应为电子等离子体频率．电子回旋频率如图中白线所示，显然有 $f_p < f_g$，f_p 和 f_g 分别表示电子等离子体频率和电子回旋频率．从测量数据的分析结果可以看出，谱的上频率截止边界是非常清楚的，这可能是判断电子等离子体频率，并从而判断电子密度的一个有效手段．这里，极光嘶声的下截止频率呈漏斗状，据认为这是由于传播效应造成的[3]．在下一节里将对此进行较为具体的说明．需要指出，通常认为极光嘶声源区的位置较低，在 3000—5000km 的高度范围内，而这时卫星的径向距离约为 $4R_e$，因此这里所记录到的是向上传播的嘶声．

6:30—7:25 UT 记录到一些静电脉冲串．在数据处理中，既处理了电场分量，也处理

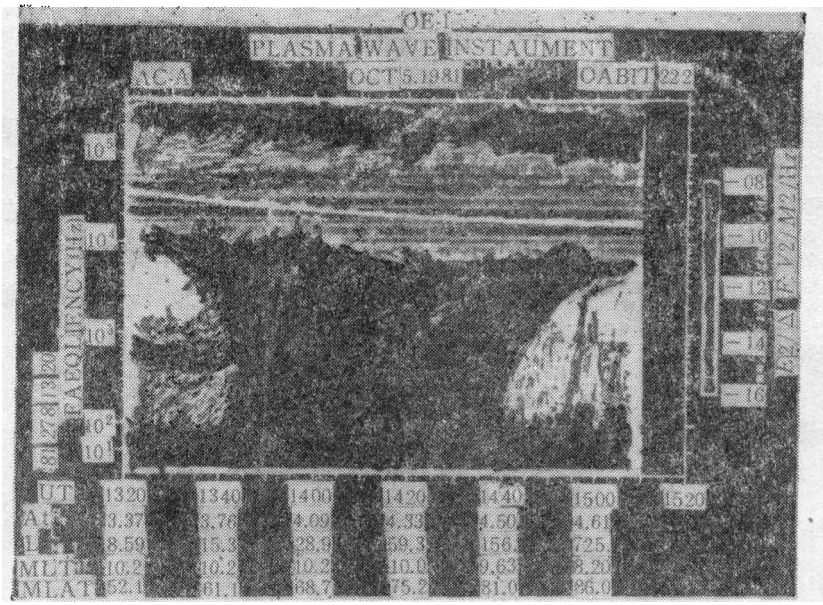
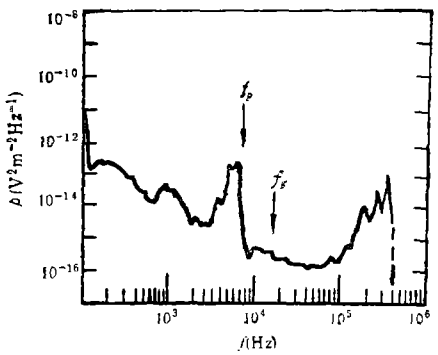


图 2 电场谱密度图

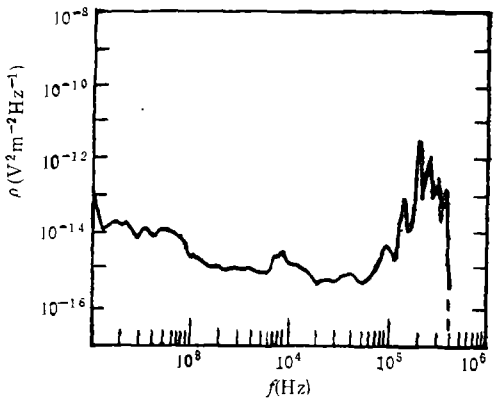
Fig. 2 Spectry density of electric field



5:22—5:24 UT

图 3 两分钟平均的电场强度谱

Fig. 3 Electric-field intensity spectry averaged over two minutes



5:40—5:42 UT

图 4 两分钟平均的电场强度谱

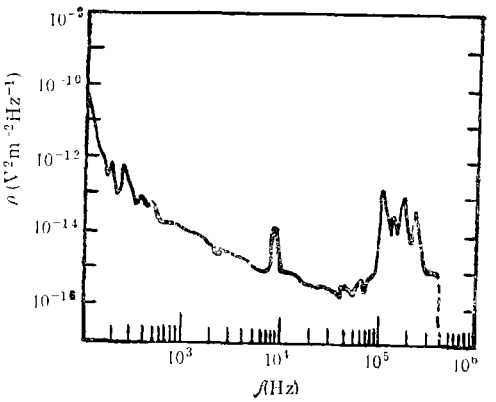
Fig. 4 Electric-field intensity spectry averaged over two minutes

了磁场分量,并把二者都画成灰度图. 如果所接收的波是电磁模,则既存在电场分量也存在磁场分量,二者灰度图的总的特征是一致的. 如果是静电模,则只有电场分量而无磁场分量. 我们正是根据这一点判断 6:30—7:25 UT 所接收到的是静电脉冲串. 可以看出,它们的上截止频率也为 f_p. 为了节省篇幅,本文没有给出磁场分量的灰度图.

图 2 也记录到持续的千米波辐射. 几乎在 13:20—15:20 UT 的整个时间范围内都记录到持续的极光嘶声,其上截止频率特征和下截止频率特征与上面所述的情况相同.

由于 DE-1 所携带的等离子体波接收机具有较高的谱分辨能力,并且能在比较短的

时间内扫描出一个完整的波谱，这就使我们能够分析波谱的一些细微特征及变化.图 3 到图 5 所画出的正是图 1 中 3 个不同时刻的电场强度谱. 谱是在两分钟内平均而得到的. 所对应的两分钟周期分别为 5:22—5:24, 5:40—5:42 和 5:46—5:48. 可以看出，千米波辐射的强度和带宽在不同时刻（也可能在不同位置）是变化的，但谱形却存在一个普遍特征，即在频率范围内存在多个峰值.峰值和谷值的电场强度谱密度相差一个量级以上. 不但如此，各个峰值的相对强度随着卫星的位置而变化. 在图 3 到图 5 所示的例子中，最强的峰由频率的高端向低端移动. 每个峰值所对应的频率也在移动. 其次，每个峰所对应的频率也不呈简单的谐波关系.



5:46—5:48 UT

图 5　两分钟平均的电场强度谱

Fig. 5　Electric-field intensity spectry averaged over two minutes

由图 3 到图 5 可以看出，极光嘶声的频率范围和强度也呈很大变化. 对应图 3 的时刻嘶声较强，上截止频率可以看得很清楚，谱在该处的变化是很陡的，这个频率对应电子等离子体频率，这个上截止频率约为 8kHz. f_g 和 f_p 已用箭头表示在图中.

三、对观测结果的分析

极光嘶声是一种哨声模的波，通常认为是由沉降电子束的契仑科夫辐射所激发的.这种波的上截止频率或者为 f_p，或者为 f_g，取决于哪一个更小. 某些测量表明，在波的源区满足 $f_p < f_g$，因此可以期待波的上截止频率为 f_p. 本例中上截止频率为 8kHz，而 $f_g =$ 16.8kHz，$f_g/f_p = 2.1$. 由 f_p 可得电子密度 $n_e \sim 1\text{cm}^{-3}$.

这里所观测到的极光嘶声的低频截止的形状和以前的观测结果很相似[2]. 文献 [2] 所观测到的低频截止为 V 形，这里所观测到的为漏斗形. 两种情形所对应的卫星相对于源区的位置是不同的，这里卫星的位置在源区之上，而文献[2]所对应的情形是卫星在源区之下.

但不管哪一种情形，低频截止是由于传播效应造成的. 据认为，极光嘶声传播的波法线方向是同共振锥相接近的，从而极光嘶声是一种准静电模. 可以证明，当波法线方向接近共振锥时，波射线路径的方向是同共振锥垂直的，其与磁场方向的夹角 ψ_{res} 由下式给出

$$\text{tg}\,\psi_{res} = \frac{f^2 f_p^2}{(f_p^2 - f^2)(f_g^2 - f^2)}. \tag{1}$$

由上式可以看出，当 $f \to 0$ 时 $\psi_{res} \to 0$；而当 $f \to \min(f_p, f_g)$ 时，$\psi_{res} \to \pi/2$. 这就是说，低频成分几乎是平行于磁力线传播的，频率愈高与磁力线的夹角就愈大. 这样，当卫星穿过经过源区的磁力线时所能够接收到的低频的频率最低，在这个位置的两侧所能接

收到的低端频率逐渐提高．这就是为什么卫星所观测到的极光嘶声的低频截止呈V形或漏斗形的原因．

本例中所观测到的嘶声的最大电场密度小于 $10^{-12}V^2m^{-2}Hz^{-1}$．前面已经提到，这里所观测到的嘶声是向上传播的．按照 Gurnett 等人的解释，向上传播的极光嘶声是由上行电子束所激发的契仑科夫辐射而形成的[3]．有观测证据表明，除沉降电子束外，在邻近区域还有上行电子束存在，这说明极光加速区的结构是很复杂的．

比较多的观测结果表明千米波辐射为 R-X 模．这种波模的截止频率，$f_R = \frac{1}{2}[f_g + (f_g^2 + 4f_p^2)^{\frac{1}{2}}]$，显然 $f_R > f_g$．当 $f_g > f_p$ 时，f_R 只是略大于 f_g．本例中卫星位置较高，可能在千米波辐射的源区位置之上．从这里的观测结果可以看出，千米波的频率范围从 50kHz 到大于 400kHz，但峰值强度是在 100—250kHz 的范围内．场强谱密度可达 $10^{-11}V^2m^{-2}Hz^{-1}$ 或以上．千米波辐射的场强谱密度具有一个显著的特征，就是在其通频带内存在多个峰值，各个峰值的相对强度以及所对应的频率随着卫星的位置在明显的变化．

已经提出多种理论解释千米波辐射的起源．Grabbe 对各种理论已进行过很好的评述[4]．吴京生和李罗权所提出的电子迴旋脉冲理论在预言波的偏振特征以及波的源区为低密度区等方面取得了成功[5]．千米波辐射具有非常复杂的谱特征和精细的结构，谱具有某种离散特征．要解释谱的各种特征及其变化，各种理论尚需进一步的发展，也许这对各种理论提供进一步的检验以决定其正确与否．为了解释谱的离散特点，Calvert 提出了一种反馈模型[6]．在他看来，由于源区的特殊密度分布会形成一种类似激光谐振腔的结构．由于谐振腔所提供的反馈便形成辐射的基波成分及各次谐波成分．但是，要形成谐振腔要求源区为低密度区，而在这个低密度区的周围要求存在一层高密度区．这种特殊的密度分布是否存在尚有待观测的进一步证实．最近有人提出，千米波辐射是由哨声孤立子辐射所形成的[7]．这个理论至少也有其合理的一面，因为常常观测到哨声和千米波辐射是一起存在的．

四、结 论

比较可以看出，通常千米波辐射最强，宽带场强可达 10mV/m，而极光嘶声一般低于 1mV/m．对于本文所描述的情况，卫星位置较高，所观测到的嘶声是向上传播的．比较多的人认为极光嘶声是由朗道共振激发的，而不是由迴旋共振产生的．如果这个观点成立，说明向上传播的嘶声是由上行电子束激发的，电子的能量范围为 100eV—10keV．Gurnett 等人所进行的射线追踪结果表明，源区的径向距离为 $2R_e$[3]．这表明该区域必定存在一个电子加速区．从前的低高度卫星所观测到的嘶声是向下传播的，这种嘶声同倒V沉降电子束密切相关．

千米波辐射的谱具有离散特征，在其通频带内存在多个峰值．多个峰值的相对强度及其所对应的频率在迅速变化．要解释这种复杂的谱特征，各种理论尚需进一步的发展．

感谢美国 IOWA 大学的 D.A. Gurnett 教授和 R. L. Huff 博士所提供的 DE-1 波测量数据以及在处理方法上所给予的帮助。感谢航天工业部空间技术研究院马式明和戈风沙同志在数据处理上所给予的帮助。

参　考　文　献

[1] Sawhan, S. D. et al., *Space Science Instrumentation*, Vol. 5, p. 535, 1981.
[2] Gurnett, D. A., *J. Geophys. Res.*, Vol. 71, p. 5599, 1966.
[3] Gurnett, D. A., S. D. Shawhan and R. R. Shaw, *J. Geophys. Res.*, Vol. 88, p. 329, 1983.
[4] Grabbe, C. L., *Rev. Geophys. Space Phys.*, Vol. 19, p. 627, 1981.
[5] Wu, C. S. and L. C. Lee, *Astrophys. J.*, Vol. 230, p. 621, 1979.
[6] Calvert, W., *J. Geophys. Res.*, Vol. 87, p. 8199, 1982.
[7] Buti, B. and G. S. lakhina, *J. Geophys. Res.*, Vol. 90, p. 2785, 1985.

Auroral Kilometric Radiation and Auroral Hiss: DE-1 Observation Results

Wang Yuan-dian　　Liu Qing-ling
(*Institute of Space Physics, Academia Sinica*)

Abstract

Data of plasma waves observed by DE-1 are analyzed for some time periods. In this paper, some results, mainly about AKR and auroral hiss, are given. The frequency range of AKR is from 50 kHz to 400 kHz or more, but the peak intensity is around 200 kHz. The maximum electric field spectral density can reach 10^{-11} $V^2m^{-2}Hz^{-1}$ or more. The frequency range and intensity vary with the observation positions. Usually there are several intensity peaks in the frequency range. The relative amplitude of the peaks and the frequencies correspondent to the peaks vary with the position of the satellite rapidly. As to auroral hiss, there are upper and lower frequency cut-offs. The upper frequency is either the electron gyrofrequency or the electron plasma frequency, depending on which one is the smaller; the lower frequency cut off is due to the propagation effect.