第20卷 第2期 空 间 科 学 学 报 Vol.20, No.2
2000 年 4月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Apr., 2000

电离层 F 层中舒曼共振现象的检测*

赵正予 谢树果
(武汉大学电子信息学院 430072)

A. Masson F. Lefeuvre
(Laboratoire de Physiquer et Chemie de L'environnment, France)

摘 要

利用 Aureol-3 卫星在电离层 F 层高度上 (650 km 左右) 对电离层电场扰动与电子密度扰动的观测数据进行分析处理，在高纬电离层 F 层高度上可以检测到舒曼共振现象. 根据等离子体参数，可以认为，发生在这个高度上的舒曼共振现象与 L 模式的波传播有关，舒曼共振的基频是与电子密度的大尺度不规则性有关，谐波分量与正向密度梯度相关.

关键词 电离层 F 层—舒曼共振

1 引 言

空间大尺度电子密度不规则性是发生在高纬和极区电离层及其上部的常见特征. 这种不规则性可以通过地面设备 (如非相干散射雷达) 和卫星观测到. 通常认为，大尺度密度不规则性是由结构性电子沉降所产生. 这些密度结构通过对流作用被输运到极区和极盖区，并在传输过程中转换成中尺度和小尺度的密度不规则性. 问题在于如何确切地指出这种结构性的机制. 在 Aureol-3 卫星上同步测量到的极区电离层高度上的电子密度和电场扰动，提供了对这种不规则性进行研究的可能性. 利用 Aureol-3 卫星观测资料， Cerisier 等指出 [1], 在极区电离层顶部观测到的中尺度的密度不规则性具有场线结构，并且与梯度漂移和电流对流不稳定性有关. 他们的工作是基于两方面：首先是考虑等离子体密度的增强，其次是电子密度与电场的比较. 然而，在进行信号的功率谱估值时， Cerisier 等并没有注意到出现在 5—30 Hz 频带内的频谱能量变化，尽管这对于他们的结论并没有任何影响. 此外，还有一些作者利用 DE-2 卫星数据对电离层电场扰动与电子密度扰动关系做了很好的描述，以确切描述发生在高纬电离层的不稳定性，但是同样没有对甚低频带 (ELF) 内的频率谱峰值进行细致的研究 [2]. 然而，不规则性和场的谱表达，常常表现出一些低频振荡现象. 值得注意的是，在这个频带内 (ELF), 所观测到的电离层 F 层高度上的电场扰动频率恰好对应于舒曼共振频率. 众所周知，舒曼共振是由发生在地球-电离层空腔内的雷暴活动所引起的 ELF 电磁振荡现象，它可以提供有关低电离层参数的有用信息. 自 50 年代以来，已有一些作者先后对此进行了研究 [3−5]. 这些研究表明，舒曼共振现象通常发生在电离层底部 (白天低于 50—60 km, 夜间低于 80—90 km). 但是，发生在电离层上部的

* 国家自然科学基金资助项目 49904010.
1999-06-15 收到原稿， 1999-12-23 收到修定稿

舒曼共振现象却鲜有报道. 本文将介绍利用 Aureol-3 卫星在电离层 F 层高度上 (650 km 左右) 对电离层电场扰动与电子密度扰动的观测数据, 通过对信号进行二阶频谱和高阶矩谱分析处理, 以期检测与电场扰动及电子密度扰动相关的舒曼共振现象并讨论舒曼共振和电子密度波动的非线性相互作用.

2 数据分析

Aureol-3 近地极轨低高度卫星于 1981 年 9 月 21 日发射, 其近地点为 400 km, 远地点为 2 000 km, 轨道周期为 109.5 min. 卫星为三轴稳定, 其 z 轴垂直. 在卫星上进行的 TBF 和 ISOPROBE 实验可以高分辨率地测量电子密度及 ELF(1—1500 Hz) 频率范围内电场和磁场分量信号 [6]. 本文工作选取其中 1982 年 3 月 16 日采集的相邻两段数据进行处理, 其有关参数示于表 1.

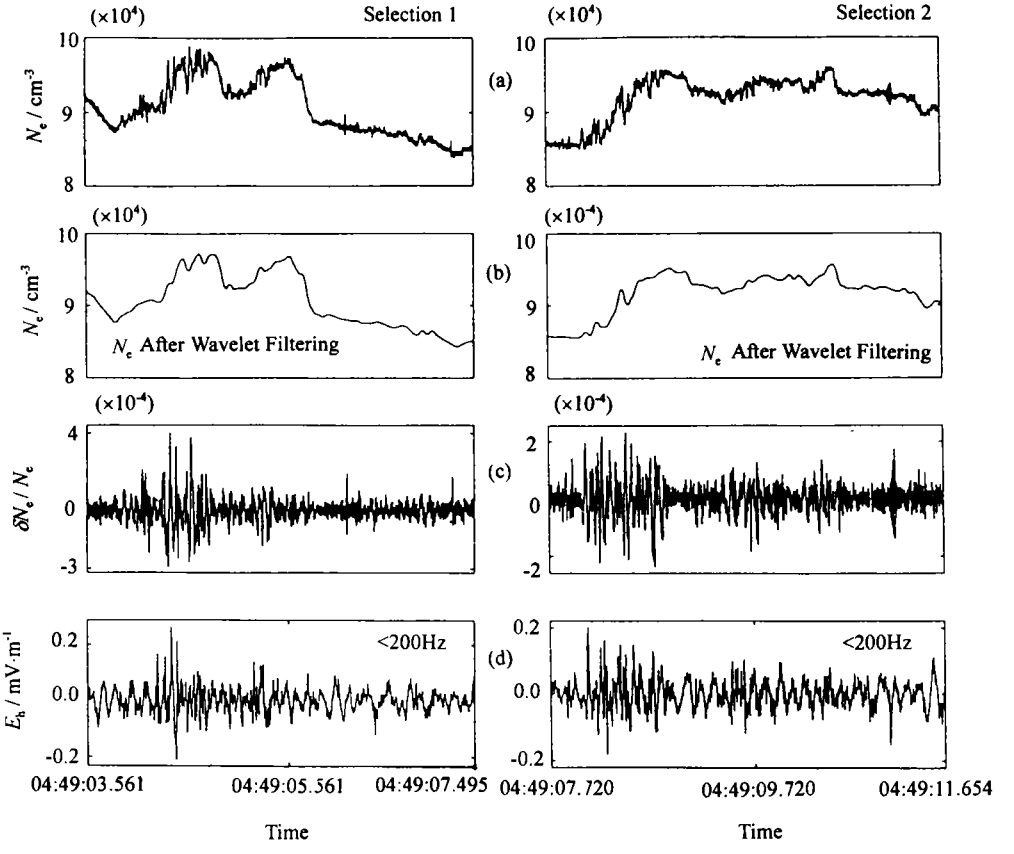


图 1 Aureol-3 的两段信号时域波形图

(a) N_e 时域波形, (b) 小波滤波后的 N_e 时域波形, (c) $\delta N_e/N_e(t)$ 时域波形, (d) 滤波后的 E_h 时域波形

Fig.1 Aureol-3 data to be analyzed: (a) waveform of N_e, (b) N_e after wavelet filtering, (c) waveform of $\delta N_e/N_e(t)$, (d) waveform of E_h ($f < 200$ Hz)

图 1 为两段信号的时域波形. 其中 $E_h(t)$ 为通过低频 (200 Hz) 滤波后的电场分量, 近似垂直于地球磁场方向, 时间序列抽样率为 5 000 Hz. $N_e(t)$ 为电子浓度, 每 0.2 ms 被测量一次. 利用小波分解方法, 可以得到电子浓度波动 $\delta N_e(t)/N_e(t)$, 即

$$\delta N_e(t)/N_e(t) = [N_e(t) - N_{e0}(t)]/N_e(t) \tag{1}$$

其中, $N_{e0}(t)$ 为 $N_e(t)$ 经过 5 阶小波滤波器处理后得到. 由图 1 可看出, $\delta N_e(t)/N_e(t)$ 和 $E_h(t)$ 分别在 044904.161—044904.961 UT 和 044908.040—044908.840 UT 两个时段上有强烈的幅度变化. 对本文所讨论的信号过程, Cerisier 等曾讨论过其梯度漂移不稳定性 [1], Zhao 等进一步进行了高分辨率谱分析和处理, 并利用高阶矩谱分析方法证明信号过程是非线性与线性机制共存 [7].

表 1　卫星轨道参数

	数据 1	数据 2
时间 (UT)	044903.561	044907.720
地磁纬度	68.33	68.10
地理纬度	71.69	71.45
地理经度	7.66	7.99
高度 (km)	637.58	640.02
L	8.92	8.70

3　舒曼共振现象的检测

图 2 为利用 3 种不同处理方法得到的 $\delta N_e(t)/N_e(t)$ 和 $E_h(t)$ 的功率谱表达. 其中, 首先在 2 564 个样本点 (≈ 0.51 s) 上, 对扰动信号, 即最大幅度波动时段进行 FFT 分析. 其次在 2 564 个样本点 (≈ 0.51 s) 上, 对噪声信号, 即最小幅度波动时段进行 FFT 分析. 最后利用平滑周期图方法对整个信号进行估值.

考察图 2(a) 中 $E_h(t)$ 的功率谱. 在利用平滑周期图方法得到的频域表达中 (图 2 中实线), 对于两段数据, 在 7.8 Hz 处都存在主频率峰值, 次峰值分别出现在 15.6 Hz 、 23.4 Hz 和 31.2 Hz 处, 但其确定不如主峰值那样明确, 尤其是第一段信号中 4 Hz 左右的峰值无法解释. 为此, 对扰动区域, 即最大幅度波动时段做 FFT 分析, 其结果如图 2 中破折线所示. 由此, 我们得到了比平滑周期图方法更为清晰的图像. 在扰动区外, 功率谱则完全不同了 (如图中连点线所示). 从两段信号的频域表达, 可以清晰地看出, 对于 $E_h(t)$ 信号, 这些频率峰值正对应于舒曼共振的基波和高次谐波, 且其最大能量峰值发生在基频处. 作为比较, 我们对其它波场信号的功率谱也做了估值. 结果表明, 在 E_z 分量上可以同样观测到舒曼共振现象 (E_z 近似平行于地磁场方向). 但是, 在三个磁场分量上都没有观测到. 在整个频带内, 磁场与电场的比值约为 1 000. 根据卫星上测量到的等离子参数 (等离子体频率为 2.2 MHz, 电子回旋频率为 1.1 MHz), 可以认为是波法线角接近于共振角、以 L 波模式传播的波引起所致. 因此, 在密度增加的区域就可能发生电场增大. 这可由图 3 中的等离子体频率的时域变化与几个舒曼共振频率的比较中看出. 显然, 舒曼共振的基频能量

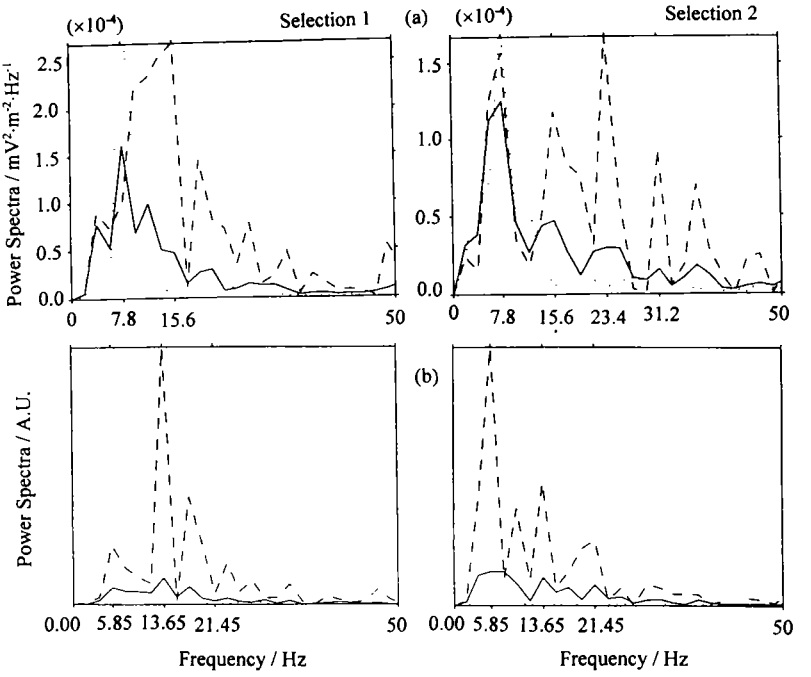


图 2 两段信号的电场扰动与电子密度扰动功率谱

(a) 电场扰动功率谱, (b) 电子密度扰动功率谱

- - - - 最大幅度波动时段进行 FFT 分析, ····· 最小幅度波动时段进行 FFT 分析, —— 平滑周期图估值

Fig.2 Power spectra for the two time intervals

(a) the electric component, (b) the electron density fluctuations

dashed lines: estimation from a single FFT applied in the region of maximum amplitude fluctuation, or turbulent signal, dotted lines: estimation from a single FFT applied in the region of minimum amplitude fluctuation, or, noise, solid lines: estimation from the periodogram

是随着大尺度电子密度起伏变化, 而谐波能量的最大值是在正的电子密度梯度区. 考虑到折射指数 (约为 1 000), 可以知道基频的波长要远大于中等尺度结构, 反之谐波波长要小于中等尺度结构.

考察图 2(b) 中 $\delta N_{\mathrm{e}}(t)/N_{\mathrm{e}}(t)$. 利用平滑周期图方法对整个信号进行估值, 两段信号分别可得到主峰值为 13.65 Hz 和 5.85 Hz. 如同对 $E_{\mathrm{h}}(t)$ 信号的分析, 同样可以得到最大幅度波动时段内和扰动区外的频谱能量表达, 即在 9.65 Hz 和 21.45 Hz 同时存在次峰值, 如图 2 所示. 5.85 Hz, 9.65 Hz 和 21.45 Hz 三个频率峰值随时间演变过程如图 3 所示. 正如图 3 所示, 所有这些频率都定位在密度梯度区内, 如同舒曼共振的谐波. 而在扰动区外的频谱则是扰动噪声, 频率谱峰值间没有明确的相关关系.

对图 2 仔细观察, 可以注意到在 $E_{\mathrm{h}}(t)$ 和 $\delta N_{\mathrm{e}}(t)/N_{\mathrm{e}}(t)$ 的频率峰值之间存在下列对应关系:

对信号 1 和 2

$$7.8\,\mathrm{Hz}\big[E_{\mathrm{h}}(t)\big]+5.85\,\mathrm{Hz}\big[\delta N_{\mathrm{e}}(t)/N_{\mathrm{e}}(t)\big]=13.65\,\mathrm{Hz}\big[\delta N_{\mathrm{e}}(t)/N_{\mathrm{e}}(t)\big]. \tag{2}$$

对信号 2

$$15.65\,\mathrm{Hz}\left[E_{\mathrm{h}}(t)\right]+5.85\,\mathrm{Hz}\left[\delta N_{\mathrm{e}}(t)/N_{\mathrm{e}}(t)\right]=21.45\,\mathrm{Hz}\left[\delta N_{\mathrm{e}}(t)/N_{\mathrm{e}}(t)\right]. \tag{3}$$

以及

$$5.85\,\mathrm{Hz}\left[\delta N_{\mathrm{e}}(t)/N_{\mathrm{e}}(t)\right]+9.75\left[\delta N_{\mathrm{e}}(t)/N_{\mathrm{e}}(t)\right]=15.6\,\mathrm{Hz}\left[E_{\mathrm{h}}(t)\right]. \tag{4}$$

理论上，一个随机过程可以用它的各阶矩函数完整地描述. 由于过程中两个谐波分量的相互作用，在两个谐波分量的和、差频处出现功率谱，并形成一定的相位关系，即所谓的平方相位耦合. 它可能是由于平方非线性的作用而产生的，实际应用中需要了解与功率谱分量有关的频率处是否出现明显的谱峰值，即各谐波分量是否发生平方相位耦合. 对于上述得到的关系，可知由于两个过程谐波分量之间的耦和作用，其频率之和 (或之差) 处可能存在功率贡献，问题在于要了解它们之间是否完全一致，或者它们是波-粒非线性相互作用的结果. 由于功率谱估计和其时域表达，即相关函数 (二阶矩) 估计在实际应用上有其局限性，相关函数 (功率谱) 仅能包含振幅信息，不包含相位信息，因此不能给出问题的解答. 为此，我们采用高阶矩 (互双谱) 分析方法检验这些频率峰值间的平方相位耦合关系，并进行定量分析. 因为，(互) 双谱分析的结果表明，只有出现平方相位耦合的各频率分量才出现在信号的三阶自 (互) 相关序列中.

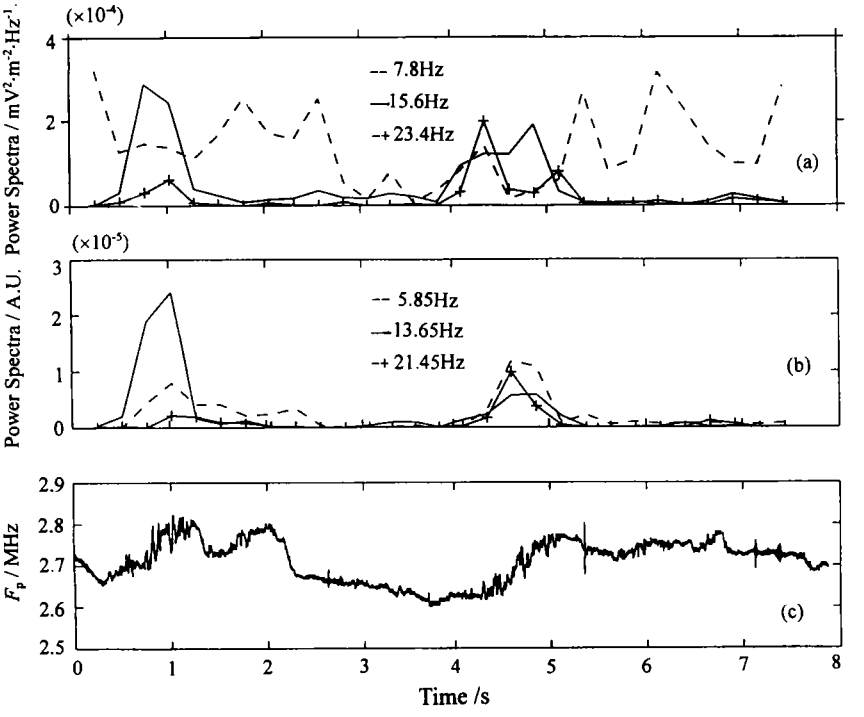


图 3　电场扰动与电子密度扰动的 Schumann 谐振及等离子频率 F_{p} 随时间演变过程
(a) 电场扰动，(b) 电子密度扰动，(c) 等离子频率 F_{p}

Fig.3　Time variation over the sum of the two intervals of the values of the power spectrum of the (a) E_{h} field component at Schumann frequencies, (b) the electron density fluctuations at frequencies possibly involved in wave-particle quadratic interactions, (c) the plasma frequency

设 $x(t)$ 与 $y(t)$ 分别代表两时间序列 $E_{\rm h}(t)$ 和 $\delta N_{\rm e}(t)/N_{\rm e}(t)$, 则 $x(t)$ 与 $y(t)$ 的互双谱表达为

$$B(F_m, F_n) = E[x(F_m)y(F_n)y(F_{\rm p})]. \tag{5}$$

其中, $E[\ ]$ 表示期望值. 如果信号是由过程的非线性部分 (或扰动)$D(t)$ 及噪声 $N(t)$ 组成, 则上式可写为:

$$B(F_m, F_n) = D_x(F_m)D_y(F_n)D_y(F_{\rm p}) + E[N_x(F_m)N_y(F_n)N_y(F_{\rm p})]. \tag{6}$$

其中假设 N_x 和 N_y 是平稳的.

对上述互双谱的估值是采用常规的非参数间接估值方法. 每段样本点数为 2564, 覆盖率为 0.50, 频率分辨率为 1.95 Hz. 考虑到可能的传播效应, 应仔细选择 $x(t)$ 与 $y(t)$ 的时间延迟值. 以不丢失它们之间的相位关系. 图 4 为两段信号互双谱分析的结果. 对于第二段信号 (图 4(b)), $\delta N_{\rm e}(t)/N_{\rm e}(t)$ 滞后于 $E_{\rm h}(t)$ 0.36 s. 如果仔细注意图 3, 就可以明白为什么选择这个滞后值了. 正如前面所指出, 在密度梯度区内, 所有的舒曼共振频率都有其最大值同时发生 (图 4(a)), 而滞后与密度不规则性的频率也是如此, 但是有约 0.25 s 的差别 (图 4(b)), 这个值是由于时间分辨率所致. 在图 4(b) 中, 三角形图表示了 Fourier 各分量通过 $F_m + F_n = F_{\rm p}$ 延迟得到的相位关系. 上半部分为 $F_m > 0$ 和 $F_n > 0$ 情况, 下半部分三角形为 $F_m > 0$ 和 $F_n < 0$ 及 $F_m \geqslant 2 \cdot |F_n|$ 的情况. 由图, 可以得到三个明显可辨的峰值. 在三角形上有两个很强的峰值, 分别落在 (5.85 Hz, 7.8 Hz) 和 (5.85 Hz, 15.6 Hz) 处. 其中, 5.85 Hz 为电子密度波动, 7.8 Hz 和 15.6 Hz 分别为舒曼共振的基频和二次谐波, 这正对应于前面我们所给出的频率关系式 (2) 和 (3). 此外, 两者相位关系正如 (4) 式所示, 即

$$15.6\,{\rm Hz}(E_{\rm h}(t)) - 5.85\,{\rm Hz}(\delta N_{\rm e}(t)/N_{\rm e}(t)) = 9.75\,{\rm Hz}(\delta N_{\rm e}(t)/N_{\rm e}(t)). \tag{7}$$

同样, 对第一段信号的互双谱分析如图 4(a) 所示. 由图可见, 只有一个明显的峰值频率值 (5.85 Hz, 7.8 Hz) 出现, 表明在此段时间事件中同样可以检测到舒曼共振现象的发生. 考虑到两段信号相邻, 因此舒曼共振发生在同一频率处.

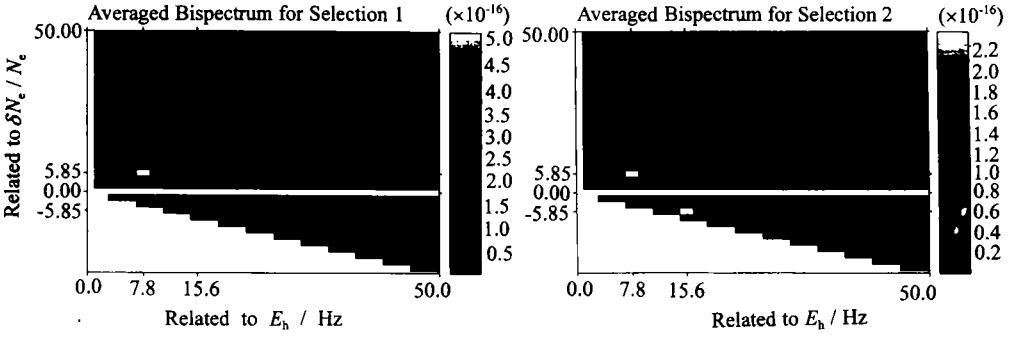


图 4 $E_{\rm h}(t)$ 和 $\delta N_{\rm e}(t)/N_{\rm e}(t)$ 互谱分析结果

Fig.4 Result of a cross-bispectral analysis on the $E_{\rm h}(t)$ and $\delta N_{\rm e}(t)/N_{\rm e}(t)$ time series for both time intervals

4 结　论

对于地球-电离层空腔，在几百 Hz 至几 Hz 的频率范围内，波长将比空腔的所有线性尺寸大得多，即往往大大超过地球的整个圆周．这时，实际上是不存在通常所说的波导过程，而只可以说空腔内激起了电磁振荡过程．显然，这个过程是以一定的张弛 (传播) 速率进行的，而且与至空腔内被辐射的或被俘获的电磁振荡源的距离及电离层参数条件有关．利用 Aureol-3 卫星观测资料，我们对高纬电离层电场及电子密度波动的变化过程及相互关系进行了分析．采用高分辨率谱分析和高阶矩谱 (互双谱) 分析方法，得到如下结果：

(1) 在高纬电离层 F 层高度上检测到舒曼共振现象．根据等离子体参数，可以认为，发生在这个高度上的舒曼共振现象与 L 波模式的波传播有关，其波法线角接近于共振角．

(2) 信号最大幅度发生在高等离子体频率区域．与各自的波长一致，舒曼共振的基频是与大尺度不规则性有关．相反，谐波的幅度与中等尺度的不规则性有关，并且其最大值发生在正密度梯度区域．

(3) 在电子密度功率谱上的峰值 5.85 Hz 与舒曼共振的基频或其谐波发生相互作用，这可以解释为什么在电子密度波动频谱分布上，在 6.5 Hz, 13.65 Hz 和 21.45 Hz 处会出现能量峰值的现象．

(4) 发生在二次波 - 粒相互作用的 $\delta N_e(t)/N_e(t)$ 的频率在密度梯度区内都有其最大值，且具有轻微的滞后，这在互双谱分析图上亦可看出，这可能与传播效应有关．

参　考　文　献

[1] Cerisier J C *et al.* Unstable density gradients in the high-latitude ionosphere. *Radio Sci.*, 1985, **20**(4):755—761

[2] Basu S *et al.* Plasma structuring by the gradient drift instability at high latitudes and comparison with velocity shear driven processes. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**:7 799—7 818

[3] Egeland A, Larsen T R. Fine structure of the Earth-ionosphere cavity resonances. *J. Geophys. Res.*, 1968, **73**: 4 986—4 989

[4] Nickolaenko A P, rabinowicz L M. Speeding up the convergence of zonal harmonic series representation in the Schumann resonance problem. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1974, **36**:979—985

[5] Williams E R. The Schumann resonance: a global tropical thermometer. *Science*, 1992, **256**:1 184—1 187

[6] Berthelier J J *et al.* Measyrements of the VLF electric and magnetic components of waves and DC electric field on board the Aureol-3 spacecraft. *Ann. Geophys.*, 1982, **38**:643—667

[7] Zhao Z Y *et al.* Non-linear interactions between ELF electrostatic turbulence and irregularities in electronic density. In: Processing of the 1997 International Symposium on Radio Propagation. Qingdao, China, 1997. 247—250

DETECTION OF SCHUMANN RESONANCE IN THE IONOSPHERE F REGION

ZHAO Zhengyu XIE Shuguo

(*College of Electronic information, Wuhan University*, 430072)

A. MASSON F. LEFEUVRE

(*Laboratoire de Physiquer et Chemie de L'environnment, France*)

Abstract

In this paper, simultaneous measurements of electron density and ELF electric field by Aureol-3 satellite have been analyzed using high frequency resolution spectral and cross-bispectral techniques. The detailed analyses of the data shows: first, the peaks in the power spectra of the electric field components are seen at the Schumann resonance frequencies in the high latitude ionospheric topside F region and second, the harmonics are associated with positive density gradients.

Key words Ionosphere F region, Irregularity, Schumann resonance