第22卷 第2期 空 间 科 学 学 报 Vol.22, No.2
2002 年 4月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Apr. 2002

电离层中 SEE 现象的静电粒子模拟 *

黄文耿 乐贵明 古士芬
(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

摘 要

利用网格粒子云 (PIC) 模型，在一定条件下，对电离层加热实验中静电波的激发和参量不稳定性的产生，作一维静电粒子模拟. 模拟结果表明， SEE 的特征与加热泵波频率 ω_0 和电子回旋频率 $n\omega_{ce}$ 之间的比值有关，入射泵波的电场与地磁场之间的夹角也是影响 SEE 的一个因素.

关键词 SEE —静电粒子模拟—参量衰减不稳定性

1 引言

大功率的高频电磁寻常波入射到电离层 F 层，能够产生地面观测到的次级电磁波 (Secondary Electromagnetic Waves 或 Stimulated Electromagnetic Emission, 简称 SEE). 这一现象在 1982 年电离层加热实验中被发现 [1]. 一般认为与大功率的电磁泵波激发的等离子体湍流有关，是由参量不稳定性产生的. 在以后的地面观测中， SEE 也陆续地被检测到 [2]–[4]. SEE 有非常丰富的能谱结构，对 SEE 的研究不仅丰富了等离子体非线性湍流理论和基本的等离子体现象，而且还为我们探测电离层提供了一种新的手段. 在一系列的电离层加热实验中发现， SEE 与加热泵波的强度和频率 ω_0 以及电子回旋频率 ω_{ce} 有着密切的关系. 当 $\omega_0 = n\omega_{ce}$ $(n = 3, 4, 5)$ 时， SEE 被抑制，这一特征为比较精确测量电波反射区的磁场提供了方便 [3].

由于静电等离子体波在 SEE 的产生中起着重要的作用 [5]，就粒子模拟而言，用静电模拟比用电磁模拟更为合理，这一工作已经有一些作者研究过. Goodman[6] 用 PIC 模型模拟了电磁非常波和强磁化线性密度梯度等离子体相互作用的情况，模拟了 40 960 个粒子，得到网格点上电场强度的频率分布曲线，与观测的 SEE 作定性的比较. 一般地，非常波不能激发 SEE 现象，但是该文中的电磁波是快 X 模，在非常波的较高的反射点反射，因而能够到达上混杂谐振层. Scales 等人 [7] 以入射的大功率高频寻常波为模拟网格的外部振荡电场，比较详细地讨论了上混杂频率 ω_{uh} 和 ω_{ce} 之间的不同取值对 SEE 的影响. Hussein 等 [8] 以同样的方法，着重讨论了不同电子和离子温度的比率对 SEE 的影响. 在以上作者的模拟过程中，均假设外加泵波电场垂直或准垂直于地磁场的情况. 由于外加电场的垂直分量 $E_\perp$ (相对磁场而言) 能激发产生 SEE 的上混杂波，因此 $E_\perp$ 的变化将影响 SEE[16]. Leyser 等 [12] 比较过不同地点的实验结果，认为 $E_\perp$ 是影响 SEE 强度的一个因素. 本文对 KEMP1[9] 模拟软件作适当的修改，重点研究泵波电场和磁场之间不同夹

* 载人航天工程应用项目资助
2001-07-02 收到原稿， 2002-02-03 收到修定稿

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

角的情况，当模拟达到稳态后，对网格点上的电场作快速傅里叶变换 (FFT)，得到电场的功率谱，将之与理论和实验结果作定性的比较.

2 SEE 能谱特征和产生机制

2.1 能谱特征

SEE 的能谱结构比较复杂，最一般的特征是所谓的 DM(Downshifted Maximum) 和 UM(Upshifted Maximum). DM 是指 SEE 能谱中存在低于泵波频率 ω_0 的成分，一般 $|\Delta\omega| \approx 10\,\mathrm{kHz}$, 约为下混杂频率 ω_{lh}, 另外，当 ω_0 比较接近 (但不等于) 电离层中电子的回旋谐振频率 $n\omega_{\mathrm{ce}}$(一般 $n = 3, 4, 5$) 时， SEE 的能谱中有时还有 2 倍或者 3 倍的 DM, 即 2 DM 或 3 DM 出现. UM 是指 SEE 能谱中存在高于泵波频率 ω_0 的成分，一般与 DM 对称，比较而言， UM 较 DM 弱. SEE 能谱还有一个重要的特点：当 ω_0 非常接近或者等于 $n\omega_{\mathrm{ce}}$ 时， SEE 中所有 DM 特征都消失. 另外， SEE 能谱中还有 BDM(Broad Downshifted Maximum, 即宽范围的 DM) 和 BUM(Broad Upshifted Maximum, 即宽范围的 UM) 特征. 详细分类参见文献 [4].

2.2 产生机制

一个大功率的电磁泵波 (寻常波) 入射到电离层 F 层，在电离层的谐振区 ($\omega_0 \approx \omega_{\mathrm{uh}}$) 的高度上，当满足匹配条件：

$$\omega_0 = \omega_1 + \omega_2;$$
$$k_0 = k_1 + k_2$$

时，能激发起参量不稳定性 [10]. SEE 的产生是一个波-波相互作用的过程 [11]–[13], 被认为是由参量不稳定性产生的. 电磁泵波参数衰变为静电上混杂波，静电上混杂波又立刻衰变为另一个低于 ω_0 的能被地面观测到的电磁寻常波和一个低混杂波，或者是一个电子 Bernstein 波和一个低混杂波，电子 Bernstein 波经电子密度不规则体散射而产生地面观测到的 SEE. 其中，电磁泵波衰变为上混杂波一般被认为有两种方式，一是通过热振荡双流不稳定性 [14],[15]; 另外一种是通过电离层中的密度不规则体的直接转变 [5], 这种机制被用来解释 SEE 的能谱结构， 1994 年 Zhou 等人 [11] 考虑参量不稳定性中电子 Bernstein 波的级联，解释了 SEE 中 DM 、 2DM 、 3DM 和 UM 能谱特征. 而更复杂的 BDM 和 BUM 则被认为与四波相互作用有关 [17]. 简单地讲， SEE 的产生可分为两个步骤.

(1) 前向模式转变过程，即发射的大功率的电磁 O 波在电离层的上混杂振荡区激发起垂直于磁场的高频静电上混杂波;

(2) 后向模式转变过程，即通过波-波相互作用，高频静电上混杂波参数衰减成平行于磁场的高频电磁波，产生地面观测到的 SEE.

3 模拟模型

用网格粒子云 PIC(Particle In Cell) 静电粒子模型 [18], 在一维空间 (x 方向) 三维速度

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

(v_x, v_y, v_z), 对牛顿方程、泊松方程和洛伦兹方程循环求解. 一般步骤为:

(1) 设定粒子的初始位置和初始速度 (x_0, v_0).

(2) 用 PIC 模型向网格点分配电荷 ρ_c.

(3) 求解泊松方程: $\nabla^2\varphi_c = -\rho_c/\varepsilon_0$, 由 $E_c = -\nabla\varphi_c$ 得到网格点上的电场 E_c.

(4) 离散化方程 $m_i \mathrm{d}v_i/\mathrm{d}t = q(E_c + v_i \times B)$ 和 $v_i = \mathrm{d}x_i/\mathrm{d}t$, 得到第 i 个粒子的位置和速度 (x_i, v_i).

(5) 扫遍所有的粒子, 时间向前推进一步, 重复以上的计算, 直到循环结束为止.

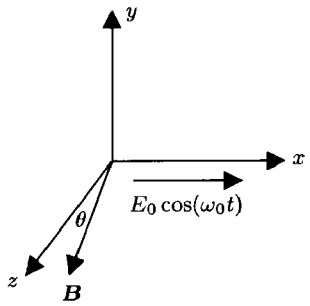


图 1　一维模拟模型
Fig.1　One dimensional simulation model

在以上的计算中, 大功率高频电磁波 $E = E_0\cos(\omega_0 t)$ 作为外加振荡电场作用于模拟网格空间. 固定背景地磁场 $\boldsymbol{B}$ 与入射泵波方向如图 1 所示.

在整个模拟阶段, 模拟长度为 $1024\,\lambda_D$, λ_D 为等离子体德拜长度, 每个网格中有 200 个电子和 200 个离子, 电子和离子初始位置随机分布于模拟网格中, 初始速度为麦克斯韦分布, 假设电子温度和离子温度相等 $(T_e = T_i)$, 边界条件为循环边界条件. 外加泵波电场强度用 ν_{osc} 与电子的平均热速度 v_{thec} 的比值表示. 其中 $\nu_{osc} = qE_0/m_e\omega_{uh}$ 为电子在外加泵波电场中的振荡速度. 这里我们取 $\nu_{osc}/v_{thec} = 0.4$, 相当于 $E_0 \approx 1.0\,\mathrm{V/m}$. 为了得到足够的电子和离子的频率解, 取电子和离子的 "人造质量" 比率 $m_e/m_i = 1/100$, 模拟时间步长 $\Delta t = 0.04$, 让模拟达到稳态时 $(\omega_{lh}t \approx 2000)$ 结束.

4　模拟结果与讨论

参考文献 [7] 和 [18] 中所讨论的静电波的色散关系, 取不同的 θ 角, 对以上第 3 节中的初始条件做反复的模拟, 模拟结果见图 2—6.

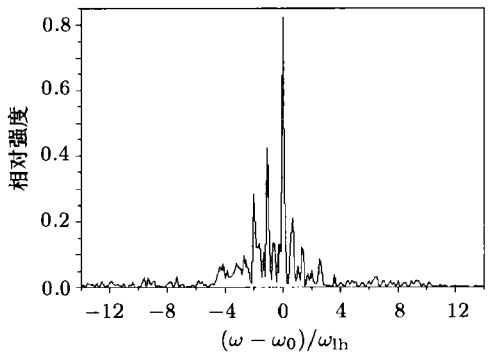


图 2　电场功率谱 $|E(\omega)|^2(\theta = 0°, \omega_0 = 4.2\omega_{ce})$
Fig.2　Electric field power spectra for $\theta = 0°$, $\omega_0 = 4.2\omega_{ce}$

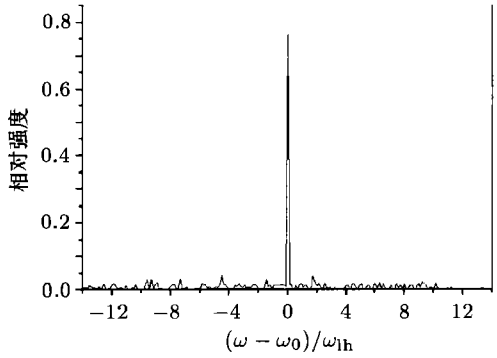


图 3　电场功率谱 $|E(\omega)|^2(\theta = 0°, \omega_0 = 4.0\omega_{ce})$
Fig.3　Electric field power spectra for $\theta = 0°$, $\omega_0 = 4.0\omega_{ce}$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

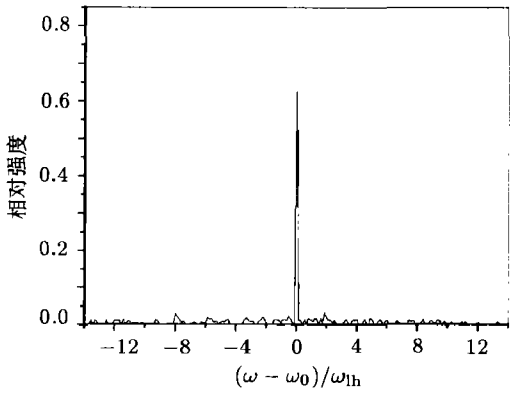


图 4 电场功率谱 $|E(\omega)|^2(\theta = 90°, \omega_0 = 4.2\omega_{ce})$

Fig.4 Electric field power spectra for $\theta = 90°$, $\omega_0 = 4.2\omega_{ce}$

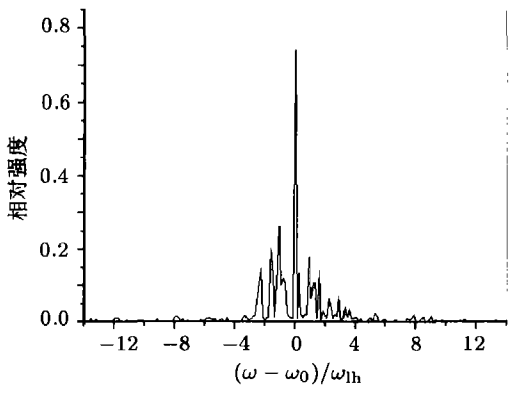
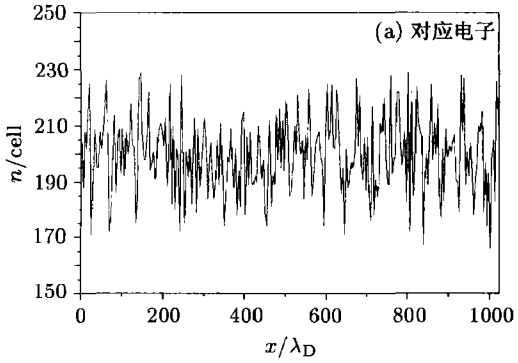


图 5 电场功率谱 $|E(\omega)|^2(\theta = 45°, \omega_0 = 4.0\omega_{ce})$

Fig.5 Electric field power spectra for $\theta = 45°$, $\omega_0 = 4.0\omega_{ce}$



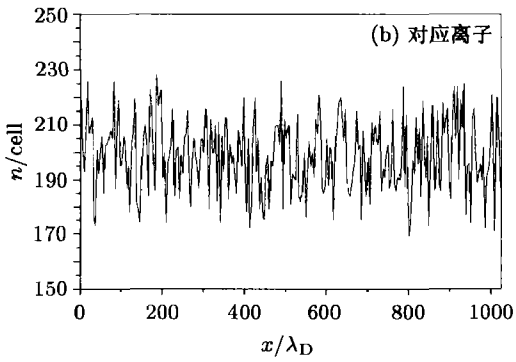


图 6 密度不规则体 $\omega_{lh}t = 1400$

Fig.6 Density irregularity, (a) panel for electron, (b) for ion, when $\omega_{lh}t = 1400$

从以上模拟结果，可以得出以下结论.

(1) 外加泵波场垂直于磁场的情况：图 2 为 $\theta = 0°$, $\omega = 4.2\omega_{ce}$ 时模拟网格点上的电场功率谱，很明显 ω_0 为中心 SEE 有比较对称的结构，与地面观测的结果基本一致. 图 3 为 $\theta = 0°$, $\omega_0 = 4.0\omega_{ce}$ 的模拟结果，不存在明显的 SEE 的谱特征. Leyser 等 [17] 解释了这种原因，当 $\omega_0 = n\omega_{ce}$ 时，上混杂波强烈回旋振荡衰减，因而 SEE 明显地被抑制.

(2) 外加泵波场平行于磁场的情况：图 4 为 $\theta = 90°$, $\omega_0 = 4.2\omega_{ce}$ 时的模拟结果，基本没有 SEE 出现，这是因为 $E_\perp = 0$, 因而没有上混杂波被激发.

(3) 外加泵波场与磁场成一夹角的情况：图 5 为 $\theta = 45°$, $\omega_0 = 4.2\omega_{ce}$ 的模拟结果. 比较而言， SEE 中 DM 、 UM 的强度较图 2 中的弱.

(4) 密度不规则体的产生：电离层中不规则体的存在对不稳定性的发展起着重用的作用，一方面加强了电磁泵波的反常耗散，另一方面又促进了不规则体的形成，从而推动着不稳定向前发展. 图 6 为模拟过程，网格中电子和离子的相对数密度，可以看到密度不规则结构的形成 (相应的参数见图中的说明).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

本文用粒子模拟的方法定性地比较了 SEE 的谱特征, 有比较好的符合. 对于不同的 θ 角, SEE 有不同的影响, 定性地证明了 SEE 的产生与垂直于磁场的静电波的激发有关. 在模拟的过程中, 我们没有考虑粒子间碰撞的影响, 因此没有考虑引起参量不稳定性的入射泵波的最小阈值, 可以认为任何强度的电场都可以引起参量不稳定性; 这虽然是一个粗略的近似, 但仅仅对模拟而言, 影响不大. 另外, 由于电离层在垂直方向上存在密度梯度, 因此, 更加细致的模拟应该发展二维模型.

参　考　文　献

[1] Thide B, Kopka H, Stubbe P. Observations of stimulated scattering of a strong high-frequency radio wave in ionosphere. *Phys. Rev. Lett.*, 1982, **49**:1561—1564

[2] Armstrong W T, Massey R, Argo P *et al.* Continuous measurement of stimulated electromagnetic emission spectra from HF excited ionospheric turbulence. *Radio Sci.*, 1990, **25**: 1283—1289

[3] Stubbe P, Kopka H, Thide B *et al.* Stimulated electromagnetic emission: a new technique to study the parametric decay instability in the ionosphere. *Radio Sci.*, 1984, **89**:7523—7536

[4] Leyser T B, Thide H, Derblom H *et al.* Dependence of stimulated electromagnetic emission on the ionosphere and pump wave. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**:17 233—17 244

[5] Leyser T B. Electromagnetic radiation by parametric decay of upper hybrid waves in ionospheric modification esperiments. *Phys. Plasma*, 1994, **1**(6):2002—2011

[6] Goodman S *et al.* Particle-in-cell (PIC) simulations of electromagnetic emissions from plasma turbulence. *Phys. Plasma*, 1994, **1**(6):1765—1767

[7] Scales W A, Cheng K T, Srivastava S. Simulation studies of processes associated with stimulated electromagnetic emission (SEE) in the ionosphere. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 1997, **59**(18):2373—2383

[8] Hussein A A, Scales W A. Simulation studies of parametris decay processes associated with ionospheric stimulated radiation. *Radio Sci.*, 1997, **32**(5):2099—2107

[9] Matsumoto H, Omura Y. Computer space plasma physics: simulation technique and software. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 1993

[10] Gurevich A V. Nonlinear phenomena in the ionosphere. Springer-Verlay, New York, 1987

[11] Zhou H L, Huang J, Kuo S P. Cascading of the upper hybrid/electron Bernstein wave in ionospheric heating experiments. *Phys. Plasmas*, 1994, **1**(9):3044—3052

[12] Leyser T B. Parametric interaction between upper hybrid and lower hybrid waves in heating experiments. *Geophys. Res. Lett.*, 1991, **18**(3): 408—411

[13] Mjolhus E, Hanssen A, Dubois D F. Radiation from electromagnetically driven Langmuir turbulence. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**:1 7527—17 560

[14] Dythe K B, Mjolhus E, Pecseli H L *et al.* A thermal oscillating two-stream instability. *Phys. Fluids*, 1983, **26**:146—149

[15] Huang J, Kuo S P. A theoretical model for the broad up-shifted maximum in stimulated electromagnetic emission spectrum. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**:19 569—19 573

[16] Leyser T B, Thide B, Waldenvik M *et al.* Spectral structure of stimulated electromagnetic emission between electron cyclotron harmonics. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**: 17 597—17 606

[17] Leyser T B, Thide B, Derblom H *et al.* Stimulated electromagnetic emission near electron cyclotron harmonics in the ionosphere. *Geophys. Res. Lett.*, 1989, **63**:1145—1148

[18] 傅竹风, 胡友秋. 空间等离子体数值模拟. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1995. 439—473

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

ELECTROSTATIC PARTICLE SIMULATION OF SEE PHENOMENA IN IONOSPHERE

HUAGN Wengeng LE Guiming GU Shifen

(*Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100080)

Abstract

In this paper a particle-in-cell model is used to simulate the SEE (stimulated electromagnetic emission) produced by the parametric decay instability when a powerful high-frequency electromagnetic pump O-wave is launched into F-region of the ionosphere. The simulation results show the ratio of the pump wave frequency (ω_0) to the electron cyclotron harmonic frequency (ω_{ce}) strongly influences the SEE when pump wave frequency is very close to the electron cyclotron frequency. Moreover the angle between the incident pump wave electric field and the geomagnetic field is also a considerable factor to the SEE. For example, for $\omega_0 = 4.2\omega_{ce}$, the SEE is obvious, when the pump electric field is perpendicular to the geomagnetic field, but if the pump electric field is parallel to the geomagnetic field, there is no SEE phenomenon.

Key words SEE, Electrostatic simulation, Parametric decay instability

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com