

大功率高频无线电波对赤道 E 区双流不稳定性的影响 —— PIC 静电粒子模拟研究

黄文耿 古士芬

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

摘 要

地面入射的大功率高频无线电波(泵波)和电离层等离子体之间的参数相互作用,能够引起静电波的激发,在一定条件下,产生不稳定性.本文用 PIC 静电粒子模拟方法,研究泵波与赤道电离层 E 区等离子体的相互作用.研究表明,泵波能够控制双流不稳定性的发生,在不同条件下,泵波对双流不稳定性起着稳定与不稳作用,模拟结果定性地与理论研究结果相符合,这为我们对不规则体产生的地面人工控制提供了依据.

关键词 泵波;赤道 E 区电离层;双流不稳定性;粒子模拟

1 引言

双流不稳定性是发生在电离层中几个典型的等离子体不稳定现象之一,主要发生在极光电离层和赤道电离层的 E 区. 20 世纪 60 年代, Buneman^[1] 和 Farly^[2] 分别用流体理论和动力学理论作了研究,所以又称之为 F-B 不稳定性,它被用来解释 E 区中经常存在的不规则结构.虽然用线性理论在解释被观测到的小波长 ($< 10\text{ m}$) 不规则体上存在困难,却为后来不稳定性的非线性研究提供了基础,但有些问题并没有完全解决.为了解释理论和观测上的矛盾,人们广泛使用数值模拟的方法^{[3]~[5]},使我们在不稳定的非线性发展和饱和方面,得到很多新的认识.但以上的模拟研究只是对自然情况下发生的不稳定性进行研究的,而没有涉及到人为因素的影响.近年来,由于天线等技术的提高,促进了地面大功率无线电波发射装置的建立,为空间环境的主动实验提供了较为方便的工具.在一系列的地面实验中,观测到了丰富的物理现象^[6],对这些实验结果的研究,不仅提高了我们对等离子体物理的认识,而且也为空间探测特别是对电离层、中高层大气的探测提供了新的手段.随着地面入射的大功率无线电波和电离层相互作用实验的进一步开展,局部空间环境,尤其是局部电离层环境的人工扰动日益被人们所重视,空间环境的局部人工控制得到了广泛的研究. 1972 年, Lee 等首先提出了赤道电离层 E 区不规则体的人工控制理论^[7],一定功率和频率的无线电波能够对 E 区可能发生的双流不稳定性起着激发和致稳作用,从而达到不规则结构的地面人为控制.他的结论是从双流出发推导色散关系得

到的, 只是简单地认为泵波与电离层等离子体是一个参数相互作用过程, 并没有解释泵波与等离子体相互作用的物理本质及泵波的具体作用. Chaturvedi 等^[8]也对离子回旋不稳定性作了类似的研究, 之后, 在实验中观测到相应的不规则体, 证实了泵波对电离层不稳定性激发, 以及不规则体的形成起着重要的作用. Høeg 等^[9]对多种实验结果作了统计研究, 并从理论上作了分析, 但也没有给出自洽的解释.

在物理机制不是完全清楚的情况下, 用模拟的方法能够给我们清晰的视野, 加深对物理现象的认识, 并促进理论方面的研究. 本文中, 我们考虑大功率无线电波的注入, 用网格粒子云 (PIC) 法对赤道电离层 E 区的双流不稳定性进行静电粒子模拟研究, 给出直观的模拟结果, 定性地证明泵波能够控制赤道电离层 E 区的双流不稳定性.

2 理论和模型

在赤道电离层的 E 区, 双流不稳定性主要发生在约 105 km 处. 在这个高度上, 因电子的磁回旋频率 (Ω_e) 远大于电子与中性分子的碰撞频率 (ν_e), 而使电子的运动主要由地磁场 ($\mathbf{B}$) 控制. 对离子而言, 刚好相反 ($\nu_i \gg \Omega_i$), 离子的运动主要受碰撞的控制, 因此, 在 $\mathbf{E}_1 \times \mathbf{B}$ 的方向上会形成双流体运动, 这里, $\mathbf{E}_1$ 是赤道 E 区的垂直电场. 根据线性微扰理论^[10], 当电子相对于离子的漂移速度大于离子声速 c_T 时, 双流不稳定性发生, 并以指数的形式增长, 造成密度的堆积区, 形成 E 区的不规则结构, 被地面的高频雷达观测到. 但是由于电离层 E 区的垂直电场常常不是太强, 致使电子的漂移速度 $\mathbf{v}_{de} = \frac{\mathbf{E}_1 \times \mathbf{B}}{B^2}$ 不可能太大, 所以在自然条件下, 这种不稳定性不会经常发生. 但是在地面入射的大功率泵波的作用下, 赤道电离层 E 区的双流不稳定性可能被激发, 另外泵波还可以对双流不稳定性起着稳定的作用, 即限制自然条件下这种不稳定的发生, 或者使发生了的不稳定性趋于稳定. 在忽略欧姆加热而主要考虑泵波有质动力的假设下, 临界稳定 (或不稳) 条件为^[7]

$$(k_{\perp} \cdot v_d)^2 - k_{\perp}^2 c_T^2 - \frac{\Omega_e \nu_i}{\nu_e k_{\perp}^2 L} (k_{\perp} \cdot v_d) + \frac{\omega_{pe}^2 \omega_{pi}^2 \delta}{\delta^2 + \omega_{pe}^2 \nu_e^2} \frac{\rho^2}{4} = 0.$$

其中, $k_{\perp}$ 是垂直于地磁场方向的波数, $L^{-1} = (1/N_0)(dN_0/dz)$ 是垂直方向密度梯度标高, ω_{pe} 、 ω_{pi} 分别是电子和离子等离子体频率, $\delta = \omega_{pe}^2 + \Omega_e^2 - \omega_0^2$, $\rho^2 \propto E_0^2$ 是与入射的泵波功率有关的物理量. 从上面的等式可以看出, 前 3 项决定了自然发生的不稳定性模式, 最后一项包含着泵波的作用. 在一定高度上, 对一定入射的泵波, 若 $\delta > 0$ 时, 泵波就对该处的不稳定性起着激发的作用; 反之, 若 $\delta < 0$ 时, 则泵波对不稳定性起着稳定的效果.

F-B 不稳定性是碰撞的双流不稳定性, 碰撞在不稳定的形成中起着重要的作用. 分析以上的不稳 (致稳) 条件和双流不稳定的色散关系^[10]可知, 仅就碰撞而言, 它是不稳定性发展的致稳因素; 对入射的泵波而言, 粒子之间的频繁碰撞对泵波起着能量耗散的作用, 使体系的温度升高, 而增加粒子的热速度, 使单能运动的束流粒子 (双流不稳定性中主要是电子流) 热展开, 当热展开宽度足够大时, 朗道阻尼使系统的不稳定变为稳定, 因此碰撞对不稳定性的演化有重要的影响. 由于电离层中的碰撞是一个十分复杂的过程, 不仅涉

及到粒子之间的弹性和各种非弹性碰撞, 还有分子精细结构的激发, 因此在一次碰撞后粒子的速度分布函数难以确定. 在本文中, 我们的主要目的是用粒子模拟方法定性证明泵波对双流不稳定性的不稳和致稳作用, 并不考虑不稳定性的演化和发展等中间过程, 为方便起见, 碰撞产生的影响将通过调整有关参数来实现, 如适当地增大电子和离子之间的相对速度, 而这些处理对我们的定性结果几乎没有影响. 另外, 在一些作者所作的粒子模拟研究中^{[11],[12]}, 粒子间的碰撞所造成的影响也往往人为地加入一些假设来解决, 本文中, 我们对碰撞项的处理也参考了他们的作法.

假设在垂直方向上没有密度梯度 ($L^{-1} = 0$), 我们对双流不稳定性进行一维 (x 方向) 粒子模拟, 基于以上的分析和讨论, 模拟模型如图 1 所示.

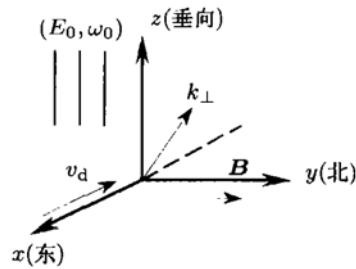


图 1 一维模拟模型

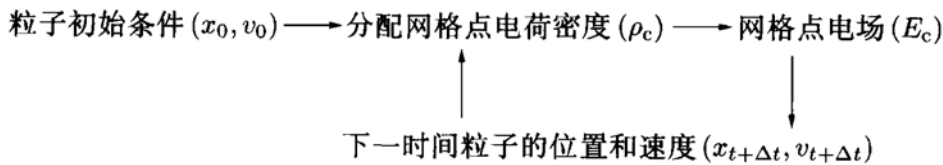
Fig.1 One dimensional simulation model

x 方向指向东, 电子在 x 的负向漂移, y 方向为地磁场方向指向北, z 方向垂直向上, $k_{\perp}$ 在 x - z 平面内, 外加泵波垂直 x - y 平面以 $E_0 \cos(\omega_0 t)$ 的形式加入. 粒子的运动方程为

$$m_{\alpha} dv_{\alpha}/dt = q(E_c + v_{\alpha} \times B),$$

$$v_{\alpha} = dx_{\alpha}/dt.$$

其中, 下标 α 代表 e、i, 分别指电子和离子, 泊松方程 $\nabla^2 \varphi_c = -\rho_c/\epsilon_0$ 和方程 $E_c = -\nabla \varphi_c$ 决定网格点上的电场 E_c , 而电荷密度 ρ_c 以某种权重来决定. 在模拟过程中, 按照下面的循环, 求解以上方程组.



以上循环主要解法参照成熟的粒子模拟 ES1 程序^[13], 主要的方法如下:

(1) 用 PIC (Particle in Cell) 权重计算网格点电荷密度 ρ_c , 并由 $\nabla \cdot E_c = \frac{\rho_c}{\epsilon_0}$ 计算网格点电场 E_c .

(2) 用蛙跳格式, 时间中心差分法离散化牛顿-洛伦兹方程, 并用 Boris 方法^[14] 求解, 得到粒子的位置和速度.

(3) 时间向前推进, 重复上面步骤, 反复迭代.

在整个模拟过程中, 模拟长度 $l = 2\pi$, 均匀划分为 $ng = 64$ 个网格, 体系中的粒子数为 $N_e = 1024$ 个电子和 $N_i = 1024$ 个离子, 电子和离子的初始位置用随机数产生, 初始速度均为平衡态的麦克斯韦分布, 且电子和离子的温度相等, 它们均在 x 的负方向上作漂移运动, 模拟中使用循环边界条件. 为了节省模拟时间, 取电子和离子的质量比 $m_e/m_i = 1/100$, 离子带有 1 个单位的正电荷, 并设介电常数 $\varepsilon_0 = 1$; 模拟时间步长 $\Delta t = 0.1$, 空间步长 $\Delta x = l/ng$. 模拟参数取与文献 [13] 相同的归一化形式: 电子的等离子体频率 $\omega_{pe} = 1.00$, 磁回旋频率 $\omega_{ce} = -1.00$, 荷质比 $q/m_e = -1.00$, 离子的这些参数根据与电子的质量比来确定. 程序中计算所需要的电荷 q 和质量 m 分别由等式 $\omega_p^2 = \left(\frac{N}{l}\right) \cdot \varepsilon_0^{-1} \cdot q \cdot (q/m)$ 和 $m = \frac{q}{(q/m)}$ 决定, 粒子的漂移速度、热速度, 以及外加泵波场的强度和频率根据下一节不同的模拟而取不同的数值.

3 模拟结果

3.1 泵波对双流不稳定的激发作用

图 2(a)、(b)、(c) 的模拟参数为电子的定向漂移速度 $v_{de} = 2.5$, 热速度 $v_{Te} = 0.05$; 而离子的定向速度和热速度 v_{di} 、 v_{Ti} 分别为 1.0、0.005. 图 2(a) 为 v - x 相空间粒子在某个时刻的速度 (v) 分布, 图 2(b)、(c) 分别为网格点上的电场 (E_c) 和电荷密度 (ρ_c) 的分布. 在图 2(a) 中, 上面深的黑点代表电子, 轻的点代表离子, 由于离子的热速度较小, 热展开宽度很窄, 看起来为一条直线, 以下的图 3、图 4 和图 5 均与图 2 一一对应. 当程序运行足够长的时间 ($t = 3 \times 10^4$, 即运行 3×10^5 个时间步长) 后没有明显的双流不稳定性发生. 这是因为定向漂移运动的束能粒子流的热展开制约着不稳定性的发展, 朗道阻尼阻止了静电波的进一步发展. 在这种情况下, 我们认为不稳定性不会发生. 图 3(a)、(b)、(c) 是加入了泵波的作用, 其他的模拟参数与图 2 完全相同, 其中加入泵波的参数为 $E_0 = 2.0$,

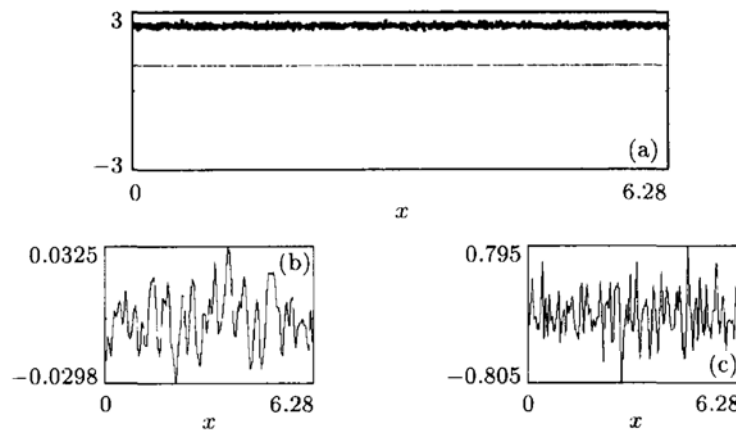


图 2 模拟结果 (没有泵波的作用)

Fig.2 Without the effects of pump waves, the simulation results, when time $t = 3 \times 10^4$

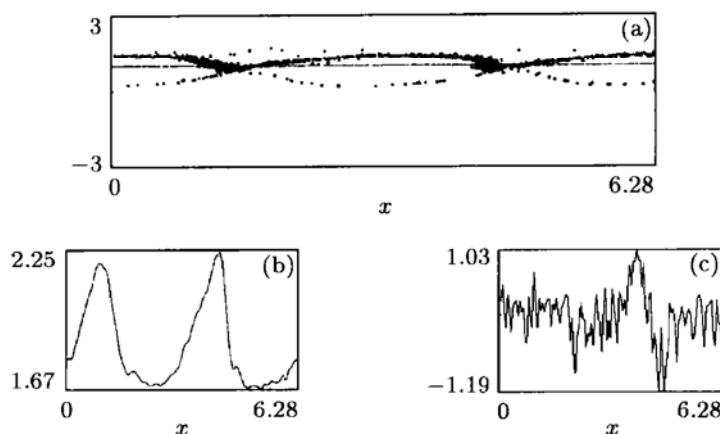


图 3 模拟结果 (加入泵波的作用)

Fig.3 Under the effects of the pump waves ($E_0 = 2.0$, $\omega_0 = 1.4$), the simulation results, when $t = 71.8$

$\omega_0 = 1.4$. 当程序仅运行到 $t = 71.8$ 时, 从图 3(a) 可以明显看出, 在 v - x 相空间发生畸变, 双流不稳定性明显发生, 电子不完全在 x 方向上均匀漂移, 对离子而言, 由于它的质量很大, 位形基本上没有变化. 从图 3(b)、(c) 也可以看出, 这个时刻的电场和电荷密度也发生了突变.

从图 2 和图 3 对应各图的对比可知, 在一定条件下, 泵波对双流不稳定性可以起着激发的作用.

3.2 泵波对双流不稳定的致稳效果

降低热速度, 使双流不稳定性发生. 图 4(a)、(b)、(c) 中的参数可以取为 $v_{de} = 2.5$, $v_{Te} = 0.01$, $v_{di} = 1.2$, $v_{Ti} = 0.001$. 在这种情况下, 当程序运行到 $t = 83.4$ 时, 不稳定性发生, 这就是经常讨论的经典的双流不稳定性, 它是赤道电离层和极区电离层 E 区的重要特征, 早先被人们用来解释 VHF 雷达回波所观测到的不规则结构. 图 5(a)、(b)、(c) 是在图 4 的基础上加入泵波的模拟结果, 其中加入泵波参数为 $E_0 = 6.0$, $\omega_0 = 1.5$. 经过

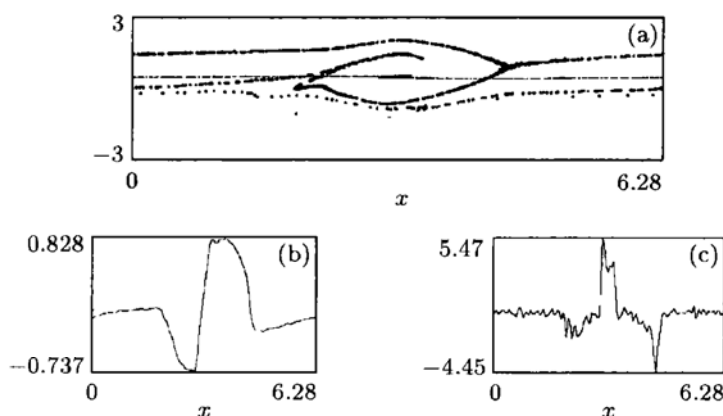


图 4 模拟结果 (没有泵波的作用)

Fig.4 Without the effects of pump waves, the simulation results, when $t = 83.4$

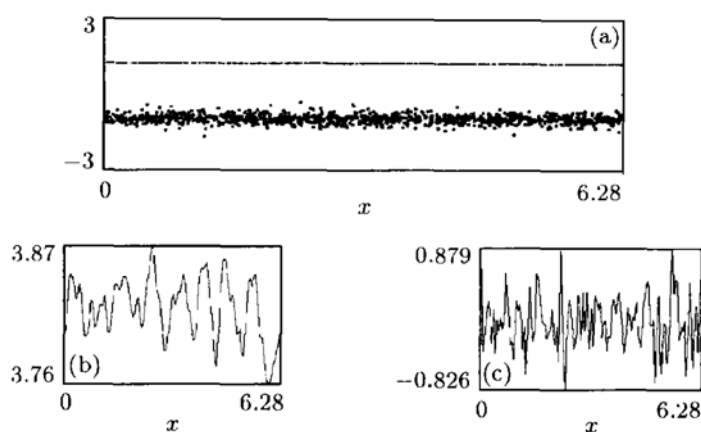


图 5 模拟结果 (加入泵波的作用)

Fig.5 Under the effects of the pump waves ($E_0 = 6.0$, $\omega_0 = 1.5$), the simulation results, when $t = 3 \times 10^4$

足够长的时间, 我们发现没有特别明显的不稳定性现象产生. 在一系列模拟过程中, 逐步加大泵波的强度 (E_0), 我们发现泵波的电场越大, 致稳效果越明显 (本文没有给出模拟结果), 这是因为泵波的有质动力逐渐变为主要因素.

与上面 3.1 节的讨论相同, 从图 4 和图 5 对应各图的对比我们可以看出, 在一定的泵波作用下, 双流不稳定性可以从不稳定变为稳定, 体现了泵波的致稳效果.

4 结论和讨论

从第 3 节的模拟结果可以看出, 我们的结论是直观和明确的, 正如理论所预言的那样, 大功率泵波对赤道电离层 E 区的双流不稳定性有重要的影响. 在不同的条件下, 泵波起着不稳或致稳的作用, 这一主要结论依赖于背景电离层的状况和外加泵波的输入参数. 当然, 模拟输入和实际的参数有一定的差别, 由于各个输入参数的归一化因子不同^[13], 我们并没有将模拟参数与实际参数作比较, 更加详细的模拟将是我们下一步的工作. 根据 Lee^[7] 的研究, 一般地, 泵波必须满足一定的条件: (1) 寻常偏振 O 波入射; (2) 电场有垂直于地磁场的分量; (3) 一定的入射频率; (4) 一定功率的入射流. 本文是从模拟的角度来定性研究泵波对赤道双流不稳定性的影响, 在模拟过程中, 微粒间碰撞的影响通过对模拟参数的调整加以体现, 这一处理并不影响我们的结论. 因为在泵波有质动力效应占优时, 与碰撞有关的欧姆加热往往被忽略掉, 这一点与参考文献 [8] 和 [9] 的研究相同. 必须强调指出, 我们的结论是一个定性的结果, 更加精确研究还必须考虑多种因素的影响, 如电波的传播 (因为 D 区的吸收对大功率泵波的影响很大); 高频电波和等离子体的相互作用; 静电波的激发; 不稳定性的演化等等. 其中, 在这些因素中泵波在整个不稳定性过程中到底起着什么样的作用是最重要的问题, 我们认为泵波对双流不稳定性的不稳和致稳作用应该是由泵波对电离层中等离子体波的激发和抑制以及它们之间的相互耦合造成的. 例如, 泵波电场和上杂波电场能够以“合拍”频率共同产生一个 ∇E^2 类型的压力项, 周相由上文中的参数 δ 决定. 要注意的是, 在电离层的加热实验中, 观测结果^{[9],[15]}

显示, 泵波为 X 波入射时也可以导致不规则结构的产生, 虽然占的比例很小, 但是也说明了在电离层的大功率泵波加热过程中, 其他的不稳定性也可以被激发。

参 考 文 献

- [1] Buneman O. Excitation of field aligned sound waves by electron streams. *Phys. Rev. Lett.*, 1963, **10**:285—287
- [2] Farley D T. A plasma instability resulting in field-aligned irregularities in the ionosphere. *J. Geophys. Res.*, 1963, **68**:6 083—6 097
- [3] Robinson T R, Honary F. A resonance broadening kinetic theory of the modified two-stream instability: implication for radar auroral backscatter experiments. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**:1 073—1 085
- [4] Oppenheim M M, Otani N F, Ronchi C. Saturation of Farley-Buneman instability via nonlinear electron $E \times B$. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**:17 273—17 286
- [5] Oppenheim M M, Otani N F. Spectral characteristics of the Farley-Buneman instability: simulations versus observations. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**:24 573—24 582
- [6] Benson R F. Stimulated plasma instability and nonlinear phenomena in the ionosphere. *Radio Sci.*, 1982, **17**:1 637—1 659
- [7] Lee K, Kaw P K, Kennel C F. External production and control of electrojet irregularities. *J. Geophys. Res.*, 1972, **77**:4 197—4 208
- [8] Chaturvedi P K, Keskinen M J, Ossakow S L. Production and control of ion-cyclotron instabilities in the high latitude ionosphere by high power radio waves. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1987, **49**:57—62
- [9] Høeg P, Nielsen E, Stubbe P, Kopka H. Heater-induced 1-Meter irregularities. *J. Geophys. Res.*, 1986, **91**:11 309—11 320
- [10] McDonald B E, Coffey T P, Ossakow S L, Sudan R N. Numerical studies of type 2 equatorial electrojet irregularity development. *Radio Sci.*, 1975, **10**:247—254
- [11] Goodman, Hideyuki, Matsumoto. Particle-In-Cell(PIC) simulations of electromagnetic emissions from plasma turbulence. *Phys. Plasmas*, 1994, **1**:1 765—1 767
- [12] Hussein A A, Scales W A. Simulation studies of parametric decay processes associated with ionospheric stimulated radiation. *Radio Sci.*, 1997, **32**(5):2 099—2 107
- [13] Birdsall C K, Langdon A B. Plasma Physics Via Computer Simulation. McGraw-Hill Book Com., 1985. 29—131
- [14] Fu Zhufeng, Hu Youqiu. Numerical simulation of space plasma. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 1995. 468—474. in Chinese (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. 468—474)
- [15] Hibberd F H, Nielsen E, Stubbe P, Kopka H, Rietveld M. Production of auroral zone E region irregularities by powerful HF heating. *J. Geophys. Res.*, 1983, **88**:6 347—6 351

THE EFFECT OF POWERFUL HIGH-FREQUENCY RADIO WAVES ON TWO-STREAM INSTABILITY IN THE EQUATORIAL E REGION: THE STUDY OF PIC ELECTROSTATIC PARTICLE SIMULATION

HUANG Wengeng GU Shifen

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

Abstract

Two-stream instability is one of some typical instabilities occurred in ionosphere. It exists in equatorial ionospheric and auroral ionospheric E region. Generally speaking, the two-stream instability appears occasionally due to the presence of a relative strong vertical electric field needed. In recent decades, several powerful High-Frequency (HF) radio wave transmitters were set up successively in the world, which provide us convenience to study the interaction of HF radio waves with plasmas. For example, the parametric process between the powerful HF radio waves (pump waves) and the ionospheric plasma, which will excite the electrostatic waves, and some instabilities may be produced under special conditions. In this paper, one dimension PIC (Particle In Cell) electrostatic particle simulation is used to study the interaction of pump waves with the equatorial ionospheric E region. The simulation results show that pump waves can control the two-stream instability. With different parameters, the instability can be stabilized or destabilized by the pump waves. The results are consistent with the theoretical model qualitatively. The simulation studying provides the probabilities for artificial control the irregularities by very strong radio waves on the ground.

Key words Pump waves, Equatorial E region ionosphere, Two-stream instability, Particle simulation