



星载等离子体探测器回波的模拟研究

肖 雄, 姜春华, 杨国斌, 赵正予

Simulation Study on Echo of Earth Plasma Layer Detector

XIAO Xiong, JIANG Chunhua, YANG Guobin, and ZHAO Zhengyu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20210127>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

等离子体磁流体发电研究进展

Research Progress of Plasma Magnetic Fluid Power Generation

深空探测学报(中英文) . 2018, 5(4): 331-346

“天问一号”太阳等离子体延迟误差分析与修正

Analysis of Delay Error Correction of Solar Plasma Region on Tianwen-1

深空探测学报(中英文) . 2021, 8(6): 592-599

舌形张角型脉冲等离子体推力器极板结构参数影响仿真研究

Simulation Researches on the Pulsed Plasma Thruster with Tongue-Shaped and Flared Electrodes

深空探测学报(中英文) . 2017, 4(3): 225-231

5 kW环型离子推力器试验研究

Research on the Experiment of 5 kW Annular Ion Thruster

深空探测学报(中英文) . 2017, 4(3): 232-237

外日球层的宽能段离子及其与湍动的耦合作用

Broad Energy-Band Ions in the Outer Heliosphere and Their Coupling with Turbulence

深空探测学报(中英文) . 2020, 7(6): 574-583

星载大型反射面天线的刚-柔-姿控一体化在轨振动分析方法

Rigid-Flexible-Attitude Control Integrated In-Orbit Vibration Analysis Method for Large Satellite Reflector Antennas

深空探测学报(中英文) . 2017, 4(4): 355-360



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

星载等离子体探测仪回波的模拟研究

肖雄¹, 姜春华¹, 杨国斌¹, 赵正予^{1,2}

(1. 武汉大学电子信息学院, 武汉 430072; 2. 哈尔滨工业大学(深圳), 深圳 518055)

摘要: 基于星载等离子体探测仪的实测回波图, 提出结合全球尺度等离子体模型(Global Core Plasma Model, GCPM)和射线追踪技术来模拟电磁波在等离子体层和磁层等离子体环境中的传播过程。采用的射线追踪方法基于冷等离子体折射指数, 考虑磁场对于折射指数的影响。该模拟方法通过仿真获取等离子体探测回波的结构特征, 为星载等离子体探测仪获取实测等离子体回波图提供一定的参考价值。对后续从实测等离子体回波图中反演得到电子密度剖面具有指导意义, 也为未来深空探测任务和通信工程的顺利实施提供重要的参考依据。

关键词: 等离子体模型; RPI; 射线追踪; GCPM; 冷等离子体

中图分类号: P3

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2022)02-0230-07

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20210127

引用格式: 肖雄, 姜春华, 杨国斌, 等. 星载等离子体探测仪回波的模拟研究[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(2): 230-236.

Reference format: XIAO X, JIANG C H, YANG G B, et al. Simulation study on echo of Earth plasma layer detector[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(2): 230-236.

引言

等离子体空间环境是空间环境的重要组成部分, 在太阳辐射的作用下, 该区域存在大量能够自由运动的电子和离子, 其中, 自由电子能够影响无线电波的传播特性。空间等离子体环境一般包括电离层、等离子体层和磁层。而等离子体层和磁层在电离层的上边界, 并向外延伸至磁层顶, 是连接深空等离子体环境与地球空间环境的过渡地区, 主要由完全电离的电子、离子组成, 中性大气成分非常少, 带电离子的运动完全受地磁场控制。由于等离子体空间环境中的自由电子会影响在其中传播的无线电波的幅度和相位, 在无线电深空探测和通信中, 如果等离子体环境中存在电子密度的不规则体结构, 那么这些不规则体结构将会严重影响深空探测和通信的性能。因此, 空间等离子体环境的研究将为深空探测和通信工程的顺利实施提供重要的参考依据^[1-2]。

随着现代电子技术的发展, 空间等离子体环境的探测技术也逐渐发展起来, 人类对于电离层的基本特征也有了丰富的认识, 特别是随着卫星技术的发展, 能够从电离层顶部对电离层进行观测研究。20世纪六七十年代, 美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)发射卫星“云雀1号”

(Alouette-1)、“云雀2号”(Alouette-2)和ISIS-1、ISIS-2, 搭载星载电离层顶部探测仪, 用于探测顶部电离层。对于等离子体层和磁层观测, 主要依赖于卫星的就位观测或无源等离子体探测手段, 如WAVES系统^[3]、PWI(Plasma Waves Instrument)系统^[4]、范阿伦探针(Van Allen Probe)^[5]等。搭载在IMAGE(Imager for Magnetopause-to-Aurora Global Exploration)^[6]卫星上的RPI(Radio Plasma Imager)^[7-8]是第一套主动发射电磁波探测等离子体层和磁层空间环境的星载探测系统。RPI是低功耗有源多普勒雷达系统, 探测频率范围为3 kHz~3 MHz, RPI向自由空间中各个方向发射雷达电磁波, 然后通过一副x-y轴为300 m、z轴为20 m的三正交天线接收三路回波信号^[9], 可以从回波幅度、相位、延迟时间、频率、极化、多普勒频移和回波方向的数据中获得自由空间中反射点处等离子体的位置和特性。利用三根天线正交组成的深空天线组阵能更好地完成对深空等离子体的探测, 更好地降低天线组阵的增益损失^[10]。

随着卫星观测数据的增加, 对等离子层的探索与模拟也愈发深入。Green等^[11]通过对Angerami和Thomas^[12]的扩散平衡模型、Kimura^[13]的电离层和等离子体层模型、Aikyo和Ondoh^[14]的等离子体层顶模型和

Roelof和Sibeck^[15]的磁层顶模型进行组合, 构造背景等离子体环境, 进一步完成射线追踪模拟。Huang等^[16]通过对IMAGE卫星的实测回波数据进行分析得到了一种基于实测数据的等离子体层经验模型。

由于卫星就位观测模式对于研究等离子体环境的空间特征分布存在一定的缺陷, 为进一步研究等离子体层和磁层中等离子体的物理过程及其和底部电离层之间的耦合关系, 需要提供更为丰富的等离子体结构分布。星载等离子体探测仪可以获取电波传播路径上的电子密度分布特征, 进一步丰富等离子体层和磁层的观测数据。为了从等离子体回波图中反演得到真实环境中的电子密度分布, 首先需要对等离子体回波图有一定基本了解, 并对比电子密度不同结构和等离子体回波图之间的关系。

星载等离子体探测仪的观测数据目前较少, 主要结合等离子体层模型和射线追踪方法来研究探测仪回波特征结构。由于等离子体层的模型对于探测仪回波模拟有决定性作用, 如果模型精度较差, 则回波特征结构也和实际探测存在较大误差。因此本文采用较高精度的等离子体层模型来研究星载等离子体探测仪回波的结构特征。首先利用全球尺度等离子体模型(Global Core Plasma Model, GCPM)构造空间等离子体环境, 然后利用基于冷等离子体的射线追踪方法对无线电波在等离子体环境中的传播进行模拟, 同时加入无线电波在自由空间中传播的损耗, 以此来仿真星载RPI的回波特征。同时, 将RPI模拟回波和

IMAGE卫星的实测结果进行了对比, 初步结果表明, 在中纬度地区和正北极区进行模拟传播时, 群路径和传播损耗随着工作频率的增加而增加, 整体趋势呈现抛物线型, 与IMAGE卫星在极区地区探测的实测结果类似, 这为后续从等离子体回波图中反演电子密度的分布提供了理论依据。

1 GCPM模型

近年来, 很多全球尺度的等离子体模型相继被开发, 如基于卫星观测数据的经验模型IMAGE/RPI^[16]、全球等离子体模型(Global Plasmasphere Ionosphere Density, GPID)^[17]、标准等离子体模型(Standard Plasmasphere Ionosphere Model, SIM)^[18], 以及GCPM^[19]。在这些模型中, GCPM模型提供的电子密度及其导数是连续的, 而这是等离子体中波传播数值模拟的一个必需条件^[20]。同时, GCPM模型是一个开源的模型, 基于以上条件考虑, 本文最终采用GCPM模型(v2.4)来模拟等离子体空间环境。GCPM模型由多个区域模型集合而成, 包括电离层模型、等离子体层、磁层槽区和极盖区等区域。该模型能够根据地磁活动指数 K_p 和太阳辐射($F_{10.7}$)以及时间等信息输出不同形态的等离子体环境图像。GCPM模型作为一个全球尺度的等离子体模型, 能够根据不同的地磁环境合理地估计整个内磁层的热等离子体密度。该模型没有明显的外部边界, 在白天可以延伸到外磁层区域, 而晚上主要在地磁场的磁力线范围内适用。图1为

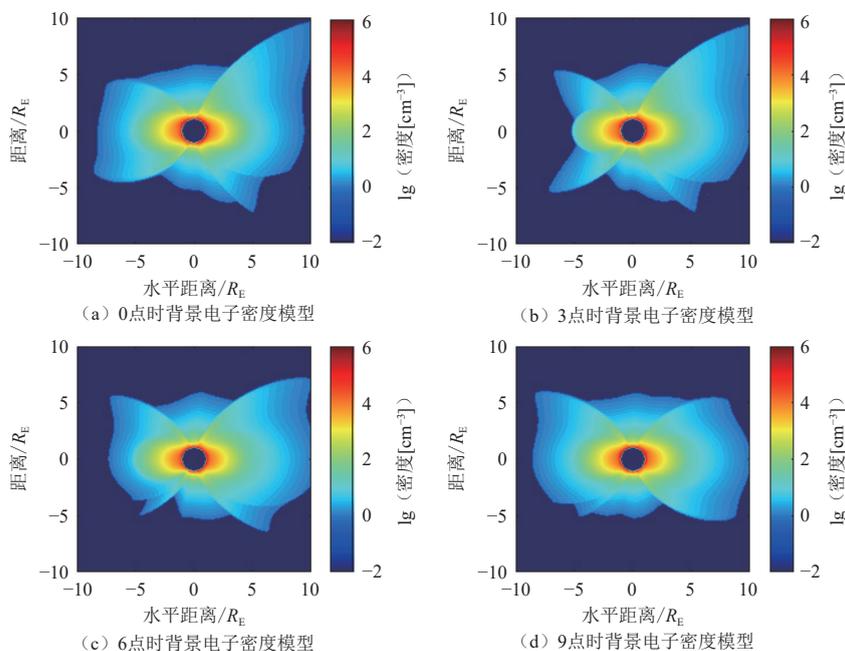


图1 2002年7月4日不同时间段背景等离子体密度分布

Fig. 1 Distribution of background plasma density at different time periods on July 4th, 2002

2002年7月4日标准时间0点、3点、6点、9点4个不同时间段, K_p 为1时的背景等离子体密度分布情况, 可以看出图示背景等离子体密度存在明显不均匀分层, 不同时刻的分布大致相同。图2为2002年7月4日标准时间0点时刻赤道区和极区位置电子密度随高度变化的剖面结构。

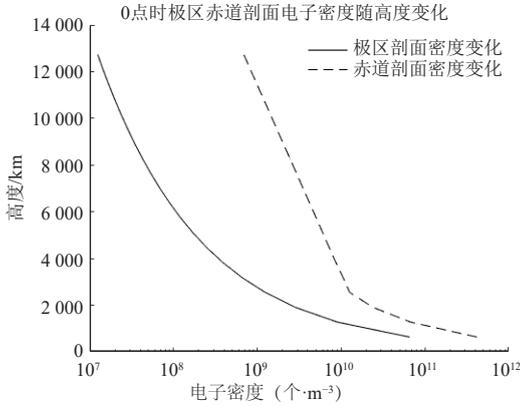


图2 2002年7月4日0点时极区和赤道地区电子密度剖面图

Fig. 2 Electron density profile at polar region and equatorial region at 0 UT on July 4th, 2002

2 基于冷等离子体的射线追踪方法

射线追踪方法是一种模拟无线电波在介质中传播的方法, 可以模拟无线电波与传播介质之间的相互作用。在色散介质中的射线追踪需要满足一定的色散关系, 通常可表示为^[13]

$$D(r, k, \omega) \equiv \mathbf{k} \cdot \mathbf{k} - \frac{\omega^2}{c^2} n^2 = 0 \quad (1)$$

其中: $r = (x, z)$ 代表射线路径的位置矢量; $k = (k_x, k_z)$ 代表射线的波矢量; ω 代表波的角频率; n 是射线在等离子体层中的折射指数; c 代表自由空间的射线传播速度。

在RPI射线追踪模拟中采用由Stix^[21]提出的等离子体层中冷等离子体折射指数^[21-22]

$$n^2 = \begin{cases} \frac{Y - \sqrt{Y^2 - 4XZ}}{2X}, & Y < 0 \\ \frac{2Z}{Y + \sqrt{Y^2 - 4XZ}}, & Y > 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$X = S \sin^2 \theta + P \cos^2 \theta \quad (3)$$

$$Y = RL \sin^2 \theta + PS (1 + \cos^2 \theta) \quad (4)$$

$$Z = PRL \quad (5)$$

$$R = 1 - \sum_s \frac{f_{ps}^2}{f(f + f_{gs})}, L = 1 - \sum_s \frac{f_{ps}^2}{f(f - f_{gs})} \quad (6)$$

$$P = 1 - \sum_s \frac{f_{ps}^2}{f^2}, S = \frac{1}{2}(R + L), D = \frac{1}{2}(R - L) \quad (7)$$

$$f_{ps} = \sqrt{\frac{e^2 N_e}{4\pi^2 m \epsilon_0}}, f_{gs} = \frac{eB}{m} \quad (8)$$

$$\alpha(\lambda) = \cos^{-1} \left(\frac{2 \cos \lambda}{(1 + 3 \cos^2 \lambda)^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (9)$$

$$\mathbf{k} = (|\mathbf{k}| \cos \beta, |\mathbf{k}| \sin \beta) \quad (10)$$

$$\theta = \arccos \left(\frac{\mathbf{B} \times \mathbf{k}}{|\mathbf{B}| \cdot |\mathbf{k}|} \right) \quad (11)$$

其中: f_{gs} 代表粒子磁旋频率; f_{ps} 代表等离子体频率; f 代表电磁波频率; e 是电荷量; m 为电子质量, ϵ_0 为真空介电常数; N_e 是电子密度; θ 表示电磁波波矢传播方向与磁场方向的夹角; β 表示射线每次前进相对于上一次位置的倾角; α 代表径向方向与磁场方向的夹角; λ 代表地磁纬度。在折射指数的计算中, 通常需要考虑地磁场的影响, 在本文的模拟中, 采用偶极子磁场近似地磁场。

由色散关系公式的推导出的射线追踪方程^[13]为

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{k}}{d\tau} = \frac{\omega}{2c} \nabla n^2 \\ \frac{d\mathbf{r}}{d\tau} = \frac{c}{\omega} \mathbf{k} \end{cases} \quad (12)$$

本文只考虑二维平面, 将群路径 τ 作为自变量, 根据背景电子密度、当前的工作频率、当前射线位置以及波矢倾角来求解出对应于当前位置的折射指数, 然后通过式(12)计算 k_x, k_z 以及 x, z 的值, 便可以得到一条射线在等离子体层中走过的路径。在进行射线路径计算时设置 x, z 的初始值为射线发射点空间坐标, τ 值为群路径的步进, 而 k_x, k_z 的初始值则由式(13)确定, 其中 θ 为射线的发射仰角。

$$\begin{cases} k_x = \frac{\omega}{c} \sin(\theta) \nabla n^2 \\ k_z = \frac{\omega}{c} \cos(\theta) \nabla n^2 \end{cases} \quad (13)$$

无线电波在自由空间中传播时, 存在一定的能量损耗, 利用式(14)^[23]来计算能量损耗值。

$$L_f = 32.45 + 20 \lg f + 20 \lg d \quad (14)$$

其中: f 是电磁波工作频率 (MHz); d 为自由空间中有效传输距离。

3 仿真结果分析

3.1 仿真条件

本文以2002年7月4日标准时间0点时刻的GCPM模型为背景等离子体环境进行电波传播的模拟。在模拟过程中，考虑两个不同地区即极区上空和中纬度地区上空的等离子体环境进行模拟。在图3中，发射仰角 0° 对应于x轴正方向，按逆时针方向增大，颜色深浅代表着射线发射仰角的大小，颜色由浅至深代表着发射仰角从小到大的变化。在极区上空的模拟中，设置卫星发射点位置为 $(3R_E, 8R_E)$ ，射线群路径的步进为 $0.01R_E$ ，当返回的射线距离发射点位置小于 $0.1R_E$ 时，则判断该射线能够被卫星接收到。设置工作频率分

别为0.1 MHz和1 MHz，射线的发射仰角以 0.05° 的步进从 225° 向 245° 变化，极区的射线传播路径图分别对应于图3 (a) (0.1 MHz)和图3 (b) (1 MHz)。从图3 (a)和图3 (b)中可知，由于极区部分存在等离子体密度的蝴蝶扇区分布，使得部分射线能返回到卫星的位置，而不是全部在极区上空反射远离发射点。图3 (c)和图3 (d)所示是在中纬度地区上空的位置，卫星发射点位置为 $(7.3R_E, 3.7R_E)$ ，射线群路径的步进为 $0.01R_E$ ，同理，设置工作频率分别为0.1 MHz和1 MHz，射线的发射仰角以 0.05° 的间隔从 210° 向 230° 变化，中纬度地区射线传播路径图分别对应于图3 (c) (0.1 MHz)和图3 (d) (1 MHz)。

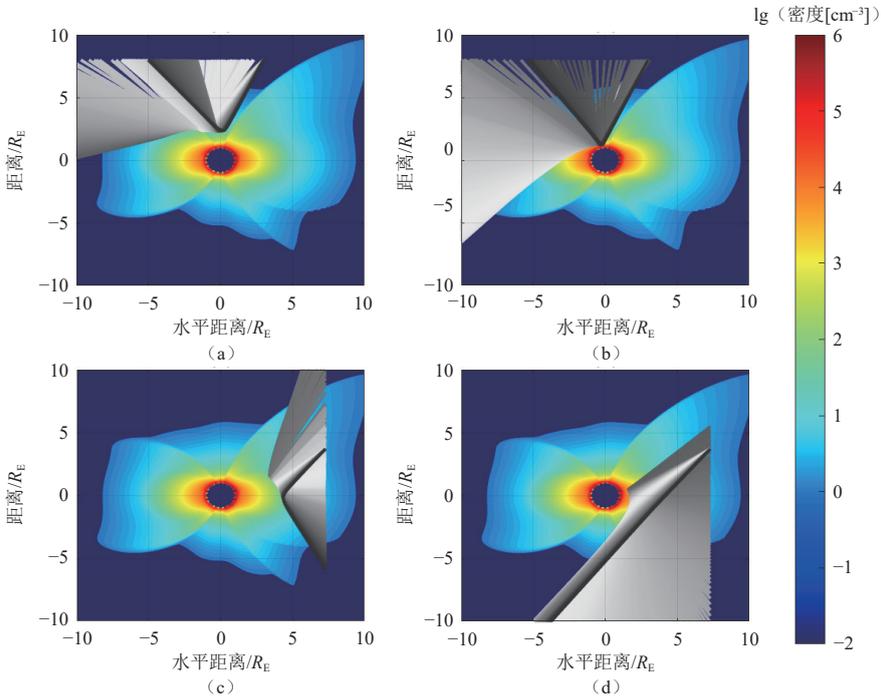


图 3 处于不同发射起点的工作频率分别为0.1 MHz和1 MHz的射线0点时刻在GCPM中传播的寻常波的路径图

Fig. 3 Path diagram of ordinary waves propagating in GCPM at 0 o'clock time of rays with working frequencies of 0.1 MHz and 1 MHz at different emission starting points respectively

为了获取RPI的等离子体回波图，本文将工作频率的起始频率设置为50 kHz，终止频率设置为1MHz，频率间隔为1 kHz，其它参数保持不变，群路径则由式 (15) 计算得到^[24]， τ_0 表示起始射线和卫星的距离， τ_r 表示射线反射点距离卫星的距离，在本文中 τ_0 为0

$$\tau(f) = \frac{ct}{2} = \int_{\tau_0}^{\tau_r} n' d\tau \quad (15)$$

$$n' = \frac{\partial(\omega n)}{\partial\omega} = n + \omega \frac{\partial n}{\partial\omega} \quad (16)$$

图4所示为在极区上空等离子体回波图的模拟结果，从图4中可知，在极区和在中纬度地区的回波图存在较大的差异，不再是一段平滑的抛物线。可以明显看出在部分频率范围内，群路径随工作频率的增长反而会减小。这是因为在极区地区，电子密度的分布会更加复杂，在极区上空存在着电子密度的凹槽。从图3 (a)、图3 (b)所示的射线传播路径图可以看出，群路径的变化即可以看作是射线反射点的变化，工作频率从0.1 MHz到0.3 MHz增长时，射线的反射点逐渐靠拢，对应着群路径也随之增大，但是由于极区地区电

子密度分布复杂,存在电子密度凹槽区,所以反射点的位置也会随电子密度的变化而变化,表现出来的便是在0.3 MHz到0.65 MHz的频率区间内有随工作频率的增加,群路径反而减小的趋势,群路径在0.65 MHz以后继续随工作频率的增加而增大。图4所示为在中纬度地区上空模拟的结果,随着工作频率的增加,群路径和能量损耗也会随之增加。电波反射点越靠近,电子密度随空间的变化越小,所以群路径在工作频率达到0.8 MHz时趋于平稳状态。由于在中纬度地区的上空,电子密度随空间变化比较平稳,因此等离子体回波图是一段较为平滑的抛物线,如图5所示。通过中纬度地区和极区上空等离子体回波图的模拟,发现等离子体回波图能够很好地反映等离子环境中电子密度的分布特征,可以通过反演等离子体回波图来获取真实环境中电子密度随空间的分布结构特征。

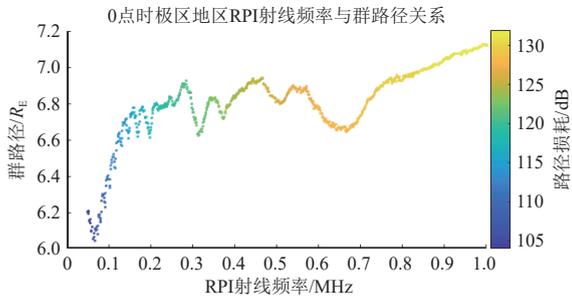


图4 0点时刻极区上空的等离子体回波图的模拟结果
Fig. 4 Simulation results of plasma echo patterns at polar regions at 0 UT

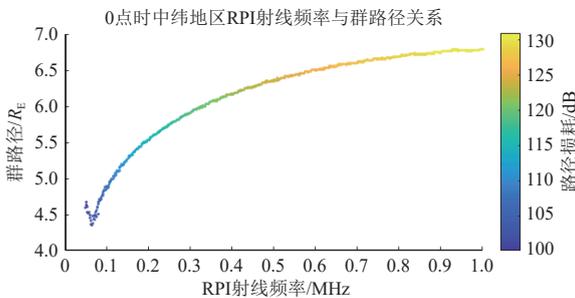


图5 0点时刻中纬度上空的等离子体回波图的模拟结果
Fig. 5 Simulation results of plasma echo patterns at mid-latitude region at 0 UT

3.2 与在轨实测数据的对比研究

图6所示为IMAGE卫星RPI在轨实测回波图^[25],卫星处于北极上空,频率范围为50~300 kHz,横坐标代表频率变化,右侧纵坐标代表回波的群路径,颜色强度则是代表了相对幅度的大小。图7所示是处于相同位置的等离子体回波图的模拟结果,卫星发射点位置为(0,3.5R_E),频率为0.05~1 MHz。从图6可知,在自由空间中传播时,随着工作频率的增加,相对幅度越来

越小,意味着回波损耗越来越大,该在轨实测等离子体回波图在50~300 kHz的频率范围内也是一段较为平滑的抛物线结构。在轨实测图中,频率为0.05 MHz时对应的群路径约为0.8R_E;频率为0.3 MHz时,群路径约为2.3R_E。而在模拟结果图7中可以看出,频率为0.05 MHz时,计算出的群路径约为0.77R_E;频率为0.3 MHz时,群路径约为2.0R_E。在轨实测图的群路径变化趋势、变化范围以及回波损耗等特征都与图7的模拟结果类似。在轨实测图存在等离子体共振回波,而本文的模拟结果没有考虑共振回波。

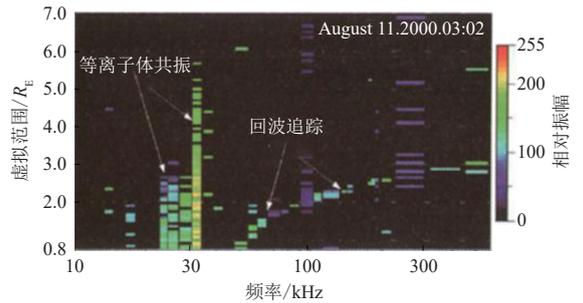


图6 IMAGE卫星RPI实测回波图^[25]
Fig. 6 RPI measured echo map by IMAGE satellite^[25]

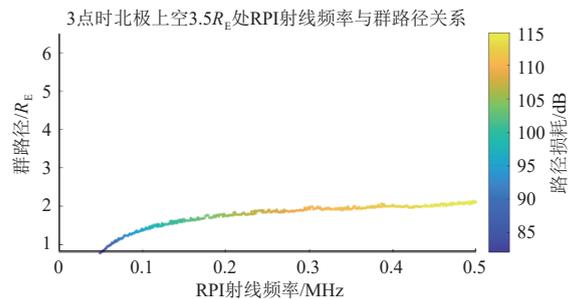


图7 距离北极上空3.5R_E处等离子体回波图模拟结果
Fig. 7 Simulation results of plasma echo pattern at 3.5R_E above the North Pole

4 结论

本文利用等离子体模型GCPM模型(v2.4)作为背景模拟等离子体空间环境,然后通过射线追踪方法对无线电波在等离子体环境中的传播进行模拟,同时加入无线电波在自由空间传播的损耗,来仿真星载等离子体探测器RPI的回波图。本文初步给出了不同地区(极区和中纬度地区)上空等离子体回波图的结构特征。从模拟仿真结果看,中纬度地区和正北极上空等离子体回波图的结构特征都和实测结果的回波类似,而从极区右上空接收的等离子体回波图则更为复杂,这是由于极区的电子密度分布更为复杂。模拟结果说

明等离子体回波图能够很好地反映等离子体环境中电子密度在空间中的分布结构。根据本文的工作基础, 后续将研究如何从等离子体回波图中反演得到电子密度随空间的分布, 进一步为未来深空探测任务和通信工程的顺利实施提供参考。

参 考 文 献

- [1] 段成林, 张宇, 韩意, 等. “天问一号”太阳等离子体延迟误差分析与修正[J]. 深空探测学报(中英文), 2021, 8(6): 592-599.
DUAN C L, ZHANG Y, HAN Y, et al. Analysis of delay error correction of solar plasma region on Tianwen-1[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8(6): 592-599.
- [2] 吴季. 深空探测的现状、展望与建议[J]. 科技导报, 2021, 39(3): 80-87.
WU J. Deep space exploration: Status, expectation and suggestion[J]. Science & Technology Review, 2021, 39(3): 80-87.
- [3] BOUGERET J L, KAISER M L, KELLOGG P J, et al. WAVES: The radio and plasma wave investigation on the wind spacecraft[J]. Space Science Reviews, 1995, 71(1): 231-263.
- [4] GURNETT D A, PERSON A M, RANDALL R F, et al. The polar plasma wave instrument[J]. Space Science Reviews, 1995, 71(1): 597-622.
- [5] MAUK B H, FOX N J, KANEKAL S G, et al. Science objectives and rationale for the radiation belt storm probes mission[J]. Space Science Reviews, 2013, 179(1): 3-27.
- [6] FUSELIER S A, BURCH J L, LEWIS W S, et al. Overview of the image science objectives and mission phases[J]. Space Science Reviews, 2000, 91(1-2): 51-66.
- [7] GREEN J L, BENSON R F, FUNG S F, et al. Radio plasma imager simulations and measurements[J]. Space Science Reviews, 2000, 91(1): 361-389.
- [8] REINISCH B W, HAINES D M, BIBL K, et al. The radio plasma imager investigation on the imagespacecraft[J]. Space Science Reviews, 2000, 91(1): 319-359.
- [9] REINISCH B W, SALES G S, HAINES D M, et al. Radio wave active Doppler imaging of space plasma structures: arrival angle, wave polarization, and Faraday rotation measurements with the radio plasma imager[J]. Radio Science, 1999, 34(6): 1513-1524.
- [10] 张旭旺, 王文灿, 马文起, 等. 深空天线组阵的空间功率合成特性分析[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(4): 399-406.
ZHANG X W, ZHANG W C, MA W Q, et al. Analysis on space power synthesis performance of deep space antenna array[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(4): 399-406.
- [11] GREEN J L, BENSON R F, FUNG S F, et al. Radio plasma imager simulations and measurements[J]. Space Science Reviews, 2000, 91(1): 361-389.
- [12] ANGERAMI J J, THOMAS J O. Studies of planetary atmospheres: 1. the distribution of electrons and ions in the Earth's exosphere[J]. Journal of Geophysical Research, 1964, 69(21): 4537-4560.
- [13] KIMURA I. Effects of ions on Whistler-mode ray tracing[J]. Radio Science, 2016, 1(3): 269-283.
- [14] AIKYO K, ONDOH T. Propagation of nonducted VLF waves in the vicinity of the plasmopause[J]. Journal of The Radio Research Laboratories, 1971, 18(99): 153-182.
- [15] ROELOFF E C, SIBECK D G. Magnetopause shape as a bivariate function of interplanetary magnetic-field $B(z)$ and solar-wind dynamic pressure[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1994, 99(A5): 8787-8788.
- [16] HUANG X, REINISCH B W, SONG P, et al. Developing an empirical density model of the plasmasphere using IMAGE/RPI observations[J]. Advances in Space Research, 2004, 33(6): 829-832.
- [17] WEBB P A, ESSEX E A. An ionosphere-plasmasphere global electron density model[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science, 2000, 25(4): 301-306.
- [18] GULYAEVA T L, HUANG X, REINISCH B W. Ionosphere-plasmasphere model software for ISO[J]. Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica, 2002, 37(2-3): 143-152.
- [19] GALLAGHER D L, CRAVEN P D, COMFORT R H. Global core plasma model[J]. Journal of Geophysical Research Space Physics, 2000, 105(A8): 18819-18833.
- [20] GOTO Y, KASAHARA Y, IDE T. Improvement of equatorial density distribution of the global core plasma model using GPS-derived TEC[J]. Radio Science, 2012, 47(5): 1-9.
- [21] STIX T H. The theory of plasma waves[J]. American Journal of Physics, 1962: 31.
- [22] KUDEKI E. Applications of Radiowave Propagation[D]. Urbana-Champaign: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2010.
- [23] 沈琪琪, 朱德生. 短波通信[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1989.
- [24] 熊年禄, 唐存琛, 李行健. 电离层物理概论[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1999.
- [25] REINISCH B W, HUANG X, HAINES D M, et al. First results from the radio plasma imager on image[J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(6): 1167-1170.

作者简介:

肖雄(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 星载等离子体探测。

通讯地址: 武汉大学电子信息学院电离层实验室(430072)

E-mail: 2019202120037@whu.edu.cn

姜春华(1984-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 空间电离层探测。

本文通讯作者。

通讯地址: 武汉大学电子信息学院电离层实验室(430072)

E-mail: chuajiang@whu.edu.cn

Simulation Study on Echo of Earth Plasma Layer Detector

XIAO Xiong¹, JIANG Chunhua¹, YANG Guobin¹, ZHAO Zhengyu^{1,2}

(1. Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Harbin Institute of Technology(Shenzhen), Shenzhen 518055, China)

Abstract: Ever of the plasmas layer and layer of magnetic plasma environment detection is mainly based on satellite in place or passive detection means, and spaceborne plasma probe as a way of active detection (active) to send and receive electromagnetic wave echo, to detect the plasma space environment provides a new means of detection, This mode can obtain the distribution structure of electron density along the propagation path in plasma space environment. This article is based on our country has not yet have access to spaceborne Plasma detector measured echo figure, put forward the combined with Plasma GCPM (Global Core Plasma Model) and the ray tracing technique to simulate the electromagnetic waves in plasmas layer and magnetospheric Plasma environment in the communication process. The ray tracing method adopted in this paper is based on the refraction index of cold plasma, considering the effect of magnetic field on the refraction index. This simulation method can obtain the structural characteristics of plasma echo through simulation, which provides a certain reference value for spaceborne plasma detector to obtain the measured plasma echo image. At the same time, it can also provide guidance for the subsequent inversion of electron density profile from measured plasma echo map, and provide important reference for the smooth implementation of deep space exploration and communication engineering.

Keywords: plasma model; RPI; ray tracing; GCPM; cold plasma

Highlights:

- The ray tracing method based on cold plasma refraction index is introduced and used in detail.
- The relationship of group path - echo loss - electromagnetic frequency is obtained by simulating transmitting stations at different spatial positions.
- The measured data of RPI in orbit and simulation results of RPI are compared and analyzed.
- We lay the foundation for electron density inversion in plasma layer.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 刘勇]