

## 电磁波在等离子体层中衰减的数值分析

王华东, 鄢扬, 郭军

(电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

**【摘要】**采用分层介质方法处理非均匀等离子体层,研究了电磁波射向覆盖磁化等离子体层的金属平板时电磁波的衰减特性。着重讨论Epstein密度分布的等离子体层,分析了等离子体电子密度、电子碰撞频率、外加磁场和入射角度等因素对电磁波衰减的影响,得出在一定等离子体密度和电子碰撞频率下,等离子体对电磁波的吸收特性。

**关键词** 电磁波; 磁化等离子体; 反射; 衰减

中图分类号 TN011; O539 文献标识码 A

## Numerical Analysis of Attenuation of Electromagnetic Wave in Non-Uniform Magnetized Plasma Slab

Wang Huadong, Yan Yang, Guo Jun

(School of Physical Electronics, UEST of China Chengdu 610054)

**Abstract** The attenuation of the electromagnetic wave in the non-uniform plasma slab cling to a metal plane is studying in this paper. The plasma slab is divided into a number of sub-slabs each of which is dealt with as a uniform slab. Detailed numerical calculations are conducted on Epstein-distributions. The effects of electron number density, momentum transfer collision rate, magnetic field and angle of incidence on the attenuation are taken into account, and get the character of plasma's absorbing electromagnetic wave.

**Key words** electromagnetic wave; magnetized plasma; reflection; attenuation

电磁波与等离子体之间相互作用是等离子体物理学中重要的研究方向之一,近年来研究表明等离子体在飞行器隐身方面具有良好前景。等离子体隐身技术的原理是在飞行器表面形成一层等离子体,利用等离子体对电磁波的吸收、反射和折射效应吸收雷达电波,大幅度减少回波能量,达到隐身目的<sup>[1]</sup>。目前等离子体隐身技术已成为国际上一个研究热点,等离子体中电磁波的吸收,反射和透射引起了广泛的关注,文献[2, 3]研究了大气层中等离子体作为电磁波反射体和吸收体的可能性,发现在大气环境中等离子体中电子与气体分子发生十分频繁的碰撞,在一定条件下等离子体可以在很宽的频带内大幅度吸收电磁波;文献[4]研究了均匀磁化等离子体与雷达波的相互作用,得到均匀磁场条件下,等离子体密度、磁场强度、碰撞频率等因素对等离子体层电磁波衰减的影响。本文着重讨论了非均匀磁化等离子体层的情形,采用精细分层模型,并假定TE波和TM波无耦合。

收稿日期: 2003-07-11

基金项目: 国防科技重点实验室基金资助项目

作者简介: 王华东(1977-),男,硕士,主要从事电磁场微波技术、微波电子学等方面的研究。

## 1 电磁波在非均匀磁化等离子体层中的传播

磁化等离子体的介电常数  $\tilde{\epsilon}_g$ ，可由Appleton方程求出<sup>[3]</sup>

$$\tilde{\epsilon}_r = 1 - \frac{\omega_{pe}^2 / \omega^2}{C_1 \pm C_2^{1/2}} \quad (1)$$

$$\begin{cases} C_1 = 1 - j \frac{\nu_{eff}}{\omega} - \frac{(\omega_{ce}^2 / \omega^2) \sin^2 q}{2(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} - j \frac{\nu_{eff}}{\omega})} \\ C_2 = \frac{(\omega_{ce}^4 / \omega^4) \sin^4 q}{4(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} - j \frac{\nu_{eff}}{\omega})^2} + \frac{\omega_{ce}^2}{\omega^2} \cos^2 q \end{cases} \quad (2)$$

式中  $q$  为电磁波传播方向与磁场之间夹角，式(1)中“+”表示左旋极化波，“-”表示右旋极化波，由计算可得，在高碰撞率下，两种波的传播常数近似相同，本文仅考虑右旋极化波。 $\omega_{pe}$  为电子等离子体频率， $\omega_{ce}$  为电子回旋频率， $\nu_{eff}$  为等离子体电子碰撞频率。磁化等离子体中平面波解为  $e^{\pm jk_r r}$  (其中  $k_r = \omega/c \sqrt{\tilde{\epsilon}_r}$ ， $c$  为光速)。

假定无限大金属板表面覆盖一层非均匀等离子体如图1所示，其厚度为  $d$ ，密度仅在  $x$  轴方向变化， $y$  轴方向不变，电磁波沿  $k$  方向射入等离子体层，与  $x$  轴夹角为  $q$ 。如图1所示，即将等离子体在  $x$  方向均匀分为  $n$  层。每一层中等离子体密度均匀分布，层与层之间密度不相同， $n$  越大越接近实际的非均匀分布，坐标原点设置在空气与等离子体边界处，第  $i$  层的等离子体起始位置为  $x_i$ ，结束位置为  $x_{i+1}$ ，金属平板的坐标为  $x_{n+1}$ ，时谐因子为  $e^{j\omega t}$ 。

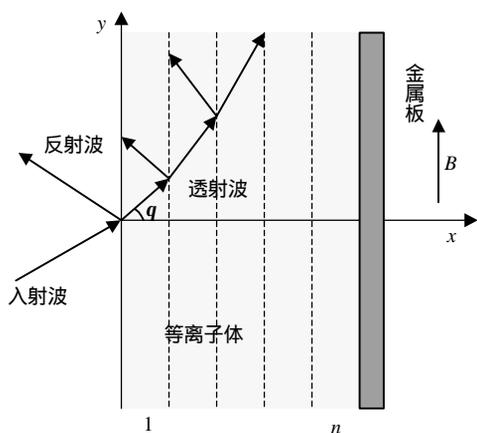


图1 分析模型

首先在不考虑多重反射情况下，求出等离子体层界面的反射系数和透射系数

$$R_i = \frac{e_i k_{i-1,x} - e_{i-1} k_{i,x}}{e_i k_{i-1,x} + e_{i-1} k_{i,x}} \quad (3)$$

$$T_i = 1 + R_i \quad R_i = -R'_i$$

式中  $k_{i,x}$  为波矢量  $k_i$  在  $x$  方向的分量， $R_i$  为从第  $i-1$  层入射，在第  $i-1$  层与  $i$  层界面反射系数； $T_i$  为从第  $i-1$  层入射，在第  $i-1$  层与  $i$  层界面透射系数； $R'_i$  为从第  $i$  层入射，在第  $i-1$  层与  $i$  层的界面的反射系数； $T'_i$  为从第  $i$  层入射，在第  $i-1$  层与  $i$  层的界面的透射系数。

考虑分层间多次反射，引入广义反射系数  $\tilde{R}_i$ <sup>[5,6]</sup>，第  $i$  层等离子体中的场为

$$E_i = A_i (e^{-jk_{i,x}x - jk_{i,y}y} + \tilde{R}_{i+1} e^{-2jk_{i,x}x_{i+1} + jk_{i,x}x - jk_{i,y}y}) \quad (4)$$

最后一层是金属平板， $R_{n+1} = \tilde{R}_{n+1} = -1$ ，在各层间匹配边界条件，可得如下关系式

$$\tilde{R}_i = \frac{R_i + R_{i+1} e^{-2jk_{i,x}(x_{i+1} - x_i)}}{1 + R_i \tilde{R}_{i+1} e^{-2jk_{i,x}(x_{i+1} - x_i)}} \quad (5)$$

功率反射系数  $G_r = |R_1|^2$ ，定义衰减系数  $a = -10 \lg G_r / d$ 。

## 2 数值计算与分析

在计算中，等离子体层厚度  $d=10$  cm，等离子体被分成50层，电子密度分布为Epstein分布： $n(x) = N_e [1 + \exp(-\frac{x - (d/2)}{z_0})]^{-1}$ 。  $z_0 = d / (4.0 \times \ln 10) \approx 0.0109$ ； $N_e$  为最大等离子体密度。

外加磁场强度为线性变化，在等离子体层表面磁场强度为零，金属平板表面磁场强度最大，为  $B_{max}$ ，

本文中取  $B_{\max} = 0.1T$ , 并讨论了磁场与金属平板平行和垂直两种情况。大气层中等离子体电子的碰撞频率与电子温度、气压和水蒸气密度有密切的关系, 在海拔3 000 m, 气压66 kPa, 温度为300 K时,  $\nu_{\text{eff}} \approx 1.0 \times 10^{11} \text{ Hz}$  [2]。

### 2.1 等离子体电子密度对衰减的影响

如图2中所示密度为  $N$  的曲线为均匀分布, 以作为比较。从计算结果可以看到等离子体层在很宽频率范围对电磁波具有强烈的吸收和衰减效果。并且最大密度较低的等离子体层在低频处的吸收效果好于在高频处; 相对应, 密度较高的等离子体有较好整体衰减效果, 并且吸收频带也越宽。另外可以看到均匀分布等离子体层与 Epstein 分布的等离子体层相比, 有更好的吸收效果。这与电子碰撞频率较低的情况有所区别, 原因应该是在较高等离子体电子碰撞频率时, 电磁波在等离子体层界面不会产生很强的反射。

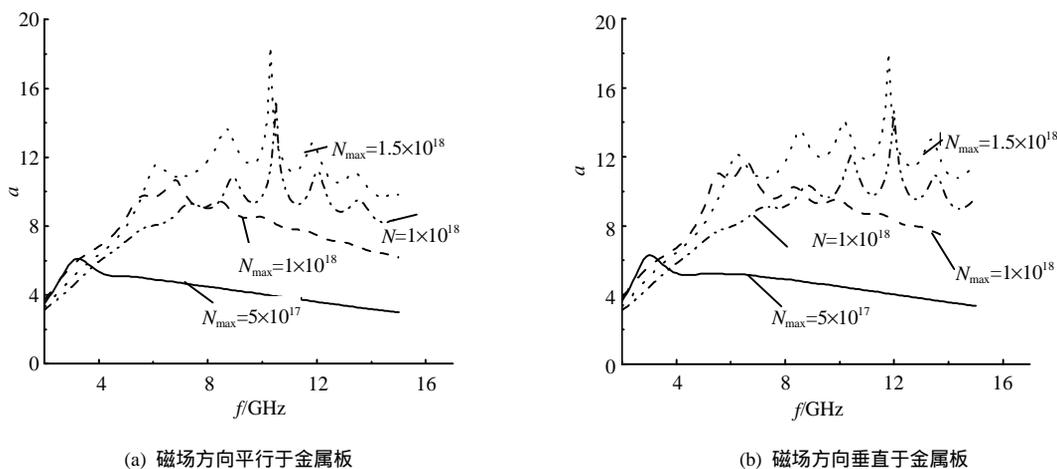


图2 不同等离子体密度情况下衰减系数与频率间关系

### 2.2 等离子体电子碰撞频率对衰减的影响

从图3可以看出, 当碰撞频率低时, 吸收带宽较窄, 随着等离子体电子碰撞频率的增加, 衰减系数增加, 等离子体吸收峰值向低频处移动, 吸收带宽增加, 但当等离子体电子碰撞频率过高时, 衰减系数反而减小, 这表明对于某一等离子体密度分布和磁场分布, 存在一个最佳电子碰撞频率, 在该碰撞频率下等离子体层吸收效果最好。

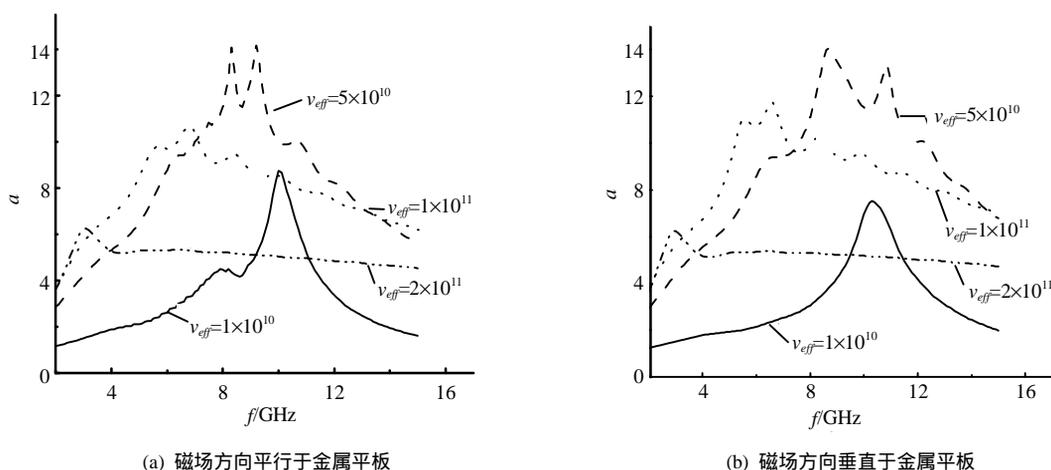


图3 不同电子碰撞频率情况下衰减系数与频率间关系

### 2.3 入射角度和外加磁场对衰减的影响

在图4和图5中  $N_e = 1 \times 10^{18} / \text{m}^3$ , 从图4可以看出随着入射角增大, 衰减效果增强。图5中三条曲线相差很小, 磁场的存在对等离子体层衰减效果影响较小, 仅使衰减系数略有降低, 计算中发现在等离子体密度

和电子碰撞频率较低情况下,磁场对等离子体层衰减的影响很大,在上杂化频率处存在吸收峰,当电子碰撞频率很高时,上杂化吸收峰趋向于消失,造成这种现象的原因是大气等离子体中电子碰撞频率较高,碰撞吸收成为主要的吸收机制,从而减弱了上杂化吸收效应。

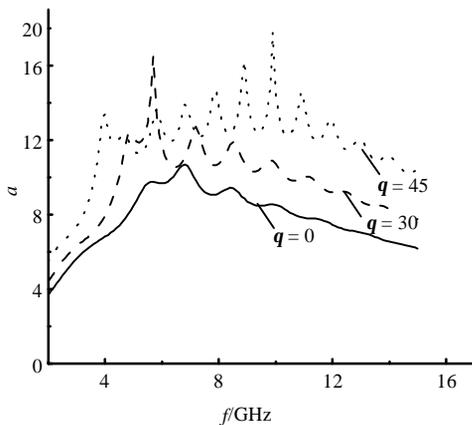


图4 不同入射角情况下衰减系数与频率间关系

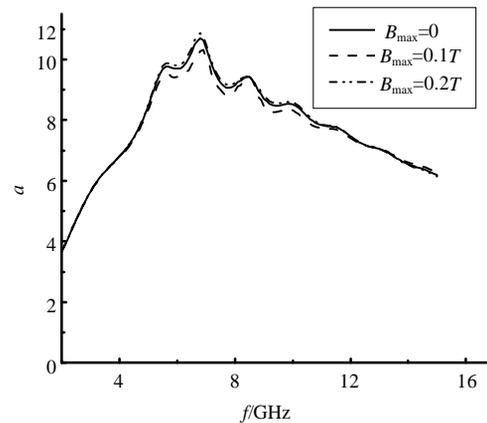


图5 不同磁场强度下情况下衰减系数与频率间关系

### 3 结 论

由计算结果可得,较高的等离子体密度会有较好的吸收效果;等离子体电子碰撞频率对等离子体层的吸收效果有明显影响,存在最佳电子碰撞频率,过高的碰撞频率会导致吸收效果减弱;磁场在较低电子碰撞频率下,对等离子体层的吸收效果影响很大,随着电子碰撞频率增加,磁场作用被大大减弱。

#### 参 考 文 献

- [1] 孙宗祥. 等离子体隐身技术的发展现状及关键技术[J]. 流体力学实验与测量, 2000, 14(2): 114-116
- [2] Vidmar R J. On the use of atmospheric pressure plasma as electromagnetic reflectors and absorbers[J]. IEEE Trans On Plasma Sci, 1990, 18(4): 733-741
- [3] Vidmar R J. Electromagnetic-wave propagation in unmagnetized plasmas[R]. AD-A250710. 1992
- [4] Laroussi M, Roth J R. Numerical calculation of the reflection, absorption, and transmission of microwaves by a nonuniform plasma slab[J]. IEEE Trans On Plasma Sci., 1993, 21(3): 366-372.
- [5] Hu B J, Lai S L. SMM analysis of reflection, absorption and transmission from nonuniform magnetized plasma slab [J]. IEEE Trans On Plasma Sci, 1999, 27(4): 1 131-1135
- [6] Chew W C. 非均匀介质中的场与波[M]. 北京: 电子工业出版社, 1992

编 辑 孙晓丹