

电磁波在不均匀磁化等离子体中的吸收

刘少斌^{1,2}, 莫锦军¹, 袁乃昌¹

(1. 国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073; 2. 南昌大学基础部, 江西南昌 330029)

摘要: 本文讨论了不均匀磁化等离子体片对圆极化电磁波、异常模电磁波的吸收, 计算了不同条件下衰减率。计算表明, 当电磁波的频率接近电子碰撞频率时, 磁等离子体对电磁波的吸收达到最大值。当入射电磁波的频率很低时, 不均匀磁化等离子体中碰撞对雷达波的吸收非常小。当入射电磁波频率较高时, 等离子体的碰撞对入射电磁波的衰减很有效。在磁场对电磁波衰减率的影响上, 对右旋电磁波, 磁场变大, 衰减率曲线的峰值向较低的碰撞频率方向移动, 且衰减率减小。而对左旋电磁波, 磁场变大, 衰减率曲线的峰值向高的碰撞频率方向移动, 且衰减率也增大。同时, 我们发现一定条件下, 磁场使电磁波的有效吸收带宽变宽。此时, 等离子体对电磁波的吸收也最大。特别是当入射电磁波的频率较低时这一特性更显著。

关键词: 等离子体隐身; 雷达散射界面; 不均匀磁等离子体片; 有效吸收带宽

中图分类号: TN011 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 03-0372-04

Research on the Absorption of EM-Wave by Inhomogeneous Magnetized Plasmas

LIU Shao-bin^{1,2}, MO Jin-jun¹, YUAN Nai-chang¹

(1. Institute of Electronic Science and Engineering, NUDT, Changshai, Hunan 410073, China;

2. Basic Courses Department, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330029, China)

Abstract: In this paper, the absorption of circularly polarized and the X-mode EM-wave by inhomogeneous magnetized plasmas is discussed, and the attenuations are calculated under different conditions. The results illustrate that the collisional absorption have a maximal value when the collision frequency is near the EM-wave frequency. Meanwhile, the absorption is very poor when the EM-wave frequency is small. The absorption is efficient with a high incident EM-wave frequency. We also find out that the magnetic fields have an influence upon the attenuations of EM-wave. For the right circularly polarized EM-wave, the peaks of the attenuation curves move to the low collision frequency, and the attenuations reduce when the magnetic field grows. For the left circularly polarized EM-wave, the peaks of the attenuation curves move to the high collision frequency, and the attenuations becomes large when the magnetic field reduces. And we find out that the effective frequency band width of absorption can be broadened under some conditions while the absorption of EM-wave have a maximum. This characteristic is remarkable when the EM-wave frequency is low.

Key words: plasma stealth; RCS; inhomogeneous magnetoplasma slab; electromagnetic wave; effective frequency width of absorption

1 引言

电磁波在不均匀等离子体中的传播和吸收一直是热门的研究领域。近年来, 由于它在电离层等离子体物理、等离子体隐身等领域存在着非常诱人的前景, 引起了人们新的兴趣^[1~14]。文献[10]中研究了不均匀非磁化分层等离子体对电磁波的碰撞吸收及雷达目标的碰撞吸收隐身机制; 用WKB方法计算以任意角入射的电磁波在不均匀等离子体中的衰减; 并计算了电磁波等离子体中的衰减与等离子体碰撞频率、电磁波频率、等离子体最大密度、电磁波入射角的关系。提出了隐身等离子体共振吸收的新概念。Laroussi在文[9, 10]中研究了电磁波在不均匀分层等离子体中的反射和透射, 给出了电磁波在分层等离子体中的碰撞吸收的数值计算结果。Hu等人在文献[12]中用散射矩阵法研究了电磁波垂直入射到分层磁等离子体中时的反射和透射, 给出了反射系数和透射系数。

本文研究了垂直入射时, 不均匀磁等离子体中电磁波的传播。用WKB方法计算了电磁波在不均匀磁等离子体中的衰

减; 分别给出了电磁波在不均匀磁等离子体中的衰减与等离子体碰撞频率、电磁波频率的关系; 并对结果进行了讨论。

2 磁化等离子体对电磁波的碰撞吸收

不均匀磁等离子体中磁化磁场均匀分布, 线性极化的电磁波沿z轴负向传播, 并垂直入射到磁等离子体平板上, 电磁波的电场矢量沿y轴方向。等离子体的另一面为金属反射面, 入射电磁波在这里将被全部反射。采用磁流体模型, 冷的、磁等离子体的复介电常数由Appleton公式给出^[13, 14]。

$$r = 1 - \frac{\frac{2}{\omega} \sin^2}{2 \left(1 - \frac{2}{\omega} - j \right)} \pm \left[\frac{\frac{4}{\omega} \sin^4}{4 \left(1 - \frac{2}{\omega} - j \right)} + \frac{2}{\omega} \cos^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

式中, ω_{pe} 为等离子体频率, ω_{ce} 为电子回旋频率, ν_e 为电子与中性粒子的碰撞频率. θ 为入射角.

平面电磁波的色散关系为: $k(z) = \alpha(z) - j\beta(z)$ (2)

其中,

$$\alpha = -\frac{1}{c} \operatorname{Re}(\sqrt{r}), \quad \beta = -\frac{1}{c} \operatorname{Im}(\sqrt{r}) \quad (3)$$

k 为电磁波在等离子体中的波数, α 和 β 分别为电磁波的衰减常数和相位常数. 设平面电磁波垂直入射面极化(电场沿 y

$$\text{方向), 电场的 WKB 解为 } E_y = E_0 \exp\left[j \int_{z_0}^z k(z) dz\right] \quad (4)$$

其有效的条件为:

$$\frac{1}{k^2} \frac{dk}{dz} \ll 1 \quad (5)$$

显然, 除非等离子体的密度变化非常大或电磁波的频率极低, 这个条件是很容易实现的.

电磁波 $z = z_0$ 从处垂直入射到等离子体内部并被金属表面反射回来, 电磁波两次被吸收, 电磁波返回到 $z = z_0$ 处时的

$$\text{能量为 } P(z_0) = P_0 \exp\left[4 \int_{z_0}^0 \operatorname{Im} k(z) dz\right] \quad (6)$$

式中, z_0 为等离子体厚度, P_0 是电磁波入射时 $z = z_0$ 处的能量. 电磁波的双程衰减为 (dB)

$$\text{Att.} = \left| 17.38 \int_{z_0}^0 \operatorname{Im} k(z) dz \right| \quad (7)$$

3 数值计算结果

3.1 不均匀磁等离子体对圆极化波吸收的计算结果

为了使隐身等离子体较易实现和维持, 等离子体的密度常取抛物线分布或指数分布, 本文取抛物线分布. 为减小目标的雷达散射截面 (RCS), 提高等离子体对目标的隐身效果, 就必须使入射电磁波的频率处于磁等离子体的通带内. 当入射电磁波的频率等于电子回旋频率时, 电磁波与电子回旋运动产生共振. 当入射电磁波的频率远大于电子回旋频率和电子等离子体频率时, 电磁波在等离子体中的传播与真空中相同. 当入射电磁波的频率等于右旋或左旋极化电磁波的截止频率

$$\omega_{R,L} = \pm \left| \omega_{ce}/2 \right| + \sqrt{\omega_{pe}^2 + \omega_{ce}^2/4}$$
 (正号为右旋, 负号为左旋), 电磁波将被反射, 该点称为电磁波的返转点. 当入射电磁波的频率大于电子回旋频率而小于电磁波的截止频率时, 电

磁波将不能在等离子体中传播, 电磁波将被反射. 并称为电磁波的阻带. 而当入射电磁波的频率大于截止频率(也称为上临界频率)时, 电磁波可以在等离子体中传播, 称为等离子体的通带. 该通带在射频范围. 此时, 电磁波的能量将被等离子体衰减.

因此, 由右旋或左旋极化电磁波的截止频率可计算出等离子体中电子密度的最大值处(目标表面)的电子密度

$$N_{e0} = \frac{m_e \omega^2}{q^2} \left[\left(\frac{\omega_{ce}}{2} \right) \pm \frac{\omega_{ce}}{4} \right] \quad (8)$$

式(8)中, 上面的负号为右旋, 正号为左旋. 只能取电磁波段内的最小值, 否则, 不能保证电磁波处于等离子体的通带内.

下面以 S 波段为例, 给出右旋极化电磁波在不均匀磁等离子体衰减的数值计算结果.

取等离子体的厚度为 0.1 米, 电子碰撞频率取值范围为 0 ~ 100 GHz. 图 1 ~ 2 给出电子密度抛物线分布时等离子体碰撞对 S 波段右旋、左旋极化雷达电磁波的吸收与碰撞频率的关系. 图中 (a)、(b)、(c) 对应的磁场分别为 0.001 T、0.01 T、0.05 T. S 频段雷达波工作频率范围为 2 ~ 4 GHz. 故式(8)中取 2.0 GHz, 图 1(a) ~ (c) 中最大等离子体密度(金属表面处)由式(8)计算出分别为 4.906×10^{16} 、 4.279×10^{16} 、 $1.49 \times 10^{17}/\text{m}^3$. 图 2(a) ~ (c) 中最大等离子体密度(金属表面处)分别为 5.045×10^{16} 、 5.672×10^{16} 、 $1.194 \times 10^{17}/\text{m}^3$. 图 1、2 显示, 磁等离子体对圆极化电磁波的吸收与电子的碰撞频率有关, 且衰减率只有一个峰值. 入射电磁波的频率增大时, 衰减率的峰值对应的碰撞频率也增大. 当电子碰撞频率接近等离子体频率时等离子体对圆极化电磁波的衰减达到最大值. 此外, 当等离子体的碰撞频率很低或很高时, 等离子体对圆极化电磁波的碰撞吸收很小. 从物理意义上, 这一现象是很容易解释的. 等离子体对电磁波的吸收是因为等离子体中的电子被入射电磁波的电场激励, 吸收电磁波的能量, 同时, 通过碰撞把能量传给中性粒子和离子. 显然, 当等离子体碰撞频率趋于零时, 等离子体变为无损耗介质. 当碰撞频率不为零时, 能量的转换效率与碰撞频率有关. 能量的转换效率依赖于碰撞发生时电子激励周期的相位. 如果碰撞发生时, 电子的动能最大(激励周期的四分之一处), 能量转换效率最大.

值得指出的是, 当等离子体的最大密度取值不变时, 等离子体对入射电磁波的碰撞衰减随入射电磁波的频率的减小而增大. 从物理意义上有两种解释. 第一, 由于等离子体的最大

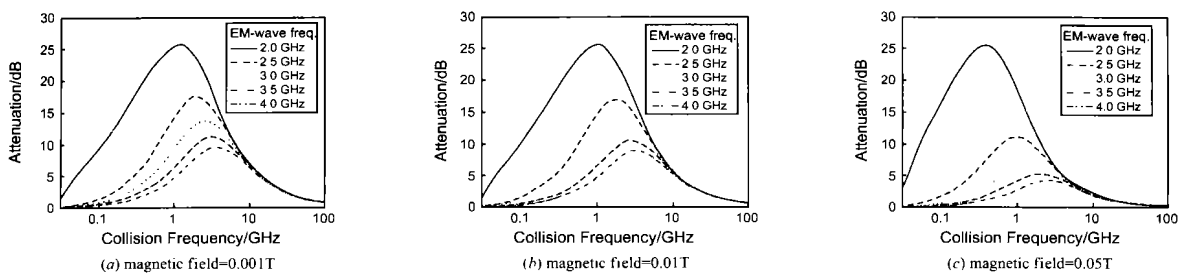


图 1 电子密度抛物线分布时磁化等离子体对 S 波段右旋极化电磁波的吸收与碰撞频率的关系

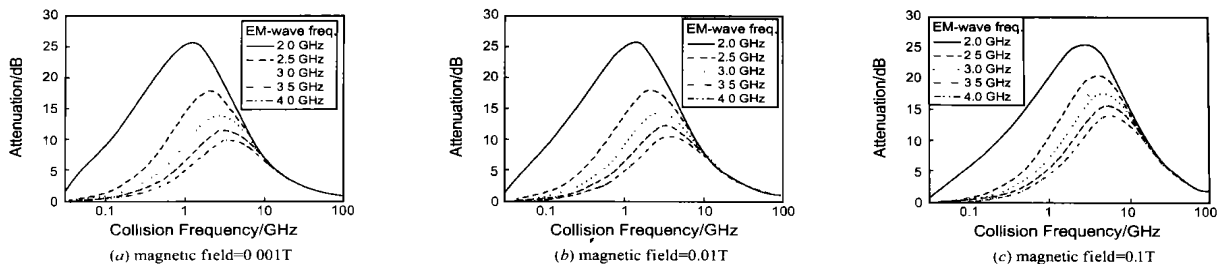


图 2 电子密度抛物线分布时磁化等离子体对 S 波段左旋极化电磁波的吸收与碰撞频率的关系

密度的取值是根据电磁波频率为该频段电磁波频率的最小值由式(8)计算出的,因此,当入射电磁波的频率接近该值时,电磁波在等离子体最大密度附近传播已接近截止区.此时,等离子体对电磁波产生共振吸收,电磁波的衰减是很大的.第二,当入射电磁波的频率太高时,等离子体中的电子的响应跟不上电磁波的变化,使等离子体内的电子的极化作用减小,从而使等离子体中的电子吸收电磁波的能量减小.

而在不同的图上(等离子体的最大密度已变),电磁波的频率越大,等离子体对电磁波的衰减也越大.等离子体的这种性质是易于理解的.当入射电磁波的频率较低时,等离子体的电子峰值密度也越低,即等离子体越稀薄.从而被入射电磁波电场加速的电子也越少,等离子体对电磁波的吸收也越小.当入射电磁波的频率较高时,等离子体的电子峰值密度也越高,即等离子体越稠密.从而被入射电磁波电场加速的电子也越多,等离子体对电磁波的吸收也越大.

此外,图 1、2 显示,磁场对电磁波衰减率的影响主要表现在衰减率峰值的移动和衰减率的大小上.对右旋极化波,磁场变大,衰减率的峰值向较低的碰撞频率方向移动,且衰减率减小.对左旋极化波,磁场变大,衰减率的峰值向较高的碰撞频率方向移动,且衰减率增大.但图中用实线表示的曲线几乎不变化.其物理原因是:磁场的增大使等离子体的最大密度的取值减小,因而,等离子体对电磁波的衰减也减小.但图中用实线表示的曲线主要是等离子体对电磁波的共振吸收,其机理是:入射电磁波与等离子体振荡产生共振,故而几乎不变化.

3.2 不均匀磁等离子体对异常模吸收的计算结果

对横向传播的异常模电磁波,磁等离子体中有三个通带.第一个位于磁流体频段,我们不考虑.其余的两个均位于射频频段.在射频频段中,第一个通带从 $\omega = \omega_{x1}$ 到 $\omega = \omega_{x2}$,第二个通带从 $\omega = \omega_{x3}$ 到 $\omega = \omega_{x4}$. 这里 $\omega_{x1} = \sqrt{\frac{k^2}{4} + \omega_{pe}^2} + \omega_{ce}$

$\omega_{x2} = \left| \frac{-k}{2} \right| + \sqrt{\frac{k^2}{4} + \omega_{pe}^2}$ 称为下截止频率, $\omega_{x3} = \sqrt{\omega_{pe}^2 + \omega_{ce}^2}$ 称为上截止频率, $\omega_{x4} = \sqrt{\omega_{pe}^2 + \omega_{ce}^2}$ 称为上混杂频率.当入射电磁波的频率位于上述两个通带时,电磁波可以在等离子体中传播.电磁波的能量将被等离子体衰减.显然,当等离子体的密度分布不均匀时,入射电磁波的频率始终处于第一个通带内将是困难的.而要使入射电磁波的频率始终处于第二个通带内是易于做到的.只要取等离子体中电子密度的最大处(金属表面)的电子密度小于某一值 N_{c0} ,即可使入射电磁波处于第二个通带内.由上截止频率可以计算出该密度 N_{c0} 为

$$N_{c0} = \frac{m_e \omega}{q^2} \left[\left(\min - \frac{k}{2} \right)^2 - \frac{k^2}{4} \right] \quad (9)$$

式中, \min 为入射电磁波频率的最小值.

下面以 S 波段为例,给出不均匀磁等离子体对异常模衰减的数值计算结果.

图 3 给出电子密度抛物线分布时,磁等离子体对 S 波段雷达电磁波的双程衰减分贝值与等离子体碰撞频率的关系. S 频段雷达波工作频率范围为 2~4GHz.故式(9)中, \min 取 2.0GHz. \min 取 2.0GHz 将使频率大于 2.0GHz 的电磁波能在等离子体中传播.图 3(a)~(c)中磁场强度分别取 1.0 Gauss、10 Gauss、100 Gauss,对应的最大等离子体密度分别为 4.969×10^{16} 、 4.906×10^{16} 、 $4.279 \times 10^{16} / m^3$.

图 3 曲线显示,磁场越大等离子体对电磁波的衰减越小.这是因为磁场越大最大等离子体密度取值越小的缘故.当电子碰撞频率接近等离子体频率时等离子体对电磁波的衰减达到最大值.

此外,当磁场的强度达到一定值时,且入射电磁波的频率接近最大等离子体频率时(也是等离子体吸收电磁波最有效的频率)磁等离子体对电磁波的有效吸收带宽变宽.特别是当入射电磁波的频率较低时这一特性更显著.该特性对目标的

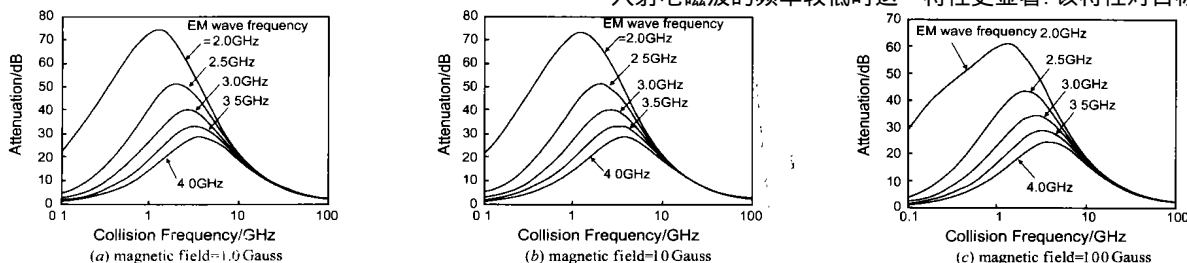


图 3 电子密度抛物线分布时磁化等离子体对 S 波段电磁波的吸收与碰撞频率的关系

等离子体隐身是有益的。

4 计算结果的检验

为了检验以上计算结果的正确性,我们对计算结果进行了估算。显然,等离子体对电磁波的吸收依赖于式(2)中的电磁波衰减常数。为此我们计算了电磁波衰减常数与电磁波频率和等离子体碰撞频率的关系。

电子回旋频率取 $\omega_{ce} = 2.8\text{MHz}$, 电子等离子体频率分别取 $\omega_{pe} = 1.0\text{MHz}$ 、 $\omega_{pe} = 4.0\text{MHz}$ (为简单计,电子回旋频率、电子等离子体频率均取为常量),计算的衰减常数与电磁波频率和等离子体碰撞频率的关系如图 4(a)、(b),所示。

有几点值得指出:

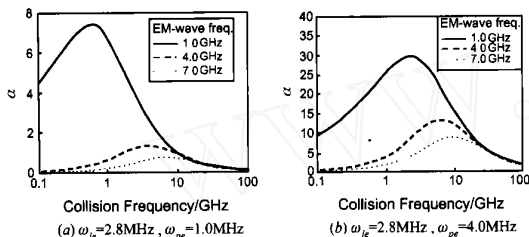


图 4 电磁波衰减常数与碰撞频率的关系

(1) 图 4 显示, 曲线的趋势与图 1~3 的计算结果非常相似。

(2) 图 4 中, 对碰撞频率的曲线只有一个峰值碰撞频率存在一个最佳值, 此时等离子体对电磁波的衰减率最大, 该峰值随入射电磁波的频率增大而增大, 此时的碰撞频率接近碰撞频率。

(3) 图 4 中, 当等离子体的碰撞频率很小或很高时, 衰减常数 都很小。

(4) 图 4 显示, 衰减常数 随等离子体的密度增大而增大。

以上几点可以看出, 我们的计算结果与检验结果基本上是吻合的。

5 结论

以上, 我们分析了不均匀磁化等离子体的碰撞对电磁波的吸收作用。当电磁波的频率大于对应的等离子体截止频率时, 电磁波可以在等离子体中传播, 但由于等离子体内自由电子与电磁波的相互作用, 电磁波要被等离子体吸收。因此, 当等离子体应用于目标的隐身时, 等离子体密度的选取应考虑入射电磁波的频率。因此, 目标隐身等离子体应针对不同频段雷达而设计。在设计等离子体发生器时, 这一点是很重要的。

同时, 我们发现当磁场的强度达到一定值时, 且入射电磁波的频率接近最大等离子体频率时, 磁等离子体对电磁波的有效吸收带宽变宽。此时, 等离子体对电磁波的吸收也最大。特别是当入射电磁波的频率较低时这一特性更显著。该特性对目标的等离子体隐身是有益的。

此外, 我们研究也发现对不同的雷达频率, 等离子体存在一个最佳碰撞频率使入射电磁波衰减最大。该频率接近入射

电磁波频率。

参考文献:

- [1] Vidmar R J. Generation and properties of tenuous plasma bodies at atmospheric pressure [R]. Annual Report, AFOSR Contract No. F49620-85-K0013 SRI International, 1988.
- [2] Vidmar R J. On the use of atmospheric pressure plasma as electromagnetic reflectors and absorbers [J]. IEEE Transactions on Plas Sci, 1990, 18(4): 733 - 741.
- [3] Vidmar R J. Electromagnetic-Wave Propagation in Unmagnetized Plasmas [R]. AD-A250710, 1992.
- [4] Roth J R. Interaction of Electromagnetic Fields with Magnetized Plasmas [R]. AD-A285496, 1996. 204 - 209.
- [5] A Igor, K W Lock. Plasma stealth antenna for the U S Navy [A]. IEEE International Conference on Plasma Science [C]. Williamsburg, VA, CAT: IEEE, 1998. 164.
- [6] 刘少斌, 莫锦军, 袁乃昌. 不均匀等离子体球的电磁波轨迹及其应用 [J]. 电波科学学报, 2002, 17(2): 134 - 137.
- [7] 莫锦军, 刘少斌, 袁乃昌. 非均匀等离子体覆盖目标隐身研究 [J]. 电波科学学报, 2002, 17(1): 69 - 73.
- [8] 刘少斌, 莫锦军, 袁乃昌, 等. 不均匀非磁化等离子体球隐身研究 [A]. 全国微波毫米波会议 [C]. 北京: 中国电子学会, 2001. 830 - 832.
- [9] Laroussi M, Roth J R. Numerical calculation of the reflection, absorption, and transmission of microwaves by a nonuniform plasma slab [J]. IEEE Trans Plasma Sci, 1993, 2(4): 366 - 671.
- [10] Laroussi M, et al. Absorption and transmission of microwaves by a nonuniform plasma near the electron cyclotron frequency [A]. Proc 9th APS Topic Conf Radio Freq Power in Plasma [C]. Charleston, SC: Publishers, 1991. 37 - 45.
- [11] Petrin A B. Transmission of microwaves through magnetoactive plasma [J]. IEEE Transactions on Plas Sci, 2001, 29(3): 471 - 478.
- [12] Hu B J, Lai S L. SMM analysis of reflection, absorption, and transmission from nonuniform magnetized plasma slab [J]. IEEE Transactions on Plas Sci 1999, 27(4): 1131 - 1135.
- [13] Henry G Booker. 冷等离子体 [M]. 北京: 科学出版社, 1984. 72.
- [14] M A Heald, C B Wharton. Plasma Diagnostics With Microwaves [M]. New York: Krieger, 1978.

作者简介:



刘少斌 男, 1965 年生于安徽省, 副教授, 国防科技大学电磁场与微波技术专业博士生, 目前主要从事电磁散射与等离子体隐身等的研究。

莫锦军 男, 1974 出生于广西, 国防科技大学电磁场与微波技术专业博士生, 目前主要从事电磁散射与隐身等方向的研究。

袁乃昌 男, 1965 出生于安徽, 教授、博士生导师, 主要研究领域为微波毫米波电路、相控阵天线、电磁散射及超宽带技术等。