

· 光电工程系统技术 ·

## 电磁波在均匀磁化等离子体中的衰减与反射

吕 丹<sup>1,2</sup>, 童创明<sup>1,2</sup>

(1. 25 号信箱, 陕西 三原 713800; 2. 毫米波国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

**摘 要:** 等离子体覆盖住金属导体, 通过等离子体对入射电磁波的折射、吸收, 使得入射波功率衰减, 降低了反射功率, 起到减小目标 RCS 的作用. 对于均匀磁化等离子体, 针对介电常数与等离子体粒子密度、外加磁场强度、电子碰撞频率以及入射波频率的关系, 仿真计算了不同的等离子体粒子密度、外加磁场强度、电子碰撞频率以及不同等离子体厚度在毫米波段对电磁波的衰减和反射特性的影响.

**关键词:** 等离子体; 衰减; 反射

**中图分类号:** O536

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-1255(2009)06-0019-04

## Attenuation and Reflection of Electromagnetic Wave in Uniform Magnetized Plasma

LV Dan<sup>1,2</sup>, TONG Chuang-ming<sup>1,2</sup>

(1. P. O. Box 25, Sanyuan 713800, China; 2. State Key Lab. of Millimeter Waves, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** When a metallic target is coated with plasma, the plasma will absorb and refract the incident electromagnetic wave, so as to attenuate the power of the incident wave and reduce the power of the reflected wave. Thus, the RCS of the target also will be reduced. For the uniform magnetized plasma, the permittivity has a relationship with the density of particle of plasma, the intensity of the outer magnetic field, the collision rate of electron and the frequency of the incident wave. The influence of different density, intensity, collision rate and thickness on the attenuation and reflection characteristics of electromagnetic wave in millimeter wave band can be calculated by the simulation method.

**Key words:** plasma; attenuation; reflection

自 20 世纪 60 年代等离子体隐身技术投入研究以来一直引起各国的兴趣. 它与常规技术相比具有很多优点: 基本不需要对装备进行外形和性能上的改变; 可通过电源开关控制等离子体的产生和消失; 吸波频带宽、吸收率高、隐身效果好、使用时间长等等<sup>[1,2]</sup>.

金属平板表面被等离子体覆盖, 电磁波入射到金属板表面发生全反射又将波反射回等离子体与空气的交界面. 均匀等离子体并有均匀外加磁场条件下, 等离子体的介电常数与等离子体粒子密度、外加

磁场强度、电子碰撞频率以及入射波频率都有关系. 在此条件下, 仿真计算了在毫米波段不同等离子体密度、碰撞频率、外加磁场强度以及不同厚度情况下电磁波的衰减以及反射特性.

### 1 理论分析

#### 1.1 电磁波在均匀磁化等离子体中的传播

对于等离子体中的电磁波, 依然遵循麦克斯韦

收稿日期: 2009-09-01

基金项目: 毫米波国家重点实验室基金项目(K200907)

作者简介: 吕丹(1981-), 女, 陕西柞水人, 博士研究生, 主要从事电磁辐射与散射方面的工作; 童创明(1964-), 男, 湖北黄冈人, 博士, 教授, 主要从事电磁学和天线方面的研究工作.

方程组

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{D} &= 0 \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \vec{B} &= \mu_0 \vec{H} \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \\ \nabla \times \vec{H} &= -\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} & \vec{D} &= \epsilon_0 \tilde{\epsilon}_r \vec{E} \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $\mu_0$ 、 $\epsilon_0$  是真空中的磁导率和介电常数;  $\tilde{\epsilon}_r$  是在外加磁场条件下的相对介电常数。

由麦克斯韦方程组可得到<sup>[2,3]</sup>

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \tilde{\epsilon}_r \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2)$$

假设平面电磁波沿  $z$  轴方向传播, 即  $\vec{E} = \vec{E}_0 \exp(j\omega t - \tilde{\gamma}z)$ , 则代入式(2)可得到如下的色散关系

$$\tilde{\gamma}^2 = -\frac{\omega^2 \tilde{\epsilon}_r}{c^2} \quad (3)$$

$$\tilde{\epsilon}_r = 1 - \frac{\frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}}{\left[ 1 - j \frac{v_{eff}}{\omega} - \frac{\frac{\omega_{ce}^2 \sin^2 \theta}{\omega^2}}{2 \left( 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} - j \frac{v_{eff}}{\omega} \right)} \right] \pm \left[ \frac{\frac{\omega_{ce}^4 \sin^4 \theta}{\omega^4}}{4 \left( 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} - j \frac{v_{eff}}{\omega} \right)} + \frac{\omega_{ce}^2 \cos^2 \theta}{\omega^2} \right]^{1/2}} \quad (6)$$

其中,  $\omega_{pe}$  是电子等离子体角频率, 由于离子的质量远远大于电子质量, 等离子体角频率等于离子与电子等离子体角频率之和, 因此可用电子的等离子体角频率来近似计算等离子体角频率

$$\omega_{pe} = \sqrt{e^2 N_e / (m_e \epsilon_0)} \quad (7)$$

其中,  $N_e$  表示等离子体的电子密度。

式(6)中  $\theta$  表示电磁波的传播方向与外加磁场方向的夹角, “+”表示左旋偏振, “-”表示右旋偏振。这里仅考虑电磁波沿着垂直于外加磁场方向传播即  $\theta = 90^\circ$  时的右旋偏振的情况, 则式(6)简化为

$$\tilde{\epsilon}_r = 1 - \frac{\frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}}{1 - j \frac{v_{eff}}{\omega} - \frac{\frac{\omega_{ce}^2}{\omega^2}}{1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} - j \frac{v_{eff}}{\omega}}} \quad (8)$$

### 1.3 电磁波在等离子体中的衰减

厚度为  $d$  均匀等离子体覆盖在金属平板上, 功率为  $P_0$  的平面电磁波垂直入射。在空气与等离子体界面  $z=0$  处通过反射进入带等离子体内部的电磁波功率是  $P_i$ 。由于等离子体是均匀的, 电磁波在

$$\tilde{\gamma} = j \frac{\omega}{c} \sqrt{\tilde{\epsilon}_r} = \alpha + j\beta \quad (4)$$

式中,  $\omega$  和  $c$  分别是入射电磁波的角频率和光速;  $\alpha$  和  $\beta$  分别称为衰减常数和相位常数。

### 1.2 均匀磁化等离子体的介电常数

均匀磁化等离子体电子的运动方程为<sup>[2,4]</sup>

$$m_e \frac{\partial \vec{v}_e}{\partial t} = -e\vec{E} - e\vec{v}_e \times \vec{B} - m_e \vec{v}_e v_{eff} \quad (5)$$

其中,  $m_e$ 、 $e$ 、 $v_{eff}$  和  $v_e$  分别是电子的质量、绝对电荷量、碰撞频率和速度。

仅考虑电子回旋频率  $\omega_{ce} = eB/m_e$  的情况下(不考虑离子回旋频率), 等离子体的介电常数为

等离子体内部没有反射, 到达金属表面  $z=d$  后被全反射回等离子体与空气的界面。若忽略掉多次反射, 则出射的电磁波功率是  $P_r$ 。在等离子体中  $z$  点处的电磁波功率是

$$P(z) = P_i \exp(-2\alpha z) \quad (9)$$

由式(9)可得出

$$P_r = P_i \exp(-4\alpha d) \quad (10)$$

定义电磁波能量的衰减为(dB)

$$A = |10 \lg \left( \frac{P_r}{P_i} \right)| = 40 d \lg(e) |\alpha| \quad (11)$$

### 1.4 电磁波在等离子体表面的反射

电磁波入射分层介质,  $\epsilon_r^{(n)}$ 、 $\mu_r^{(n)}$  分别为第  $n$  层的相对介电常数和相对磁导率,  $d^{(n)}$  为第  $n$  层的厚度,  $a^{(n)}$  为入射波在第  $n$  层的入射角。1 对应为自由空间,  $N$  对应底板。

反射系数分为平行极化反射系数  $R_H$  和垂直极化反射系数  $R_E$ 。这里仅考虑垂直入射这一情况,  $R_E = -R_H$ , 下面仅给出  $R_E$  的计算公式<sup>[5]</sup>

$$R_E = \frac{Z_{iE}^{(2)} \cos a^{(1)} - Z^{(1)} \cos a^{(2)}}{Z_{iE}^{(2)} \cos a^{(1)} + Z^{(1)} \cos a^{(2)}} \quad (12)$$

其中,  $Z_{iE}^{(n)}$  表示垂直极化情况下第  $n$  层的输入阻抗,

由下面公式求得

$$Z_{iE}^{(n)} = \{ [ Z_{iE}^{(n+1)} \cos a^{(n)} - j Z^{(n)} \cos a^{(n+1)} \tan (c^{(n)} d^{(n)}) ] / [ Z^{(n)} \cos a^{(n+1)} - j Z_{iE}^{(n+1)} \cos a^{(n)} \tan (c^{(n)} d^{(n)}) ] \} Z^{(n)} \quad (13)$$

当  $n = N$  时,有

$$Z_{iE}^{(N)} = Z^{(N)} \quad (14)$$

式中,  $Z^{(n)} = \sqrt{\mu_0 \mu_r^{(n)} / (\epsilon_0 \epsilon_r^{(n)})}$  是第  $n$  层的阻抗;

$c^{(n)} = k^{(n)} \cos a^{(n)}$ ;  $k^{(n)} = \omega \sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r^{(n)} \mu_0 \mu_r^{(n)}}$  是第  $n$

层的波数;  $\cos a^{(n)} = \sqrt{1 - \frac{\mu_r^{(1)} \epsilon_r^{(1)}}{\mu_r^{(n)} \epsilon_r^{(n)}} \sin^2 a^{(1)}}$ .

定义反射率为(dB)

$$\Gamma = 10 \lg(|R_E|^2) \quad (15)$$

## 2 仿真计算

(1) 等离子体厚度为  $d = 0.1$  m, 电子碰撞频率为  $\nu_{eff} = 50$  GHz, 等离子体密度分别为  $N_e = 1.0 \times 10^{10}$ 、 $1.0 \times 10^{11}$ 、 $1.0 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ , 外加磁场为  $B = 0.1$  T. 图 1、图 2 反映了不同等离子体密度情况下衰减和反射率随入射波频率的变化( $f \in (30 \sim 100)$  GHz).

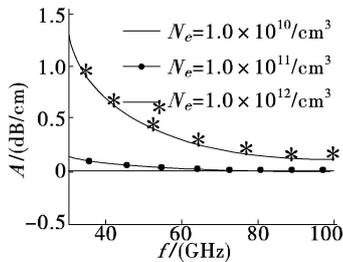


图 1 不同等离子体密度时衰减随入射波频率的变化关系

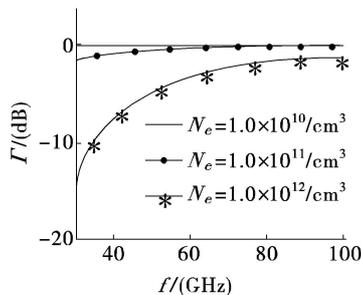


图 2 不同等离子体密度时反射率随入射波频率的变化关系

由图 1、图 2 可看出, 等离子体密度越小, 衰减

越小, 反射率越大. 而且随着入射波频率的增大, 衰减逐渐减小, 反射率逐渐增大.

(2) 等离子体厚度为  $d = 0.1$  m, 等离子体密度为  $N_e = 1.0 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ , 电子碰撞频率分别为  $\nu_{eff} = 10$ 、 $50$ 、 $100$  GHz, 外加磁场为  $B = 0.1$  T. 图 3、图 4 反映了不同电子碰撞频率情况下衰减和反射率随入射波频率的变化.

图 3、图 4 显示等离子体碰撞频率越小, 衰减越小, 反射率越大. 而且随着入射波频率的增大, 衰减逐渐减小, 反射率逐渐增大. 当碰撞频率过大时, 等离子体内的电子频繁与中性粒子和离子发生碰撞, 等离子体内被电磁波极化的电子相对减少, 入射波频率较大时电子极化周期变短, 电磁波传递给电子的能量需靠碰撞传递给其他粒子. 所以碰撞频率越大, 衰减越大.

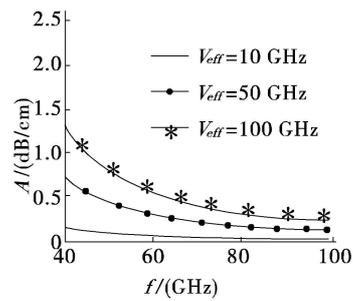


图 3 不同电子碰撞频率时衰减随入射波频率的变化关系

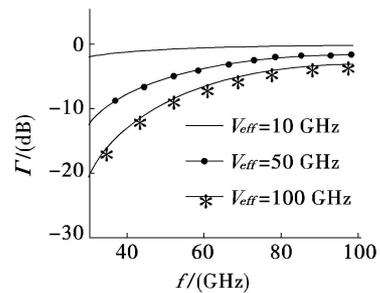


图 4 不同电子碰撞频率时反射率随入射波频率的变化关系

(3) 等离子体厚度为  $d = 0.1$  m, 等离子体密度为  $N_e = 1.0 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ , 电子碰撞频率为  $\nu_{eff} = 50$  GHz, 外加磁场分别为  $B = 0.1$ 、 $0.2$ 、 $0.3$  T. 图 5、图 6 反映了不同磁场强度情况下衰减随入射波频率的变化.

图 5、图 6 显示外加均匀磁场强度越小, 衰减越小, 反射率越大. 而且随着入射波频率的增大, 衰减逐渐减小, 反射率逐渐增大. 但是不同的外加磁场强度引起的衰减量和反射率差别很小.

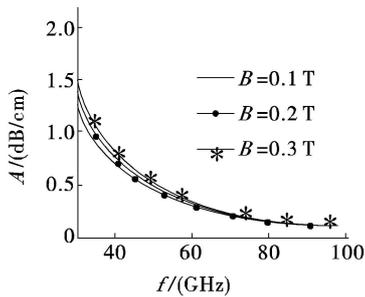


图5 不同磁场强度时衰减随入射波频率的变化关系

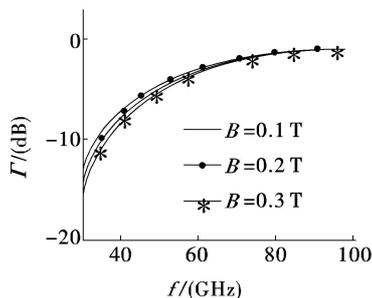


图6 不同磁场强度时反射率随入射波频率的变化关系

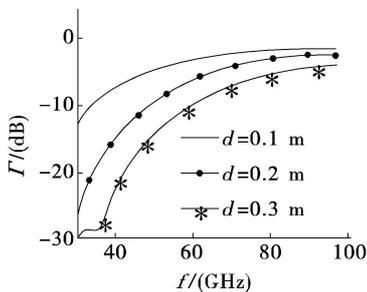


图7 不同等离子体厚度时衰减随入射波频率的变化关系

(4) 等离子体密度为  $N_e = 1.0 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ , 电子碰撞频率为  $\nu_{eff} = 50 \text{ GHz}$ , 外加磁场为  $B = 0.1 \text{ T}$ , 等离子体厚度分别为  $d = 0.1, 0.2, 0.3 \text{ m}$ . 由于厚度对衰减 ( $\text{dB}/\text{cm}$ ) 没有影响 (如果不是计算每厘米的

衰减, 厚度就会有影响), 这里仅给出反射率的变化示意图 (如图7所示).

图7显示等离子体厚度越小, 反射率越小. 而且随着入射波频率的增大, 反射率呈逐渐增大的趋势.

### 3 结束语

金属板上覆盖等离子体后, 入射电磁波从空气入射到等离子体, 最后经过金属板的反射又从等离子体出射到空气层中. 从仿真计算结果来看, 电磁波的衰减以及等离子体表面反射率的大小与等离子体的离子密度、碰撞频率、外加磁场强度、等离子体厚度以及入射波频率的变化都有关系. 而且在入射波频率过高的情况下, 等离子体的反射趋于全反射. 这将意味着等离子体对电磁波的传播没有任何效应, 对金属板起不到任何减缩雷达散射截面的作用. 因此下一步研究高频段电磁波在等离子体中的传播有非常重要的意义.

### 参考文献

- [1] 吴琼. 等离子体覆盖目标的电磁散射特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006.
- [2] 郭斌. 高频电磁波在大气等离子体层中的传播和吸收的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- [3] 曾福华, 刘正东. 等离子体吸收隐身技术的吸收功率数值模拟[J]. 南昌: 南昌大学学报(理科版), 2008, 32(2): 183-185.
- [4] 鄂扬. 等离子体对电磁波吸收效应的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2003.
- [5] Klement Dieter, Preissner Jürgen, Volker Stein. Special Problems in Applying the Physical Optics Method for Backscatter Computations of Complicated Objects[J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 1988, 36(2): 228-237.

(上接第6页)

- [2] 姚连兴, 仇维礼, 王福恒. 目标和环境的光学特性[M]. 北京: 宇航出版社, 1995.
- [3] 宣益民, 韩玉阁. 地面目标与背景的红外特征[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.

- [4] 舒锐, 周彦平, 陶乾宇, 等. 空间目标红外辐射特性的研究[J]. 光学技术, 2006, 32(2): 196-199.
- [5] R 西格尔, J R 豪厄尔. 热辐射传热[M]. 曹玉璋. 北京: 科学出版社, 1990.
- [6] 刘景生. 红外物理[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995.