

电磁波在大气层人造等离子体中的衰减特性

刘明海 胡希伟 江中和 刘克富 辜承林 潘 垣

(华中科技大学电气与电子工程学院, 武汉 430074)

(2001 年 3 月 23 日收到, 2001 年 9 月 27 日收到修改稿)

利用洛伦兹模型来研究大气层人造非均匀等离子体的电磁响应特性, 讨论了电磁波频率、等离子体密度及电子碰撞频率对电磁波衰减特性的影响. 结果表明, 电磁波在长波长区域及等离子体密度大时, 其能量衰减越快. 当等离子体密度高时, 电子温度越低, 大气层高度越高, 电磁波的能量衰减越快.

关键词: 电磁波, 大气等离子体, 能量衰减

PACC: 5225, 5240, 5265

1. 引 言

大气压等离子体已成为低温等离子体应用领域中的一个重要分支, 由于无需真空系统, 可直接在高大气压或大气压条件下产生高密度大体积等离子体, 所以在材料制备、表面处理及环境工程等领域有着广泛的应用前景^[1-3]. 近年来, 人们对开展低空大气层人造等离子体薄层的应用研究产生了浓厚的兴趣, 主要是因为不同位形分布的等离子体对外来电磁波有不同的响应特性, 它既可用于来反射地面电磁波, 也可用于吸收外来电磁波, 因此对开发近地面飞行器的电磁屏蔽技术有广阔的应用前景. 正因如此, 欧美等发达国家对电磁波在大气层人造等离子体中传播特性的理论与实验方面相继进行了大量的研究^[4-6], 而我国在这方面的的工作尚处于起步阶段^[7]. 本文利用洛伦兹模型, 来研究大气层人造等离子体的电磁响应特性, 并讨论等离子体密度、电子-中性气体碰撞频率及入射波频率对电磁波在大气层人造等离子体中的衰减特性的影响.

2. 物理模型

我们研究的近低空大气层的高度在 4—20km, 对应大气压强是 66661—6666.1Pa^[8], 中性气体密度是 1.6×10^{25} — $1.6 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$. 人工产生的等离子体密度在 10^{16} 至 10^{19} m^{-3} 之间, 由于电子质量远远小于离子质量, 因此只需考虑电子对电磁波的响应, 则运动方程为

$$m_e m_e \frac{\partial \mathbf{v}_e}{\partial t} = -en_e \mathbf{E} - n_e m_e \mathbf{v}_e \nu. \quad (1)$$

描写电磁波传播的麦克斯韦方程为

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu_0 \mathbf{j}. \quad (3)$$

由(1)式得

$$n_e m_e i\omega \mathbf{v}_e = -en_e \mathbf{E} - n_e m_e \mathbf{v}_e \nu, \\ \mathbf{j} = -en_e \mathbf{v}_e = \frac{e^2 n_e}{m_e(i\omega + \nu)} \mathbf{E}.$$

由(2)式得

$$-\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{B}) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \mu_0 \frac{\partial \mathbf{j}}{\partial t},$$

则有

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \{1 - \omega_p^2 [1 - i\nu/\omega]\},$$

其中 $\omega_p = 5.641 \times 10^4 n_e^{0.5}$, $\omega = 2\pi f$ 分别为等离子体频率和电磁波频率, $\nu = n_0 \nu_e \sigma$ 为电子与中性气体的碰撞频率, ν_e 为电子热运动速度, σ 为电子-中性气体的碰撞截面, n_0 为中性气体密度, 与大气层的高度相关, 大气层高度越高, 碰撞频率越低. k 为波数, 在耗散介质中, $k = \beta - i\alpha$, 电磁波在等离子体中的波动方程为

$$E = E_0 e^{i(\omega t - kx)} = E_0 e^{\alpha x} e^{i(\omega t - \beta x)},$$

传播功率为

$$P = P_0 e^{2\alpha x},$$

定义衰减系数为^[9]

$$att(\text{dB/cm}) = 10 \times \log\left(\frac{P}{P_0}\right) = 20 \times \log(e) \alpha = 8.684\alpha.$$

对于电磁波在不均匀等离子体中的传播,可以进行分层处理.

3. 数值结果

选图 1 所示的电磁散射模型,考虑电磁波正入

射在有效厚度 x_0 等离子体密度逐渐变化的等离子体层中的散射特性.考虑应用的实际情况,在图 1 (a)中,假定分布函数为 $n_e = n_{e0} f(x, x_0)$ 其中 n_{e0} 为接近金属衬底表面的等离子体密度.计算时把 x_0 分为很多层,每层 n_e 的正增量保持恒定.图 1(b)是等离子体均匀情况,通常称为锐边界情形.

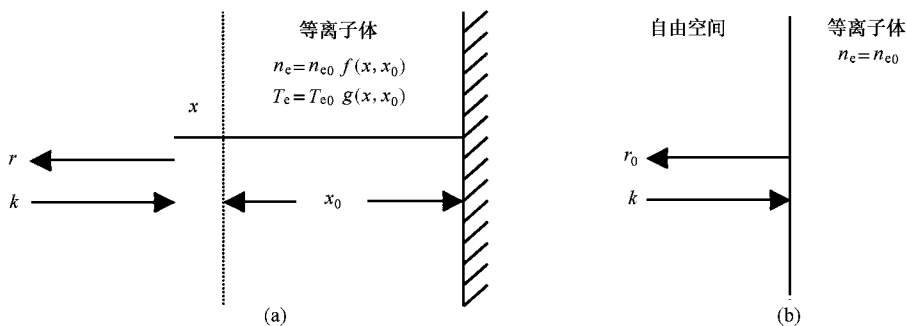
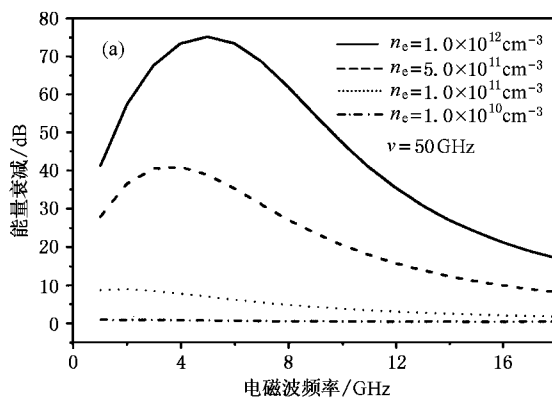


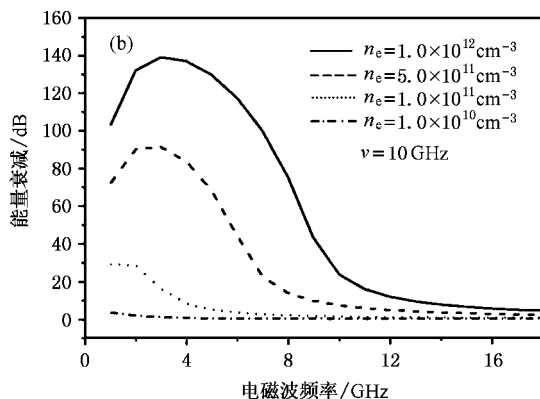
图 1 等离子体为不均匀(a)和均匀(b)分布的电磁散射模型

图 2(a)(b)是电磁波在不同等离子体密度传播 0.1m 时,其能量衰减随其频率的变化.无论电子碰撞频率大小,在低频段,电磁波能量衰减随其频率的增大而增加,而在高频段,则随其频率的增大而减小.对于不同等离子体密度,电磁波能量衰减最大值所对应的电磁频率(峰值频率)随等离子体密度的增大而增加.比较两图可知,当碰撞频率高时,对于小于等离子体频率的电磁波,等离子体对其仍有明显的衰减作用.例如,当等离子体密度为 $n_e = 5.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 时,等离子体频率为 6.347GHz,对于小于该频率的电磁波仍有明显的吸收.在低碰撞频率时,对于小于等离子体频率的电磁波,等离子体对其有强烈的衰减作用,而对于高于等离子体频率的电磁波,等离子体对其表现为高通性(衰减很小).此外,对于给定的电磁频率和碰撞频率,雷达波能量衰减随等离子体密度的增加而增大.密度低于一定值,等离子体对电磁波无衰减作用.

对实际人造的等离子体,其等离子体密度和电子温度是不均匀分布的,假定它们的分布分别为 $n_e = A \exp(-B(x/d)^2)$, $T_e = A_0 \exp(-B_0 x/d)$, 其中 A 和 A_0 为最外层空间的等离子体密度和电子温度, d 为等离子体厚度, $B = \log(n_{e0}/A)$, $B_0 = \log(T_{e0}/A_0)$, n_{e0} 和 T_{e0} 分别为等离子体密度和电子温度的最大值.在实际计算中, A 可取为对电磁波有阻尼效果所对应的等离子体密度最小值,电磁波频段 $f = 1\text{--}18\text{GHz}$ 因此 $A = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, 选取 $T_{e0} = 5.0\text{eV}$, $A_0 =$



(a) $\nu = 50\text{GHz}$



(b) $\nu = 10\text{GHz}$

图 2 均匀分布时不同等离子体密度值中的电磁波能量衰减随其频率的变化

2.0eV, $d = 0.1\text{m}$, 计算结果如图 3(a)所示. 可以看出, 电磁波能量衰减随等离子体密度的增大而增加; 无论等离子体密度大小, 在低频段, 电磁波能量衰减随其频率的增大而增加, 而在高频段, 则随其频率的增大而减小.

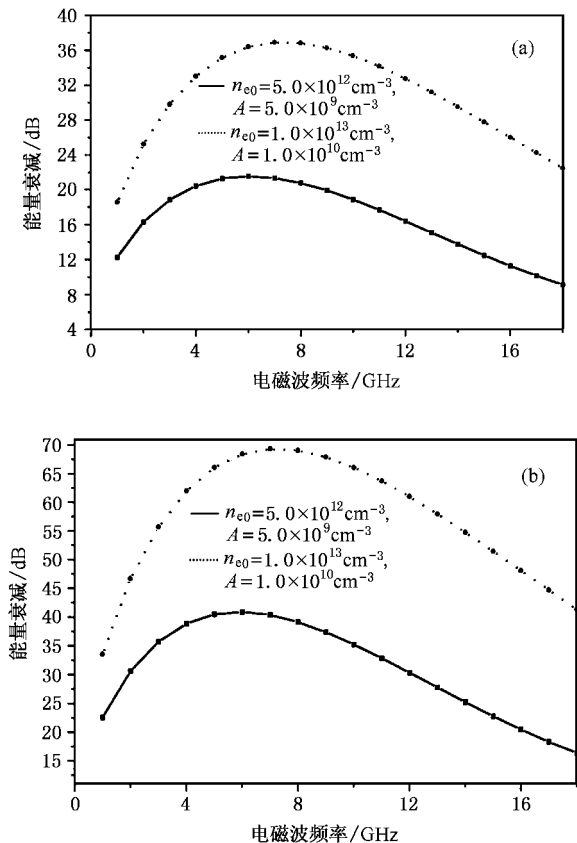


图 3 不同等离子体密度时电磁波能量衰减随其频率的变化

为了研究电磁波在不同等离子体位形分布中的衰减特性, 将图 3(a)中的等离子体密度和电子温度分布函数调换, 即

$$n_e = A \exp(Bx/d), T_e = A_0 \exp(B_0(x/d)^2),$$

计算结果如图 3(b)所示. 与图 3(a)比较可以看出, 电磁波能量衰减随其频率的变化在定性上没有差别, 但其值增大了一倍.

图 4(a)是在两种不同大气层高度, 即不同电子碰撞频率时, 电磁波能量衰减随其频率的变化. 此时等离子体密度和电子温度分布函数分别为 $n_e = A \exp(Bx/d)$, $T_e = A_0 \exp(B_0 x/d)$, $n_{e0} = 1.0 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$, 其他条件同图 3(b). 可见, 电磁波能量衰减随大气层高度的降低而迅速减小.

为了研究电子温度对电磁波能量衰减的影响, 选取 $T_{e0} = 2.5\text{eV}$, $A_0 = 0.50\text{eV}$, 其他条件同图 4(a).

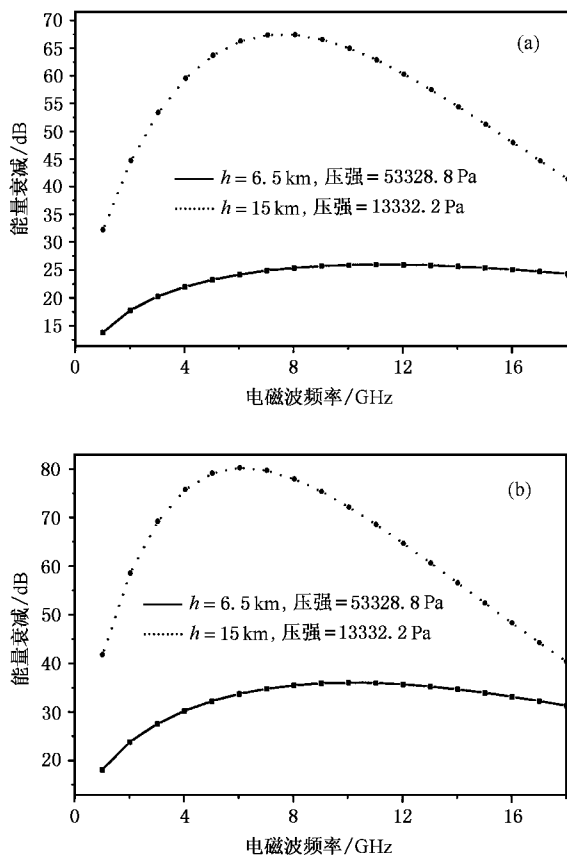


图 4 不同大气层高度时电磁波能量衰减随其频率的变化 ($n_{e0} = 1.0 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$)

计算结果如图 4(b)所示. 通过比较可以看出, 电子温度越低, 电磁波能量衰减越大. 此外, 当大气层高度低时, 在比较宽的频带内, 电磁波能量均保持有一定的衰减.

通过比较图 3(b)、图 4(a)、图 4(b)的结果(图中虚线部分)可知, 在等离子体密度分布相同情况下, 电子温度分布函数的变化对电磁波能量的衰减无明显影响, 只有当电子温度的大小改变时, 才有一定的影响, 而且电子温度值越低, 越有利于电磁波的能量衰减.

4. 结 论

大气层人造等离子体中电子与中性气体的碰撞频率非常高, 与低气压情形相比, 电磁波与其相互作用呈现许多新颖特性. 电磁波在等离子体中的能量衰减与电磁波频率, 等离子体密度及其分布、电子温度及大气层高度密切相关. 总体来讲, 电磁波在长波长区域及等离子体密度大时, 其能量衰减越快. 具体

而言,等离子体密度越大,能量衰减越快.对于一定位形分布的等离子体,高空大气层时,更有利于低频段电磁波的能量衰减;当等离子体密度高及电子温

度较低时,即使大气层高度较低,在较宽的频带内,电磁波均有较好的能量衰减.

-
- [1] Czernichowski A 1994 *Pure. & Chem.* **66** 1301
 [2] Richard F, Cormier J M *et al* 1996 *J. Appl. Phys.* **79** 2245
 [3] Lin L and Wu C K 1997 *ISPC-13, China.* **VII** 807-812
 [4] Vidmar R J 1991 *IEEE Trans on Plasma Sci.* **18** 733
 [5] Laroussi M 1995 *Int. J. Infrared and Millimeter Waves* **16** 2069
 [6] Koretzky E and Kuo S P 1998 *Phys. Plasmas* **5** 3774
 [7] Liu M H, Hu X W *et al* 2001 *Chin. Phys. Lett.* **18** 1225
 [8] Roth J R 1998 *Industrial Plasma Engineering 1* (Science Press, Beijing) (in Chinese) Roth J R 1998 工业等离子体,第一卷(北京:科学出版社)
 [9] Ran Y Z 1998 *Radar Section & Stealth Technology* (in Chinese) 阮颖铮 1998 电磁截面与隐身技术(北京:国防工业出版社)

Property of electromagnetic wave attenuation in the artificial plasmas of atmosphere

Liu Ming-Hai Hu Xi-Wei Jiang Zhong-He Liu Ke-Fu Gu Cheng-Lin Pan Yuan

(*Institute of Electric and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

(Received 23 March 2001 ; revised manuscript received 27 September 2001)

Abstract

The electromagnetic property of the artificial plasmas of atmosphere was investigated with the Lorentz model. The effects of the frequency of electromagnetic wave, plasma density, and the electron-neutral collision frequency on the attenuation of electromagnetic wave were discussed. Numerical results indicate that the wave attenuation is stronger at the region of the longer wavelength and the higher plasma density. For the high plasma density, the wave attenuation is stronger at the lower electron temperature and the higher altitude of atmosphere.

Keywords : electromagnetic wave, atmosphere pressure plasmas, energy attenuation

PACC : 5225, 5240, 5265