

不均匀等离子体对超高频微波吸收特点的研究

许玉琪, 王琦, 吴成国*, 吴海涛, 蔡宏宇, 李霞

陆军工程大学, 江苏 南京

Email: *wcg68288@sina.com

收稿日期: 2020年8月20日; 录用日期: 2020年9月9日; 发布日期: 2020年9月16日

摘要

在构建等离子体与电磁波相互作用的几何模型基础上, 利用WKB近似方法得出了吸收衰减公式。结合Matlab数值模拟, 讨论了不同入射角超高频微波与等离子体碰撞频率、等离子体峰值密度之间的相互影响和作用机理。通过计算结果发现, 当等离子体分布呈抛物线分布时, 对入射超高频微波的吸收效果最好。

关键词

电磁波, 非磁化等离子体, 衰减, 隐身

Study on the Absorption Characteristics of Ultra-High Frequency Microwave by Inhomogeneous Plasma

Yuqi Xu, Qi Wang, Chengguo Wu*, Haitao Wu, Hongyu Cai, Xia Li

Army Engineering University of PLA, Nanjing Jiangsu

Email: *wcg68288@sina.com

Received: Aug. 20th, 2020; accepted: Sep. 9th, 2020; published: Sep. 16th, 2020

Abstract

Based on the geometric model of the interaction between plasma and electromagnetic wave, the absorption attenuation formula is obtained by using the WKB approximation method. The interaction and mechanism of interaction between electromagnetic waves and plasma collision fre-

*通讯作者。

quency and plasma peak density at different incident angles are discussed. The result illustrates that the wave attenuation is stronger when the plasma density presents a parabolic distribution.

Keywords

Electromagnetic Waves, Non-Uniform Unmagnetized Plasma, Attenuation, Stealth

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

隐身能力已经成为衡量现代军事飞行器性能的重要指标之一，等离子体被称为物质第四态，由于在电磁方面具有特殊的物理性质，成为了隐身材料研究中热门的课题。目前，等离子体对电磁波的隐身性能的研究主要有三个方面：折射隐身、吸收隐身和反射隐身。

文献[1]详细讨论了电磁波在不同折射率时等离子体的折射隐身规律，利用费马原理和变分法给出了不同折射率时等离子体中的电波轨迹，文献[2]讨论了电磁波在等离子体中吸收隐身规律。当电磁波在等离子体中传播时，相当大部分的能量将被等离子体吸收，其机理是电磁波的电场使等离子体中电子加速获得动量，相互之间产生电磁振荡和粒子的有效碰撞，成而使电磁波的能量发生衰减，这就是所谓的碰撞吸收。由于碰撞吸收可以使电磁波的能量产生较多的衰减，因此吸收隐身成为了研究的重点。文献[3] [4]从等离子体对电磁波碰撞吸收的角度讨论了当等离子体密度呈线性和指数分布时，等离子体对电磁波衰减的影响。文献[5] [6] [7]讨论了等离子体密度呈抛物线分布时，讨论了电磁波在等离子体中衰减与等离子体碰撞频率、电磁波频率、等离子体最大密度、电磁波入射角等的关系。然而在实验室中产生的等离子体的电子密度常取 Epstein 分布，文献[2]虽然讨论了等离子体密度呈 Epstein 分布时电磁波与等离子体之间的相互作用，但是作者从反射角度讨论了电磁波在等离子体中的传播特性，而且理论基础也比较简单，因此有必要从吸收角度在理论上进行深入探讨其微观作用机理，同时对这三种等离子体密度分布衰减进行分析比较，为未来实际应用提供参考。

WKB 是一种普遍采用计算束缚态能量和势垒穿透率的近似计算方法。在研究电磁波在非均匀等离子体中传播碰撞吸收特性时，可将等离子体的介电常数看成随着电磁波的波长变化，同时忽略在传播过程中的耦合效应。本文首先将具有一定厚度的等离子体看成密度分布是不均匀的，然后将其构建为不均匀分布的等离子体层，利用 Matlab 进行编程和数值模拟，计算了三种不同类型等离子体密度分布对电磁波碰撞吸收衰减的影响，并且对相关结果进行了分析比较。

2. 模型建立和波动方程求解[5] [6] [7]

图 1 给出了等离子体与电磁波相互作用的几何模型。金属目标物表面被包裹着一层厚度为 r_0 的非磁性不均匀等离子体。将等离子体看作是平面分层各向同性介质。沿着 z 轴方向，等离子体呈不均匀分布，而在垂直于 z 轴即在 xy 平面内分布是均匀的。

当等离子体内部收到外部扰动时，等离子体将产生集体振荡，相应的振荡频率称为等离子体频率 ω_p ，它表征等离子体物性的重要参数之一。其表达式为

$$\omega_p = \sqrt{n_e e^2 / \varepsilon_0 m_e} \quad (1)$$

式中 e 为电子的电荷量, ϵ_0 为真空介电常数, m_e 为电子质量。

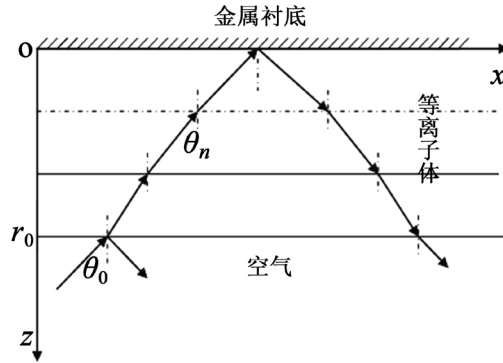


Figure 1. Diagram of electromagnetic wave propagation in metal substrate plasma
图 1. 电磁波在金属衬底等离子体中传播示意图

一般来说, 电子和中性分子的碰撞频率 ν 是电子密度 n_e 和温度 T 的函数, 实际应用中通常取经验值, 用 ν_e 表示。当考虑碰撞时, 非磁化等离子体的介电常数 ϵ 可表示为

$$\epsilon = \epsilon_r + i\epsilon_i = \epsilon_0 \left(1 - \omega_p^2 / (\omega^2 + \nu_e^2) + i(\nu_e / \omega) \omega_p^2 / (\omega^2 + \nu_e^2) \right) \quad (2)$$

在耗散介质中, 波数 $k = k_r + ik_i$ 为复数, 实部 k_r 表现了波在传播过程中的相位延迟, 虚部 k_i 表现了波在传播过程中的幅度衰减, 结合 $k^2 = \omega^2 \mu \epsilon$ 以及式(2)得到

$$k_r = \omega(\mu/2)^{1/2} \left[\epsilon_r + (\epsilon_r^2 + \epsilon_i^2)^{1/2} \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$k_i = \omega(\mu/2)^{1/2} \left[-\epsilon_r + (\epsilon_r^2 + \epsilon_i^2)^{1/2} \right]^{1/2} \quad (4)$$

可看出, 耗散介质中波数 k 为入射电磁波频率 ω 和等离子体密度 n_e 的函数。

根据模型仅考虑垂直入射面线性极化的平面波, 则电场 E 仅在 y 轴方向有分量。此时波动方程可表示为:

$$\frac{d^2 E_y}{dz^2} + Q^2(z) E_y = 0 \quad (5)$$

式中: $Q^2(z) = k^2(z) - \frac{\omega^2}{c^2} \sin^2 \theta_n$ (6)

根据菲涅尔定律: $1 \cdot \sin \theta_i = n_n \sin \theta_n$ (7)

其中 n_n 、 θ_n 和 θ_i 表示第 n 层等离子体的折射率、入射角和透射角。

根据方程(6)、(7)解方程(5), 解得斜入射情况下的 WKB 近似解为

$$E_y = E_0 \exp \left[\mp i \int_0^{r_0} \sqrt{\left(k^2(z) - \frac{\omega^2}{c^2} \sin^2 \theta_n \right)} dz \right] \quad (8)$$

“-”代表正向波, “+”代表反向波。WKB 有效条件为

$$\frac{1}{k_0^2} \left| \frac{3}{4} \left(\frac{1}{Q^2} \frac{dQ}{dz} \right)^2 - \frac{1}{2} \frac{1}{Q^3} \frac{d^2 Q}{dz^2} \right| \ll 1 \quad (9)$$

出射到空气中的电磁波电场强度可以由式(8)得出

$$E = E_0 \exp \left[-2i \int_0^{r_0} \sqrt{k^2(z) - \frac{\omega^2}{c^2} \sin^2 \theta_n} dz \right] \quad (10)$$

当电磁波从 $z = r_0$ 处以入射角 θ_n 传播到等离子体内部并在等离子体表面即 $z = 0$ 处被反射回来, 当电磁波再次传播到等离子体的表面时其能量可表示为

$$P(r_0) = P_0 \exp \left[-4 \operatorname{Im} \left(\int_0^{r_0} \sqrt{k^2(z) - \frac{\omega^2}{c^2} \sin^2 \theta_n} dz \right) \right] \quad (11)$$

这里 P_0 是电磁波入射时 $z = r_0$ 处的能量。

电磁波的双程衰减为

$$Att = \left| 10 \lg \frac{P(r_0)}{P_0} \right| = \left| 17.37 \operatorname{Im} \left(\int_0^{r_0} \sqrt{k^2(z) - \frac{\omega^2}{c^2} \sin^2 \theta_n} dz \right) \right| \quad (12)$$

c 为真空中光速。

3. 计算模拟与结果分析

根据以上理论分析可知, 等离子体隐身的效果与电磁波的频率具有密切的关系。因此, 为了更直观的揭示它们之间的相互作用机理, 本文从以下角度进行了分析和研究。首先我们将等离子体密度分别取以下三种分布:

线性分布: $n_e(z) = n_{e_0}(z/r_0)$ 。

抛物线分布: $n_e(z) = n_{e_0}(z/r_0)^{1/2}$ 。

Epstein 分布: $n_e = n_{e_0} \left[1 + \exp(-(z - r_0/2)/z_0) \right]^{-1}$ 。

计算中, 等离子体层厚度 $r_0 = 0.1 \text{ m}$, $z_0 = \frac{r_0}{4.0 \times \ln 10} \approx 0.0109$, n_{e_0} 为等离子体峰值密度, e 和 m_e 分别为单电子的电量和质量。

3.1. 电磁波入射频率对衰减的影响

图2揭示了垂直入射的电磁波在等离子体密度分别为线性、抛物线和 Epstein 分布时相互作用的特点。其中 n_{e_0} 取值 10^{11} m^{-3} , ν_e 取值 10^{11} Hz 。当入射波频率较小时, 等离子体对电磁波的吸收能力都较强。随着入射波的频率不断增大, 存在明显的最大吸收峰。随着入射波频率不断变大, 等离子体对电磁波的吸收在减弱。以上现象产生的原因可解释为, 当入射波的频率接近或等于等离子体振荡截止频率时, 等离子体和电磁波产生共振吸收效应, 从而对电磁波的吸收达到最大值; 当入射波频率小于或大于等离子体振荡截止频率时, 等离子体中的电子对电磁波的相应不同步, 等离子体内的电子极化现象较弱, 从而使等离子体中的电子对电磁波能量的吸收大大减弱。通过图2进一步看出, 当等离子体密度为抛物线分布时, 入射电磁波的衰减最为明显。

3.2. 等离子体电子碰撞频率对衰减的影响

将等离子体三种分布设定了相同的峰值密度 ($n_{e_0} = 10^{17} \text{ m}^{-3}$), 考虑垂直入射到非磁化等离子体中电磁波的碰撞吸收情况。图3反映了当碰撞频率较小时, 等离子体对电磁波的吸收频谱较窄, 随着等离子体振荡频率增大, 电磁波的吸收衰减系数增加, 等离子体吸收峰值向更低的频率移动, 电磁波的吸收频谱

范围增加, 当等离子体电子碰撞频率增大时, 等离子体对电磁波的吸收能力不增反减, 这表明对于一定的等离子体密度分布模型, 等离子体对电磁波的吸收能力存在一个最优化的电子碰撞频率, 在该碰撞频率下等离子体层对电磁波的吸收能力最强。通过对图 3 三种分布的类比可以知道, 当等离子体呈抛物线分布时, 等离子体对电磁波具有更好的吸收效果。

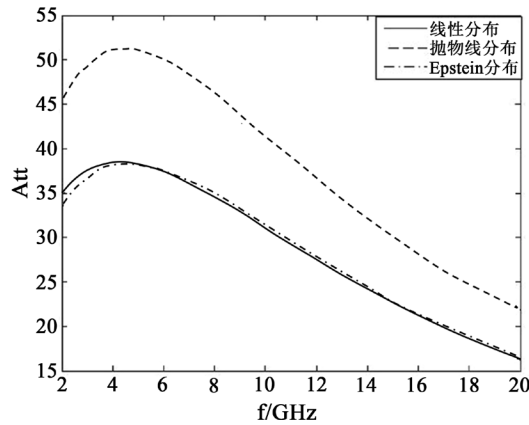


Figure 2. The influence of electromagnetic wave incident frequency on attenuation
图 2. 电磁波入射频率对衰减的影响

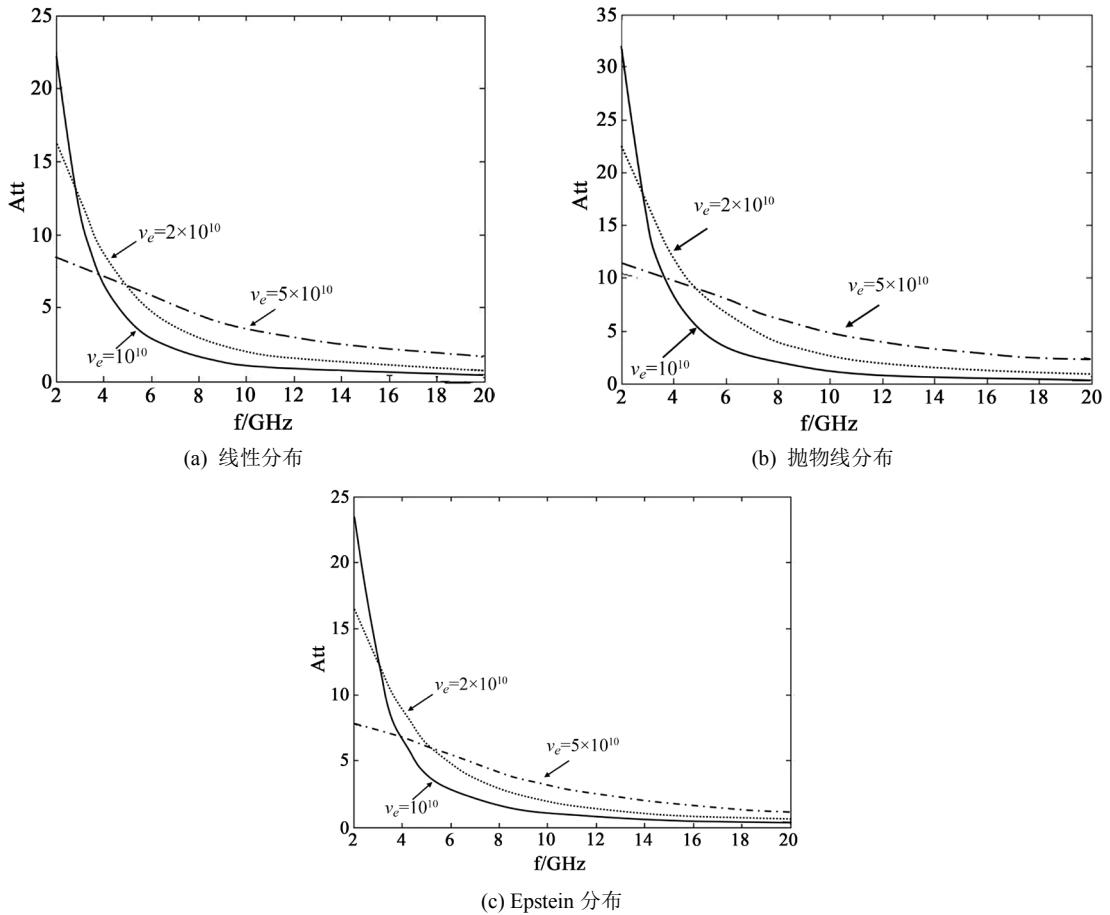


Figure 3. The relationship between electromagnetic wave attenuation and electromagnetic wave frequency
图 3. 电磁波的衰减与电磁波频率的关系

3.3. 等离子体峰值密度对衰减的影响

将线性分布、抛物线分布和 Epstein 分布设定了相同的碰撞频率($\nu_e = 10^{10}$ Hz), 考虑垂直入射到非磁化等离子体中电磁波的碰撞吸收情况。

图 4 揭示了当入射到等离子体层中的电磁波频率较低和等离子体峰值密度越大时, 电磁波在等离子体层中衰减越明显。同时可以发现, 当等离子体峰值密度较高时, 对电磁波的吸收衰减越强, 吸收频谱也越宽。从图 4 三种分布数值模拟的结果可知, 抛物线分布等离子体层比另外两种分布的吸收效果更好。

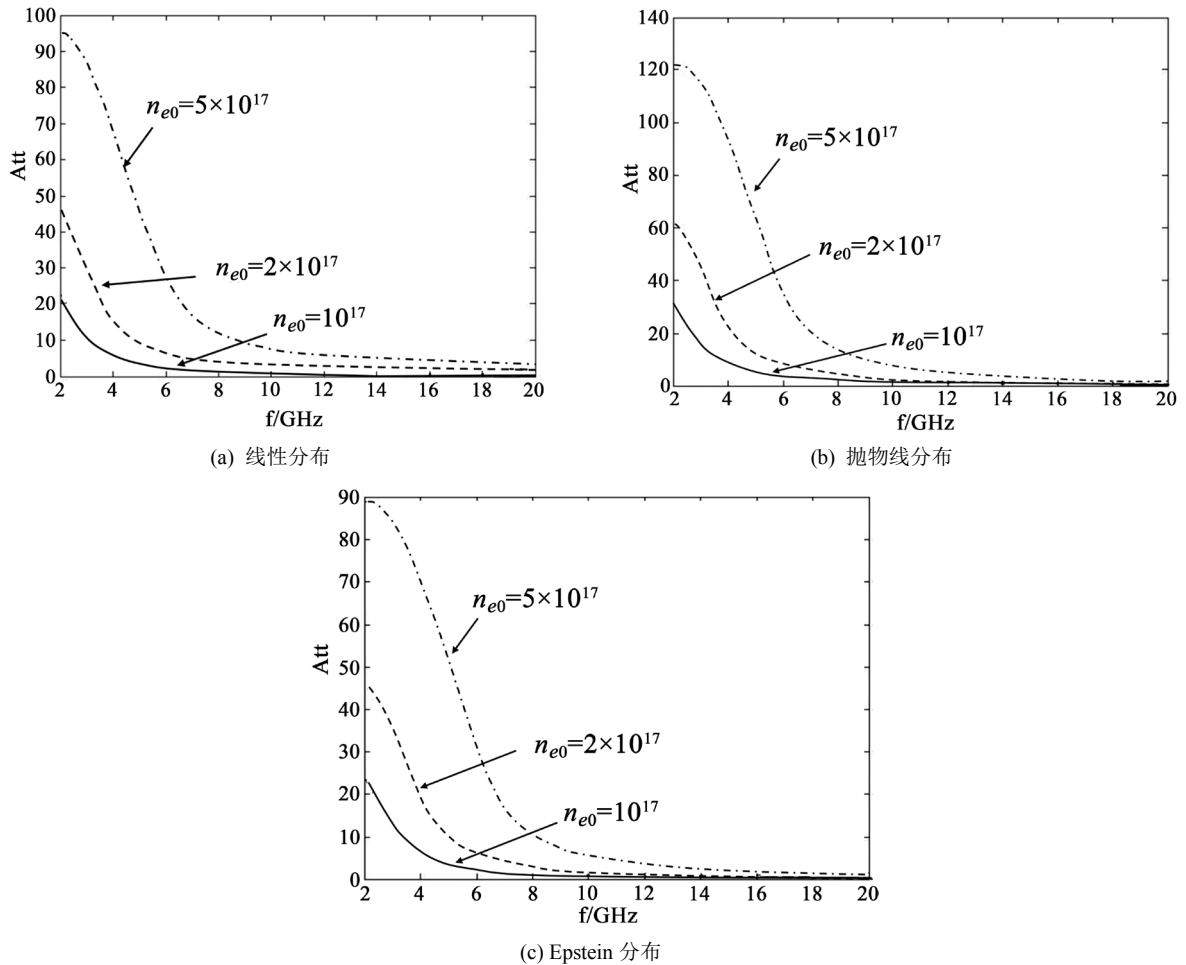


Figure 4. The relationship between attenuation and incident wave frequency at different plasma densities

图 4. 等离子体密度不同时, 衰减随入射波频率的变化关系

3.4. 入射角度对衰减的影响

将线性分布、抛物线分布和 Epstein 分布设定了相同的峰值密度 $n_{e0} = 10^{17} \text{ m}^{-3}$ 、碰撞频率 $\nu_e = 10^{10}$ Hz, 考虑斜入射到非磁化等离子体中电磁波的碰撞吸收情况。从图 5 中可以看出, 当电磁波的入射角增大, 等离子体对电磁波的衰减能力随电磁波频率的变化趋势是一致的。当电磁波的入射角度较小时, 电磁波在等离子体中传播的距离也相对较短, 因此其衰减程度也越缓慢。当等离子体密度呈抛物线分布时, 等离子体对电磁波具有更好的吸收效果。

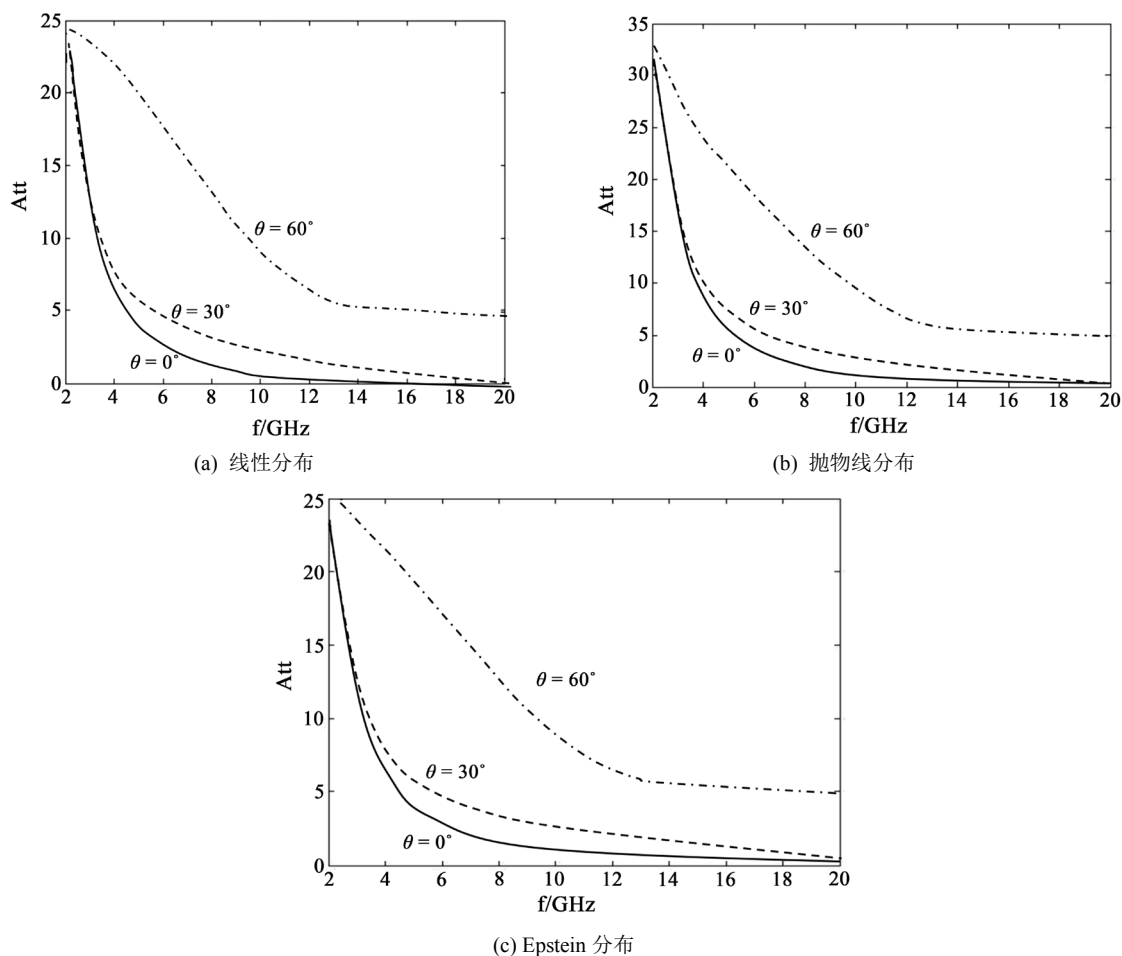


Figure 5. The relationship between electromagnetic wave attenuation and electromagnetic wave frequency at different incident angles

图 5. 入射角度不同时, 电磁波的衰减与电磁波频率的关系

4. 结论

在构建等离子体与电磁波相互作用的几何模型基础上, 利用 WKB 近似方法进行了理论推导, 得出了电磁波在非磁性不均匀等离子体中传播时的双程吸收衰减和其他参数之间的联系, 利用 Matlab 软件进行了数值模拟。研究发现, 如果调整等离子体的峰值密度, 当入射电磁波的频率较小时, 等离子体峰值密度越大, 等离子体对电磁波的衰减能力越强; 当等离子体的碰撞频率取较低的值时, 对电磁波的吸收频谱将变窄, 当等离子体电子碰撞频率数值增加时, 对电磁波的吸收衰减也增加; 当电磁波的入射角度不同时, 电磁波入射角度越小, 衰减越慢。通过以上分析可知, 无论是改变等离子体峰值密度、等离子体碰撞频率, 还是改变电磁波的入射角, 三种分布中, 等离子体呈抛物线分布时, 等离子体对电磁波具有更好的吸收效果。这主要是因为等离子体对电磁波的吸收衰减能力取决于边缘电子密度大小和电子密度梯度之间的关系, 当等离子体的边缘密度缓慢增加而不是陡增时, 使更多电磁波容易进入等离子层参与了衰减, 因此等离子体对电磁波的吸收衰减能力增强。

基金项目

陆军工程大学基础学科培育基金重点项目。

参考文献

- [1] 李慧, 刘江凡, 焦子涵, 等. 磁化分层等离子体中电磁波传播特性研究[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(11): 80-85.
- [2] 陈伟, 郭立新, 李江挺, 等. 时空非均匀等离子体鞘套中太赫兹波的传播特性[J]. 物理学报, 2017, 66(8): 70-76.
- [3] 林敏, 徐浩军, 魏小龙, 等. 电磁波在非磁化等离子体中衰减效应的实验研究[J]. 物理学报, 2015, 64(5): 313-319.
- [4] 薄勇, 赵青, 罗先刚, 等. 电磁波在非均匀磁化的等离子体鞘套中传输特性研究[J]. 物理学报, 2016, 65(3): 167-176.
- [5] 孟令辉, 任洪波, 刘建晓. 高温等离子体中太赫兹波的传输特性[J]. 物理学报, 2018, 67(17): 70-75.
- [6] 孙行, 陈郑珊, 蔡红华, 聂万胜, 石天一. 电磁波在固体火箭尾焰中的折射轨迹研究[J/OL]. 兵器装备工程报: 1-8. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1213.TJ.20190601.1104.004.html>, 2019-08-01.
- [7] Guo, L., Chen, W., Li, J., *et al.* (2018) Scattering Characteristics of Electromagnetic Waves in Time and Space Inhomogeneous Weakly Ionized Dusty Plasma Sheath. *Physics of Plasmas*, **25**, Article ID: 053707. <https://doi.org/10.1063/1.5020628>