

太赫兹波在飞行器等离子体鞘套中的传输特性*

耿兴宁^{1,2}, 徐德刚^{1,2}, 李吉宁^{1,2}, 陈 锴^{1,2}, 钟 凯^{1,2}, 姚建铨^{1,2}

(1. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072; 2. 天津大学 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 针对临近空间飞行器的黑障问题, 根据模拟的 RAM C-III 飞行器周围的流场分布结果, 计算了等离子体电子密度和碰撞频率, 并根据其分布建立了非均匀的等离子体模型。在此基础上, 利用散射矩阵方法分析了太赫兹波在等离子体中的传输特性随着等离子体密度、等离子体厚度、等离子体碰撞频率的变化以及外加磁场对传输特性的影响。结果表明, 太赫兹波的传输损耗随着等离子体电子密度和等离子体厚度的增加而增加, 而碰撞频率的增加会使得透射率先减小后增加。在外加磁场的作用下, 左旋太赫兹波的传输特性会得到改善; 而对于右旋太赫兹波, 磁场的施加会引入吸收峰, 并且随着磁感应强度的增加向高频方向移动。

关键词: 太赫兹波; 等离子体鞘套; 散射矩阵方法; 传输特性; 外加磁场

中图分类号: TN29

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190291

Propagation characteristics of terahertz wave in plasma sheath around air vehicle

Geng Xingning^{1,2}, Xu Degang^{1,2}, Li Ji'ning^{1,2}, Chen Kai^{1,2}, Zhong Kai^{1,2}, Yao Jianquan^{1,2}

(1. School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Optoelectronics Information Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In this paper, the plasma electron density and collision frequency are calculated based on the flow field simulation of RAM C-III air vehicle, and an inhomogeneous plasma model is established according to the calculation results. The effects of plasma density, plasma thickness, plasma collision frequency and external magnetic field on the propagation characteristics of terahertz wave in plasma are analyzed using scattering matrix method. The results show that the propagation loss increases with plasma electron density and plasma thickness, while the transmittance decreases first and then increases with the increasing of collision frequency. When an external magnetic field is applied, the propagation characteristics of the left-handed polarized terahertz wave will be improved, while for the right-handed polarized terahertz wave, the application of magnetic field induces an absorption peak, which shifts to high frequency range with the increasing of magnetic induction intensity. This work may make a contribution to solving the problem of communication blackout.

Key words: terahertz wave; plasma sheath; scattering matrix method; propagation characteristics; external magnetic field

超高速飞行器在进入临近空间后, 在与大气的强烈作用下, 使大气发生电离, 从而产生包覆在飞行器外部的等离子体鞘套。这将引起通信信号的失真, 严重时会使其中断, 这就是著名的“黑障”问题^[1-2]。随着航空航天事业的发展, 这一问题的解决愈加紧要。研究表明, 太赫兹波能在黑障中传播, 这为解决这一问题提供了一种方法^[3]。太赫兹波主要指的是频率范围在 0.1~10 THz 的电磁波, 介于毫米波与红外线之间, 具有瞬时性、低能性、穿透性、指纹谱性等特点。近年来, 随着太赫兹产生和检测技术的发展, 人们对太赫兹波段有了更深入的认识, 太赫兹技术也在越来越多的领域有了更广泛的应用^[4-8], 而太赫兹波在等离子体中的传输特性也逐渐得到更多的关注。郑灵等人^[9] 计算了频率在 0.1~1 THz 波段的太赫兹波在均匀非磁化等离子体中的传播特性, 并进行了 0.22 THz 太赫兹波在等离子体中的传输实验, 实验和理论符合较好。蒋金等人^[10] 根据 NASA 的 RAM C-III 飞行数据, 建立两个非均匀等离子体模型, 研究了太赫兹波在非均匀非磁化等离子体中的传播特性, 说明太赫兹波有利于解决黑障问题。周天翔等人^[11]

* 收稿日期: 2019-08-11; 修订日期: 2019-11-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61705162); 装备预研基金重点项目 (6140415010202)

作者简介: 耿兴宁 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事太赫兹波与等离子体方向研究; gengxingning@tju.edu.cn。

通信作者: 李吉宁 (1984—), 男, 博士, 讲师, 主要从事太赫兹技术与太赫兹器件方向研究; jiningli@tju.edu.cn。

研究了 0.1~1 THz 波段的太赫兹波在均匀磁化等离子体中的传播特性,说明外加磁场能有效减小太赫兹波的衰减,在固定磁场下,衰减达到了 5 dB 以下。马平等^[12]对比毫米波和太赫兹波在等离子体中的传输特性,并采用辅助差分方程的时域有限差分方法进行数值模拟,说明太赫兹波在等离子体中传播的衰减比微波小很多,穿透能力更强。Tian 等人^[13]通过计算太赫兹波在碰撞频率为非均匀的等离子体中的传输特性,发现非均匀的碰撞频率可以加速吸收谱的下降,并且碰撞频率的峰值及分布会改变吸收峰的高度。Guo 等人^[14]利用散射矩阵的方法,比较太赫兹波在三种不同分布情况的非均匀等离子体中的传输特性,发现等离子体的分层和变化率对于吸收的影响最大。

研究等离子体鞘套中太赫兹波的传播有十分重要的意义,但之前的研究多是在均匀等离子体或理想的等离子体分布的情况下开展的,没有考虑飞行器周围的流场对等离子体分布情况的影响。因此本文将从模拟的 RAM C-III 飞行器等离子体分布情况出发,计算某一截面上的电子密度和碰撞频率分布情况,并以这一分布情况为依据,利用散射矩阵方法建立太赫兹波与等离子体相互作用模型,研究太赫兹波在电子密度和碰撞频率均为非均匀分布的等离子体中的传播特性,并分析等离子体电子密度、碰撞频率、等离子体厚度及外加磁场对传输特性的影响。

1 物理模型

RAM C-III 飞行器^[15]的二维模型如图 1 所示,其外形为钝锥体,总长 1.29 m,钝头直径 0.16 m,半锥角为 9°。

根据 NASA 的 RAM C-III 飞行试验,以飞行高度 21 km、飞行速度 4.5 km/s 的情况为例,设置背景环境气压和温度分别为 4 541 Pa 和 220.97 K,利用软件 ANSYS Fluent 仿真出飞行器周围的压强、温度和空气密度分布,如图 2 所示。

可以看出,压强、温度和空气密度的最高值集中在飞行器的头部,并且由于钝头的作用使得压缩的激波和高温气体扩散到距飞行器表面一定距离处。压强、温度和空气密度的最大值分别为 1.17×10^6 Pa, 5.21×10^3 K 和 8.22×10^{-1} kg/m³。流场的参数沿着图 1 中与壁面垂直的虚线提取,对于等离子体电子密度,可以根据空气中的 11 组分 (O₂, N₂, O, N, NO, NO⁺, O₂⁺, N₂⁺, O⁺, N⁺, e⁻) 的化学反应,并利用平衡常数法^[16-17]计算得到;对于碰撞频率,根据经验公式 $\nu_{en} = 5.8 \times 10^{12} \sqrt{T} p$ 计算得到^[18],其中 T 为飞行器周围的温度, p 为飞行器周围的压强。得到的等离子体电子密度和碰撞频率的分布如图 3 所示。

等离子体频率定义为 $\omega_p = \sqrt{\omega_{pe}^2 + \omega_{pi}^2}$, ω_{pe} 和 ω_{pi} 分别为等离子体电子和离子振荡频率,并且 $\omega_{pe} = \sqrt{n_e e^2 / \epsilon_0 m_e}$,

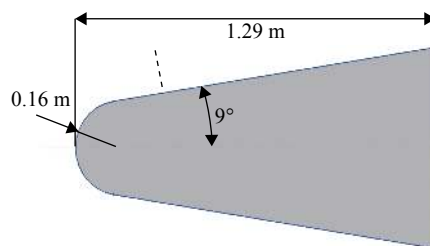


Fig. 1 Vehicle model of RAM C-III
图 1 RAM C-III 飞行器模型

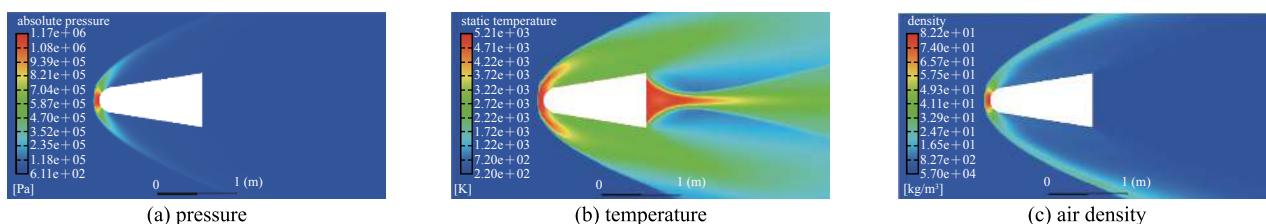


Fig. 2 Flow field distribution simulation of RAM C-III vehicle model
图 2 RAM C-III 飞行器流场仿真

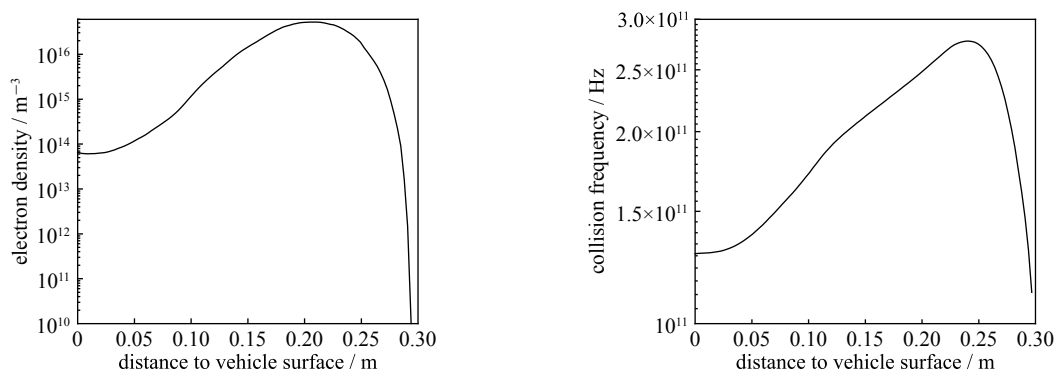


Fig. 3 Plasma electron density and collision frequency distribution
图 3 等离子体电子密度和碰撞频率分布

$\omega_{pi} = \sqrt{n_i e^2 / \varepsilon_0 m_i}$, n_e 和 n_i 分别为等离子体电子密度和离子密度, 且 $n_e = n_i$, $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m为真空介电常数, $m_e = 1.67 \times 10^{-27}$ kg为电子质量, $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C为电子电量。由于 $m_i \gg m_e$, 因而 $\omega_{pe} \gg \omega_{pi}$, 故有

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

飞行器周围等离子体为非磁化等离子体, 其介电常数表示为 $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$, 其中 ε_r 为非磁化等离子体相对介电常数, 可表示为

$$\varepsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2 (\omega \pm \omega_{ce})}{\omega [(\omega \pm \omega_{ce})^2 + \nu_{en}^2]} - j \frac{\nu_{en}}{\omega} \frac{\omega_p^2}{(\omega \pm \omega_{ce})^2 + \nu_{en}^2} \quad (2)$$

式中: ω 为电磁波角频率; ν_{en} 为等离子体碰撞频率, 且 $\nu_{en} = 2\pi f_{en}$ 。 ω_{ce} 为电子回旋频率, 并且 $\omega_{ce} = eB/m_e$, B 为磁感应强度。“ \pm ”代表电磁波的极化方向, “ $+$ ”为左旋电磁波, “ $-$ ”为右旋电磁波。

以等离子体密度的分层为例, 利用散射矩阵方法建立的太赫兹波在等离子体鞘套中传播模型如图4所示, 其中 E_i , E_r 和 E_t 表示入射波、反射波和透射波。太赫兹波沿 xOz 平面入射到等离子体中, 分层时将每层的厚度取得足够小, 这样每层中的等离子体可以看作是均匀分布, 并对碰撞频率取与等离子体密度相同的分层方式。

在图4中, 入射等离子体前的太赫兹波的电场表示为

$$E_z^{(0)} = E_0 (e^{-jk^{(0)}z} + A e^{jk^{(0)}z}) \quad (3)$$

等离子体中的第 m 层电场表示为

$$E_z^{(m)} = E_0 (B_m e^{-jk^{(m)}z} + C_m e^{jk^{(m)}z}) \quad (4)$$

出射等离子体后的电场表示为

$$E_z^{(n+1)} = E_0 D e^{-jk^{(n+1)}z} \quad (5)$$

式中: A 是总的反射系数; D 是总透射系数; B_m , C_m 是第 m 层透射系数和反射系数。等离子体中波数为 $k^{(m)} = k_0 \sqrt{\varepsilon_r^{(m)}}$, 其中 $k_0 = \omega/c$ 为真空中波数, $c = 3 \times 10^8$ m/s为真空中光速。

第 m 层的散射矩阵 S_m 为

$$S_m = \begin{pmatrix} e^{-jk^{(m)}d_m} & e^{jk^{(m)}d_m} \\ k^{(m)} e^{-jk^{(m)}d_m} & -k^{(m)} e^{jk^{(m)}d_m} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} e^{-jk^{(m-1)}d_m} & e^{jk^{(m-1)}d_m} \\ k^{(m-1)} e^{-jk^{(m-1)}d_m} & -k^{(m-1)} e^{jk^{(m-1)}d_m} \end{pmatrix} \quad (6)$$

为了满足 $z = 0$ 和 $z = d_{n+1}$ 处的边界条件可以得到

$$S_g \begin{pmatrix} A \\ 1 \end{pmatrix} = VD \quad (7)$$

$$V = \frac{1}{2k^{(n)}} \begin{pmatrix} k^{(n)} + k^{(n+1)} e^{j(k^{(n)} - k^{(n+1)})d} \\ k^{(n)} - k^{(n+1)} e^{-j(k^{(n)} + k^{(n+1)})d} \end{pmatrix} \quad (8)$$

总散射矩阵 S_g 可写作

$$S_g = \left(\prod_{m=n}^2 S_m \right) S_1 \quad (9)$$

将 S_g 表示成 $S_g = (S_{g1}, S_{g2})$, 公式(7)可以写成

$$\begin{pmatrix} A \\ D \end{pmatrix} = -(S_{g1}, -V)^{-1} S_{g2} \quad (10)$$

根据以上公式可以得到总的反射系数 A 和透射系数 D 。

因此, 反射率、透射率和吸收率分别为

$$R = |A|^2, \quad T = |D|^2, \quad Q = 1 - R - T \quad (11)$$

2 数值计算与分析

本文将以飞行器在21 km时的等离子体密度和碰撞频率分布为依据, 分别讨论等离子体峰值密度、等离子体峰值碰撞频率、等离子体厚度以及外加磁场对传输特性的影响。

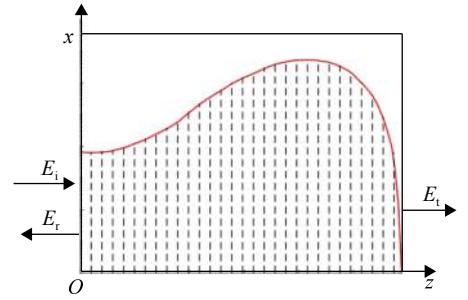


Fig. 4 Stratification of terahertz wave propagation in plasma sheath

图4 太赫兹波在等离子体鞘套中传输的分层模型

2.1 等离子体密度的影响

当飞行速度及高度不同时, RAM C-III 飞行器的等离子体鞘套峰值电子密度处于 $10^{16} \sim 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 的范围内^[10], 在等离子体峰值碰撞频率 $f_{\text{en}}=0.2 \text{ THz}$ 、等离子体厚度 $d=0.3 \text{ m}$ 时, 太赫兹波在不同等离子体峰值密度的等离子体中传输特性如图 5 所示。

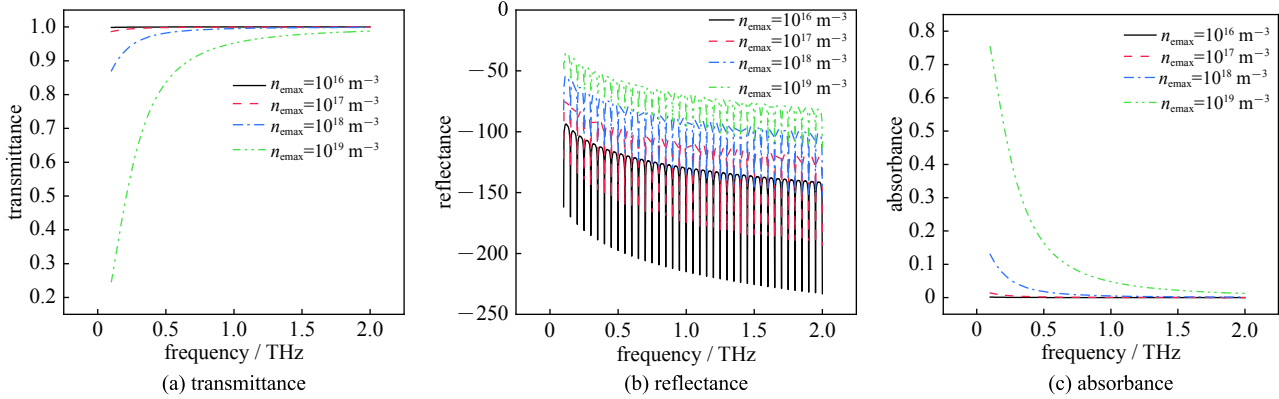


Fig. 5 Propagation characteristics of terahertz wave in plasma with different plasma electron density

图 5 不同等离子体电子密度下太赫兹波在等离子体中的传输特性

由图 5 可以看出, 随着太赫兹波频率的增加, 透射率增加, 反射率减小, 反射曲线呈周期振荡趋势, 吸收率减小。随等离子体密度的增加, 透过率减小, 反射和吸收增加。这是因为当太赫兹波频率增加时, 电磁场变化速度加快, 导致等离子体中的电子来不及响应快速变化的电场, 从而吸收的能量降低, 透射率上升, 反射率和吸收率下降。当等离子体密度增加时, 更多的电子从电场中吸收能量, 从而导致透射率减小, 反射率和吸收率增加。反射曲线用分贝标度表示, 周期振荡是因为在等离子体的边界层多次反射所致, 第 m 阶振荡发生在 $k = m\pi/d$ 处。

2.2 等离子体碰撞频率的影响

在等离子体峰值密度 $n_{\text{emax}}=10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、等离子体厚度 $d=0.3 \text{ m}$ 时, 太赫兹波在不同等离子体峰值碰撞频率的等离子体中传输特性如图 6 所示。可以看出, 随等离子体碰撞频率的增加, 透射率先减小后增加, 反射率略有减小, 吸收率先增加后减小。这是因为随着碰撞频率的增加, 电子通过碰撞传给中性粒子的能量也增加, 因此电磁波透射率降低, 吸收增加; 当碰撞频率继续增加时, 电子在碰撞前被电场加速的时间很短, 尚未来得及从电场获取更多的能量, 便与中性粒子发生了碰撞, 因此此时透射率反而上升, 吸收率下降。当电磁波频率和碰撞频率相等时, 太赫兹波与等离子体发生共振吸收, 电子吸收能量最多, 因此此时的透射率最小, 吸收最大。

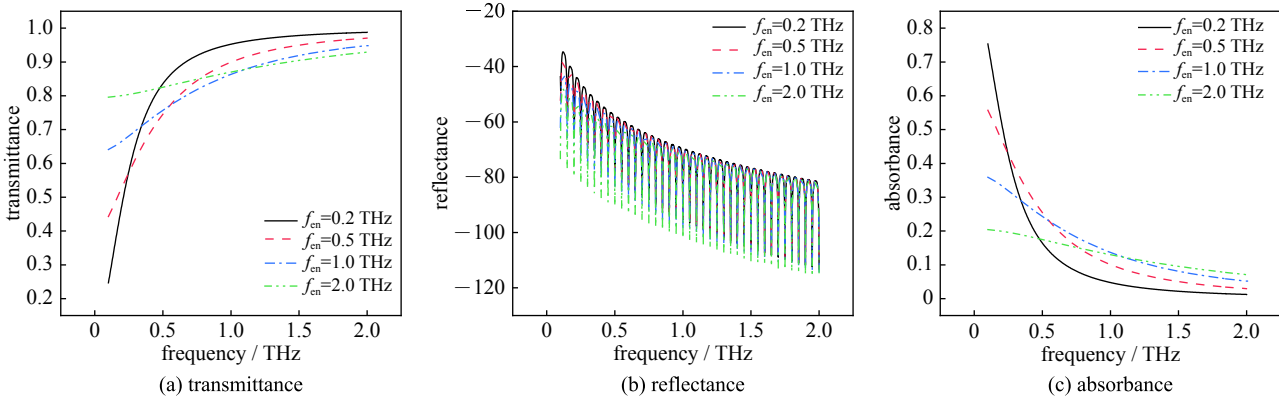


Fig. 6 Propagation characteristics of terahertz wave in plasma with different plasma collision frequency

图 6 不同等离子体碰撞频率下太赫兹波在等离子体中的传输特性

2.3 等离子体厚度的影响

在等离子体峰值密度 $n_{\text{emax}}=10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、等离子体峰值碰撞频率 $f_{\text{en}}=0.2 \text{ THz}$ 时, 太赫兹波在不同等离子体厚度的等离子体中传输特性如图 7 所示。可以看出, 随等离子体厚度的增加, 透射率减小, 吸收率增加, 反射率的周期振荡频率增加, 大小基本不变。因为随着等离子体厚度的增加, 电子与进入等离子体的太赫兹波相互作用的距离

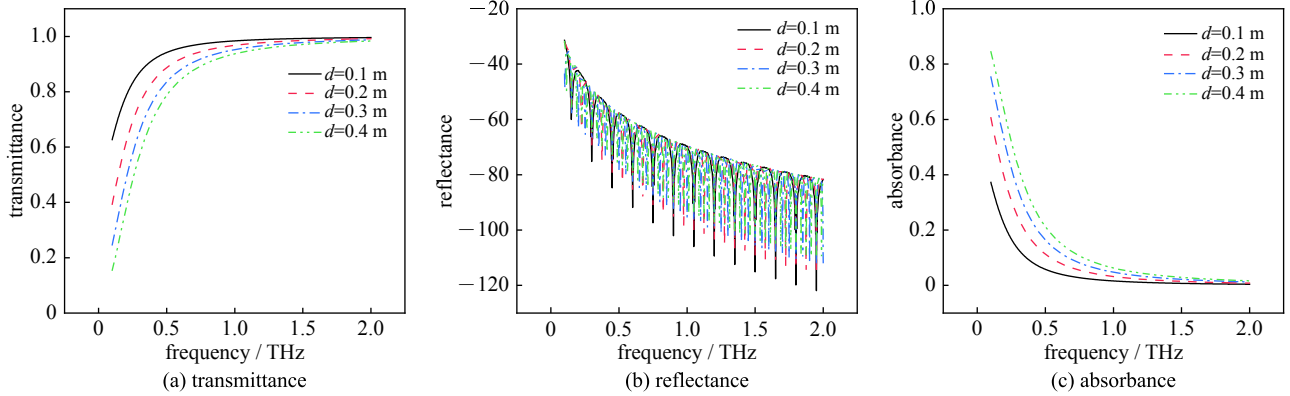


Fig. 7 Propagation characteristics of terahertz wave in plasma with different plasma thickness

图 7 不同等离子体厚度下太赫兹波在等离子体中的传输特性

也增加,更多的电子吸收能量,因此透射率减小,吸收率增加。对于等离子体厚度 $d=0.1, 0.2, 0.3$ 和 0.4 m 的情况,反射率的振荡周期,即振荡峰值出现的频率间隔分别为 $0.15, 0.075, 0.05$ 和 0.035 THz。

2.4 外加磁场的影响

在等离子体峰值密度 $n_{\text{emax}}=10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、等离子体峰值碰撞频率 $f_{\text{en}}=0.2$ THz、等离子体厚度 $d=0.3$ m 时,外加磁场对于左旋和右旋极化的太赫兹波在等离子体中的传输特性的影响如图 8 和图 9 所示。

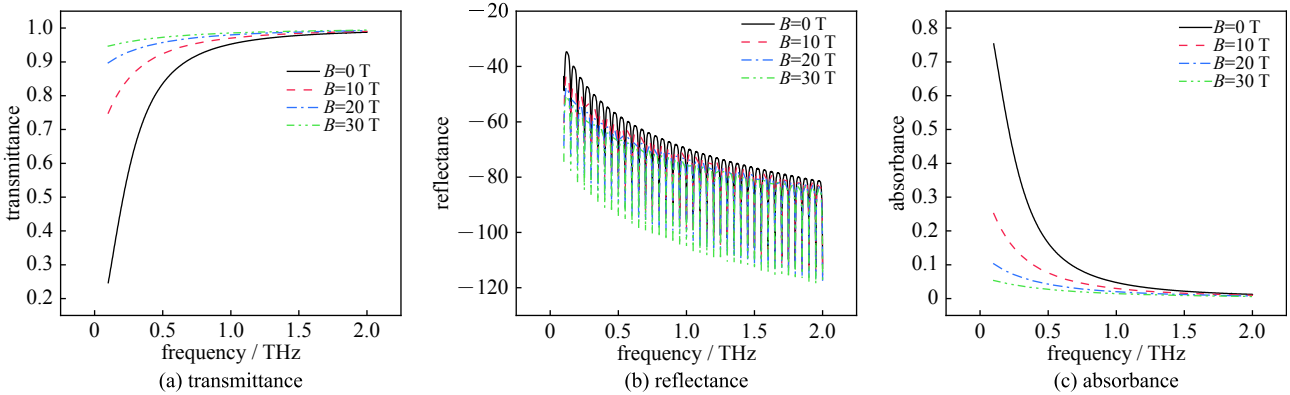


Fig. 8 Effect of external magnetic field on propagation characteristics of left-handed polarized terahertz wave

图 8 外加磁场对于左旋太赫兹波传输特性的影响

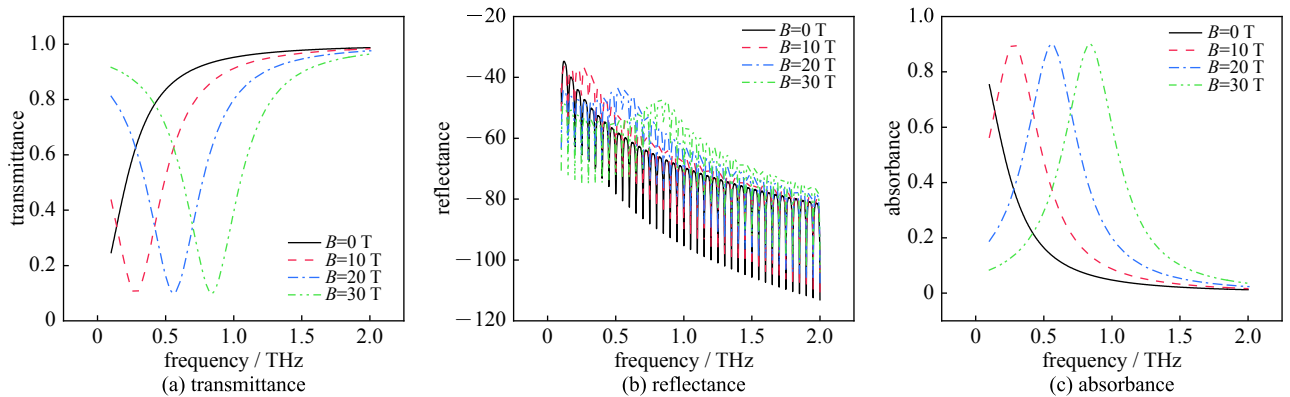


Fig. 9 Effect of external magnetic field on propagation characteristics of right-handed polarized terahertz wave

图 9 外加磁场对于右旋太赫兹波传输特性的影响

从图 8 可以看出,随着磁感应强度的增加,太赫兹波在等离子体中传输的透射率增加,反射率和吸收率下降。这是由于左旋太赫兹波与电子回旋频率没有共振作用,并且提高磁感应强度使得电子吸收的太赫兹波能量减少,因此传输的损耗减小。对于 0.22 THz 的电磁波,在没有外加磁场的情况下,透射率为 52.0% ,而在施加 30 T 的磁场后,透射率高达 95.7% 。因此外加磁场能极大地改善左旋太赫兹波的穿透特性。

从图9可以看出,对于右旋太赫兹波,磁场的施加使得传输特性曲线出现了吸收峰,并且随着磁感应强度的增加,吸收峰逐渐向高频方向移动。这是因为右旋太赫兹波与电子存在回旋共振相互作用,当回旋频率与太赫兹波频率相等时,电子吸收的能量最多,此时的传输损耗最大。对于磁感应强度为10,20和30 T的情况,共振频率分别是0.28,0.56和0.84 THz。通过对外加磁场强度的改变,可以利用这一特性实现通信信号的选择。

3 结 论

本文以RAM C-III飞行器的流场分布为依据,计算电子密度和碰撞频率,并通过散射矩阵方法建立了太赫兹波在等离子体鞘套中的传输模型,分析了在等离子体密度、碰撞频率、等离子体厚度、太赫兹波入射角变化以及外加磁场下的传输特性。结果表明:太赫兹波在等离子体中的传输损耗随着等离子体密度和等离子体厚度的增加而增加;当等离子体的碰撞频率与太赫兹波频率相等时会发生共振吸收,此时传输损耗最大。外加磁场的引入会使得左旋太赫兹波的传输损耗降低,但对于右旋太赫兹波会产生电子的回旋共振吸收,此时的损耗最大。这一理论计算对于研究太赫兹波与等离子体鞘套的相互作用,解决临近空间飞行器通信黑障问题提供了一定的参考。

参考文献:

- [1] Hartunian R A, Stewart G E, Ferguson S D, et al. Causes and mitigation of radio frequency (RF) blackout during reentry of reusable launch vehicles[R]. Aerospace Corporation, 2007.
- [2] Gillman E D, Foster J E. Review of leading approaches for mitigating hypersonic vehicle communications blackout and a method of ceramic particulate injection via cathode spot arcs for blackout mitigation[R]. NASA TM-2010-216220, 2010.
- [3] 刘丰, 朱忠博, 崔万照, 等. 太赫兹技术在空间领域应用的探讨[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(6): 857-866. (Liu Feng, Zhu Zhongbo, Cui Wanzhao, et al. Application of terahertz techniques in space science[J]. Journal of Terahertz Science & Electronic Information Technology, 2013, 11(6): 857-866)
- [4] 申金娥, 荣健, 刘文鑫. 太赫兹技术在通信方面的研究进展[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(3): 342-347. (Shen Jin'e, Rong Jian, Liu Wenxin. Progress of terahertz in communication technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(3): 342-347)
- [5] Bu F. Progress of terahertz spectroscopy[J]. Journal of Electronic Measurement & Instrument, 2009, 23(4): 1-6.
- [6] 常胜利, 王晓峰, 邵铮铮. 太赫兹光谱技术原理及其应用[J]. 国防科技, 2015, 36(2): 17-22. (Chang Shengli, Wang Xiaofeng, Shao Zhengzheng. Terahertz spectrum and its application[J]. National Defense Science & Technology, 2015, 36(2): 17-22)
- [7] 张栋文, 袁建民. 太赫兹技术概述[J]. 国防科技, 2015, 36(2): 12-16. (Zhang Dongwen, Yuan Jianmin. Introduction to terahertz technology[J]. National Defense Science & Technology, 2015, 36(2): 12-16)
- [8] 姚建铨, 钟凯, 徐德刚. 太赫兹空间应用研究与展望[J]. 空间电子技术, 2013, 10(2): 1-16. (Yao Jianquan, Zhong Kai, Xu Degang. Study and outlook of terahertz space applications[J]. Space Electronic Technology, 2013, 10(2): 1-16)
- [9] 郑灵, 赵青, 刘述章, 等. 太赫兹波在非磁化等离子体中的传输特性研究[J]. 物理学报, 2012, 61: 245202. (Zheng Ling, Zhao Qing, Zhao Shuzhang, et al. Studies of terahertz wave propagation in non-magnetized plasma[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61: 245202)
- [10] 蒋金, 陈长兴, 汪成, 等. 太赫兹波在非均匀等离子体鞘套中的传播特性[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(12): 3109-3115. (Jiang Jin, Chen Changxing, Wang Cheng, et al. Properties of terahertz wave propagation in inhomogeneous plasma sheath[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(12): 3109-3115)
- [11] 周天翔, 陈长兴, 蒋金, 等. 太赫兹波在磁化等离子体中传输特性[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(7): 97-101. (Zhou Tianxing, Chen Changxing, Jiangjin, et al. Terahertz wave propagation in magnetized plasma sheath[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(7): 97-101)
- [12] 马平, 秦龙, 石安华, 等. 毫米波与太赫兹波在等离子体中传输特性[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(11): 2965-2970. (Ma Ping, Qin Long, Shi Anhua, et al. Millimeter wave and terahertz wave transmission characteristics in plasma[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(11): 2965-2970)
- [13] Tian Y, Han Y P, Ling Y J, et al. Propagation of terahertz electromagnetic wave in plasma with inhomogeneous collision frequency[J]. Physics of Plasmas, 2014, 21: 023301.
- [14] Guo L J, Guo L X, Li J T. Propagation of terahertz electromagnetic waves in a magnetized plasma with inhomogeneous electron density and collision frequency[J]. Physics of Plasmas, 2017, 24: 022108.
- [15] Liu S, Guo L, Pan W, et al. PO calculation for reduction in radar cross section of hypersonic targets using RAM[J]. Physics of Plasmas, 2018, 25: 062105.
- [16] Gnoffo P A, Gupta R N, Shinn J L. Conservation equations and physical models for hypersonic air flows in thermal and chemical nonequilibrium[R]. NASA-TP-2867, 1989.
- [17] Nagaraj N, Lombard C, Bardina J. Navier-Stokes simulation of 3-D hypersonic equilibrium air flow[C]//23rd Thermophysics, Plasmadynamics and Lasers Conference. 1988: 2695.
- [18] Chen J, Yuan K, Shen L, et al. Studies of terahertz wave propagation in realistic reentry plasma sheath[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2016, 157: 21-29.