0254-6124/2021/41(6)-881–06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

ZHANG Jie, ZHAO Shanchao, ZHANG Guodong. Transmission characteristics of electromagnetic waves in plasma with external orthogonal electromagnetic fields (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2021, **41**(6): 881-886. DOI:10.11728/cjss2021.06.881

外加正交电磁场等离子体中电磁波透射特性*

张 洁 赵善超 张国栋

(西北师范大学物理与电子工程学院 兰州 730070)

摘 要 在基于磁流体动力学和电磁波传播理论的基础上, 针对航天飞行器再入过程中的黑障问题, 提出了一种物理模型. 利用数值分析方法, 研究电磁窗周围的电子密度在不同的飞行器轴向距离下, 随着飞行器法向距离增加呈现出的变化趋势; 改变外加电场和磁场的交叉角度, 分析不同角度下电磁窗周围电子密度的变化趋势; 研究有外加正交电磁场的电子密度与无外加电磁场电子密度比值的变化趋势和电磁波衰减的变化趋势. 结果表明: 当外加正交电磁场时, 接收天线周围的电子密度随飞行器法向距离的增加而不断减小, 其与无外加电磁场时电子密度之比呈现不断下降的趋势; 电磁波的衰减在不同飞行高度和外加磁场强度下, 随着电磁波频率的增加而不断减小. 这为减缓 "黑障" 问题提供了一种新的方法.

关键词 黑障, 电磁窗, 等离子体鞘套, 电磁波衰减

中图分类号 P 354

Transmission Characteristics of Electromagnetic Waves in Plasma with External Orthogonal Electromagnetic Fields

ZHANG Jie ZHAO Shanchao ZHANG Guodong

(*College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou* 730070)

Abstract On the basis of Magnetohydrodynamics (MHD) and the theory of electromagnetic wave propagation, a physical model is proposed to solve the blackout in the reentry process of spacecraft. By means of numerical analysis, the variation trend of the electron density around the electromagnetic window is studied with the increase of the normal distance of the aircraft model under the premise of different axial distances of the aircraft model; the variation trend of electron density around the electromagnetic window is analyzed by changing the cross angle of the applied electric field and magnetic field; the variation trend of the ratio of electron density after applying an orthogonal electromagnetic field to electron density without applying electromagnetic field and the variation trend of attenuation of electromagnetic wave. The results show that when the orthogonal electromagnetic field is applied, the electron density around the antenna decreases with the increase

* 甘肃省科技计划项目 (20JR10RA080) 和西北师范大学青年教师能力提升计划项目 (NWNU-LKQN-17-14) 共同资助

2020-06-01 收到原稿, 2020-09-09 收到修定稿

E-mail: zhangjie@nwnu.edu.cn

of the normal distance of the aircraft, and the ratio of electron density to that without the applied electromagnetic field shows a decreasing trend. Attenuation of the electromagnetic wave decreases with the increase of electromagnetic frequency at different flying heights and magnetic field strength of the applied magnetic field. This provides a new method to alleviate the blackout.

Key words Blackout, Electromagnetic window, Plasma sheath, Electromagnetic wave attenuation

0 引言

高超声速航天飞行器在地球的大气层中飞行时, 飞行器前端会形成弓形激波. 在这种高温激波的作用下, 周围的空气会被电离, 进而在飞行器表面形成一层等离子体鞘套, 等离子体鞘套阻断了地面与飞行器之间的通信, 形成黑障 [1−6]. 如何缓解黑障效应, 有研究提出了多种方法. Hodara 等 [7] 最早发现外加磁场可以缓解右旋圆极化电磁波在等离子体中的衰减, 即磁窗法, 但是此方法需要较强的磁场强度, 现有的技术水平限制了磁窗法的发展. Liu 等 [8] 提出了在空气动力学的基础上改变飞行器的外形, 但其外形改变后, 飞行器的载重能力以及抗磨损能力下降. 美国有组织提出在飞行器表面注射亲电子物质, 但是这种方法并没有获得真正的技术突破 [9]. Ma 等 [10,11] 提出增加入射电磁波的频率, 但电磁波频率越高, “雨衰” 现象越明显. Lemmer 等 [12,13] 提出利用外加交叉电磁场的方法减缓黑障问题, 但仅研究了等离子体密度及其频率的衰减特性.

本文基于磁流体动力学 (MHD) 和电磁波传播理论, 提出了一个物理模型, 并针对该模型进行数值计算, 分析了电磁窗周围电子密度的变化趋势以及电磁波在外加电磁场等离子体中的透射特性. 结果表明, 外加电磁场能够显著降低电磁窗周围的电子密度, 电磁波的衰减也随之降低.

1 理论框架及物理模型

通常, 当再入飞行器周围等离子体的频率超过从飞行器发射的无线电波频率 f, 即 $f_{\rm p} > f$ 时, 就会产生黑障问题 [13].

$$f_{\rm p} = \frac{\omega_{\rm p}}{2\pi} \approx 9 \times 10^3 \sqrt{n_{\rm p}}. \tag{1}$$

其中, $f_{\rm p}$ 为等离子体频率 (单位 Hz), $\omega_{\rm p}$ 为等离子体角频率, $n_{\rm p}$ 为等离子体电子密度.

当对飞行器施加正交电磁场时, 电场和磁场的大小以及分布会影响等离子体中的电子密度分布. 利用数值分析方法可以计算这种影响, 并且能够确定接收天线附近产生最低电子密度时的最优电磁场配置. 因此, 需要对流场的物理特性进行精确的计算.

外加正交电磁场的模型如图 1 所示, 电场和磁场分别由一对电极和永磁铁产生, 等离子体层由大量带电粒子组成, 可以认为是一个复杂的导电流体. 要缓解黑障问题, 需要对飞行器周围等离子体的特性有准确了解. 本文以磁流体动力学和电磁波传播理论为基础建立的流体模型可以用于分析内部电磁场和流场的影响. 考虑到电离平衡, 带电粒子的质量守恒由下式给出:

$$\nabla(n_\Gamma v_\Gamma) = 0. \tag{2}$$

动量守恒表达式为

$$m_\Gamma n_\Gamma (v_\Gamma \cdot \nabla v_\Gamma) = q_\Gamma n_\Gamma (\boldsymbol{E} + v_\Gamma \times \boldsymbol{B}) - k_{\rm B} T_\Gamma \cdot \nabla n_\Gamma - \sum_{\lambda \neq \Gamma}^{\lambda={\rm i,e},n} n_\Gamma m_\Gamma \nu_{\Gamma\lambda} (v_\Gamma - v_\lambda). \tag{3}$$

其中: q_Γ 为电荷量, v 为速度, T 为温度, m 为质量, $\Gamma = {\rm i, e, l}$ 分别表示离子流体、电子流体以及中性粒子流体; $k_{\rm B}$ 为玻尔兹曼常数, $\boldsymbol{E}$ 为电场强度, $\boldsymbol{B}$ 为外加磁场的磁感应强度; $\nu_{\rm ie}$ 为电子–离子碰撞频率, $\nu_{\rm il}$ 为中性粒子–离子碰撞频率, $\nu_{\rm el}$ 为中性粒子–电子碰撞频率.

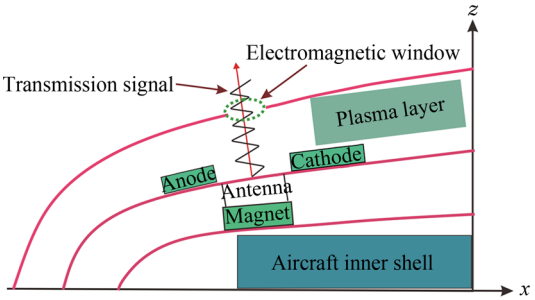


图 1 外加电磁场减缓黑障问题模型

Fig. 1 Model of external electromagnetic field that alleviates blackout

电子与离子的碰撞频率 ν_{ie} 远小于中性粒子与离子的碰撞频率 ν_{il}, 可以忽略不计. 由于离子的质量大约是电子质量的 10^4 倍, 所以电子的惯性 $m_{\mathrm{e}}n_{\mathrm{e}}(v_{\mathrm{e}}\cdot\nabla v_{\mathrm{e}})$ 相对于离子也是可以忽略不计的. 中性粒子的流速 v_{l} 大约等于等离子体的流速 v. 因此, 式 (3) 可以简化为

$$m_{\mathrm{i}}n(v_{\mathrm{i}}\cdot\nabla v_{\mathrm{i}}) = en(\boldsymbol{E}+v_{\mathrm{i}}\times\boldsymbol{B}) - k_{\mathrm{B}}T_{\mathrm{i}}\nabla n_{\mathrm{i}} - n_{\mathrm{i}}m_{\mathrm{i}}\nu_{\mathrm{il}}(v_{\mathrm{i}}-v), \tag{4}$$

$$0 = -en_{\mathrm{e}}(\boldsymbol{E}+v_{\mathrm{e}}\times\boldsymbol{B}) - k_{\mathrm{B}}T_{\mathrm{e}}\nabla n_{\mathrm{e}} - n_{\mathrm{e}}m_{\mathrm{e}}\nu_{\mathrm{ie}}(v_{\mathrm{e}}-v_{\mathrm{i}}) - n_{\mathrm{e}}m_{\mathrm{e}}\nu_{en}(v_{\mathrm{e}}-v). \tag{5}$$

其中, 等离子体流速为 [14]

$$v = \frac{m_{\mathrm{i}}v_{\mathrm{i}}+m_{\mathrm{e}}v_{\mathrm{e}}}{m_{\mathrm{i}}+m_{\mathrm{e}}}. \tag{6}$$

等离子体层的物理尺寸大于德拜长度

$$\lambda_{\mathrm{D}} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 k_{\mathrm{B}}T_{\mathrm{e}}}{n_{\mathrm{e}}e^2}},$$

所以等离子体层可以看作是准中性的, 即 $n_{\mathrm{e}}\approx n_{\mathrm{i}}=n$. 离子质量远大于电子质量, 所以等离子体流速大致等于离子速度, 即 $v\approx v_{\mathrm{i}}$. 式 (2) 可以简化为

$$\nabla\cdot(nv) = 0. \tag{7}$$

式 (4) 和 (5) 可以简化为 [14]

$$m_{\mathrm{i}}n(v_{\mathrm{i}}\cdot\nabla v_{\mathrm{i}}) = en(\boldsymbol{E}+v_{\mathrm{i}}\times\boldsymbol{B}) - k_{\mathrm{B}}T_{\mathrm{i}}\nabla n, \tag{8}$$

$$0 = -en_{\mathrm{e}}(\boldsymbol{E}+v_{\mathrm{e}}\times\boldsymbol{B}) - k_{\mathrm{B}}T_{\mathrm{e}}\nabla n_{\mathrm{e}} - n_{\mathrm{e}}m_{\mathrm{e}}\nu_{\mathrm{e}}(v_{\mathrm{e}}-v_{\mathrm{i}}). \tag{9}$$

式 (7)~(9) 可以用来描述外加电磁场对等离子体内部的影响, 联立式 (8) 和式 (9), 可以得到

$$m_{\mathrm{i}}n(v_{\mathrm{i}}\cdot\nabla v_{\mathrm{i}}) = -k_{\mathrm{B}}(T_{\mathrm{i}}+T_{\mathrm{e}})\nabla n + \boldsymbol{J}\times\boldsymbol{B} + nm_{\mathrm{e}}\nu_{\mathrm{e}}\boldsymbol{J}/(en). \tag{10}$$

其中, 电子碰撞频率 $\nu_{\mathrm{e}}=\nu_{\mathrm{ei}}+\nu_{\mathrm{el}}$, 电流密度 $\boldsymbol{J}=en(v_{\mathrm{i}}-v_{\mathrm{e}})$[15]. 在一维情况下, 式 (10) 可以化简为 [16]

$$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}x} = \frac{jB\sin\theta}{m_{\mathrm{i}}}\frac{1}{n_{\mathrm{e}}v_0} + \frac{m_{\mathrm{e}}}{m_{\mathrm{i}}}\frac{\nu_{\mathrm{e}}}{v_0}\frac{j}{en_{\mathrm{e}}} - \frac{k_{\mathrm{B}}(T_{\mathrm{i}}+T_{\mathrm{e}})}{n_{\mathrm{e}}m_{\mathrm{i}}v_0}\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}x}. \tag{11}$$

其中, $j=\sigma E$[17], 等离子体的电导率 $\sigma=\dfrac{e^2n}{\nu_{\mathrm{e}}m_{\mathrm{e}}}$, v_0 为等离子体流速, θ 为外加电场和磁场间的交叉角度. 本文假设电场方向与流场运动方向一致, 联立式 (7) 和式 (11), 电磁窗周围的电子密度 n_x 表示为

$$\left[\frac{k_{\mathrm{B}}(T_{\mathrm{i}}+T_{\mathrm{e}})}{n_{\mathrm{e}}m_{\mathrm{i}}v_0}-\frac{n_{\mathrm{e}}v_0}{n}\right] - \left[\frac{k_{\mathrm{B}}(T_{\mathrm{i}}+T_{\mathrm{e}})}{n_{\mathrm{e}}m_{\mathrm{i}}v_0}n_{\mathrm{e}}+\frac{n_{\mathrm{e}}v_0}{n_{\mathrm{e}}}\right] = \left(\frac{jB\sin\theta}{m_{\mathrm{i}}}\frac{1}{n_{\mathrm{e}}v_0}+\frac{m_{\mathrm{e}}}{m_{\mathrm{i}}}\frac{\nu_{\mathrm{e}}}{v_0}\frac{j}{en_{\mathrm{e}}}\right)x, \tag{12}$$

对式 (12) 求解可得 [13]

$$n_x = \frac{2v_0n_{\mathrm{e}}}{a+bx+\sqrt{(a+bx)^2-4c}}. \tag{13}$$

其中, $a=v_0+\dfrac{k_{\mathrm{B}}(T_{\mathrm{i}}+T_{\mathrm{e}})}{m_{\mathrm{i}}v_0}$, $b=\dfrac{jB\sin\theta}{m_{\mathrm{i}}n_{\mathrm{e}}v_0}+\dfrac{jm_{\mathrm{e}}\nu_{\mathrm{e}}}{m_{\mathrm{i}}v_0en_{\mathrm{e}}}$, $c=\dfrac{k_{\mathrm{B}}(T_{\mathrm{i}}+T_{\mathrm{e}})}{m_{\mathrm{i}}}$.

2　数值分析

2.1　电磁窗周围电子密度随飞行器法向距离的变化

电磁窗周围电子密度以及电子和中性粒子的碰撞频率将导致电磁波在等离子体鞘套中产生较大的衰减, 这是造成黑障问题的主要因素 [18].

图 2 给出了不同飞行器轴向距离 x 时, 电磁窗周围电子密度 n_x 随法向距离 z 的变化趋势. 由图 2 可以看出: 当轴向距离 $x=0.17\,\mathrm{m}$ 时, 随着法向距离 z 的增大, 电子密度下降了几个数量级; 当轴向距离 x 分别等于 $0.57\,\mathrm{m}$ 和 $1.17\,\mathrm{m}$ 时, 电磁场周围电子密度的变化趋势与 $x=0.17\,\mathrm{m}$ 时一致, 电子密度均随 z 增加而不断减小. 此外, 飞行器轴向距离 x 的值越大, 电磁窗周围的电子密度反而越小. 整体来看, 外加电磁场的方法可以减缓黑障问题.

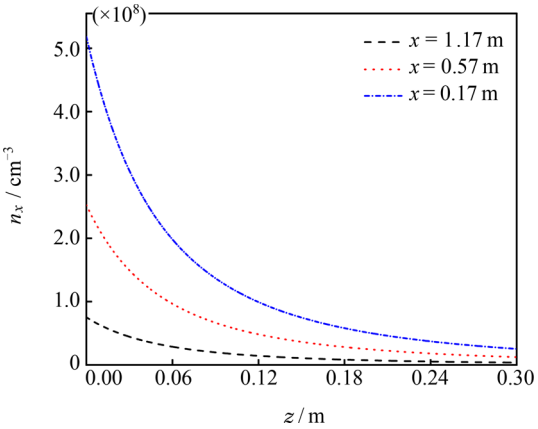


图 2　不同轴向距离 x 时电子密度的变化

Fig. 2　Change of electron density with different axial distance x

如图 3 所示, 在外加电场和磁场不同交叉角度时, 随着法向距离 z 从 0 增大到 0.3 m, 电磁窗周围的电子密度呈现出不断下降的趋势, 其中轴向距离 x 设置为 0.57 m. 在交叉角度 θ 从 30° 增加到 60° 再到 90° 的过程中, 电磁窗周围的电子密度越来越小, 且在法向距离 $z=0.075$ m 处, $\theta=90°$ 时的电子密度比 $\theta=30°$ 以及 $\theta=60°$ 低一个数量级. 当 $\theta=90°$ 时, 即外加正交的电场和磁场时, 对降低电磁窗周围电子密度的效果最好.

由图 4 可以看出, 外加正交电磁场时, 在不同轴向距离 x 的前提下, 飞行器周围电子密度 n_x 与无外加电磁场时的飞行器周围电子密度 n_e 的比值随着法向距离 z 的增加而不断减小, 其中 $\theta=90°$. 在轴向距离 x 等于 0.57 m 和 1.17 m 两种情况下, n_x 始终小于 n_e, 其比值始终小于 1. 轴向距离 $x=0.17$ m 时, 比值的下降幅度最大; 轴向距离 $x=0.57$ m 时, 比值的下降程度居中, 但其一直小于轴向距离 $x=0.17$ m 时的比值; 轴向距离 $x=1.17$ m 时, 下降趋势最为缓慢, 但比值始终小于飞行器轴向距离 x 分别等于 0.17 m 和 0.57 m 时的情况. 这是由于随着飞行器轴向距离 x 增大, n_x/n_e 的值会越来越小, 最后得到一个使比值最小的值, 此处也是最适合建立接收天线的位置.

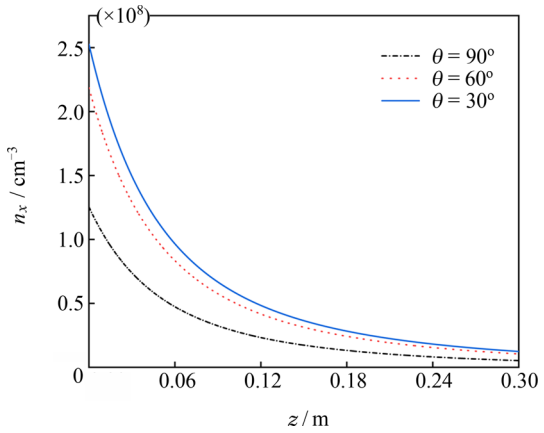


图 3 不同外加电场与磁场交叉角度时电子密度的变化

Fig. 3 Electron density variations with different crossing angles of applied electric field and magnetic field

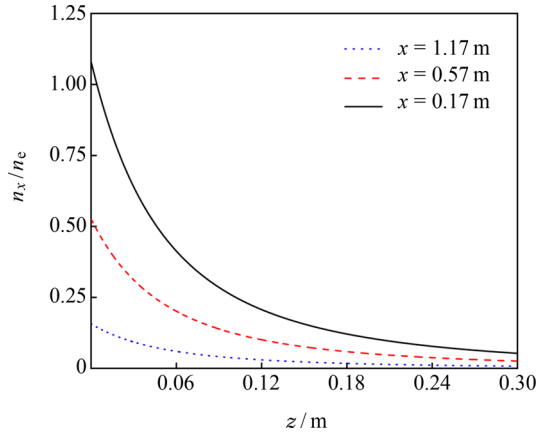


图 4 有外加电磁场的电子密度与无外加电磁场的电子密度比值

Fig. 4 Ratio of electron density with external electromagnetic field to that without external electromagnetic field

2.2 电磁波衰减随电磁波频率的变化

电磁波在等离子体中的衰减常数为 [19]

$$\alpha=\frac{8.86\omega}{\sqrt{2}c}\left\{\left\{\left(1-\frac{\omega\pm\omega_{ce}}{\omega}\frac{\omega_p^2}{(\omega\pm\omega_{ce})^2+\nu_e^2}\right)^2+\left[\frac{v_e}{\omega}\frac{\omega_p^2}{(\omega\pm\omega_{ce})^2+\nu_e^2}\right]^2\right\}^{\frac{1}{2}}-\left[1-\frac{\omega\pm\omega_{ce}}{\omega}\frac{\omega_p^2}{(\omega\pm\omega_{ce})^2+\nu_e^2}\right]\right\}^{\frac{1}{2}}. \tag{14}$$

其中, ω 为电磁波角频率, ω_{ce} 为电子回旋频率, $\omega_{ce}=qB/m_e$, α 的单位为 dB·m^{-1}. 电磁波在等离子体中的相位常数为 [19]

$$\beta=\frac{\omega}{\sqrt{2}c}\left\{\left\{\left(1-\frac{\omega\pm\omega_{ce}}{\omega}\frac{\omega_p^2}{(\omega\pm\omega_{ce})^2+\nu_e^2}\right)^2+\left[\frac{\nu_e}{\omega}\frac{\omega_p^2}{(\omega\pm\omega_{ce})^2+\nu_e^2}\right]^2\right\}^{\frac{1}{2}}+\left[1-\frac{\omega\pm\omega_{ce}}{\omega}\frac{\omega_p^2}{(\omega\pm\omega_{ce})^2+\nu_e^2}\right]\right\}^{\frac{1}{2}}. \tag{15}$$

式 (14) 和式 (15) 中的 “+” 代表左旋圆极化波, “–” 代表右旋圆极化波, β 的单位为 rad·m^{-1}. 本文只考虑左旋圆极化波这一种情况.

不同飞行高度的飞行器周围电子密度 n_e 也不相同. 如图 5 所示, 电磁波衰减随着电磁波频率的增加呈不断减小的趋势. 当电子密度 $n_e=10^{19}$ cm^{-3} 时, 在电磁波频率从 1.0×10^{11} Hz 增加到 2.0×10^{11} Hz 的过程中, 电磁波衰减的下降趋势最明显, 从 85 dB 下降到 60 dB. 在电子密度 $n_e=10^{17}$ cm^{-3} 及 $n_e=10^{18}$ cm^{-3} 两种情况下, 电磁波频率从 1.0×10^{11} Hz 增加到 2.0×10^{11} Hz, 在此过程中, 电磁波衰减的下降趋势比电子密度 $n_e=10^{19}$ cm^{-3} 时平缓, 但始终在 30 dB 以下. 说明当飞行器周围电子密度越大, 外加正交电磁场的方法越能对黑障问题起到减缓作用.

如图 6 所示, 在入射电磁波频率从 1.0×10^{11} Hz 增加到 2.0×10^{11} Hz 的过程中, 不同外加磁场强度下的电磁波衰减呈现出连续下降的趋势. 在磁感应强度 B 从 0.3 T 增加到 0.4 T, 最后到 0.5 T 过程中, 衰减的初始值以及最终值均有较大程度的减小. 当 $B=0.5$ T 时, 衰减的数值从 85 dB 下降到 60 dB, 与 $B=0.3$ T 和 $B=0.4$ T 的情况相比, 此时电磁波衰减最接近正常通信允许的电磁波衰减数值. 这说明磁场强度越大, 外加正交电场的放大对减小电磁波衰减越有效果, 越能提高入射电磁波透过等离子体鞘套的能力, 即减缓黑障问题的效果越明显.

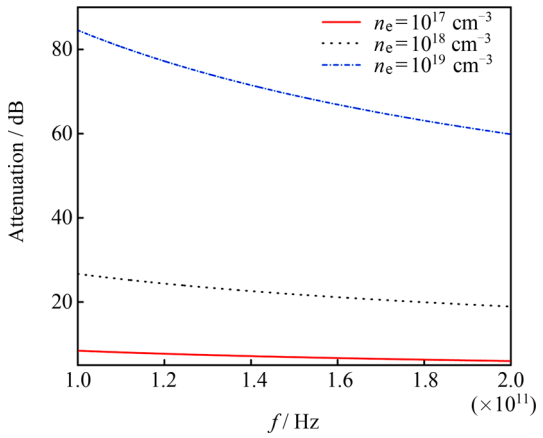


图 5　不同高度电磁波衰减随入射电磁波的变化情况

Fig. 5　Variations of electromagnetic wave attenuation with incident electromagnetic wave at different heights

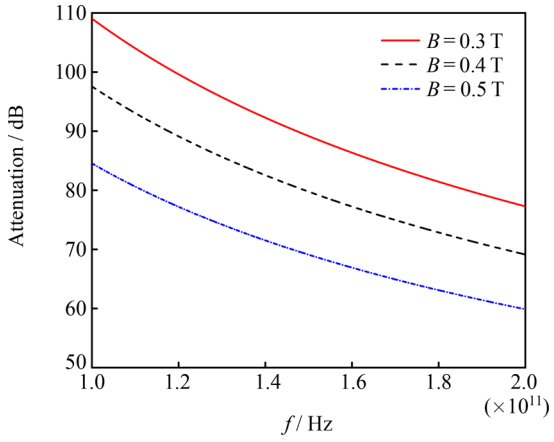


图 6　电磁波衰减在不同外加磁场强度下随入射电磁波的变化情况

Fig. 6　Variations of electromagnetic wave attenuation with incident electromagnetic wave under different external magnetic field intensity

3　结论

基于 MHD 以及电磁波传播理论建立分析模型, 研究利用外加正交电磁场的方法缓解黑障问题. 通过对数值计算结果进行分析, 可以得到以下结论.

(1) 与无外加电磁场时相比, 有外加电磁场时飞行器周围电子密度表现出明显下降. 当飞行器轴向距离 $x=1.17$ m 时, 电磁窗周围的电子密度与 x 分别等于 0.17 m 和 0.57 m 时相比最小.

(2) 外加电场和磁场的交叉角度从 30° 增加到 90° 的过程中, 电磁窗周围的电子密度呈现单调递减的趋势, 外加正交电场和磁场时, 电磁窗周围的电子密度最小.

(3) 在不同的飞行高度下, 飞行器周围的电子密度也不相同, 本文分别对电磁波穿过 $n_e=10^{17}$ cm^{-3}, $n_e=10^{18}$ cm^{-3} 以及 $n_e=10^{19}$ cm^{-3} 等离子体鞘套进行了分析, 发现飞行器周围的电子密度越大, 外加正交电磁场的方法对其减小的效果越明显.

(4) 外加磁场的强度增大时, 电磁波衰减随电磁波频率的增加而不断减小, 外加磁场的磁感应强度越大, 电磁波衰减的初始值以及最终值均越小, 越接近正常通信允许的电磁波衰减数值. 因此, 外加正交电磁场的方法是减缓黑障问题的一种新的途径.

参考文献

[1] JIANG Jin, CHEN Changxing, ZHOU Tianxiang, *et al.* Study on atmospheric window of millimeter wave propagation in near space plasma sheath [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2016, **36**(1): 56-62 (蒋金, 陈长兴, 周天翔, 等. 毫米波大气窗口在临近空间等离子体鞘套中的传播特性 [J]. 空间科学学报, 2016, **36**(1): 56-62)

[2] LING Yunfei, CHEN Changxing, JIANG Jin. Properties of C-band wave propagation in plasma sheath with different incidence angle [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2016, **36**(6): 904-908 (凌云飞, 陈长兴, 蒋金. 不同入射角度下等离子鞘套中 C 波段电磁波传输特性 [J]. 空间科学学报, 2016, **36**(6): 904-908)

[3] GENG Xingning, XU Degang, LI Xingning, *et al.* Propagation characteristics of terahertz wave in plasma sheath around air vehicle [J]. *High Power Laster Part. Beams*, 2020, **32**(3): 190291 (耿兴宁, 徐德刚, 李杏宁, 等. 太赫兹波在飞行器等离子体鞘套中的传输特性 [J]. 强激光与粒子束, 2020, **32**(3): 190291)

[4] YU Zhefeng, SUN Liangkui, MA Ping, *et al.* Influence of blackout on communication security and several possible

solutions [J]. *Infrared*, 2017, **38**(2): 39-45 (于哲峰, 孙良奎, 马平, 等. 黑障对通信安全的影响及几种可能的解决方案 [J]. 红外, 2017, **38**(2): 39-45)

[5] ZHOU Yong, PAN Yurong, LI Chunjian. Propagation attenuation of electromagnetic waves in plasma [J]. *Modern Radar*, 2019, **41**(2): 1-6 (周勇, 潘昱融, 李纯健. 电磁波在等离子体中的传播衰减 [J]. 现代雷达, 2019, **41**(2): 1-6)

[6] ZHENG Ling, ZHAO Qing, LUO Xiangang, *et al.* Theoretical and experimental studies of electromagnetic wave transmission in plasma [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2012, **61**(15): 155203 (郑灵, 赵青, 罗先刚, 等. 等离子体中电磁波传输特性理论与实验研究 [J]. 物理学报, 2012, **61**(15): 155203)

[7] HODARA H. The use of magnetic fields in the elimination of the re-entry radio blackout [J]. *Proc. IRE*, 1961, **49**(12): 1825-1830

[8] LIU Jiangfan, XI Xiaoli, WAN Guobin, *et al.* Simulation of electromagnetic wave propagation through plasma sheath using the moving-window finite-difference time-domain method [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2011, **39**(3): 852-855

[9] YANG Yongchang. ZT-FDTD Method to Analyze the Influence of Spacecraft Reentry Plasma Sheath on Communication Signals [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010 (杨永常. ZT-FDTD 法分析航天器再入等离子体鞘套对通信信号的影响 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010)

[10] MA Ping, ZENG Xuejun, SHI Anhua, *et al.* Experimental study on transmission characteristics of electromagnetic wave in plasma high temperature gas [J]. *J. Exper. Fluid Mech.*, 2010, **24**(5): 51-54 (马平, 曾学军, 石安华, 等. 电磁波在等离子体高温气体中传输特性试验研究 [J]. 实验流体力学, 2010, **24**(5): 51-54)

[11] YU Zhefeng, MA Ping, ZHANG Zhicheng, *et al.* Research on microwave transmission in thin layer plasma [J]. *J. Exper. Fluid Mech.*, 2013, **27**(3): 60-64 (于哲峰, 马平, 张志成, 等. 微波在薄层等离子体中传输效应研究 [J]. 实验流体力学, 2013, **27**(3): 60-64)

[12] LEMMER K M, GALLIMORE A D, SMITH T B, *et al.* Experimental results for communications blackout amelioration using crossed electric and magnetic Fields [J]. *J. Spacec. Rockets*, 2009, **46**(6): 1100-1109

[13] KEIDAR M, KIM M, BOYD I D. Electromagnetic reduction of plasma density during atmospheric reentry and hypersonic flights [J]. *J. Spacec. Rockets*, 2008, **45**(3): 445-453

[14] KIM M. Electromagnetic Manipulation of Plasma Layer for Re-Entry Blackout Mitigation [M]. Michigan: University of Michigan, 2009

[15] BITTENCOURT J A. Plasma Conductivity and Diffuflion [M]. New York: Springer, 2004

[16] CHENG Jiajun, JIN Ke, KOU Yong, *et al.* An electromagnetic method for removing the communication blackout with a space vehicle upon re-entry into the atmosphere [J]. *J. Appl. Phys.*, 2017, **121**(9): 093301. DOI: 10.1063/1.4976213

[17] CAMBEL A B. Plasma Physics and Magneto-fluidmechanics [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1963

[18] CHEN Jiamin, YUAN Kai, SHEN Linfang, *et al.* Studies of terahertz wave propagation in realistic reentry plasma sheath [J]. *Prog. Electromag. Res.*, 2016, **157**: 21-29

[19] BO Yong, ZHAO Qing, LUO Xiangang, *et al.* Experimental study of the communication performance of electromagnetic wave in time-varying and magnetized plasma channel [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2016, **65**(5): 055201 (薄勇, 赵青, 罗先刚, 等. 电磁波在时变磁化等离子体信道中通信性能的实验研究 [J]. 物理学报, 2016, **65**(5): 055201)