



·前沿技术与交叉科学·

# 等离子体鞘套低频通信电磁波透射率与 辐照微波场强关系仿真研究\*

陈煜青, 王 蕾, 赵立山, 贺军涛

(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 长沙 410073)

**摘 要:** 高超声速飞行器飞行期间, 由于表面激波的影响, 飞行器表面会生成等离子体鞘套。等离子体鞘套会吸收、反射和散射电磁波, 导致通信信号发生衰减甚至中断, 从而形成“黑障”问题。理论上来说, 等离子体鞘套与微波的相互作用随微波电场幅值的变化呈现非线性, 所以可能存在一个合适的电场幅值和辐照时间区间, 使等离子体鞘套的电磁波透射率上升。针对这种可能性, 采用有限元分析方法, 对飞行器表面等离子体鞘套流场与电磁场进行二维耦合仿真, 得到微波照射后等离子体鞘套透射率的改变情况。分别使用电场幅值为  $5 \times 10^4$ 、 $1 \times 10^5$ 、 $2.5 \times 10^5$ 、 $5 \times 10^5$   $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$  的微波对等离子体鞘套进行 30 ns 的辐照, 在辐照后等离子体鞘套对 1.2 GHz 和 1.6 GHz 的电磁波的最大透射率提升, 为解决“黑障”问题提供了新的可能。

**关键词:** 高超声速飞行器; 等离子体鞘套; 黑障; 微波; 耦合仿真

中图分类号: O539

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220361

## Simulation study of the relationship between low-frequency communication EM wave transmissivity of plasma sheaths and irradiation microwave E-field strength

Chen Yuqing, Wang Lei, Zhao Lishan, He Juntao

(College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** During the flight of hypersonic vehicle, plasma sheath will be produced on the surface due to the influence of surface shockwave. Because the plasma sheath will absorb, reflect and scatter electromagnetic waves, the communication signal will be attenuated or even interrupted, causing “blackout” problem. Theoretically, the interaction between the plasma sheath and microwave is nonlinearly changing with electric field, so there may be a suitable E-field amplitude and irradiation time interval to make electromagnetic wave transmissivity rise. For this possibility, Finite Element Analysis is used to conduct a two-dimensional coupled simulation of the plasma sheath flow field and the electromagnetic field on the hypersonic vehicle’s surface, and the change of the plasma sheath transmissivity after microwave irradiation is obtained. The plasma sheath was irradiated for 30 ns with electric field of  $5 \times 10^4$  V/m,  $1 \times 10^5$  V/m,  $2.5 \times 10^5$  V/m,  $5 \times 10^5$  V/m, respectively. The maximum transmissivity to 1.2 GHz and 1.6 GHz electromagnetic waves is enhanced after irradiation. It provides a new possibility to solve the “blackout” problem.

**Key words:** hypersonic vehicle, plasma sheath, blackout, microwave, coupling simulation

当高超声速飞行器的飞行速度超过 5 倍音速时, 飞行器表面的气体会形成激波, 导致飞行器表面温度急剧上升。温度的升高引起大气中的气体分子发生一系列的离解和电离反应, 在飞行器周围生成等离子体鞘套<sup>[1-5]</sup>。等离子体鞘套会吸收、反射和散射电磁波, 导致通信出现中断, 即“黑障”问题。在飞行器再入大气层的过程中, 黑障问题一般会持续 4~10 min, 而且飞行器的速度极高, 在通信中断的过程中可能已经飞行了数百 km, 这对飞行器的安

\* 收稿日期: 2023-01-12; 修订日期: 2023-04-15

基金项目: 国防科技大学前沿交叉学科学院重大基础自主研究项目 (ZDJC19-11); 国防科技大学前沿交叉学科学院自主科研基金项目 (22-ZZKY-07); 国家自然科学基金项目 (12205369)

联系方式: 陈煜青, [m15668741620@163.com](mailto:m15668741620@163.com)。

通信作者: 贺军涛, [hjt0731@163.com](mailto:hjt0731@163.com)。

全造成了很大的威胁<sup>[6-8]</sup>。目前解决黑障问题的方法主要有提高通信电磁波的频率<sup>[9]</sup>、谐振传输<sup>[10]</sup>、磁窗<sup>[11]</sup>、优化气动外形<sup>[12]</sup>和  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  漂移<sup>[13]</sup>等,但是这些方法在使用过程中都有一定的局限性,仍需要研究新方法来解决黑障问题。

微波在辐照等离子体鞘套后,等离子体鞘套的电磁波透射率会因为吸收微波的能量而改变,并且通过仿真发现,辐照微波的电场幅值与等离子体鞘套电磁波透射率的变化为非线性关系,这为解决黑障问题提供了新的思路<sup>[14-15]</sup>。本文基于有限元分析方法,对飞行器表面流场和电磁场进行了二维耦合仿真。在飞行高度为 40 km、飞行速度为  $3150 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的条件下,研究了电场幅值为  $5 \times 10^4$ 、 $1 \times 10^5$ 、 $2.5 \times 10^5$ 、 $5 \times 10^5 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$  的微波对等离子体鞘套电磁波透射率的影响,发现微波的照射会使等离子体鞘套对低频电磁波的透射率明显提升。

## 1 仿真模型

### 1.1 超声速流体模型

在本小节中给出超声速流体模型的计算公式,采用 Kundrapu 等人提出的可压缩流体多组分单速度流模型进行计算<sup>[16]</sup>。保守形式的 Navier-Stokes 方程如式(1)至式(3)所示,依次表示流体质量、动量和能量守恒。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u} + p \mathbf{I}) = \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (2)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} (e + p)) = \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{u}) + \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

式中:  $\rho$  是质量密度;  $\mathbf{u}$  是速度;  $p$  是压强;  $\boldsymbol{\tau}$  是应力张量;  $e$  是能量密度;  $k$  为传热系数;  $T$  为温度。质量密度表示为

$$\rho = \sum_i^N n_i m_i \quad (4)$$

式中:  $n$  是粒子数密度;  $m$  为粒子质量;  $N$  为流体中包含的粒子种类数。

压强可由理想气体状态方程表示为

$$p = \rho R T \quad (5)$$

式中:  $R$  为摩尔气体常数。

应力张量计算式为

$$\boldsymbol{\tau} = -\frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} + \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \quad (6)$$

式中:  $\mu$  为物质的黏度;  $\mathbf{I}$  为单位矩阵。

能量密度为流体的动能、内能和化学能的能量密度之和,即

$$e = \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{u} + \sum_i^N n_i H_i \quad (7)$$

式中:  $\gamma$  为气体的比热容比;  $H$  为物质生成焓。

物质的粘度和传热系数分别表示为

$$\mu_i = \frac{5}{16} \frac{\sqrt{\pi m_i k_B T}}{\pi \sigma^2 \Omega} \quad (8)$$

$$k_i = \frac{5}{2} c_{v,i} \mu_i \quad (9)$$

式中:  $k_B$  是玻耳兹曼常数;  $\sigma$  是碰撞直径;  $\Omega$  是碰撞积分;  $c_V$  是气体的定容比热容。

使用连续性方程来计算流体中各个组分随时间的演化,表示

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} n_i) = s_i \quad (10)$$

式中： $s$ 为化学反应源项。模型采用与RAMC-II飞行器一致的几何结构，如图1所示。飞行器的鼻帽半径为15.24 cm，半锥角为 $9^\circ$ ，长度为1.295 m<sup>[4]</sup>。化学反应模型采用Park单温度模型，模型包含7种组分( $N_2$ 、 $O_2$ 、 $N$ 、 $O$ 、 $NO$ 、 $NO^+$ 、 $e$ )和18种化学反应，化学反应式如表1所示<sup>[17]</sup>。

表1中 $M_1^a$ 表示 $N_2$ 、 $O_2$ 和 $N$ ， $M_1^b$ 表示 $N$ 和 $O$ ， $M_2^a$ 表示 $N_2$ 、 $O_2$ 和 $N$ ， $M_2^b$ 表示 $N$ 和 $O$ ， $M_3^a$ 表示 $N_2$ 、 $O_2$ 和 $N$ ， $M_3^b$ 表示 $N$ 和 $O$ 。

## 1.2 等离子体中电磁波传输模型

本小节给出等离子体鞘套与电磁波相互作用的计算公式。电磁波的演化过程可由麦克斯韦方程组求解，即

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (11)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho'}{\varepsilon_0} \quad (12)$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - c^2 \nabla \times \mathbf{B} = -\frac{\mathbf{J}}{\varepsilon_0} \quad (13)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (14)$$

式中： $\mathbf{E}$ 为电场； $\mathbf{B}$ 为磁场； $\rho'$ 为电荷密度； $\varepsilon_0$ 为真空介电常数； $\mathbf{J}$ 为电流面密度； $t$ 为时间。

等离子体鞘套和电磁波的相互作用采用多流体模型进行仿真，计算公式为

$$\frac{\partial \rho_\alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_\alpha \mathbf{u}) = \rho_\alpha \nu_\alpha \quad (15)$$

$$\frac{\partial (\rho_\alpha \mathbf{u}_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_\alpha \mathbf{u}_\alpha \mathbf{u}_\alpha + p_\alpha \mathbf{I}) = \frac{\rho_\alpha}{m_\alpha} q_\alpha (\mathbf{E} + \mathbf{u}_\alpha \times \mathbf{B}) - \sum_{i \neq \alpha}^N \frac{\rho_\alpha}{m_\alpha} \mu_{\alpha i} \zeta_{\alpha i}^{-1} (\mathbf{u}_\alpha - \mathbf{u}_i) \quad (16)$$

$$\frac{\partial e_\alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}_\alpha (e + p_\alpha)) = \frac{\rho_\alpha}{m_\alpha} q_\alpha \mathbf{u}_\alpha \cdot \mathbf{E} + \left( \sum_i^N \rho_i \mathbf{u}_i \left| \sum_i^N \rho_i \right. \right) \cdot \left( - \sum_i^N \frac{\rho_\alpha}{m_\alpha} \mu_{\alpha i} \zeta_{\alpha i}^{-1} (\mathbf{u}_\alpha - \mathbf{u}_i) \right) - \sum_{i \neq \alpha}^N 3k_B \frac{\rho_\alpha}{m_\alpha} (\mu_{\alpha i} / (m_\alpha + m_i)) \zeta_{\alpha i}^{-1} (T_\alpha - T_i) \quad (17)$$

式中： $\nu_\alpha$ 是外加电磁场所导致的电离频率； $q_\alpha$ 是粒子所带电荷量； $\mu$ 是折合质量； $\zeta$ 是碰撞弛豫时间。

本模型描述了等离子体对电磁波的反射和吸收以及电磁波对大气的电离导致等离子体密度上升的过程。电磁波入射方向以及模型边界条件的设置如图2所示。其中，“incident electromagnetic wave”表示平面电磁波的入射方向；“inflow boundary”表示这个边界只允许流量流入而禁止流量流出；“outflow boundary”表示这个边界只允许流量流出而禁止流量流入；“conductor boundary”表示设定这个边界为理想导体，电磁波在这个边界会被完全反射。

## 2 仿真结果

### 2.1 等离子体鞘套仿真

超声速流体模型的仿真条件设置为飞行高度40 km，飞行速度 $3150 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，飞行器攻角 $0^\circ$ ，大气温度 $253.2 \text{ K}$ 。

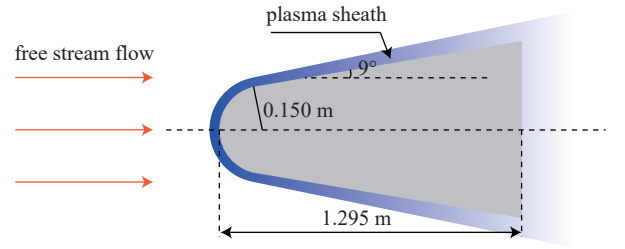


Fig. 1 Schematic diagram of hypersonic vehicle geometry and surrounding flow field

图1 飞行器几何结构及周围流场示意图

表1 化学反应式

Table 1 Chemical reaction

No.	chemical equation
1,2,3	$N_2 + M_1^a \rightleftharpoons N + N + M_1^a$
4,5	$N_2 + M_1^b \rightleftharpoons N + N + M_1^b$
6,7,8	$O_2 + M_2^a \rightleftharpoons O + O + M_2^a$
9,10	$O_2 + M_2^b \rightleftharpoons O + O + M_2^b$
11,12,13	$NO + M_3^a \rightleftharpoons N + O + M_3^a$
14,15	$NO + M_3^b \rightleftharpoons N + O + M_3^b$
16	$N_2 + O \rightleftharpoons NO + N$
17	$NO + O \rightleftharpoons O_2 + N$
18	$N + O \rightleftharpoons NO^+ + e^-$

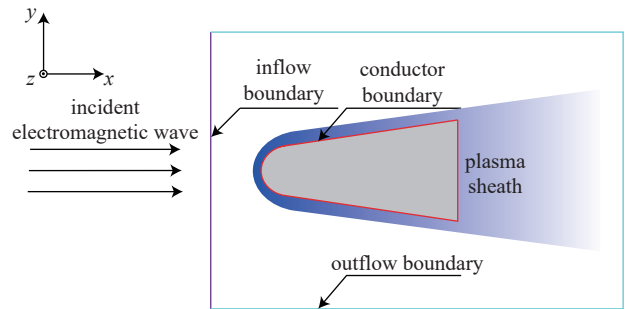


Fig. 2 Electromagnetic wave incident direction and model boundary conditions

图2 电磁波入射方向及模型边界条件示意图

通过仿真得到飞行器表面等离子体密度、温度、碰撞频率、等离子体频率的分布情况如图3所示。

图4为等离子体峰值密度在飞行器表面的分布情况,图4(a)为数据监测点位置,图4(b)为数据监测点处的等离子体峰值密度。

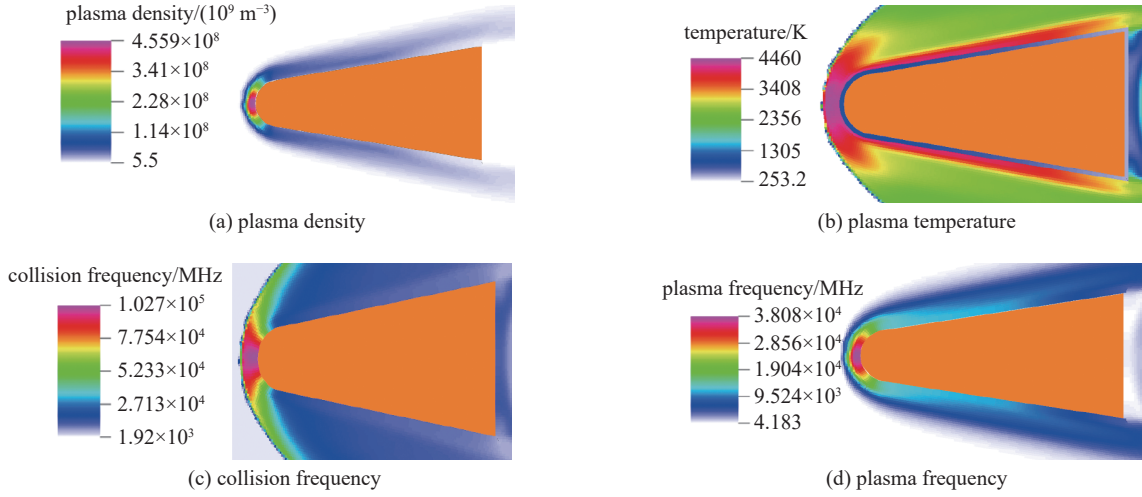


Fig. 3 Parameter distribution of plasma sheath

图3 等离子体鞘套参数分布

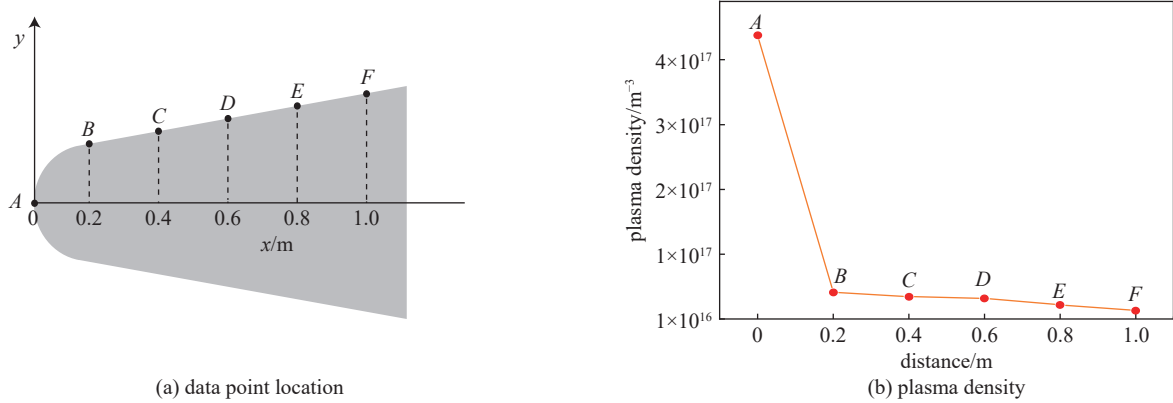


Fig. 4 Plasma density distribution along vehicle axis

图4 飞行器轴线等离子体密度分布

## 2.2 电磁波在等离子体中传输仿真

入射微波频率为1 GHz, 电场幅值分别为  $5 \times 10^4$ 、 $1 \times 10^5$ 、 $2.5 \times 10^5$ 、 $5 \times 10^5 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ , 电场偏振方向为  $z$  轴方向, 入射方向如图2所示。

不同电场幅值的微波的磁场分布情况如图5所示, 可以看出辐照的四组微波均无法穿透等离子体鞘套。

## 2.3 等离子体鞘套的电磁特性

由图4可知, 飞行器尾部等离子体密度较低, 对解决黑障问题更为有利, 故选取图4(a)中F点作为监测点, 选定典型低频通信频率1.2 GHz和1.6 GHz作为监测频率, 研究不同电场幅值的微波辐照下, 等离子体鞘套对监测频率电磁波透射率的变化情况。均匀等离子体的电磁波透射率受其相对介电常数的影响, 其关系为

$$T = \left| \frac{2\sqrt{\epsilon_r}e^{jk_0d}}{(1+\epsilon_r)\sinh(jk_0\sqrt{\epsilon_r}d) + 2\sqrt{\epsilon_r}\cosh(jk_0\sqrt{\epsilon_r}d)} \right|^2 \quad (18)$$

式中: 电磁波透射率为  $T$ ; 等离子体的相对介电常数为  $\epsilon_r$ ; 等离子体层的厚度为  $d$ ;  $k_0$  为真空中电磁波波数。对于非磁化的等离子体, 其相对介电常数可以由下式(19)表示

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu_{en}^2} - j\frac{\nu_{en}}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu_{en}^2} \quad (19)$$

式中:  $\omega$  为电磁波频率,  $\omega_p$  为等离子体频率,  $\nu_{en}$  为碰撞频率。由于等离子体的电磁波透射率受等离子体相对介电

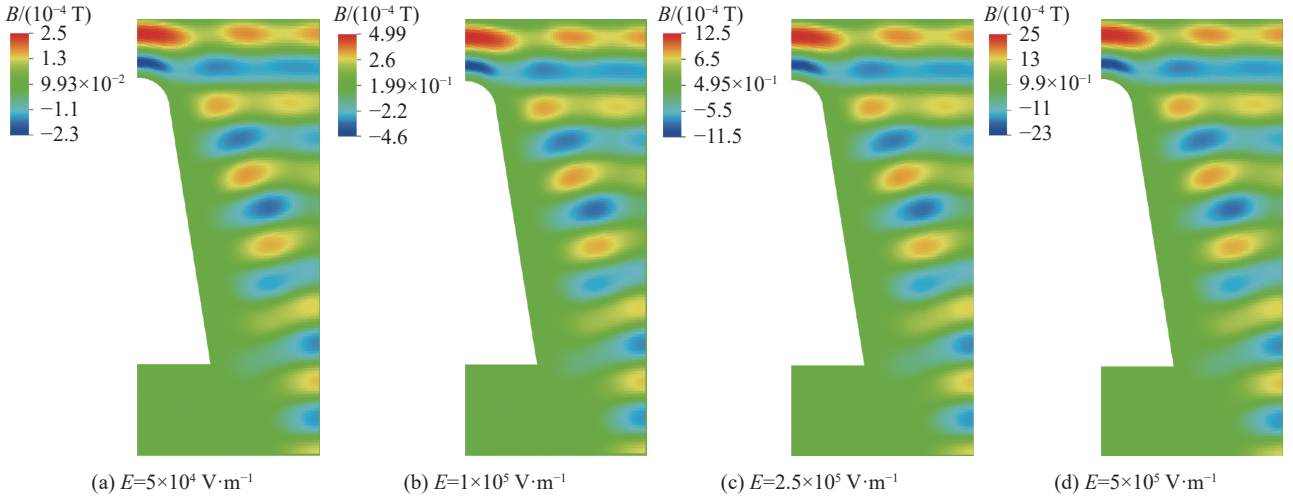


Fig. 5 Magnetic field distribution of microwaves with different E-field amplitudes

图 5 不同电场幅值的微波的磁场分布

常数的影响,而等离子体的相对介电常数又受等离子体频率和等离子体碰撞频率的影响,因此等离子体的电磁波透射率受等离子体频率和碰撞频率的影响。对于等离子体鞘套可以将其分割为多个均匀等离子体层来求解透射率。

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e q^2}{m_e \epsilon_0}} \quad (20)$$

式中:  $n_e$  代表电子数密度;  $m_e$  代表电子质量,  $q$  代表电子电量,该式中等离子体频率与电子密度为正相关的关系。

经过微波辐照后等离子体电磁波透射率改变的原因可以总结为:微波辐照等离子体会加速等离子体中的带电粒子使等离子体的碰撞频率改变,同时微波会电离部分中性粒子,使电子密度上升,进而使等离子体频率上升,等离子体频率和碰撞频率改变会改变等离子体的相对介电常数,相对介电常数会影响等离子体的电磁波透射率。

经过 30 ns 的微波辐照后等离子体鞘套的碰撞频率和等离子体频率的变化情况如图 6 所示,其中图 6(a)和图 6(b)的横坐标表示离开飞行器表面的距离。

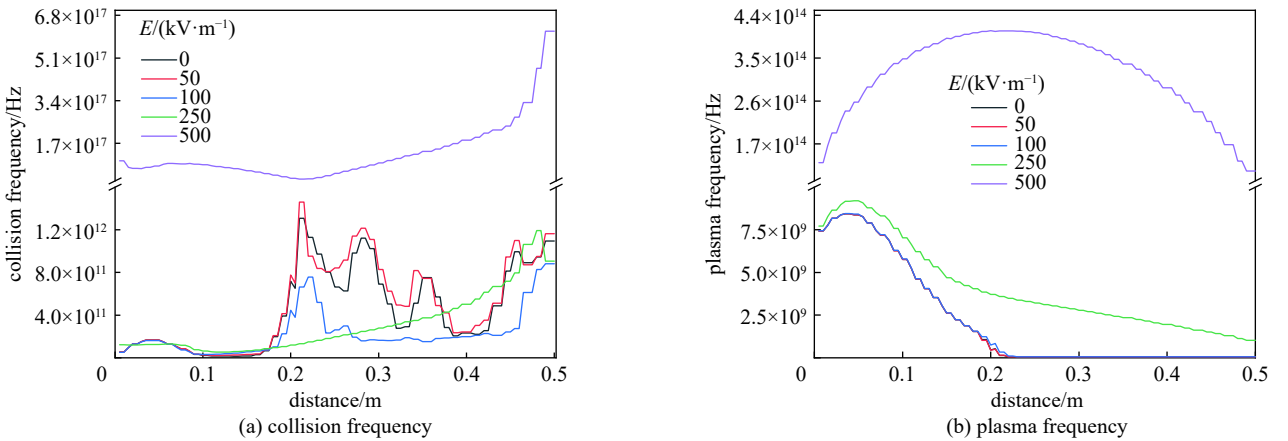


Fig. 6 Changes of plasma frequency and collision frequency after 30 ns irradiation

图 6 经过 30 ns 辐照后等离子体振荡频率和碰撞频率的变化

由图 6 可以看出,经过 30 ns 的微波辐照后,在靠近飞行器表面位置的等离子体碰撞频率上升,并且随着辐照微波电场幅值的提高,碰撞频率上升幅度增加,当辐照微波的电场幅值上升至  $5 \times 10^5 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$  时,碰撞频率上升幅度剧增;在经过 30 ns 的微波辐照后,等离子体频率增加,并且随着辐照微波电场幅值的提高,等离子体频率上升的幅度增加,当辐照微波的电场幅值上升至  $5 \times 10^5 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$  时,等离子体频率上升幅度剧增。由式(18)和式(19)可知,等离子体频率和碰撞频率的改变会影响等离子体相对介电常数进而使电磁波透射率发生变化,图 7 为微波辐照过程中等离子体鞘套对 1.2 GHz 和 1.6 GHz 电磁波的透射率随辐照时间的变化,可以看出,经过电场幅值为  $5 \times 10^4 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$  和  $1 \times 10^5 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$  的微波辐照后,电磁波透射率逐渐提升,但提升速度逐渐降低,当电场幅值提升至  $2.5 \times 10^5 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$  时,

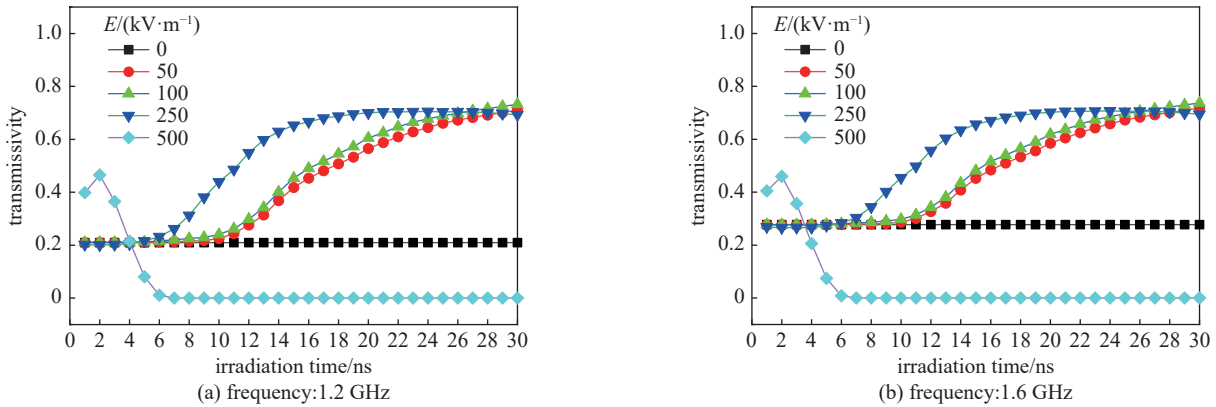


Fig. 7 Transmissivity changes with irradiation time  
图 7 透射率随时间变化

透射率先上升后下降, 而当电场幅值提升至  $5 \times 10^5 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$  时, 电磁波透射率在辐照开始 2 ns 后就开始下降。

为了分析微波辐照后等离子体鞘套电磁波透射率发生改变的原因, 我们设置了一个简单的模型: 令 16 GHz 的电磁波垂直入射一个厚度为 0.3 m 的均匀等离子体平板, 如图 8(a) 所示。接下来, 将式(19)计算的等效介电常数代入式(18)中, 得到不同等离子体频率下电磁波透射率随碰撞频率的变化情况, 如图 8(b) 所示, 可以看出当等离子体频率不变、碰撞频率大于 16 GHz 时, 电磁波透射率随碰撞频率的提升而提升; 当等离子体碰撞频率不变时, 增加等离子体频率, 电磁波透射率降低。因此, 当微波辐照等离子体鞘套时, 等离子体碰撞频率上升, 电磁波透射率上升, 随着辐照时间的增加, 等离子体频率增加, 电磁波透射率下降。

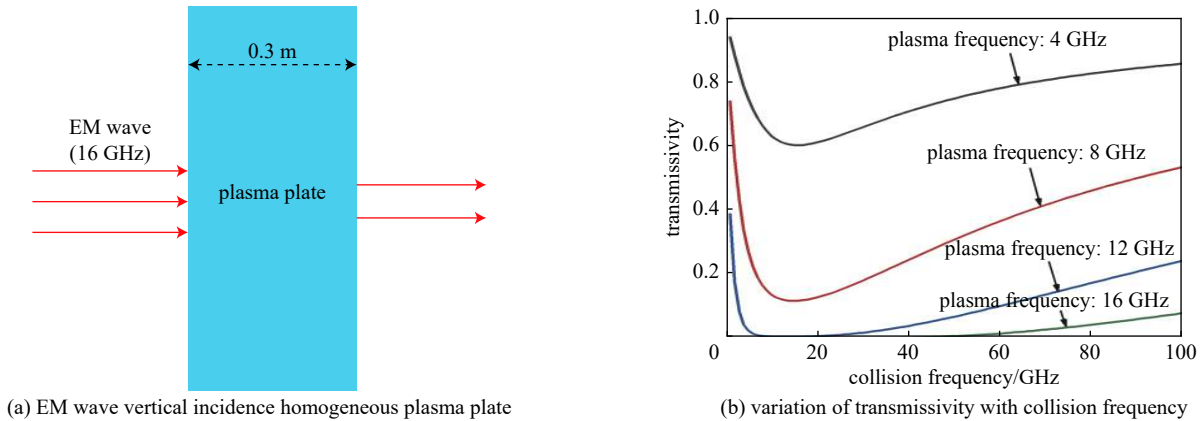


Fig. 8 Homogeneous plasma plate mode  
图 8 均匀等离子体平板模型

等离子体鞘套经过不同场强微波辐照后对 1.2 GHz 和 1.6 GHz 的电磁波的最大透射率如表 2 所示。结合图 6 和表 2 的数据可知, 辐照微波电场幅值越大, 电磁波透射率的上升速率越快, 最大透射率出现时间越早, 过大的电

表 2 最大透射率

Table 2 Maximum transmissivity

frequency/GHz	$E/(\text{kV}\cdot\text{m}^{-1})$	maximum transmissivity/%	irradiation time/ns
1.2	0	21.0	0
1.2	50	71.1	30
1.2	100	73.3	30
1.2	250	70.4	26
1.2	500	46.5	2
1.6	0	27.7	0
1.6	50	71.8	30
1.6	100	73.7	30
1.6	250	70.7	24
1.6	500	46.0	2

场幅值( $5 \times 10^5 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ )会使电磁波透射率随辐照时间的增长而迅速下降,这是因为电场幅值越大,等离子体从微波中吸收能量的速度越快、等离子体频率和碰撞频率的改变越迅速、使电磁波透射率的改变也就越快、最大透射时间出现的越早。但是过大的电场幅值会加速空气的电离,大幅提升电子密度,从而使等离子体频率急剧上升,最终使电磁波透射率迅速下降。

### 3 结 论

本文采用有限元分析方法对微波辐照高超声速飞行器表面等离子体鞘套的过程进行了仿真,对飞行高度 40 km,速度  $3150 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的飞行器表面等离子体鞘套分别使用电场幅值为  $5 \times 10^4$ 、 $1 \times 10^5$ 、 $2.5 \times 10^5$  和  $5 \times 10^5 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$  的微波进行 30 ns 的辐照,发现由于微波对带电粒子的加速和对中性粒子的电离,使等离子体频率和碰撞频率有不同程度的改变,进而影响等离子体的相对介电常数,最终使等离子体鞘套电磁波的透射率改变。通过仿真结果发现,电场幅值越大,监测频率电磁波透射率上升的速度越快、最大透射率出现的时间越早、短时间内对电磁波的透射率改善越显著,但是过大的电场幅值会使透射率随辐照时间增长而迅速下降。所以电场幅值不宜过大、辐照时间不宜过长,结合实际应用场景,选定合适的电场幅值和辐照时间可以显著提升电磁波的透射率,这为解决“黑障”问题提供了新的可能性。

### 参考文献:

- [1] 龚旻, 谭杰, 李大伟, 等. 临近空间高超声速飞行器黑障问题研究综述[J]. 宇航学报, 2018, 39(10): 1059-1070. (Gong Min, Tan Jie, Li Dawen, et al. Review of blackout problems of near space hypersonic vehicles[J]. *Journal of Astronautics*, 2018, 39(10): 1059-1070)
- [2] 徐茂格, 席文君. 近空间高超音速飞行器射频通信“黑障”研究[J]. 电讯技术, 2009, 49(10): 49-52. (Xu Maoge, Xi Wenjun. Study on blackout in near space hypersonic vehicle radio frequency communication[J]. *Telecommunication Engineering*, 2009, 49(10): 49-52)
- [3] Blazek J. Computational fluid dynamics: principles and applications[M]. 3rd ed. Britain: Butterworth-Heinemann, 2015: 20-57.
- [4] Ouyang Wenchong, Liu Yanming. Impact of ionization rate on the transmission of electromagnetic wave in realistic plasma[J]. *Physics of Plasmas*, 2020, 27: 033507.
- [5] Bian Zheng, Li Jiangting, Guo Lixin. Simulation and feature extraction of the dynamic electromagnetic scattering of a hypersonic vehicle covered with plasma sheath[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12: 2740.
- [6] 梁晓庚, 田宏亮. 临近空间高超声速飞行器发展现状及其防御问题分析[J]. 航空兵器, 2016(4): 3-10. (Liang Xiaogeng, Tian Hongliang. Analysis of the development status and the defense problem of near space hypersonic vehicle[J]. *Aero Weaponry*, 2016(4): 3-10)
- [7] 于哲峰, 刘佳琪, 刘连元, 等. 临近空间高超声速飞行器RCS特性研究[J]. 宇航学报, 2014, 35(6): 713-719. (Yu Zhefeng, Liu Jiaqi, Liu Lianyan, et al. Research on the RCS characteristics of hypersonic near space vehicle[J]. *Journal of Astronautics*, 35(6): 713-719)
- [8] 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. (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)
- [9] Ouyang Wenchong, Jin Tao, Wu Zhengwei, et al. Study of terahertz wave propagation in realistic plasma sheath for the whole reentry process[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2021, 49(1): 460-465.
- [10] Sternberg N, Smolyakov A I. Resonant transmission of electromagnetic waves in multilayer dense-plasma structures[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2009, 37(7): 1251-1260.
- [11] Hodara H. The use of magnetic fields in the elimination of the re-entry radio blackout[J]. *Proceedings of the IRE*, 1961, 49(12): 1825-1830.
- [12] Shashurin A, Zhuang T, Teel G, et al. Laboratory modeling of the plasma layer at hypersonic flight[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2014, 51(3): 838-846.
- [13] Keidar M, Kim M, Boyd I D. Electromagnetic reduction of plasma density during atmospheric reentry and hypersonic flights[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2008, 45(3): 445-453.
- [14] Li Ji, He Mang, Li Xiuping, et al. Multiphysics modeling of electromagnetic wave-hypersonic vehicle interactions under high-power microwave illumination: 2-D case[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(7): 3653-3664.
- [15] Li Zhigang, Yuan Zhongcai, Wang Jiachun, et al. Simulation of propagation of the HPM in the low-pressure argon plasma[J]. *Plasma Science and Technology*, 2017, 20: 025401.
- [16] Kundrapu M, Loverich J, Beckwith K, et al. Modeling radio communication blackout and blackout mitigation in hypersonic vehicles[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2015, 52(3): 853-862.
- [17] 韦毅. 高超飞行器等离子体鞘套的多场耦合数值研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017: 18-25. (Wei Y. Multi-field coupling numerical study on plasmasonic sheath of hypersonic flying craft[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017: 18-25.)