

电磁波在非均匀磁化的等离子体鞘套中传输特性研究

薄勇 赵青 罗先刚 刘颖 陈禹旭 刘建卫

Study on transmission characteristics of electromagnetic waves in inhomogeneously magnetized plasma sheath

Bo Yong Zhao Qing Luo Xian-Gang Liu Ying Chen Yu-Xu Liu Jian-Wei

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 65, 035201 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.035201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.035201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I3>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于极化旋转超表面的圆极化天线设计

[A circular polarization antenna designed based on the polarization conversion metasurface](#)

物理学报.2016, 65(2): 024101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.028901024101>

电磁波在非磁化等离子体中衰减效应的实验研究

[Experimental investigation on attenuation effects of electromagnetic waves in an unmagnetized plasma](#)

物理学报.2015, 64(5): 055201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.055201>

微波阶梯阻抗变换器低气压电晕放电粒子模拟

[Particle-in-cell simulation of corona discharge in low pressure in stepped impedance transformer](#)

物理学报.2013, 62(2): 025201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.025201>

太赫兹波在非磁化等离子体中的传输特性研究

[Studies of terahertz wave propagation in non-magnetized plasma](#)

物理学报.2012, 61(24): 245202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.245202>

等离子体中电磁波传输特性理论与实验研究

[Theoretical and experimental studies of electromagnetic wave transmission in plasma](#)

物理学报.2012, 61(15): 155203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.155203>

电磁波在非均匀磁化的等离子体鞘套中 传输特性研究*

薄勇^{1)†} 赵青¹⁾ 罗先刚²⁾ 刘颖¹⁾ 陈禹旭¹⁾ 刘建卫¹⁾

1)(电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

2)(中国科学院光电技术研究所, 微细加工光学技术国家重点实验室, 成都 610209)

(2015年8月14日收到; 2015年10月8日收到修改稿)

采用流场模拟软件模拟了十一组分RAM-II飞行器表面等离子体鞘套的分布, 提取了四个典型飞行高度、飞行状态下的等离子体鞘套的分布信息. 然后根据RAM-II飞行器等离子体鞘套数据, 利用计算色散介质的Z变换FDTD方法主要计算了电磁波在四个不同高度处等离子体鞘套中的功率反射系数和功率透射系数. 此外, 根据目前可以做出的磁场强度的大小, 对四个不同高度下的非均匀等离子体鞘套层按距飞行器表面的距离进行相应的非均匀磁化. 由于左旋极化波和右旋极化波在磁化等离子体中的传输特性不同, 最后对比了左旋极化波、右旋极化波在非磁化和磁化情况下的传输特性, 对飞行器导航通信磁窗天线的设计给出建议.

关键词: 等离子体鞘层, 非均匀磁化, 左右旋圆极化波

PACS: 52.40.Db, 41.20.Jb, 52.25.Os

DOI: 10.7498/aps.65.035201

1 引言

当超高声速飞行器以10马赫以上的速度穿越大气层时, 由于与空气摩擦, 在飞行器表面会形成一层等离子体鞘套, 鞘套的出现会对通信的电磁波进行衰减, 造成通信中断. 磁开窗效应作为抑制黑障效应的一种有效手段一直是专家们研究的热点. 国外早就有很多学者对此进行研究. 1996年, 俄罗斯学者Petrin^[1]利用大量的线圈产生了最高1.2 T磁场用于研究左右旋极化波在均匀等离子体在非均匀磁化条件下的传输特性, 仿真发现了右旋极化波存在回旋共振吸收. 国内学者也对电磁波在等离子体中的传输做了大量的研究^[2-4], 郑灵等^[5]利用激波管产生等离子体, 实验观察了不同频率的电磁波在等离子体中的传输特性的变化, 实验证明提高电磁波频率确实可以有效地解决黑障问题. 杨敏

等^[6]通过理论和实验手段研究了时变等离子体对通信电磁信号的影响, 证明时变等离子体会对电波幅度和相位造成寄生调制效应.

关于电磁波在磁化等离子体中传播的研究, 刘少斌等^[7,8]先后利用多种时域有限差分(FDTD)算法对磁化等离子体进行研究, 研究了多种不同的FDTD算法如何在各向异性色散介质中实现, 所假定的磁场和等离子体都是均匀的, 而实际鞘套的分布情况和实际磁场强度的分布情况是不均匀的, 但能定性地看出左右旋极化波在磁化等离子体中传输特性的不同. 杨利霞等^[9]利用有限差分方法对导体表面均匀磁化的均匀等离子体涂覆材料的电磁散射特性进行了深入研究, 而且还对等离子体的时变特性对电磁散射的影响进行了仿真研究. 2008年, 美国密歇根大学的Minkwan Kim和华盛顿大学的Michael Keidar利用商用软件研究了电场和均匀磁场正交分布情况下, 电磁波在非均匀等

* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2011AA7022016)、国家自然科学基金(批准号: 11275045)和四川省科技支撑计划(立项编号: 2013GZ01333)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: boyong_boyong@163.com

离子体中的衰减情况^[10]. 但以上研究者用于仿真研究的等离子体都没有体现飞行器等离子体鞘套的流体特性. 2014年, Kundrapu和Loverich^[11]利用软件USim仿真了飞行器的流场分布, 并观察了平面波在飞行器流场中的传输, 发现所用的电磁波无法穿透等离子体鞘层, 但引入磁场后, 平面波可以以等离子体哨声波的形式穿过等离子体鞘层. 本文在总结前人研究的基础上, 在以下方面做了改进: 1) 先利用流场仿真软件得到REM-II在四个典型飞行状态下的等离子体流场分布; 2) 利用非均匀磁场对等离子体鞘层进行非均匀磁化; 3) 用Z变换时域有限差分算法计算了电磁波在非均匀等离子体非均匀磁化的RAM-II鞘套中的传输特性, 对比左右圆旋极化波在不同高度下的传输特性, 对飞行器通信天线的设计提出一些建议.

2 RAMC-II飞行器等离子体流场计算

20世纪60年代到70年代, 为了研究“黑障”现象的机理, 提出缓解及抑制“黑障”现象的办法, 美国国家航空航天局(NASA)进行了大量的飞行试验, 特别是RAMC系列飞行试验, 在世界范围内具有重要的参考价值和实践意义.

在RAMC系列飞行试验中, NASA对此飞行器周围的等离子体进行了测量. RAMC-II飞行器分别在鼻锥、身部及尾部安装了四个测量天线, 每个天线都可以处于四个不同的工作频率, 测量得到通信天线安装位置处等离子体密度范围约在 10^{10} — $10^{13}/\text{cm}^3$.

以RAMC-II飞行器为模型, 在其飞行轨道上选取典型高度, 对RAMC-II飞行器超高速等

离子体流场进行计算和仿真, 得到RAMC-II飞行器周围流场的等离子体密度分布云图、压强分布云图、密度分布云图及马赫数分布云图等. RAMC-II是钝锥模型, 总长度为1.295 m, 头部半径为0.1524 m, 半锥角为 9° . 模型及网格划分如图1所示, 对飞行器头部及紧靠飞行器壁面网格进行了加密处理.

在计算RAMC-II飞行器周围等离子体流场分布时, 依据给定轨道的当地压强与当地温度来设定边界条件, 并将飞行器壁面设为无滑移恒温壁面, 壁面温度为1100 K. 四个典型高度的等离子体流场模拟结果如下.

高度一: $H = 74.68$ km, 等离子体流场计算结果如图2所示.

计算条件: 来流温度 $T_\infty = 210.3$ K, 来流压强 $P_\infty = 2.5$ Pa, 飞行速度 $v = 7.65$ km/s, 飞行攻角 $\theta = 0^\circ$.

如图2所示, 当飞行器在 $H = 74.68$ km时, 其飞行速度约为24 Ma, 周围等离子体流场最高压强为2200 Pa, 周围等离子体流场最高温度为11000 K, 周围等离子体流场最高电子密度为 $7 \times 10^{13}/\text{cm}^3$.

高度二: $H = 50.29$ km, 等离子体流场计算结果如图3所示.

计算条件: 来流温度 $T_\infty = 270.6$ K, 来流压强 $P_\infty = 79.8$ Pa, 飞行速度 $v = 7.62$ km/s, 飞行攻角 $\theta = 0^\circ$.

如图3所示, 当飞行器在 $H = 50.29$ km时, 其飞行速度约为22Ma, 周围等离子体流场最高压强为35000 Pa, 周围等离子体流场最高温度为11000 K, 周围等离子体流场最高电子密度为 $6 \times 10^{14}/\text{cm}^3$.

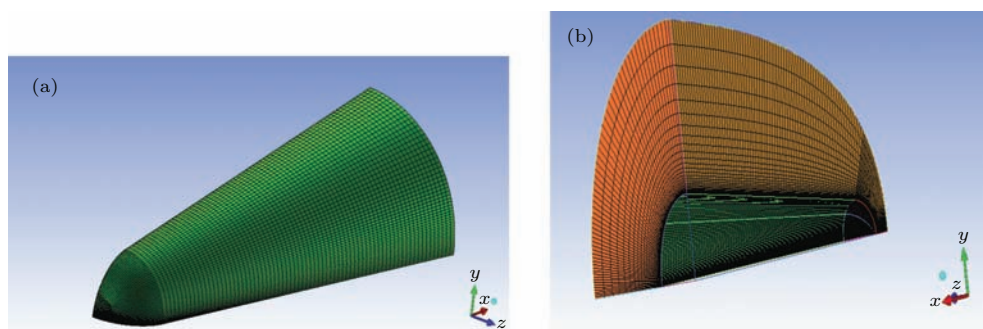


图1 (网刊彩色) RAMC-II飞行器网格划分 (a) RAMC-II壁面网格; (b) RAMC-II流场网格

Fig. 1. (color online) RAM-II aircraft grid partitioning: (a) RAM-II wall grid partitioning; (b) RAM-II flow field grid partitioning.

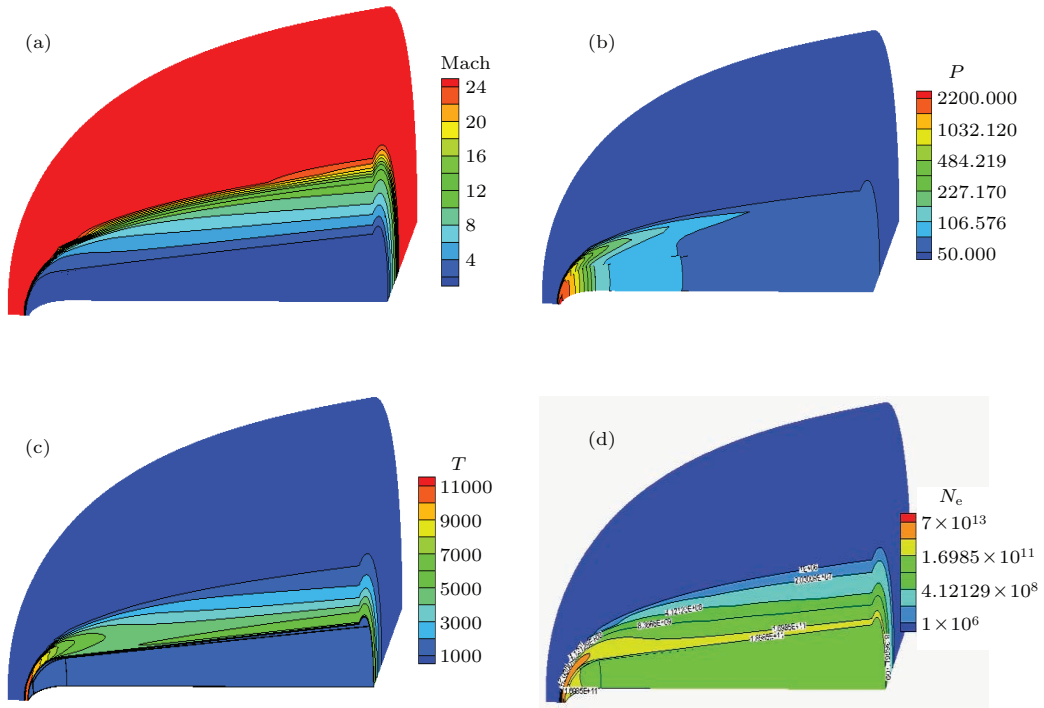


图2 (网刊彩色) 高度为 74.68 km 时飞行器周围流场分布云图 (a) 马赫数分布云图; (b) 压强分布云图; (c) 温度分布云图; (d) 电子密度分布云图

Fig. 2. (color online) Aircraft flow field distribution when altitude is 74.68 km: (a) Mach number distribution; (b) pressure distribution; (c) temperature distribution; (d) electronic density distribution.

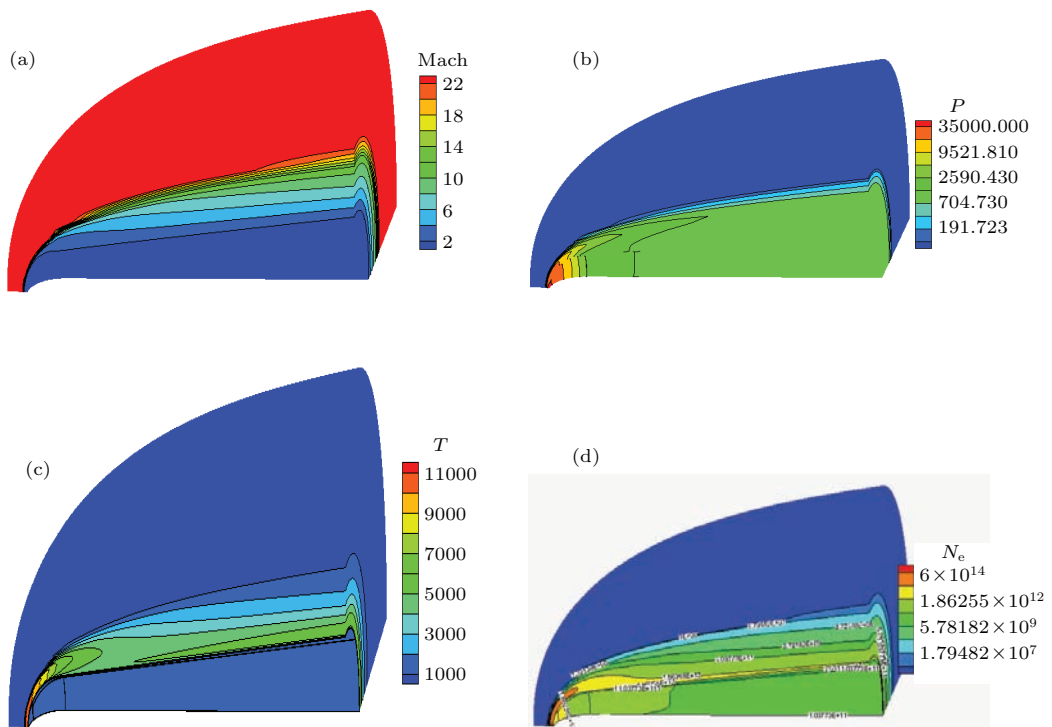


图3 (网刊彩色) 高度为 50.29 km 时飞行器周围流场分布云图 (a) 马赫数分布云图; (b) 压强分布云图; (c) 温度分布云图; (d) 电子密度分布云图

Fig. 3. (color online) Aircraft flow field distribution when altitude is 50.29 km: (a) Mach number distribution; (b) pressure distribution; (c) temperature distribution; (d) electronic density distribution.

高度三: $H = 32.00$ km, 等离子体流场计算结果如图4所示.

计算条件: 来流温度 $T_\infty = 228.5$ K, 来流压强 $P_\infty = 889.1$ Pa, 飞行速度 $v = 6.8$ km/s, 飞行攻角 $\theta = 0^\circ$.

如图4所示, 当飞行器在 $H = 32.00$ km时, 其飞行速度约为 $20Ma$, 周围等离子体流场最高压强为 550000 Pa, 周围等离子体流场最高温度为 13000 K, 周围等离子体流场最高电子密度为 $3 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ (出现在飞行器的头部).

高度四: $H = 25.91$ km, 等离子体流场计算结果如图5所示.

计算条件: 来流温度 $T_\infty = 222.5$ K, 来流压强 $P_\infty = 2188.38$ Pa, 飞行速度 $v = 5.61$ km/s, 飞行攻角 $\theta = 0^\circ$.

如图5所示, 当飞行器在 $H = 25.91$ km时, 其飞行速度约为 $18Ma$, 周围等离子体流场最高压强为 1×10^6 Pa, 周围等离子体流场最高温度为 9000 K, 周围等离子体流场最高电子密度为 $2.4 \times 10^{16}/\text{cm}^3$.

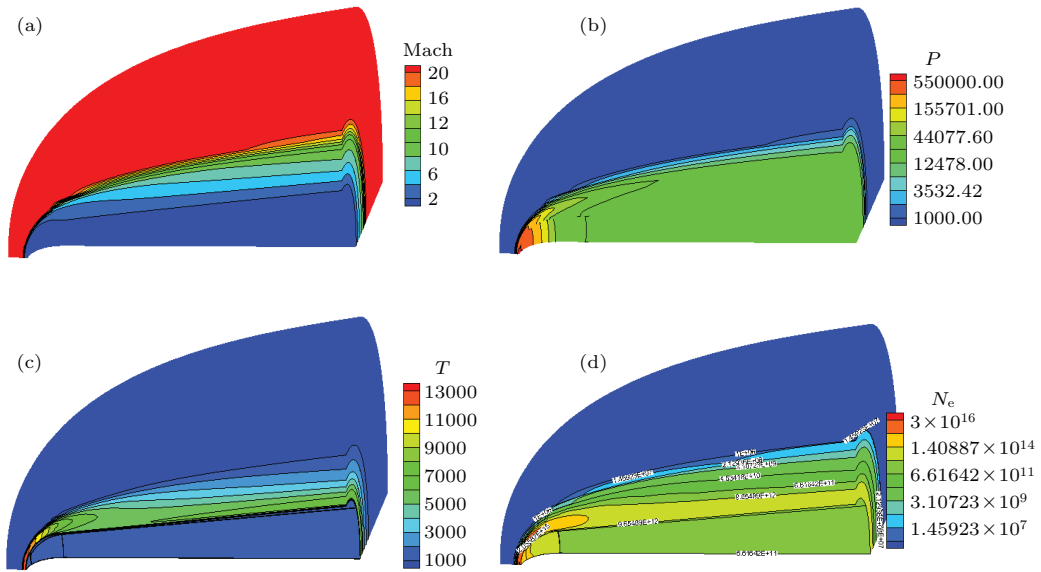


图4 (网刊彩色) 高度为 32.00 km时飞行器周围流场分布云图 (a) 马赫数分布云图; (b) 压强分布云图; (c) 温度分布云图; (d) 电子密度分布云图

Fig. 4. (color online) Aircraft flow field distribution when altitude is 32.00 km: (a) Mach number distribution; (b) pressure distribution; (c) temperature distribution; (d) electronic density distribution.

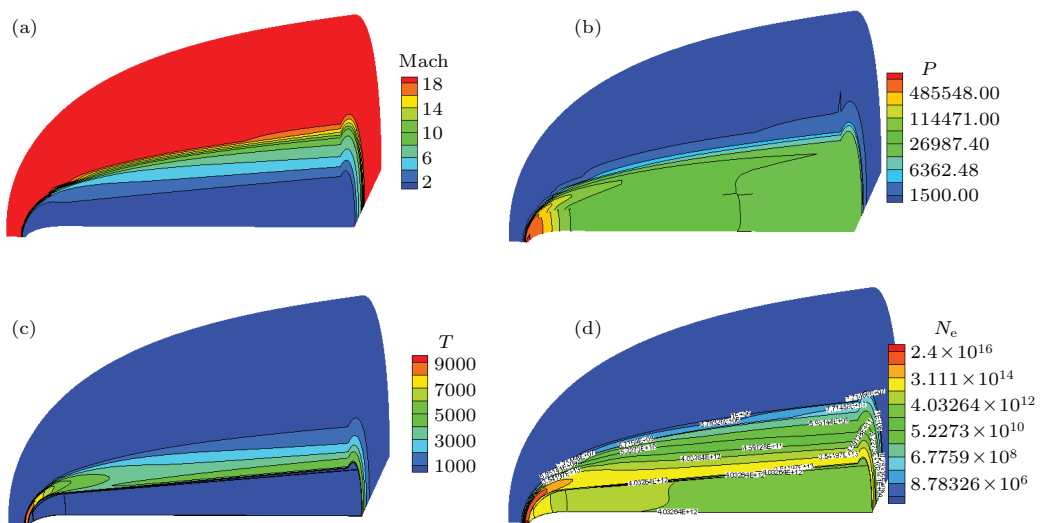


图5 (网刊彩色) 高度为 25.91 km时飞行器周围流场分布云图 (a) 马赫数分布云图; (b) 压强分布云图; (c) 温度分布云图; (d) 电子密度分布云图

Fig. 5. (color online) Aircraft flow field distribution when altitude is 25.91 km: (a) Mach number distribution; (b) pressure distribution; (c) temperature distribution; (d) electronic density distribution.

综合图2、图3、图4和图5所示可知:

1) $H = 74.68\text{--}25.91\text{ km}$, 随飞行高度下降, 流场电子数密度先升高后降低, 在 $H = 32.0\text{ km}$ 时, 等离子体流场电子密度取最大值; 全轨道电子密度峰值约为 $3 \times 10^{16}/\text{cm}^3$; 超高速飞行器周围等离子体电子密度分布是多场耦合效应的整体表现, 即与来流马赫数、局部温度有关, 也与空气稀薄程度有关, 而且与飞行器外形也密切相关; 流场中电子数密度最高区域主要集中在头部激波层内, 最大值能达到 $10^{14}\text{--}10^{16}/\text{cm}^3$; 沿流动方向, 电子数密度逐步降低, 尾部电子数密度可达 $10^{10}\text{--}10^{13}/\text{cm}^3$;

2) 由压强数据云图可知流场最大压强随着高度的升高而降低, 这是由于当飞行器飞行状态的高度增加时, 虽然速度有所改变, 但是空气本身的压强降低为飞行器压强流场变化的主导因素;

3) 由温度数据云图可知最大温度随着高度的变化先增加后减小, 这是由于当飞行器飞行状态的高度增加时, 一方面飞行器的飞行速度急剧增加, 由于飞行速度的增加导致过激波后的整体流场温度升高; 另一方面由于压强和温度场的共同作用, 空气发生一系列的化学反应, 反应中吸放热对流场周围的温度也有一定的影响.

3 电磁波在非均匀磁化等离子体中的传输特性 Z 变换 FDTD 法

由于磁化等离子体是一种各向异性色散介质, 采用 Z 变换 FDTD 对在磁化等离子体中的电磁波进行计算. 电磁波垂直入射鞘套等离子体中的传输模型, 如图6所示. 电磁波沿 z 轴正向传播, 电场沿 x 轴方向, 磁场沿 y 轴方向 (垂直纸面向外), 磁感应强度 B 的方向沿正 z 方向, 等离子体鞘套厚度为 d .

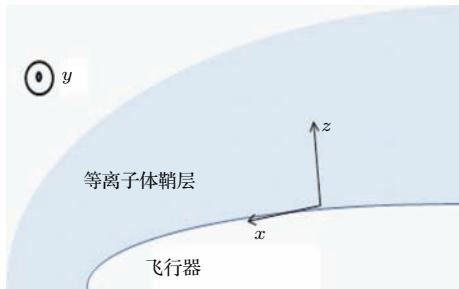


图6 电磁波在非均匀磁化鞘套等离子体传播的物理模型
Fig. 6. Physics model of electromagnetic wave propagation in non-uniform magnetization plasma sheath.

E 为电磁波电场强度, H 为磁场强度, B 为磁感应强度, D 为电位移矢量, μ_0 为真空磁导率, ε_0 为真空介电常数, ε_r 为等离子体相对介电常数.

$$E' = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} E, \quad (1)$$

$$D' = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0}} D. \quad (2)$$

则麦克斯韦方程组变为

$$\nabla \times H = \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \frac{\partial D'}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\nabla \times D' = -\varepsilon_r \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (4)$$

$$D'(\omega) = \varepsilon_r E'(\omega). \quad (5)$$

由于电场为 x 轴方向, 磁场为 y 轴方向, 对 (3) 式和 (4) 式采用中心差分并在时间和空间上进行离散, 得到

$$\begin{aligned} & D'_x{}^{n+\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right) \\ &= D'_x{}^{n-\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right) \\ & - \frac{\Delta t}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \left\{ \frac{1}{\Delta z} \left[H_y^n \left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) \right. \right. \\ & \left. \left. - H_y^n \left(i + \frac{1}{2}, j, k - \frac{1}{2} \right) \right] \right\}, \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & H_y^{n+1} \left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) \\ &= H_y^n \left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) \\ & - \frac{\Delta t}{\varepsilon_r \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \left\{ \frac{1}{\Delta z} \left[D'_x{}^{n+\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right) \right. \right. \\ & \left. \left. - D'_x{}^{n+\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j, k - 1 \right) \right] \right\}. \quad (7) \end{aligned}$$

其中, Δz 和 Δt 分别为空间步长和时间步长.

等离子体被磁化以后变成各向异性介质, 在磁化等离子体中传播的波为左旋圆极化波 (LCP) 和右旋圆极化波 (RCP), 磁化等离子体的相对介电常数如 (8) 式, 其中 RCP 和 LCP 的相对介电常数表示不同, 其中“+”表示左旋极化的相对介电常数, “-”表示右旋极化的相对介电常数,

$$\varepsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 \left[\left(1 - j \frac{f_v}{\omega} \right) \pm \frac{\omega_{ce}}{\omega} \right]}, \quad (8)$$

其中, $\omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\varepsilon_0 m_e}}$ 为等离子体振荡角频率, f_v 为等离子体中电子和中性粒子之间的碰撞频率,

ω 为电磁波角频率, n_e 为等离子体电子密度, m_e 和 e 分别为电子质量和电量, $\omega_{ce} = eB/m_e$ 为电子回旋频率. 令 $a = \omega_0^2/(\omega_{ce} - jf_v)$, $\phi = \exp(-[f_v + j\omega_{ce}]\Delta t)$, 可推出以下迭代公式:

$$\mathbf{E}'_x(n) = \mathbf{D}'_x(n) - \mathbf{S}'_x(n-1), \quad (9)$$

$$\mathbf{S}(n) = (1 + \phi)\mathbf{S}(n-1) - \phi\mathbf{S}(n-2) - ja\Delta t(1 - \phi)\mathbf{E}'_x(n). \quad (10)$$

由 (6), (7) 和 (9), (10) 式在时间上进行迭代, 并由傅里叶变换, 就可以得到电磁波的反射率 R 、透过率 T 和衰减 Att :

$$R = \left| \frac{E_r}{E_i} \right|^2, \quad (11)$$

$$T = \left| \frac{E_t}{E_i} \right|^2, \quad (12)$$

$$Att = -10 \lg T, \quad (13)$$

其中, E_i , E_r , E_t 分别为入射、反射和透射电磁波电场振幅的稳态解. 仿真中所用的输入信号为正弦调制的零阶高斯信号, 高斯信号的表达式如下:

$$E_x^n(n) = E_0 \exp \left[- \left(\frac{n - n_0}{n_{\text{decay}}} \right)^2 \right] \times \sin [2\pi f_0 (n - n_0) \Delta t], \quad (14)$$

脉冲的中心位置在 $n_0\Delta t$, 脉冲经过 $n_{\text{decay}}\Delta t$ 时, 衰减为 E_0/e , f_0 为调制频率.

因为实际鞘层中应用的磁场是非均匀的, 所以在计算模型中, 采用非均匀的磁场来磁化等离子体鞘层, 这样更符合实际情况. 非均匀磁场的强度随距飞行器表面距离的变化关系如图 7 所示.

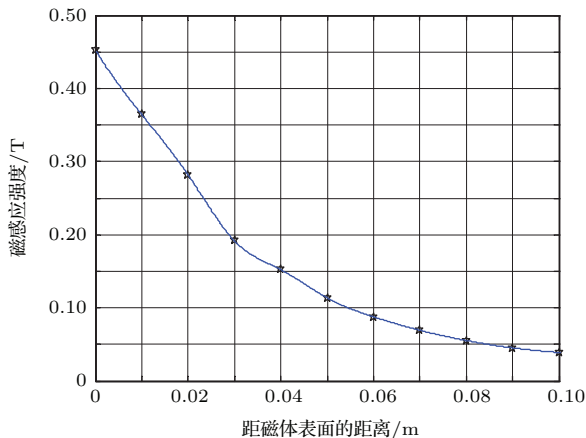


图 7 实际测得的磁场强度随距离的分布
Fig. 7. The actual measured magnetic field strength curve under different distance.

4 结果分析

对 RAMC-II 飞行器周围等离子体流场, 在垂直于飞行器壁面方向取等离子体密度, 取值示意图见图 8. RAMC-II 超高速飞行器三个通讯天线安装位置分别在 $x = 97.41, 80.62, 106.78$ cm. 现提取 S 波段天线位置处 ($x = 106.78$ cm) 的等离子体鞘层信息用于仿真计算.

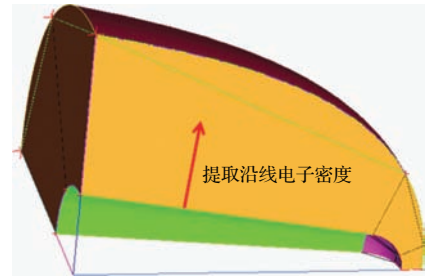


图 8 等离子体密度取值示意图

Fig. 8. Electron density value extraction schematic diagram.

提取四个高度的等离子体密度随距飞行器壁面距离的变化曲线如图 9(a) 所示, 为方便观察, 等离子体电子密度用指数坐标表示. 可以看出等离子体电子密度峰值一般分布在距壁面一定距离 d 处, 且随着飞行器高度的降低, 距离 d 逐渐减小, 最终 d 趋于 0, 电子密度峰值位置紧贴壁面. 根据文献 [12] 等离子体中电子与中性粒子碰撞频率公式如 (15) 式, n_m 为等离子体体中性粒子的密度 (单位是 cm^{-3}), 由气体状态方程决定. 图 9(b) 是四个飞行状态下对应的碰撞频率与壁面距离的关系曲线, 可以看出, 碰撞频率也存在一个峰值, 这是由于温度在对应的位置出现了峰值, 而后碰撞频率趋于稳定是由于温度和中性粒子在流场中相应的层流中趋于稳定. 此外, 高度越高对应的碰撞频率越低, 原因是随着高度的增加, 空气压强逐渐减小, 空气越来越稀薄, 中性粒子密度越来越小. 在 25.91 km 处, 碰撞峰值超过了 20 GHz, 而在 74.68 km 处碰撞频率仅有数十兆赫兹.

$$v_{em} = 6.3 \times 10^{-9} n_m \sqrt{\frac{T}{300}}. \quad (15)$$

当左右旋圆极化电磁波传播在磁化等离子体中传播时, 利用第 2 节中永磁体的磁场强度来磁化等离子体鞘套, 观察左旋极化波和右旋极化波在等离子体鞘套中的传输特性, 并与无磁场条件下的电磁波的传输特性进行对比.

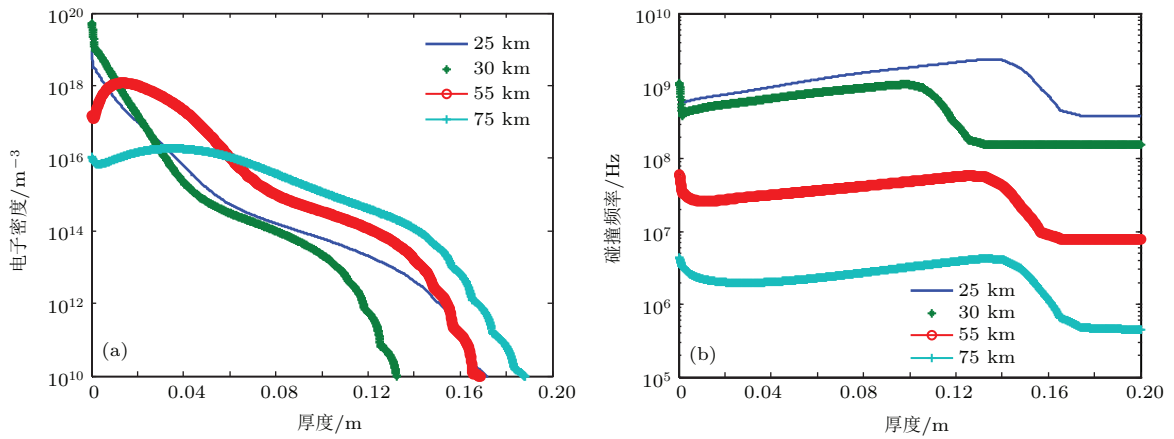


图9 (网刊彩色) 四个高度电子密度 (a) 和碰撞频率 (b) 与飞行器壁面垂直距离的变化曲线

Fig. 9. (color online) Electron density (a) and collision frequency (b) curves of four altitudes under the change of the vertical distance from aircraft wall.

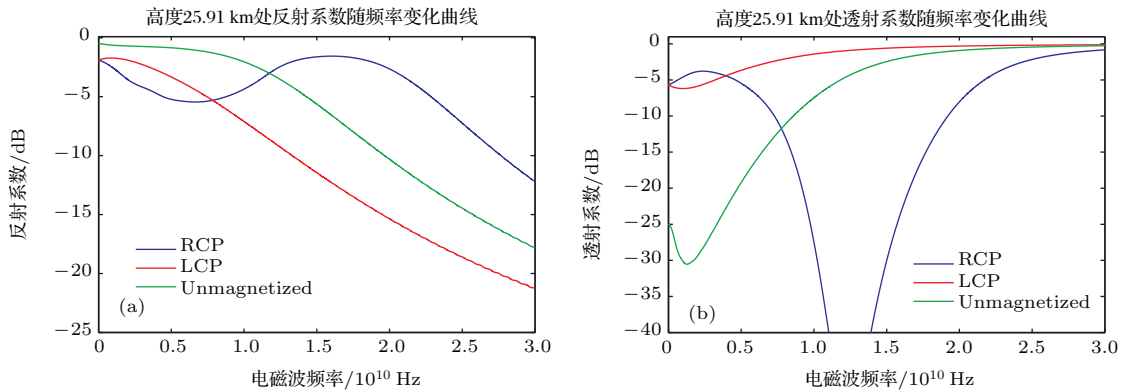


图10 (网刊彩色) 高度 25.91 km 处左右旋圆极化波的频率与反射系数与透射系数的关系

Fig. 10. (color online) Transmission coefficient and the reflection coefficient curve of LCP and RCP waves when altitude is 25.91 km.

图 10(a) 和图 10(b) 是高度 25.91 km 处的功率反射系数和功率透射系数, 透射系数即是去掉反射和吸收衰减后的功率透射. 从图中可以看出, 如果没有永磁体的情况下, L, S 波段的电磁波几乎全被反射, 透射电磁波的能量衰减得很严重, 如果按透射波能量低于 -30 dB 作为进入黑障的评判标准, 那么飞行器上 1.5 GHz 和 2.4 GHz 的通讯电波衰减分别达到了 30.34 dB 和 28.2 dB, 处于中断的边缘附近, 通信质量难以保证. 磁化以后, 右旋极化波在 L, S 波段 (1—4 GHz) 的反射系数和透射系数均优于左旋极化波, 无论是左旋极化还是右旋极化, 在 L, S 波段的传输特性都比非磁化情况下优越. 但随着电磁波频率升高到 X 波段 (8—12 GHz), 右旋圆极化波透射功率急剧减小, 甚至比非磁化情况下的透射系数还要低, 在 10.5—15 GHz 右旋圆极化波进入了通信中断. 左旋圆极化波在 L, S 频段的反射系数和透射系数与右旋极化波相比略差,

但随着左旋圆极化波频率升高到 C 波段以后传输性能逐渐优于右旋极化波, 并且不会出现右旋极化波那样的通信阻带, 尤其在 C 波段 (4—8 GHz) 和 X 波段, 左旋圆极化波相比于非磁化情况, 有较好的改善效果. 当频率足够高时, 非磁化与磁化的差别不明显, 此时可以不加磁体.

图 11(a) 和图 11(b) 是飞行器在高度 32 km 处的反射系数和透射系数曲线, 从透射系数曲线可以看出不加磁体的情况下, L, S 以及 C 波段的电磁波都进入了通信中断, 甚至 X 波段的一部分也进入了中断期, 加入磁体磁化后, 无论是哪一种旋向, 电磁波的衰减均比无磁体情况下减小很多, 右旋圆极化波在 L, S 以及 C 波段的透射系数比左旋极化波好得多, 在 1.5 GHz 和 2.4 GHz 处比左旋圆极化波分别高出 13 dB 和 16 dB. 但频率升高, 随着右旋极化波进入阻带, 左旋极化波的优势再度显现出来.

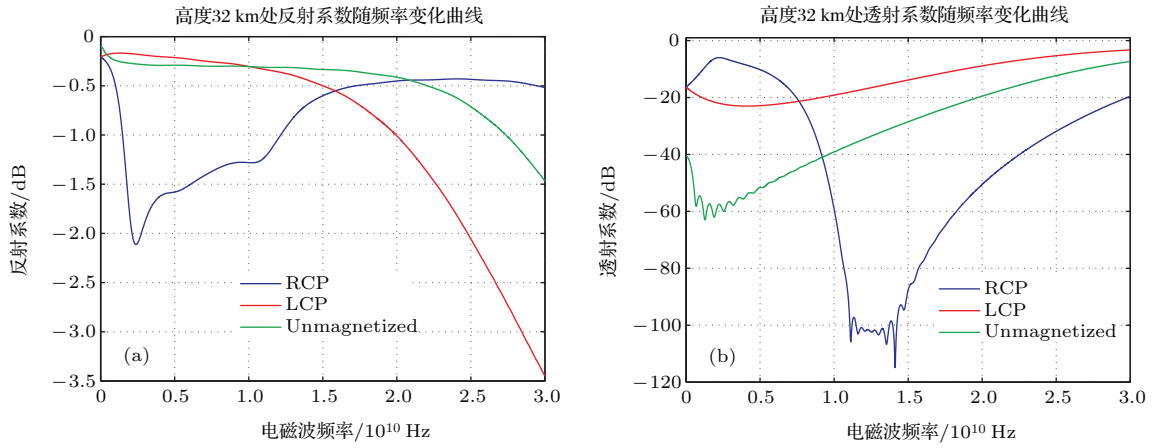


图 11 (网刊彩色) 高度 32 km 处左右旋圆极化波的频率与反射系数与透射系数的关系
 Fig. 11. (color online) Transmission coefficient and the reflection coefficient curve of LCP and RCP waves when altitude is 32 km.

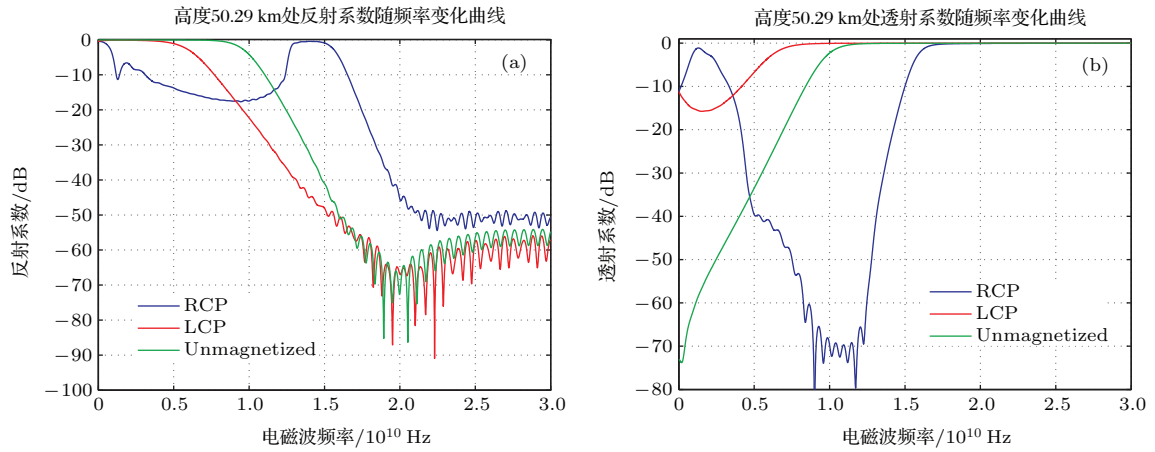


图 12 (网刊彩色) 高度 50.29 km 处左右旋圆极化波的频率与反射系数与透射系数的关系
 Fig. 12. (color online) Transmission coefficient and the reflection coefficient curve of LCP and RCP waves when altitude is 50.29 km.

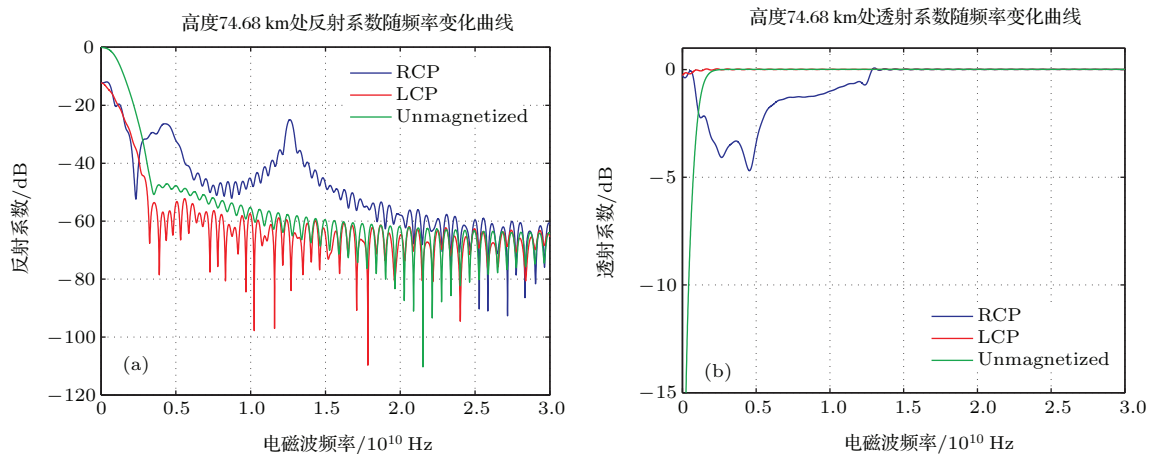


图 13 (网刊彩色) 高度 74.68 km 处左右旋圆极化波的频率与反射系数与透射系数的关系
 Fig. 13. (color online) Transmission coefficient and the reflection coefficient curve of LCP and RCP waves when altitude is 74.68 km.

图 12(a) 和图 12(b) 是飞行器在 50.29 km 处的反射系数和透射系数曲线. 在 L, S 波段的电磁波, 磁化下的传输特性好于非磁化, 其中右旋极化波在 L, S 频段传输性能比左旋要好. 1.5 GHz 和 2.4 GHz 右旋极化波比左旋极化波的透射系数分别高出 14.3 dB 和 11 dB.

图 13(a) 和图 13(b) 是飞行器在 74.68 km 处的反射系数和透射系数曲线. 由于高度较高, 空气比较稀薄, 等离子体电子密度、碰撞频率都较小, 当电磁波频率超过 1 GHz 后, 有无永磁体磁化的差别不太大, 透射系数的差别在 5 dB 以内. 右旋的结果相对左旋和非磁化要差一些.

5 结 论

1) 从仿真的角度来看, 加永磁体改善飞行器黑障区通信质量是有可能的, 但具体和工作电波的频率和飞行器周围等离子体鞘套的参数有关.

2) 加入永磁体磁化后, 一般来说, 在 L, S 频段右旋极化波的衰减小于左旋极化波, 两种旋向圆极化波都比无磁体情况下的衰减小, 从而有可能避免黑障现象. 当频率逐渐升高到 X 波段和 Ku 波段, 右旋极化波阻带出现, 在磁化等离子体中的衰减急剧增加. 此时左旋极化波的优势表现出来, 在 X, Ku 波段的衰减远小于右旋极化波和非磁化的电波. 当频率进一步提高到大于等离子鞘套电子密度峰值对应的 ω_p 时, 非磁化下的衰减和高于左旋向极化波的衰减但低于右旋极化波的衰减, 这相当于通过提高工作频率来抑制黑障现象, 此时如果飞行器天线采用右旋圆极化天线, 再用永磁体磁化, 效果反而变差.

3) 文中计算的沿正 z 方向传输的电磁波的传输特性, 传输方向和磁感应强度的方向一致, 如果波传播方向与磁感应强度 B 的方向相反, 考虑电子回旋频率变为 $\omega'_{ce} = -eB/m_e = -\omega_{ce}$, 则此时右旋极化波传输特性(功率反射系数与透射系数)变为图 10—图 13 中左旋的情况, 而此时左旋极化波的传输特性变成图 10—图 13 中右旋极化的情况. 考虑到永磁体的体积和重量, 飞行器不可能安装两个磁体, 而用超导线圈产生磁场的话, 又面临电磁兼容以及功耗重量的问题. 所以上述情况就对应了飞行器向控制台发射电磁信号还是接收来自控制台的电磁信号. 如果飞行器所用磁体磁场 B 方

向垂直壁面向外, 鉴于左右旋电磁波在各个频段的不同反射透射特性, 建议将天线设计成一种右旋发射、左旋接收的双圆极化天线, 这样可更好地接收 L, S 波段的电磁信号. 如果磁场 B 方向不是垂直向外而是向飞行器内部, 则天线旋向也做调换, 才能更好地利用 L, S 波段电磁波在黑障区通信.

4) 针对结论 3 中的情况, 如果工作电波的频率位于 C 波段或者 X 波段频率较低的频段, 当磁场 B 方向垂直飞行器壁面向外时, 设计天线是可采用左旋发射、右旋接收的双圆极化天线. 当磁场 B 垂直壁面向里时, 则可采用右旋发射、左旋接收双圆极化天线.

本文为了仿真验证磁场对飞行器通信中断的改善效果, 针对 RAMC-II 飞行器四个高度的等离子体流场模型, 提取出每个高度处的电子密度、温度、压强、马赫数; 仿真中用来磁化等离子体鞘套的磁场是非均匀磁场, 和实际情况更加类似; 利用专门针对色散介质 Z 变换的时域有限差分方法计算各个频段电磁波在磁化等离子体鞘套中的传输特性, 并对比了磁化下的左右旋圆极化波和非磁化情况下电磁波的反射和透射情况; 最后针对加永磁体来抑制黑障这种方法, 提出一种飞行器通信导航天线设计的理论模型. 下一步工作拟利用实验验证上述左右旋圆极化波通过等离子体的衰减与磁场方向的关系.

参考文献

- [1] Petrin A B 2000 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **28** 3
- [2] Zheng L 2013 *Ph. D. Dissertation* (Chengdu: UESTC) (in Chinese) [郑灵 2013 博士学位论文 (成都: 电子科技大学)]
- [3] Zhong S Y, Liu S 2009 *Chin. J. Comput. Phys.* **26** 3 (in Chinese) [钟双英, 刘崧 2009 计算物理 **26** 3]
- [4] Xia X R, Huang Y, Yin C Y 2009 *Aerospace Shanghai* **1** 12 (in Chinese) [夏新仁, 黄冶, 尹成友 2009 上海航天 **1** 12]
- [5] Zheng L, Zhao Q, Luo X G, Ma P, Liu S Z 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 155203 (in Chinese) [郑灵, 赵青, 罗先刚, 马平, 刘述章 2012 物理学报 **61** 155203]
- [6] Yang M, Li X P, Liu Y M, Shi L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 085201 (in Chinese) [杨敏, 李小平, 刘彦明, 石磊 2014 物理学报 **63** 085201]
- [7] Liu S, Zhong S, Liu S B 2009 *Plasma Sci. Technol.* **11** 14
- [8] Liu S B, Zhou T, Liu M L 2008 *J. Syst. Engineer. Electron.* **19** 15

- [9] Yang L X, Shen D H, Shi W D 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 104101 (in Chinese) [杨利霞, 沈丹华, 施卫东 2013 物理学报 **62** 104101]
- [10] Kim M, Keidar M 2010 *J. Spacecraft and Rockets* **47** 1
- [11] Kundrap M, Loveric J H 2014 *Submitted to the Proceedings of ICOPS/BEAMS*
- [12] Yuan Z C, Shi J M 2004 *Nuclear Fusion and Plasma Physics* **22** 2 (in Chinese) [袁忠才, 时家明 2004 核聚变与等离子体物理 **22** 2]

Study on transmission characteristics of electromagnetic waves in inhomogeneously magnetized plasma sheath*

Bo Yong^{1)†} Zhao Qing¹⁾ Luo Xian-Gang²⁾ Liu Ying¹⁾ Chen Yu-Xu¹⁾ Liu Jian-Wei¹⁾

1) (School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

2) (State Key Laboratory of Optical Technologies for Microfabrication, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

(Received 14 August 2015; revised manuscript received 8 October 2015)

Abstract

We use simulation software to simulate the plasma sheath flow field of RAM-II at four different altitudes, and get the distribution information of electron density, temperature, and Mach number of plasma sheath at four typical flight altitudes. On this basis, the paper analyzes the cause of the distribution at each altitude. Secondly, Z transform FDTD formula is used to solve the electromagnetic problem in the dispersed medium. According to RAM-II aircraft plasma sheath data, we calculate the power transmission coefficient and power reflectance coefficient of L, S-band electromagnetic waves by Z transform FDTD method at each altitude. Because of the strength of magnetic field used in actual aircraft cannot be uniform, in this calculation the plasma sheath and the magnetic induction are both non-uniform. The transmission characteristics are also different between left-hand circularly polarized waves and right-hand circularly polarized wave in the magnetized plasma. Finally, the paper gives some theoretical design advise about communication antenna for supersonic speed aircraft.

Keywords: plasma sheath, non-uniform magnetization, left-hand circularly polarized and right-hand circularly polarized wave

PACS: 52.40.Db, 41.20.Jb, 52.25.Os

DOI: 10.7498/aps.65.035201

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2011AA7022016), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11275045), and the Scientific Research Foundation of the Education Department of Sichuan Province, China (Grant No. 2013GZ01333).

† Corresponding author. E-mail: boyong_boyong@163.com