

非均匀等离子体覆盖下目标流场的透射特性研究

牛骏^{1,2}, 赵志钦¹, 杨伟¹, 陈祝明¹, 刘昱朗¹

(1. 电子科技大学电子工程学院 成都 611731; 2. 杜克大学电子与计算机工程系 美国 北卡罗莱纳州 达勒姆 27708)

【摘要】分析等离子体对电磁波的透射特性时,一般可以对等离子体鞘套进行分层处理,根据各层的媒质特性大致确定测控信号相位和幅度的变化,该方法通常只能处理空间结构分布相对简单的媒质,无法精确地分析复杂绕流流场。针对覆盖于目标的非均匀等离子体鞘套,采用色散媒质的时域有限差分方法较为准确地计算和分析了等离子体鞘套对不同频段测控信号的透射特性的影响。该方法具有计算精度高、可移植性强等优点;同时,所得到的数值分析结果对实际工程应用有一定的参考价值。

关键词 色散媒质; 时域有限差分方法; 等离子体鞘套; 透射特性

中图分类号 TN99

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.02.006

Approach to the Transmission Characteristics of the Flow Fields of Targets Covered with Heterogeneous Plasma

NIU Jun^{1,2}, ZHAO Zhi-qin¹, YANG Wei¹, CHEN Zhu-ming¹, and LIU Yu-lang¹

(1. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731;

2. Department of Electrical and Computer Engineering, Duke University Durham NC27708 USA)

Abstract For the analysis of near-field transmission characters of the hypersonic plasma sheath, layered media treatment is often applied to simplify the problem. However, it can only deal with the media with relatively simple distributions. For complex hypersonic flow field of real applications, this treatment will bring significant errors. In this paper, a frequency-dependent finite-difference time-domain method is utilized to accurately analyze the transmission characters of heterogeneous plasma sheath. Meanwhile, based on the numerical results, the basic tendency of the transmission process is further explored, which will also be valuable for practical applications.

Key words: dispersive media; frequency-dependent finite-difference time-domain; plasma sheath; transmission characters

再入飞行器以高超声速再入大气层时,空气中离子与飞行器隔热罩相互作用产生等离子体鞘套^[1]。由于等离子体鞘套对电磁波的反射、折射、吸收及其媒质本身的色散特性,等离子体鞘套的存在将极大地增加再入目标的测控难度^[2]。针对该问题,国内外许多学者和研究机构对等离子体鞘套的物理组成和电磁特性进行了一系列的研究和探讨。但国内针对再入目标电磁特性的理论研究起步较晚,研究所采用的物理模型相对简单,且多集中在再入目标远场电磁特性(如RCS特性)的分析。而现有的关于测控信号透射特性的研究既有解析方法(如可用WKB方法计算以任意角入射的电磁波在不均匀等离子体中的衰减^[3]),也有分层近似的方法计算电磁波的衰减情况和相位变化情况^[4-6]。解析方法存在两条限制条

件^[7];分层近似方法过度依赖于绕流流场的分层处理,而真实流场的结构通常是极其复杂的,一般的分层近似将带来极大的误差。事实上,对于实际电磁特性尚未知晓的等离子体鞘套及组合目标,甚至很难对上述方法所得结果的误差进行定量评估。

本文针对典型飞行状态下的再入目标对应的高复杂等离子体鞘套模型,采用色散媒质的时域有限差分方法(frequency-dependent finite-difference time-domain, (FD)²TD)较为精确地计算和分析典型状态下绕流流场对不同频段电磁波的透射的影响。FDTD方法可以处理复杂形状目标和非均匀介质物体的电磁散射问题^[8],这样不仅完全回避了对复杂绕流流场的分层处理问题,而且具有良好的可移植性和较高的精度。对于处理色散媒质的算法,目前常见的

收稿日期: 2012-08-01; 修回日期: 2013-12-18

基金项目: 部级预研基金

作者简介: 牛骏(1990-),男,博士生,主要从事计算电磁学方面的研究。

是PLRC-FDTD、JEC-FDTD、ADE-FDTD, SO-FDTD^[9]。本文采用了PLRC-FDTD。最后, 本文根据仿真结果总结了典型状态下等离子鞘套对不同频段再入目标测控信号的影响。

1 再入流场与等离子鞘套建模策略

1.1 再入流场控制方程组

在高速飞行器再入的过程中, 随着大气密度的增加, 飞行器头部前方将产生激波。由于激波压缩和大气的粘度作用, 飞行器的动能大量转化为热能, 使激波和飞行器之间的大气被加热到数千摄氏度, 导致气体发生电离, 于是在飞行器周围形成等离子体。与此同时, 飞行器表面在高温烧灼下也将释放出碱金属元素, 导致飞行器表面的电子密度大大增加。图1为再入过程中等离子体鞘套结构示意图。

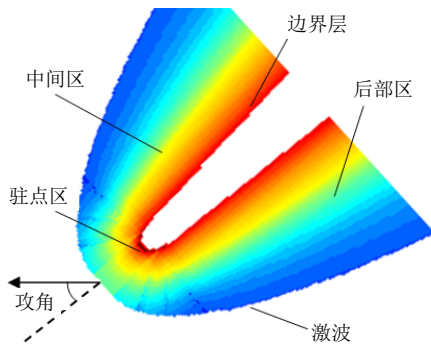


图1 再入等离子体鞘套

在直角坐标系下, 控制高超声速热化学流动的Navier-Stokes方程组为^[6]:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial z} = \frac{\partial \mathbf{E}_v}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}_v}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{G}_v}{\partial z} + \mathbf{S} \quad (1)$$

式中, \mathbf{U} 为守恒变量组成的矢量; \mathbf{E} 、 \mathbf{F} 、 \mathbf{G} 分别为直角坐标系下 x 、 y 、 z 方向上的对流通量矢量; \mathbf{E}_v 、 \mathbf{F}_v 、 \mathbf{G}_v 为 x 、 y 、 z 方向上的粘性通量项矢量; \mathbf{S} 为化学反应和振动能量源项矢量。

1.2 等离子体电磁建模

对无外加磁场的冷等离子体, 忽略离子作用影响^[10], 得到非磁化冷等离子体的相对介电常数为:

$$\varepsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} - j \frac{\nu}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \quad (2)$$

电极化率为:

$$\chi = -\frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} - j \frac{\nu_a}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \quad (3)$$

式中, ω 为电磁波角频率; ω_p 为等离子体角频率; ν 为等离子碰撞频率。

众所周知, 等离子体的基本特性参数为等离子

体频率和碰撞频率, 其他诸如电导率、相对介电常数的一系列电磁参数均可由此确定出来。但是, 这两个参数本身既难以通过实验的手段直接测出, 也很难在实验过程中直接加以控制。为能够进一步对比相关实验数据以确保本模型的精确程度, 可用已有的经验公式, 将电子浓度和流体温度作为基本参数。二者的变换关系为:

$$f_p = 8974 \sqrt{n_e} \quad (4)$$

$$\nu = 2.3 \times 10^{-14} \omega_p^2 T \quad (5)$$

式中, n_e 是电子数密度; f_p 和 ω_p 分别是等离子体是频率和角频率; ν 是等离子体碰撞频率。

2 适于非磁化等离子体的PLRC-FDTD方法

在非磁化等离子体中, Maxwell 旋度方程组为:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (6)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (7)$$

同时, 由替换关系可知, $\mathbf{B}(\omega) = \mu \mathbf{H}(\omega)$, $\mathbf{D}(\omega) = \varepsilon \mathbf{E}(\omega)$, μ 、 ε 分别为等离子体的磁导率和介电常数。非磁化等离子体的磁导率 $\mu = \mu_0$ 。

PLRC-FDTD认为在每一时间步中, 电场值是线性变化的; 而之前的RC-FDTD认为在每一时间步中, 电场值是定值。因而在电场变化剧烈的区域, PLRC-FDTD的精度要远高于RC-FDTD。

在时域内, 电位移矢量与电场强度不再是线性关系, 而有^[6,11]:

$$\mathbf{D}(t) = \varepsilon_\infty \varepsilon_0 \mathbf{E}(t) + \varepsilon_0 \int_0^t \mathbf{E}(t-\tau) \chi(\tau) d\tau \quad (8a)$$

$$\mathbf{D}(\omega) = \varepsilon(\omega) \cdot \mathbf{E}(\omega) \quad (8b)$$

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_0 [\varepsilon_\infty + \chi(\omega)] \quad (8c)$$

$$\chi(\omega) = \frac{\omega_p^2}{\omega(j\nu - \omega)} \quad (8d)$$

式中, ε_0 为真空介电常数; ε_∞ 为 $\omega \rightarrow \infty$ 时等离子体的相对介电常数; ω 为入射波角频率; $\chi(\tau)$ 为等离子体电极化率, 当 $\omega \rightarrow \infty$ 时, $\varepsilon_\infty = 1$ 。

在非磁化等离子体中, 离子和电子有其各自的电极化率。但由于离子质量远大于电子质量, 因而可忽略离子的运动效应。结合式(3)可得时域内的非磁化等离子体电极化率为:

$$\chi(\tau) = \frac{\omega_p^2}{\nu} [1 - \exp(-\nu\tau)] U(\tau) \quad (9)$$

式中, $U(\tau)$ 为单位阶跃函数。

由式(8)和式(9)得:

$$D_i^{n+1} - D_i^n = \epsilon_0(1 + \chi^0 - \xi^0)E_i^{n+1} - \epsilon_0(1 - \xi^0)E_i^n - \epsilon_0 \sum_{m=0}^{n-1} \left[E_i^{n-m}(\chi^m - \chi^{m+1}) + (E_i^{n-m} - E_i^{n+1-m})(\xi^m - \xi^{m+1}) \right] \quad (10)$$

式中,

$$\begin{aligned} \chi^m &= \int_{m\Delta t}^{(m+1)\Delta t} \chi(\tau) d\tau = \\ \frac{\omega_p^2}{v} \Delta t - \frac{\omega_p^2}{v} [1 - \exp(-v\Delta t)] \exp(-mv\Delta t) \\ \xi^m &= \frac{1}{\Delta t} \int_{m\Delta t}^{(m+1)\Delta t} \chi(\tau)(\tau - m\Delta t) d\tau = \\ \frac{\omega_p^2 \Delta t}{2v} + \frac{\omega_p^2}{v^3 \Delta t} [1 - (1 + v\Delta t) \exp(-v\Delta t)] \exp(-mv\Delta t) \end{aligned}$$

由式(8)~(10)得等离子体中电场的迭代方程:

$$E_i^{n+1} = \frac{1 - \xi^0}{1 + \chi^0 - \xi^0} E_i^n + \frac{\Delta t}{\epsilon_0(1 + \chi^0 - \xi^0)} (\nabla \times H)_i^{n+1/2} + \frac{1}{1 + \chi^0 - \xi^0} \left\{ \sum_{m=0}^{n-1} \left[E_i^{n-m}(\chi^m - \chi^{m+1}) + (E_i^{n-m} - E_i^{n+1-m})(\xi^m - \xi^{m+1}) \right] \right\} \quad (11)$$

磁场的迭代方程与非磁性介质完全相同。

3 算法验证

为验证算法的正确性, 首先考察电磁波穿透厚度为 50 cm 的均匀等离子体平板时的衰减情况, 并将数值结果与解析结果对比。分别选取等离子体平板的电子数密度、碰撞频率为 $n_e = 1.0 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$, $\nu = 2 \times 10^{10} \text{ rad/s}$, 图 2 给出了数值结果与解析解的对比情况。可以看出, 二者吻合好好, 证明了本文所编写程序的准确性。

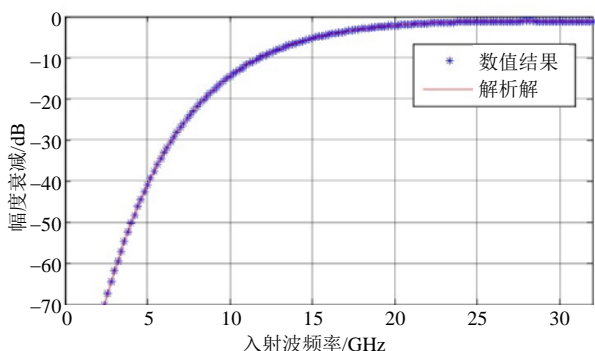


图 2 电磁波穿透均匀等离子平板时的衰减情况

4 典型目标的电磁仿真分析

以非均匀等离子体覆盖下的典型飞行器为研究对象, 分析入射波频率、飞行马赫数、飞行高度对测控信号透射特性的影响。

钝锥体是绝大多数再入飞行器的经典外形设计, 本文对这类目标选取图3中的考察点, 分别计算典型飞行状态下的等离子鞘套对不同频段电磁波的透射特性。仿真时, 钝锥体头部半径 $R=0.05 \text{ m}$, 半锥角 8° , 总长 0.5 m 。此外, 目标的绕流流场与飞行器的高度、速度等再入条件相关。在本文的仿真中, 首先考察不同飞行状态下电磁波穿透等离子体鞘套时的衰减特性。

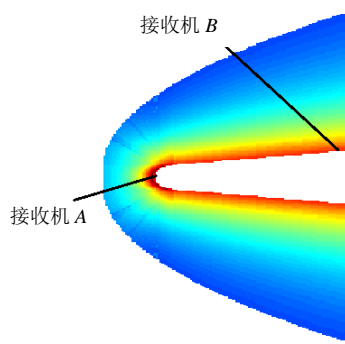


图 3 飞行器接收机位置设置图

图4为不同状态下等离子鞘套对电磁波的衰减特性。由图4可以看出, 在HF/VHF/UHF/L/S/C/X/Ku/Ka频段内, 随着飞行高度的降低、速度的增加, 电磁波穿透等离子体时的损耗愈发增大。但是, 随着电磁波频率的升高, 其衰减在总体上逐渐缓和。

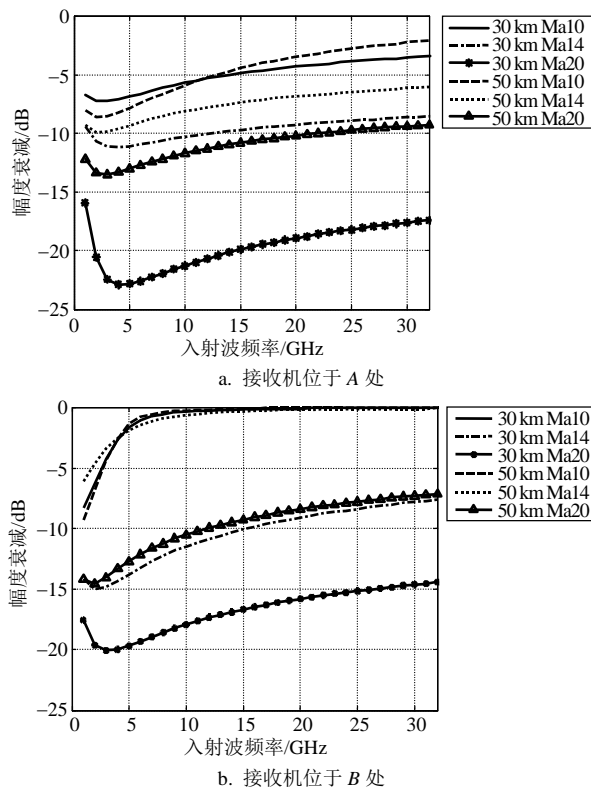


图 4 不同状态下等离子鞘套对电磁波的衰减特性

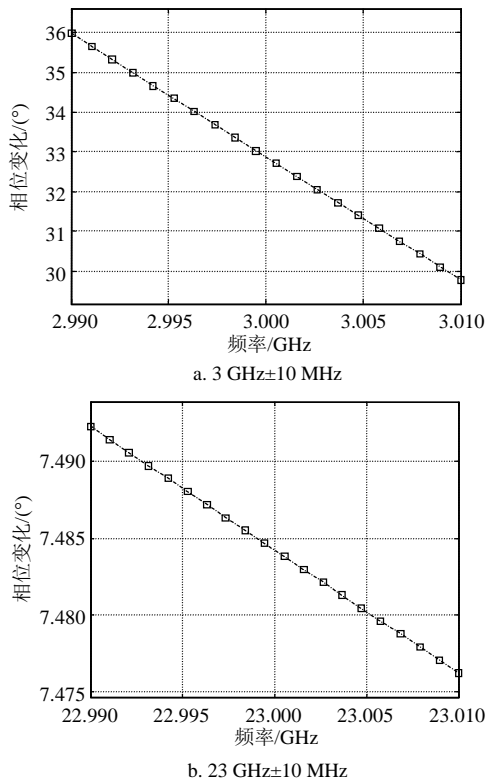


图5 30 km、20 Ma 状态下等离子鞘套对不同工作频段内电磁波的影响(接收机位于A处)

图5为不同频率下等离子鞘套对电磁波的相位改变特性。可以看出,随着频率的升高,相位变化越来越小。

根据以上仿真结果,可以看出等离子体的存在导致电磁波出现了明显的色散现象。总的来看,随着通信频率的升高,电磁波的幅度衰减逐渐减弱,相位变化逐渐减小,等离子体对电磁波的透射逐渐呈现透明现象;此外,对于窄带高频信号(20 MHz带宽),等离子体的色散效应相对稳定,这使得再入目标的测控成为可能。

5 结论

本文通过数值仿真技术,针对实际工程中的复杂目标绕流流场,分析了不同飞行状态下再入目标的测控性能。通过采用PLRC-FDTD算法对测控信号穿透等离子鞘套的物理过程进行数值模拟,探究了典型状态下等离子体鞘套对不同频段的电磁波的透射特性。计算结果表明,等离子体鞘套的存在使得不同频率的电磁波出现了明显的色散现象,这对机动目标的测控带来了极大挑战。但是,在窄带内,高频电磁波的色散较为稳定。同时,仿真结果表明,随着电磁波工作频率的提高,等离子体对其透射逐渐呈现透明特性,电磁波的幅度衰减和相位延迟均明显缓和。

参考文献

- [1] MATHER D E, PASQUAL J M, SILLENCE J P. Radio frequency (RF) blackout during hypersonic reentry[C]//13th AIAA International Space Planes and Hypersonics Systems and Technologies. [S.l.]: [s.n.], 2005.
- [2] RYBAK J P, CHRUCHILL R J. Progress in reentry communications[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic systems, 1971, 7(5): 879-893.
- [3] 刘少斌, 莫锦军, 袁乃昌. 电磁波在不均匀磁化等离子体中的吸收[J]. 电子学报, 2003, 31(2): 372-375.
LIU Shao-bin, MO Jin-jun, YUAN Nai-chang. Research on the absorption of EM wave by inhomogeneous magnetized plasmas[J]. Chinese Journal of Electronics 2003, 31(2): 372-375.
- [4] 钟育民, 谡明, 卢满宏, 等. 无线电波在再入等离子体中传输的衰减模型及仿真[J]. 验证遥测遥控, 2010, 31(2): 1-6.
ZHONG Yu-min, CHEN Min, LU Man-hong, et al. Attenuation model and simulation validation of electromagnetic wave transmission in reentry plasma[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2010, 31(2): 1-6.
- [5] 马兆国, 高正平, 毕兆亿. 高速飞行器再入时微波通过等离子体鞘套的传输特性[J]. 战术导弹控制技术, 2007(1): 1-4.
MA Zhao-guo, GAO Zheng-ping, BI Zhao-yi. Transmission properties of microwaves through plasma sheath in the reentry of high-speed aircraft[J]. Control Technology of Tactical Missile, 2007(1): 1-4.
- [6] 常雨. 超声速/高超声速等离子体流场数值模拟及其电磁特性研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
CHANG Yu. Numerical research on supersonic/hypersonic plasma flow and its electromagnetic characteristics[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.
- [7] BOYD T J M, SANDERSON J J. The physics of plasmas[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003.
- [8] 郭斌. 高频电磁波在大气等离子体层中的传播和吸收的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
GUO Bin. Studies on power absorption of high frequency electromagnetic waves in partially ionized plasma layer under atmosphere conditions[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.
- [9] AHMAD A A, ALSUNAIIDI M A, TIEN N G, et al. A simple FDTD algorithm for simulating EM-wave propagation in general dispersive anisotropic material[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(3): 1321-1326.
- [10] TAFLOVE A, HAGNESS S C. Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method[M]. 3rd ed. London, UK: Artech House Publishers, 2005.
- [11] KELLEY D F, LUEBBERS R J. Piecewise linear recursive convolution for dispersive media using FDTD[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1996, 44(6): 792-797.