

临近空间等离子体鞘套对太赫兹波传播特性分析

蒋金¹, 陈长兴¹, 任晓岳¹, 周天翔¹, 陈婷², 周弘毅¹

(1.空军工程大学理学院,西安,710051;2.西安邮电大学电子工程学院,西安,710121)

摘要 针对高超声速飞行器在临近空间巡航时出现的通信“黑障”问题,根据RAM C提供的飞行试验数据,建立一维等离子体鞘套模型,通过数值计算分析了等离子体与太赫兹波的相互作用机理,并从等离子体厚度、等离子体电子密度、等离子体碰撞频率和太赫兹波入射角等条件得到了太赫兹波在等离子体鞘套中的传输特性曲线。仿真结果表明:把太赫兹波段作为临近空间平台通信,有利于解决“黑障”问题,其中在大气窗口0.22 THz处的衰减均在30 dB以下。此论证结果可为临近空间平台设计的高超声速飞行器选用通信频段时提供参考。

关键词 临近空间;等离子体鞘套;太赫兹波

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.05.003

中图分类号 V271;TN011 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)05-0011-04

Analysis of Terahertz Wave Propagation in Near Space Plasma Sheath

JIANG Jin¹, CHEN Changxing¹, REN Xiaoyue¹, ZHOU Tianxiang¹, CHEN Ting², ZHOU Hongyi¹

(1. Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. Dept. of Electron Engineering, Xi'an University of Posts Telecommunication, Xi'an 710121, China)

Abstract: Aimed at the problem that the communication blackout usually happens when a hypersonic vehicle voyage closes to the space, a model of plasma sheath is established according to the data provided by radio attenuation measurement C (RAM C) voyage experiment. Through numerical calculation, the principle of interaction between plasma and terahertz wave is analyzed, and the properties of terahertz wave propagation in plasma sheath are obtained by changing the parameters of plasma including plasma thickness, plasma density, plasma collision frequency and terahertz wave incident angle. The simulation shows that taking the terahertz frequency band as communication frequency band in near space, this is advantageous to the solution of communication blackout problem in the value of attenuation less than 30 dB at the atmospheric window of 0.22 THz. The result can be used as reference for design of communication platform in the near space.

Key words: near space; plasma sheath; terahertz wave

飞行器以高超声速在临近空间层巡航时,飞行器表面会包覆一层等离子鞘套,引起飞行器天线极化和相位发生特性改变、信号的衰减和相位失真等问题,严重时将导致电磁波通信中断,出现通信“黑

障”问题^[1-5]。国内外很早就开展了一系列的飞行试验和地面仿真,以此通过研究等离子体鞘套与电磁波相互作用机理、影响和应对方法,探索出减缓或消除再入黑障问题的技术途径。由于微波器件的成

收稿日期:2015-05-06

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2014JM8344);空军工程大学理学院研究生创新基金资助项目(LXY2015YJS06)

作者简介:蒋金(1990—),男,安徽宿州人,硕士生,主要从事临近空间通信技术研究,E-mail:johnking61@163.com

引用格式:蒋金,陈长兴,任晓岳,等.临近空间等离子体鞘套对太赫兹波传播特性分析[J].空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(5):11-14. JIANG Jin, CHEN Changxing, REN Xiaoyue, et al. Analysis of Terahertz Wave Propagation in Near Space Plasma Sheath[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(5): 11-14.

熟,现在大都用微波频段研究解决临近空间的通信问题^[6-7]。NASA 兰利研究中心(LRC)在临近空间开展的无线电衰减测量 C(RAM C)飞行试验,发现提高射频工作频率可有效缩短在临近空间通信中断的时间和高度^[8]。文献[9]分析了一维均匀等离子体中太赫兹波的传输特性,通过仿真和实验验证了当频率达到太赫兹波段并增加时,反射率减小,衰减减小,可以解决高超声速飞行器在临近空间的通信黑障问题。文献[10]从理论上分析了太赫兹波穿透等离子体鞘套的可行性,并提出一套太赫兹通信系统的概念,用来解决飞行器在临近空间高超声速巡航时的实时测控问题。

本文主要参考 NASA 开展的 RAM C 飞行试验数据设置等离子体厚度 h 、等离子体电子密度 n_e 、等离子体碰撞频率 f_{en} 和太赫兹入射角 θ 等参数,研究等离子体鞘套对太赫兹波的传输性能影响。

1 理论分析及物理模型的建立

1.1 一维均匀等离子体模型

电磁波穿过等离子体过程中发生反射、折射、吸收和衰减。根据不同介质中的电磁波传输理论,由 Maxwell 方程组可推出在空气中电磁波为:

$$\begin{cases} E_{0x} = \frac{k_z}{\omega\epsilon} H_0 (e^{-jk_z z} - r e^{jk_z z}) e^{-jk_x x} \\ E_{0z} = -\frac{k_x}{\omega\epsilon} H_0 (e^{-jk_z z} + r e^{jk_z z}) e^{-jk_x x} \\ H_{0y} = H_0 (e^{-jk_z z} + r e^{jk_z z}) e^{-jk_x x} \end{cases} \quad (1)$$

式中: r 为电磁波反射系数; H_0 为入射电磁波的振幅; $k_x = k_0 \sin\theta_0$ 为 k_0 在 x 轴方向的分量; $k_z = k_0 \cos\theta_0$ 为 k_0 在 z 轴方向上的分量; θ_0 为电磁波入射角; $k_0 = \omega/c$ 为空气中电磁波的波数, ω 为电磁波角频率, c 为光速。

等离子体中电磁波为:

$$\begin{cases} E_{1x} = \frac{k_{1z}}{\omega\epsilon} (H_{1r} e^{-jk_{1z} z} - H_{1t} e^{jk_{1z} z}) e^{-jk_{1x} x} \\ E_{1z} = -\frac{k_{1x}}{\omega\epsilon} (H_{1r} e^{-jk_{1z} z} + H_{1t} e^{jk_{1z} z}) e^{-jk_{1x} x} \\ H_{0y} = (H_{1r} e^{-jk_{1z} z} + H_{1t} e^{jk_{1z} z}) e^{-jk_{1x} x} \end{cases} \quad (2)$$

式中: H_{1r} 和 H_{1t} 分别为等离子体中反射波、透射波磁场的振幅; k_{1x} 为 k_1 在 x 轴上的分量; k_{1z} 为 k_1 在 z 轴上的分量; $k_1 = k_0 \sqrt{\epsilon_r}$ 为等离子体中电磁波波数; ϵ_r 为非磁化等离子体的相对介电常数,其中:

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu_{en}^2} - j \frac{\nu}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu_{en}^2} \quad (3)$$

$$\omega_p = \sqrt{n_e e^2 / \epsilon_0 m_e} \quad (4)$$

穿透等离子体鞘套后的空气中电磁波为:

$$\begin{cases} E_{2x} = \frac{k_z}{\omega\epsilon} H_0 t e^{-jk_z z} e^{-jk_x x} \\ E_{2z} = -\frac{k_x}{\omega\epsilon} H_0 t e^{-jk_z z} e^{-jk_x x} \\ H_{2y} = H_0 t e^{-jk_z z} e^{-jk_x x} \end{cases} \quad (5)$$

式中: t 为电磁波的透射系数。

由介质分界面上电磁波的切向分量满足连续性边界条件:

$$\begin{cases} E_{0x} = E_{1x}, & E_{0z} = E_{1z}, & H_{0z} = H_{1z} (z=0) \\ E_{1x} = E_{2x}, & E_{1z} = E_{2z}, & H_{1z} = H_{2z} (z=h) \end{cases} \quad (6)$$

由式(1)、式(2)、式(5)联合式(6)可得电磁波的反射系数 r 和透射系数 t 的表达式:

$$\begin{cases} r = \frac{k_z^2 - k_{1z}^2}{k_z^2 + k_{1z}^2 + 2k_z k_{1z} \coth(jk_{1z} h)} \\ t = \frac{2k_z k_{1z} e^{jk_z h}}{(k_z^2 + k_{1z}^2) \sinh(jk_{1z} h) + 2k_z k_{1z} \cosh(jk_{1z} h)} \end{cases} \quad (7)$$

电磁波的反射率 R 和透射率 T 和衰减值得 Att 为:

$$R = |r|^2, \quad T = |t|^2, \quad \text{Att} = -10 \lg T \quad (8)$$

1.2 一维非均匀等离子体模型

大量文献数据表明,20~45 km 处左右飞行器表面等离子体鞘套电子密度近似为指数分布,在 45 km 以上飞行器表面的等离子体鞘套电子密度近似为高斯分布。取临近空间中高空分析,等离子体电子密度近似服从正态分布:

$$n_e(z) = \begin{cases} n_{e\max} \exp[\alpha_1 (z - z_0)^2] & (z_1 \leq z \leq z_0) \\ n_{e\max} \exp[-\alpha_2 (z - z_0)^2] & (z_0 \leq z \leq z_2) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $n_{e\max}$ 为等离子体最大电子密度; α_1 和 α_2 为描述正态分布的常数; $z_2 - z_1$ 为等离子体厚度。

此时在等离子体中的电磁波为:

$$\partial^2 E_y / \partial z^2 + (k_1^2 - k_0^2 \sin^2 \theta) E_y = 0 \quad (10)$$

求解式(10)得:

$$E_y = E_0 \exp \left[j \int_0^z \sqrt{k_1^2 - k_0^2 \sin^2 \theta} dz \right] \quad (11)$$

当电磁波穿透等离子体鞘套时,功率衰减为:

$$P_2 = P_0 \exp \left[-2 \text{Im} \left(\int_0^z \sqrt{k_1^2 - k_0^2 \sin^2 \theta} dz \right) \right] \quad (12)$$

式中: P_0 为入射波功率; P_2 为透射波功率。则透射率 T 和衰减值得 Att 为:

$$T = P_2 / P_0, \quad \text{Att} = -10 \lg T \quad (13)$$

根据上述建立的 2 个等离子体模型,通过数值模拟与分析,来研究等离子体鞘套对太赫兹波传输特性的影响。

2 太赫兹波在均匀等离子体中数值模拟分析

2.1 等离子体厚度对太赫兹波传输特性分析

取 $n_e = 10^{12} / \text{cm}^3$, $f_{en} = 0.2 \text{ THz}$, 电磁波垂直

入射,此时太赫兹波在等离子体中随厚度变化的传播特性见图 1。

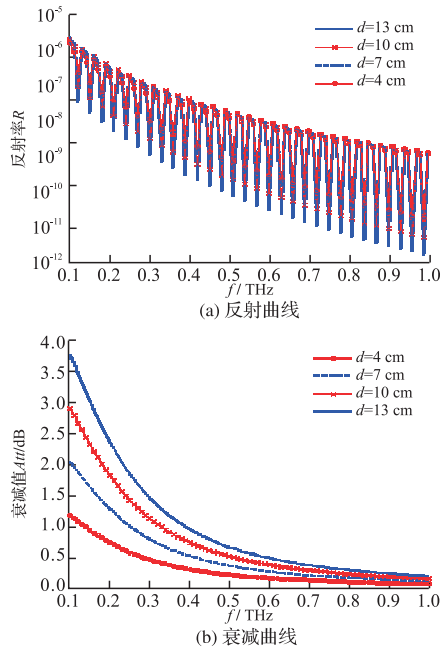


图 1 不同等离子体厚度对应太赫兹波的传输特性
Fig.1 Terahertz wave propagation with variation of plasma thickness

由于太赫兹波反射率大小是与等离子体厚度无关的函数,且太赫兹波在界面处多次反射,见图 1 (a),随着等离子体厚度增加,太赫兹波在等离子体中的反射曲线基本不变,并出现周期性振荡,振荡周期为 0.025 THz,且太赫兹波段反射率均在 10^{-6} 以下,其中位于大气窗口 0.22 THz 处反射率约为 5×10^{-6} 。而后随着太赫兹波频率增加,太赫兹波透过等离子体的惯性增加,反射率逐渐减小。由图 1(b)得,太赫兹波段在 $h \leq 13$ cm 以下衰减均小于 4 dB。由于等离子体厚度的增加使得电磁波在等离子体鞘套中作用距离增大,透过率减小,衰减增大。当太赫兹波频率增加时,等离子体中电子从快速变化的电场吸收能量减小,从而太赫兹波衰减减小。

2.2 等离子体电子密度对太赫兹波传输特性分析

取 $h = 8$ cm, $f_{em} = 0.2$ THz,电磁波垂直入射,此时太赫兹波在等离子体中随电子密度变化的传播特性见图 2。

由于等离子体中电子数增多,电磁波与带电粒子等碰撞几率增大,电子从电磁波中吸收更多的能量加速自身无规则运动,使得电磁波透过率减小,衰减也增大。从图 2(a)中可看出,随着等离子体电子密度的增加,太赫兹波反射率增加,出现的周期性振荡越平缓;随着太赫兹波频率的增加,周期性振荡越剧烈,反射率下降。从图 2(b)可看出,随着太赫兹波频率增加时,衰减减小,随着等离子体密度增加,

太赫兹波衰减增大。当 $n_e \leq 10^{13}$ /cm³ 时,太赫兹波衰减值均在 25 dB 以下,其中在大气窗口 0.22 THz 处,最大衰减仅为 20 dB。

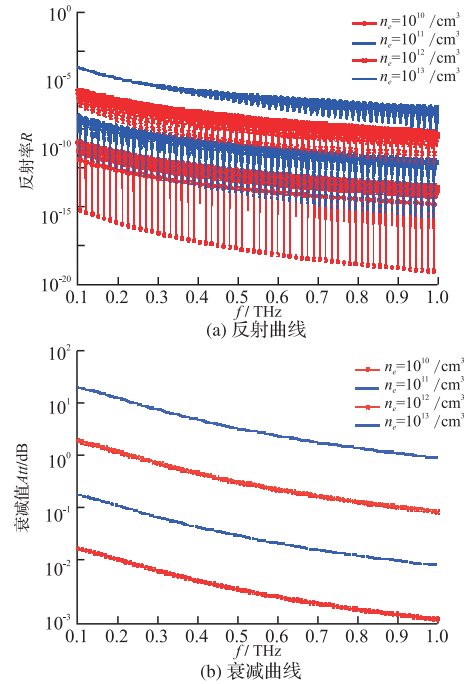


图 2 不同等离子体电子密度对应太赫兹波的传输特性
Fig.2 Terahertz wave propagation with variation of plasma density

2.3 等离子体碰撞频率对太赫兹波传输特性分析

取 $n_e = 10^{12}$ /cm³, $h = 8$ cm,电磁波垂直入射时,太赫兹波在等离子体中随等离子体碰撞频率变化的传播特性见图 3。

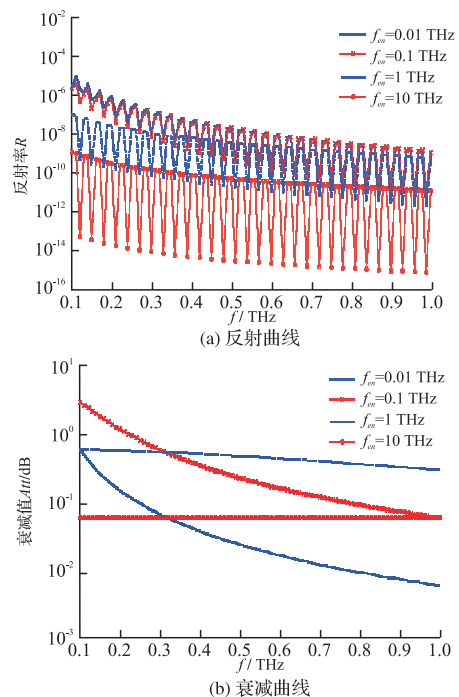


图 3 不同等离子体碰撞频率对应太赫兹波的传输特性
Fig.3 Terahertz wave propagation with variation of plasma collision frequency

等离子体碰撞频率越大,等离子体中的电子与中性粒子相互作用运动越剧烈,从而使得电子从电磁波中吸收能量减小,电磁波透过率增加,衰减减小。如图3(a)所示,随着等离子体碰撞频率的增加,太赫兹波反射率减小,出现的周期性振荡越剧烈;随着太赫兹波频率增加,反射率减小,出现的周期性震荡也越剧烈。如图3(b)所示,随着等离子体碰撞频率增加,太赫兹波衰减先减小后增加;随着太赫兹波频率增加,衰减减小;当碰撞频率 $f_{en} \geq 0.01$ THz 时,在大气窗口 0.22 THz 处最大衰减为 0.8 dB。

3 太赫兹波在非均匀等离子体中数值模拟分析

设置等离子体碰撞频率 $f_{en} = 0.2$ THz, 此时太赫兹波在等离子体中随太赫兹波入射角变化的传播特性见图4。

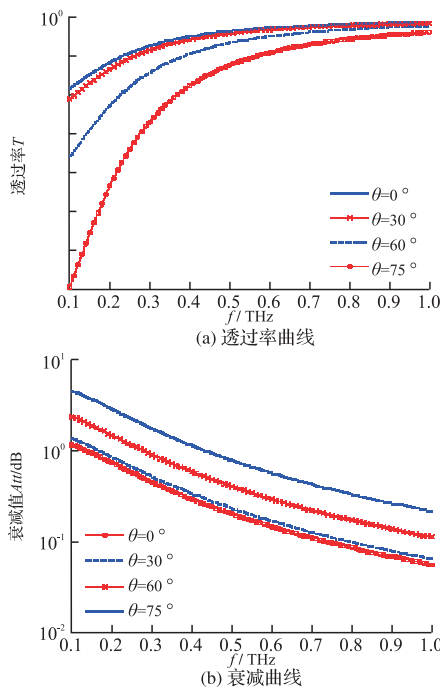


图4 不同太赫兹波入射角对应太赫兹波的传播特性

Fig.4 Terahertz wave propagation with variation of terahertz wave incident angle

当太赫兹波入射角增加时,太赫兹波在等离子体中作用距离增加,等离子体中电子从太赫兹波吸收的能量增加,太赫兹波透过率减小,衰减增大。随着太赫兹波入射角增大,太赫兹波透过率减小;随着太赫兹波频率增加,太赫兹波透过率增大。其中在太赫兹波入射角 $\theta \geq 0^\circ$ 时,透过率均在 1 以下。随着太赫兹波入射角增大,太赫兹波衰减值增加;随着太赫兹波频率增加,衰减减小。其中当入射角 $\theta \leq 75^\circ$ 时,在大气窗口 0.22 THz 处最大衰减仅达到 2.5 dB。

4 结语

本文建立的均匀与非均匀等离子体模型,通过计算 h 、 n_e 、 f_{en} 和 θ 等参数,得到太赫兹波在等离子鞘套中传输的反射率、衰减等曲线。综合分析表明,提高通信频率至太赫兹波段有助于减轻临近空间平台出现的通信的黑障问题,通过 2 个物理模型的仿真论证,在大气窗口 0.22 THz 处的衰减均小于 30 dB,适合临近空间通信平台的使用。由于太赫兹波段在大气传输时衰减较大,可采用天基平台中继,对高超声速飞行器在临近空间巡航时进行实时测控。此仿真论证结果,可为设计临近空间平台的高超声速飞行器选用通信频段时提供参考。

参考文献(References):

- [1] L Zhao, B W Bai, W M Bao, et al. Effects of Reentry Plasma Sheath on GPS Patch Antenna Polarization Property[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2013; 1-8.
- [2] B W Bai, X P Li, Y M Liu, et al. Effects of Reentry Plasma Sheath on the Polarization Properties of Obliquely Incident EM Waves[J]. IEEE Transaction on Plasma Science, 2014, 42(10): 3365-3372.
- [3] Eric D. Gillman, John E. Foster. Review of Leading Approaches for Mitigating Hyper Sonic Vehicle Communications Blackout and A Method of Ceramic Particulate Injection via Cathode Spot Arcs for Blackout Mitigation[R]. NASA TM-2010-216220.
- [4] C T Swift, F B Beck, J Thomson, et al. RAM C-III S-band Diagnostic Experiment[R]. Washington: NASA, 1971; 137-155.
- [5] Surzhikov S T. Three Dimensional Simulation of Shock Layer Ionization for RAM C-II Flight Tests[C]//AIAA Sci Tech 52nd Aerospace Sciences Meeting, National Harbor, Maryland, 2014.
- [6] Zheng L, Zhao Q, Liu S Z, et al. Theoretical and Experimental Studies of 35 GHz and 96 GHz Electromagnetic Wave Propagation in Plasma[J]. Prog. Electromagn. Res. M, 2012, 24: 179-192.
- [7] D. Brida, D. Tskhakaya. Investigation of Oscillations in the Plasma Sheath[J]. Contrib. Plasma Phys. 2014, 54: 469-473.
- [8] Huber P W, Evans J S, Schexnayder Jr C J. Comparison of Theoretical and Flight-measured Ionization in A Blunt Body Reentry Flowfield[J]. AIAA Journal, 1971, 9(6): 1154-1162.
- [9] 郑灵, 赵青, 刘述章, 等. 太赫兹波在非磁化等离子体中的传播特性研究[J]. 物理学报, 2012, 61(24): 245202; 1-5. ZHENG Ling, ZHAO Qing, LIU Shuzhang, et al. Studies of Terahertz Wave Propagation in Non-magnetized Plasma[J]. Acta Phys Sin, 2012, 61(24): 245202; 1-5. (in Chinese)
- [10] Jin Li, Yiming Pi, Xiaobo Yang. A Conception on the Terahertz Communication System for Plasma Sheath Penetration[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2014, 14: 1252-1258.

(编辑:徐敏)