

磁化等离子鞘套中毫米波大气窗口的衰减

凌云飞, 陈长兴, 蒋 金

(空军工程大学理学院, 西安, 710051)

摘要 为了更好地利用目前紧张的频谱资源, 解决临近空间通信“黑障”问题, 选取高斯分布模型建立非均匀等离子鞘套, 并结合 4 个在大气中具有高透过性的毫米波大气窗口, 研究等离子鞘套外加不同强度磁场与无外加磁场情况下, 毫米波大气窗口在其中传输的衰减情况受攻角和等离子鞘套碰撞频率改变的影响。仿真结果显示: 外加不同强度磁场时会改变毫米波大气窗口的衰减值, 但不会改变毫米波大气窗口在等离子鞘套中的传输规律。外加磁场是否改善毫米波大气窗口的传输性能需要综合考虑等离子鞘套与毫米波大气窗口的谐振频率。

关键词 通信黑障; 等离子鞘套; 高斯分布; 毫米波大气窗口; 衰减

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.02.003

中图分类号 V443; TN011 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)02-0010-05

Research on Attenuation of Millimeter Wave Atmospheric Window in Magnetized Plasma Sheath

LING Yunfei, CHEN Changxing, JIANG Jin

(Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: In order to make full use of the scarce spectrum resources, and solve the "black out" problem of near space communication, a non-uniform plasma sheath is built by selecting a Gauss distribution model combined with the millimeter wave atmospheric window with high transmittance in the atmosphere to study the influence on attenuation of millimeter wave atmosphere window in the process of transmittance in the atmosphere on account of frequency changes subjected to the collision between attack angles and plasma sheath on condition that there are additional different intensity magnetic fields and on no condition. The simulation results show that the magnetic field with different intensities added on the plasma sheath can change the attenuation value of the millimeter wave atmospheric window, but can not change the transmission law of the millimeter wave atmospheric window. The external magnetic field does not necessarily improve the transmission performance of the millimeter wave atmospheric window, but also needs to consider the resonance frequency of the plasma sheath and the millimeter wave window. The results provide effective theoretical data support for the establishment of near space communication platform.

Key words: ionization blackout; plasma sheath; Gaussian distribution; millimeter wave atmospheric window; attenuation

近年来, 由于临近空间(20~100 km)高超声速飞行器的迅速发展, 围绕其所展开的研究也逐渐成

收稿日期: 2015-11-06

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划(2014JM8344)

作者简介: 凌云飞(1992—), 男, 甘肃兰州人, 硕士生, 主要从事临近空间通信技术研究. E-mail: lingyunf0421@hotmail.com

引用格式: 凌云飞, 陈长兴, 蒋金. 磁化等离子鞘套中毫米波大气窗口的衰减[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2016, 17(2): 10-14. LING Yunfei, CHEN Changxing, JIANG Jin. Research on Attenuation of Millimeter Wave Atmospheric Window Magnetized Plasma Sheath[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(2): 10-14.

为热门^[1-6]。当飞行器以超高声速飞行于临近空间时,飞行器头部会产生非常强烈的激波,且由于大气的粘滞,飞行器的动能大幅度地向热能转化,从而使飞行器表面的温度骤增,大气与飞行器表面材料发生电离,形成一层具有一定厚度的高温等离子鞘套^[7,8]。等离子鞘套对于通信电磁波具有非常强烈的衰减作用,严重时会使通信完全中断,产生临近空间通信“黑障”问题^[9-12]。通信“黑障”所产生的高度与持续时间会因为电磁波频率的不同而有所区别,如 L 波段在 62~53 km 之间发生“黑障”现象,持续时间约为 11 s,而 C 波段在 48~40 km 处发生“黑障”现象,持续时间约为 5 s^[13]。目前,研究人员对电磁波在非磁化等离子体中传输特性的研究已较为深入。袁忠才^[14]运用有限时域差分法研究了等离子鞘套对信号传播的影响,结果显示等离子鞘套的电子密度及其分布对信号传输有重要影响。李栓涛^[15]等以矩阵散射方法研究了太赫兹波在非磁化非均匀等离子鞘套中的传输特性,证明等离子鞘套密度、碰撞频率、分布形态等差异均会对电磁波的传输产生影响,等离子鞘套外加磁场可以有效地增强电磁波在等离子鞘套中的传输性能。夏新仁^[16]等结合分层传播模型研究了电磁波在非均匀磁化等离子体中的反射与吸收,发现背景磁场强度能够显著改变等离子共振吸收频段。杨华^[17]等研究了平面电磁波在均匀磁化等离子体中的传播规律,并分析了均匀磁化等离子体中的电磁波反射现象。

电磁波在大气层中传输时透过率较高的频段被称之为大气窗口,毫米波在大气中传播主要有 35 GHz、94 GHz、140 GHz 与 220 GHz 附近的 4 个窗口,本文结合这 4 个大气窗口,建立一个电子密度为高斯分布的非均匀等离子鞘套,并给其外加不同强度的磁场,研究等离子鞘套外加磁场对毫米波大气窗口在其中传输性能的影响。

1 电磁波在磁化非均匀等离子体传输原理

电磁波在等离子鞘套中的传输模型见图 1。

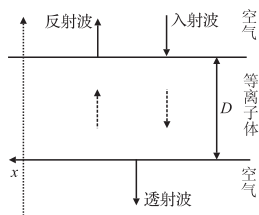


图 1 等离子鞘套模型

Fig.1 The plasma sheath model

根据文献[18],磁化冷等离子体复介电常数为:

$$\epsilon = 1 - \frac{(\omega_d/\omega)^2}{1 - \frac{(\omega_h \sin\varphi)^2}{\omega^2} - j\frac{v_s}{\omega}} \pm \sqrt{\frac{(\omega_h \cos\varphi)^2}{\omega^2} + \frac{(\omega_h \sin\varphi)^4}{\omega^2} - 4 - 4\frac{(\omega_d)^2}{\omega^2} - j\frac{4v_s}{\omega}} \quad (1)$$

式中: φ 为电磁波入射角; v_s 为等离子体碰撞频率; ω_d 为等离子体频率; ω_h 电子回旋频率为。

对于右旋偏振,当入射角 $\varphi = 0^\circ$ 时,式(1)可以转化为:

$$\epsilon = 1 - \frac{(\omega_d/\omega)^2}{1 - \frac{(\omega_h/\omega)^2}{1 - \frac{(\omega_d)^2}{\omega^2} - j\frac{v_s}{\omega}}} \quad (2)$$

根据平面电磁波的色散关系:

$$K = \beta - j\alpha \quad (3)$$

相位常数 β 为:

$$\beta = (\omega/c)\text{Re}(\sqrt{\epsilon}) \quad (4)$$

衰减常数 α 为:

$$\alpha = -(\omega/c)\text{Im}(\sqrt{\epsilon}) \quad (5)$$

通过对电磁波沿传播路径进行积分计算,可求得电磁波在磁化等离子鞘套中的衰减值 A 为:

$$A = -10\lg m \quad (6)$$

式中: m 为等离子鞘套的透射系数:

$$m = \frac{2\epsilon^{1/2} \exp(jnd)}{2\epsilon^{1/2} \cosh(jnd) + (1 + \epsilon) \sinh(jnd)} \quad (7)$$

式中: n 表示入射电磁波波数:

$$n = \frac{\omega}{c} \epsilon^{1/2} \quad (8)$$

2 电子密度模型

当飞行器的飞行速度达到 $7 Ma$ 以上时可进入临近空间层(20~100 km),飞行速度的增加会使飞行器飞行轨道升高至临近空间中部甚至中上部,而在临近空间中上部飞行时其表面所产生的等离子鞘套电子密度近似服从高斯分布,见图 2。建立高斯分布等离子鞘套电子密度模型,其表达式为:

$$n_e(d) = \begin{cases} N_e e^{\epsilon_1(d-d_0)^2} & (d_0 \leq d \leq d_1) \\ N_e e^{-\epsilon_2(d_2-d)^2} & (d_1 \leq d \leq d_2) \end{cases} \quad (9)$$

式中: d 为电子密度达到峰值时的等离子鞘套厚度; d_0 、 d_2 分别为等离子鞘套两边界; N_e 为电子密度峰值; ϵ_1 、 ϵ_2 为高斯分布函数常数。

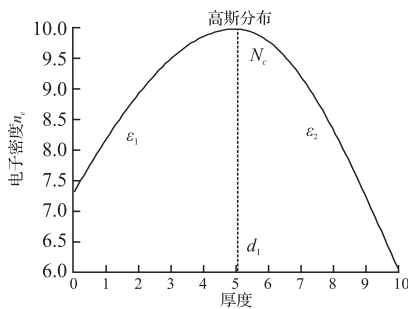


图2 电子密度模型

Fig.2 The electron density model

3 仿真分析与结果

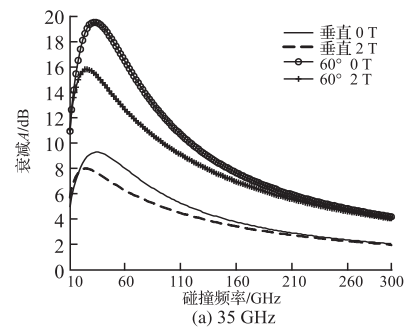
毫米波大气窗口在大气中的透过率较高,且其所处频段,如 35 GHz 所在的 Ka 波段,已经在卫星通信中得到了大量应用,而 220 GHz 所处的太赫兹波段被认为是最有希望解决“黑障”问题的波段。因此,研究大气窗口在外加磁场等离子鞘套中的传输性能,并利用大气窗口在大气中的强透过性,有利于解决临近空间通信“黑障”问题,且能较为充分地利用目前紧张的频谱资源。

3.1 碰撞频率对毫米波大气窗口传输衰减影响

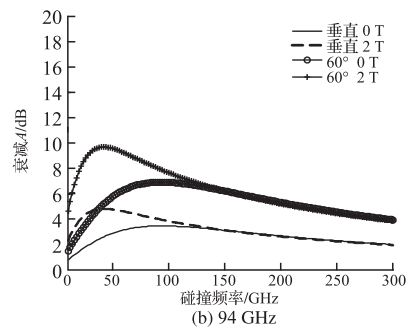
只考虑右旋偏振电磁波,参考 NASA 提供的 RAM-C 数据^[19],取鞘套厚度为 10 cm,电子密度峰值为 $10^{12}/\text{cm}^3$ 。等离子鞘套碰撞频率变化范围为 10~300 GHz,在电磁波垂直入射与 60° 角斜入射 2 种情况下,分别对等离子鞘套外加 2 T 磁场与 0 T 磁场(无外加磁场),研究分析电磁波受等离子鞘套碰撞频率变化的影响。仿真结果见图 3。

从图 3 中能够看到,在垂直入射与斜入射 2 种情况下,随着频率从 35 GHz 增加至 220 GHz,毫米波大气窗口衰减峰值明显减小,并且随着等离子鞘套碰撞频率的增加,4 个毫米波大气窗口的衰减值都先增大后减小,且给等离子鞘套外加磁场并没有改变衰减随碰撞频率变化的规律。在等离子鞘套碰撞频率小于毫米波大气窗口频率时,随着碰撞频率的增强,毫米波大气窗口衰减值不断增加,并且在碰撞频率接近电磁波频率时达到衰减峰值。当等离子鞘套碰撞频率大于毫米波大气窗口频率后,衰减值下降。其原因在于:当碰撞频率小于毫米波大气窗口频率时,碰撞频率的增大会加剧等离子鞘套中的电子和中性粒子的碰撞,中性粒子吸收更多电子的能量,而使毫米波大气窗口衰减值增加。当碰撞频率继续增加,此时电子已没有时间获得足够的能量就与中性粒子碰撞,因此反而使得毫米波大气窗口衰减值下降。在相同磁化条件与碰撞频率下,垂直入

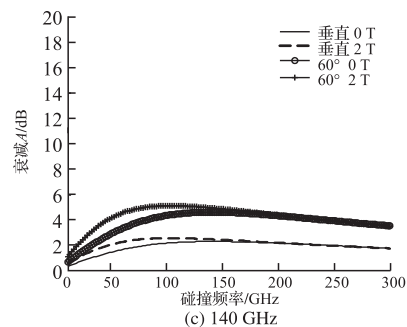
射电磁波的衰减明显小于斜入射电磁波的衰减,主要原因是相对于垂直入射,电磁波斜入射时,其在等离子体中的波程增加,与等离子体相互作用的时间增加,从而使衰减增大。



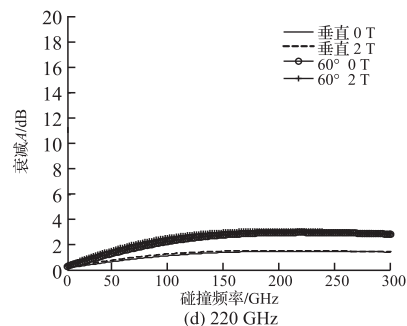
(a) 35 GHz



(b) 94 GHz



(c) 140 GHz



(d) 220 GHz

图3 碰撞频率对毫米波大气窗口传输性能影响

Fig.3 The influence of collision frequencies on millimeter wave atmospheric window propagation property

此外,图 3(a)中可以看出,与无外加电场相比,当给等离子鞘套外加 2 T 磁场时,垂直入射大气窗口 35 GHz 处的衰减峰值明显下降 1.4 dB,斜入射大气窗口 35 GHz 处的衰减峰值明显下降 4 dB,且峰值点明显左移。但是在图 3(b)~(d)中我们看到,无论是垂直入射还是斜入射,外加 2 T 磁场后,大气窗口 94 GHz、140 GHz 与 220 GHz 处的衰减

峰值点虽然左移,但衰减值反而比无外加磁场时大。由于等离子鞘套是一种特殊的色散介质,当给其外加磁场时,会改变等离子鞘套的电磁特性,使毫米波大气窗口与等离子鞘套的谐振频率发生变化,磁场强度与电磁波频率的不同会影响谐振频率的大小,从而使衰减值出现不同的变化。综上可知,垂直入射更有利于降低毫米波大气窗口衰减值,且等离子鞘套外加 2 T 磁场会使毫米波大气窗口衰减值峰值点左移,但只有利于 35 GHz 电磁波的衰减值下降,其余 3 个大气窗口的衰减值峰值均上升。说明给等离子鞘套外加一定量磁场不一定能改善毫米波大气窗口在其中的传输性能,还需考虑谐振频率的影响。

3.2 攻角对毫米波大气窗口传输衰减影响

由于飞行器攻角的变化会使毫米波大气窗口的入射角发生改变,从而影响其在等离子鞘套中的传输性能。取等离子鞘套碰撞频率为 100 GHz,鞘套厚度为 10 cm,电子密度峰值为 $10^{12}/\text{cm}^3$ 。使攻角在 $0^\circ-90^\circ$ 间变化,研究分析等离子鞘套外加不同强度的磁场与无外加磁场时,电磁波受飞行器攻角变化的影响。仿真结果见图 4。

从图 4 中可以看到,随着攻角的不断增大,4 个毫米波大气窗口的衰减值随之增加,主要原因在于随着角度的增加,电磁波在等离子鞘套中的传输路径变长,使得衰减值增加。且频率越高,衰减值受攻角变化的影响越大。等离子鞘套外加不同强度磁场不会改变毫米波大气窗口衰减随攻角变化的规律。图 4(a) 中显示,在相同攻角处,当给等离子鞘套外加磁场时,相比于无外加磁场情况(0 T),大气窗口 35 GHz 处的衰减值明显下降。在图 4(b) 中,对比无外加磁场情况,当等离子体外加 7 T 与 9 T 强度磁场时,大气窗口 94 GHz 处的衰减值明显下降,但在外加 2 T 磁场时,衰减值反而增大。图 4(c) 中显示,只有当外加磁场强度为 9 T 时,大气窗口 140 GHz 处的衰减比无外加磁场时有所减小,而在图 4(d) 中,等离子鞘套外加不同强度磁场反而使大气窗口 220 GHz 处的衰减值比无外加磁场时增大。由 3.1 节分析,衰减值大小不仅受磁场强度影响,还跟等离子鞘套与毫米波大气窗口的谐振频率有关,且就同一攻角而言,毫米波大气窗口频率越高,衰减值越小。综合可知,攻角度数的增加不利于毫米波大气窗口在等离子鞘套中的传输,且在同一攻角下,给等离子鞘套外加磁场不一定改善毫米波大气窗口的传输性能。

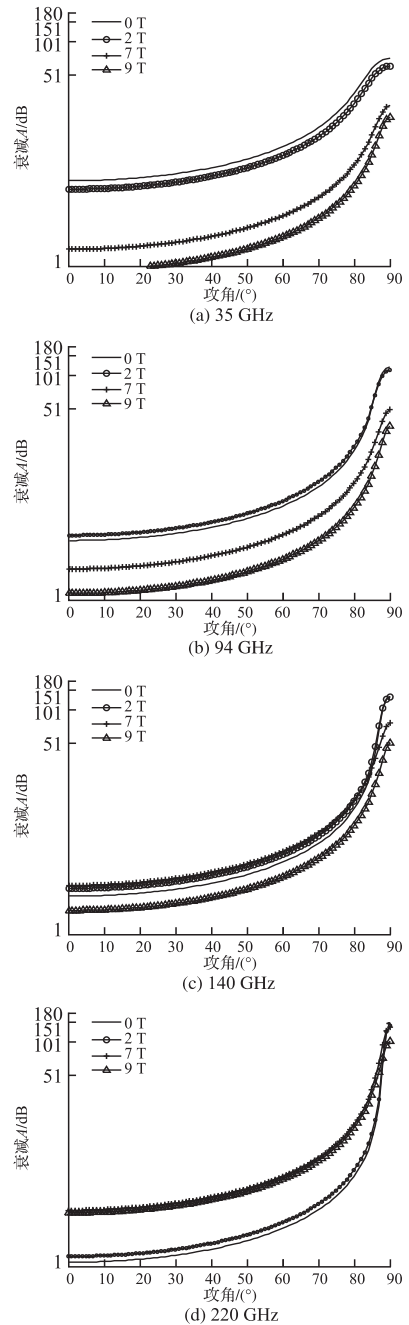


图 4 磁化强度对不同攻角毫米波大气窗口传输影响
 Fig.4 The Influence of magnetization on millimeter wave atmospheric window with different in cident angles propagation property

4 结语

通过上述仿真分析可知,对于 35 GHz、94 GHz、140 GHz 和 220 GHz 4 个毫米波大气窗口频率,在垂直入射与斜入射 4 种情况下,毫米波大气窗口衰减值都随等离子鞘套碰撞频率的升高先增大后减小。且等离子鞘套外加不同强度的磁场不会改变其在等离子鞘套中的传输规律,即与无外加磁场时相同,毫米波大气窗口衰减值随攻角增加而增大。

外加一定值强磁场会改变毫米波大气窗口的衰减,并使衰减峰值点发生移动。但是外加磁场并不一定会改善毫米波大气窗口的传输性能,还需综合考虑等离子鞘套与毫米波大气窗口的谐振频率。根据本文所得数据,结合毫米波大气窗口在大气中传输时的高透过性,并利用不同频段的特点,可设定不同的磁场强度以优化其在等离子鞘套中的传输特性;或可设计双频段通信系统帮助解决临近空间通信“黑障”问题。

参考文献(References):

- [1] KEIDAR M, KIM M, BOYD I D. Electromagnetic Reduction of Plasma Density during Atmospheric Reentry and Hypersonic Flight[J]. *Spacer Rockets*, 2008, 45(3): 445-453.
- [2] GAO X, JIANG B. A Matching Approach to Communicate Through the Plasma Sheath Surrounding A Hypersonic Vehicle[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117: 233301.
- [3] 石磊,郭宝龙,刘彦明,等.临近空间高速飞行器综合信道模型研究[J]. *宇航学报*, 2011, 23(7): 1557-1563.
SHI Lei, GUO Baolong, LIU Yanming, et al. Research on Integrated Channel Model for Near-Space Hypersonic Vehicle [J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 23(7): 1557-1563. (in Chinese)
- [4] SHARIFIAN M, SADEGHI Y. FDTD Study of the Effects of the Doubly Ionized Ions on the Plasma Immersion Ion Implantation Process[J]. *Plasma Physics*, 2014, 80(2): 215-223.
- [5] CHALISE R, KHANAL R. The Study of Kinetic Energy of Ion and Sheath Thickness in Magnetized Plasma Sheath[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2015, A5(1-2): 41-46.
- [6] 陈长兴,蒋金,凌云飞,等.适合临近空间通信的Ka/V双频口径耦合天线设计[J]. *宇航学报*, 2015, 36(8): 940-944.
CHEN Changxing, JIANG Jin, LING Yunfei, et al. Aperture Coupled Antenna Design for Near Space Communication in Ka/V Dual-band[J]. *Journal of Astronautics*, 2015, 36(8): 940-944. (in Chinese)
- [7] 谢楷,李小平,杨敏,等.L、S频段电磁波在等离子体中衰减实验研究[J]. *宇航学报*, 2013, 34(8): 1166-1171.
XIE Kai, LI Xiaoping, YANG Min, et al. Experimental Study on Attenuation Characteristics of L and S Band Electromagnetic Wave in Plasma[J]. *Journal of Astronautics*, 2013, 34(8): 1166-1171. (in Chinese)
- [8] 陈禹旭,赵青,薄勇,等.等离子体鞘层中电磁传输特性的数值仿真和实验验证[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(3): 032041-1-5.
CHEN Yuxun, ZHAO Qing, BO Yong, et al. Numerical Simulation and Experimental Verification of Electromagnetic Transmission Characteristics of Plasma Sheath [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(3): 032041-1-5. (in Chinese).
- [9] OZAKI M, YAGITANI S, TAKAHASHI K, et al. Equivalent Circuit Model for the Electric Field Sensitivity of a Magnetic Search Coil of Space Plasma[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(3): 1680-1688.
- [10] 蒋金,陈长兴,任晓岳,等.临近空间等离子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, 12(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. (in Chinese)
- [11] TIAN B, FAN W, SU R, et al. Real-Time Trajectory and Attitude Coordination Control for Reusable Launch Vehicle in Reentry Phase[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(3): 1639-1649.
- [12] LI J, PI Y, YANG X. A Conception on the Terahertz Communication System for Plasma Sheath Penetration[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2014, 14: 1252-1258.
- [13] 郑灵.飞行器等离子体鞘套对电磁波传输特性的影响研究[D].成都:电子科技大学,2013.
ZHENG Ling. Study of Electromagnetic Wave Propagation in Spacecraft Plasma Sheath [D]. Chengdu: Electronic Science and Technology of China, 2013. (in Chinese)
- [14] 袁忠才.等离子体鞘套对飞行器再入过程信号传播特性的影响分析[J]. *航天器环境工程*, 2014, 31(1): 79-82.
YUAN Zhongcai. Analysis of Characteristics of Reentry Sheath and Its Effects on Communication [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2014, 31(1): 79-82. (in Chinese)
- [15] 李拴涛,李军,朱忠博,等.等离子体鞘套中太赫兹波传输特性研究[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2015, 13(2): 203-214.
LI Shuantao, LI Jun, ZHU Zhongbo, et al. Studies on Terahertz Wave Propagation in Plasma Sheath[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2015, 13(2): 203-214. (in Chinese)
- [16] 夏新仁,尹成友,王光明.非均匀磁化等离子体层的电磁特性分析[J]. *上海航天*, 2008, 24(4): 8-11.
XIA Xinren, YIN Chengyou, Wang Guangming. Electromagnetic Characteristic Analysis of Non-Uniform Magnetized Plasma Slab [J]. *Aerospace Shanghai*, 2008, 24(4): 8-11. (in Chinese)
- [17] 杨华,时家明,凌永顺.电磁波在磁化等离子体上的反射特性研究[J]. *电波科学学报*, 2001, 16(2): 196-199.
YANG Hua, SHI Jiaming, LING Yongshun. Studies of Reflection Characteristics of Electromagnetic Waves Propagating into Magnetized Plasma [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2001, 16(2): 196-199. (in Chinese)
- [18] HEALD M A, WHARTON C B. *Plasma Diagnostics with Microwaves*[M]. New York: Krieger, 1978.
- [19] National Aeronautics and Space Administration. *The Entry Plasma Sheath and Its Effects on Space Vehicle Electromagnetic Systems*[R]. Washington DC: NASA, 1970.

(编辑:徐敏)