

L、S 频段电磁波在等离子体中衰减实验研究

谢 楷, 李小平, 杨 敏, 石 磊, 刘东林

(西安电子科技大学机电工程学院, 西安 710071)

摘 要: 利用低气压辉光放电原理在地面产生大面积、长时间稳定持续的可控等离子体,在此基础上进行了 L、S 频段的电波传播衰减实验,在实验室环境下持续再现了“黑障”现象,并获得了 1.57GHz 和 2.49GHz 电磁波衰减量随等离子体电子密度变化的规律。将实验数据与经典传播理论以及薄层理论的预期值对比,结果表明:电波的衰减趋势与经典理论预期基本相符,验证了本文所提出的新实验方法的有效性;在等离子体厚度约为波长的 1 倍与 1.5 倍条件下,未观测到明显的薄层效应。

关键词: 黑障; 等离子鞘; 辉光放电; 电波传播; 薄层效应

中图分类号: TN92; V416.8 文献标识码: A 文章编号: 1000-1328(2013)08-1166-06

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2013.08.019

Experimental Study on Attenuation Characteristics of L and S Band Electromagnetic Wave in Plasma

XIE Kai, LI Xiao-ping, YANG Min, SHI Lei, LIU Dong-lin

(Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: An experiment of electromagnetic wave propagation in plasma is proposed to obtain the attenuation characteristics of L and S band electromagnetic waves. The controllable large scale plasma is generated based on the glow discharge principle in low pressure gas to reproduce a ‘blackout’ phenomenon with long duration in an environment of the ordinary laboratory. The attenuation characteristics versus electron density of electromagnetic wave at 1.57GHz and 2.49GHz are obtained, and then the experimental results are compared with two theoretical expected values, the classical theory and thin-layer theory. The experimental results support the validity of the classical theory, the attenuation trend is consistent with that expected in classical theory, and the thin-layer effect is not observed under the condition that the plasma thickness is about 1 and 1.5 times of wavelength.

Key words: Blackout; Plasma sheath; Glow discharge; EM wave propagation; Thin-layer effect

0 引 言

高速飞行器(返回式航天器、弹头、近空间飞行器)以 10~25 马赫的超高声速在大气层中飞行时,由于粘性和激波的作用,飞行器表面附近的空气分子会因剧烈热运动而被电离,形成含有等离子体的高温激波层,即“等离子鞘套”。它会影响电磁波的传输,严重时将呈现类似金属的屏蔽效应,从而引起通信中断,即“黑障”现象^[1-5]。

“黑障”是航空与航天技术发展中继“声障”和“热障”之后的又一技术难题。国外从 1960 年开始投入了大量人力物力,实施了一系列大规模飞行实验,诸如美国的 Fire、Asset、RAM、MA-6、GT-3 和 Trailblazer 计划等^[1,3,16],明确了等离子体鞘套的形成机理,掌握了多种缓解或减轻通讯中断的措施。

我国曾于上世纪 70-80 年代开展过等离子鞘套相关的研究,包括对电波衰减特性的测量^[17],取得了许多重要的进展。但随着存储转发技术的成熟,

该领域的研究一度停滞。近年来,随着我国载人航天工程、天地往返运载器、临近空间飞行器、行星探测,以及新型战术战略导弹的研制工作开展,“黑障”带来的通讯中断问题又重新成为研究热点^[6-7]。

电磁波在等离子体内的衰减特性与等离子体的电子密度、碰撞频率以及电磁波频率有关,理论和实验都表明了提高电磁波频率有助于延缓“黑障”的出现^[3,8-9]。随着 Ka 甚至更高频率通信技术逐渐成熟,提高频率是目前抑制“黑障”的主流手段之一^[10-11]。然而,许多既有的通信体制频率是不可更改的,例如 USB 体制、GPS 和北斗导航体制等。它们都采用了频率较低的 L、S 频段载波,容易受到等离子体的影响。因此,开展 L、S 频段电磁波的传播特性实验,对测控、导航信号中断预测、黑障抑制等后续相关的研究有重要的意义。

在等离子体波传播实验方面,激波管是目前主要的实验手段,它采用高压气体破膜的方式产生超高速激波,压缩试验段内的气体从而产生等离子体^[12-13,17]。含等离子体的高速激波穿过电磁波试验区的时间仅有几百微秒,其中稳定期仅数十微秒。需要借助高速采样和定时触发机制来保证实验在稳定期内完成,实验的难度大、效率低且重复性较差。

在等离子体波传播理论方面,目前的主流理论将等离子体等效为一种色散介质^[10,18],再按经典传播理论进行计算。但近年来也有研究指出:经典传播理论适用于等离子体厚度远大于电磁波波长的情况,当电磁波波长与等离子体厚度接近时,衰减量与经典理论差异较大,有学者提出了若干理论模型^[12-13],但还缺乏大量的实验支持。

针对上述两方面的问题,本文将采用辉光放电的新方法产生持续、稳定且电子密度连续可控的等离子体,并选择 L、S 频段典型频率点进行电磁波传播实验,对两种理论进行对比和验证。

1 等离子体产生装置简介

根据 NASA 提供的 RAM-C-III 再入数据^[3,22],S 频段天线窗处(位于弹体中部)的等离子鞘在 250kft (76km) 时电子密度约为 $1 \times 10^{10}/\text{cm}^3$; 在 131kft (40km) 处达到 $1 \times 10^{12}/\text{cm}^3$, 在 70kft (21km) 处下降至 $3 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ 继而出黑障区。尽管辉光放电等离

子的电子密度范围($10^9 \sim 10^{11}/\text{cm}^3$)^[19]与再入过程相比低了一个数量级,但仍可以用辉光放电再现部分频段的“黑障”现象,并进行电波传播实验。其优点是能够产生长时间持续的等离子体,不仅电波传播实验的难度大为降低,而且在短时间内可获得大量重复性较好的实验数据。

为了再现“黑障”现象,辉光放电等离子产生装置必须满足以下条件:

首先,应产生非磁化等离子体,与实际等离子鞘套一致。要避免产生装置引入额外的磁场,例如电流产生的磁场、电子回旋共振放电(ECR)方式施加的磁激励等。

其次,等离子体应具有足够大的尺度,且传播路径上无金属阻挡物。不仅要保证约束等离子体的金属外壁大于波束主瓣宽度,以避免波导效应,还要保证传播路径上无金属遮挡物。

第三,电子密度应足够使得电磁波产生“黑障”。根据等离子体波传播理论,当等离子体振荡频率 ω_p 大于电磁波角频率 ω 时,才会对电磁波造成明显的衰减:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e q_e^2}{\epsilon_0 m_e}} > \omega \quad (1)$$

换算成电子密度与电磁波频率 f 的关系,有:

$$n_e > \frac{f^2}{80.64} \quad (2)$$

式中: n_e — 电子密度, m^{-3} ;

ϵ_0 — 真空介电常数, $8.854 \times 10^{-12} (\text{F/m})$;

m_e — 电子质量, $9.109 \times 10^{-31} (\text{kg})$;

q_e — 电子电荷, $1.602 \times 10^{-19} (\text{C})$

L、S 频段的测控、导航信号频率大多集中在 1.2GHz ~ 2.7GHz。以 2.7GHz 信号为例,为了观测到明显的衰减,电子密度应不低于 $0.9 \times 10^{11}/\text{cm}^3$ 。

为同时满足上述三个条件,本文提出了图 1 所示的辉光放电等离子发生器结构。其主体是一只厚度 18cm,直径 50cm 的金属密封腔体,内部气压被真空泵抽至 10Pa 以下,满足辉光放电所需的低气压条件。采用直径 30cm 的环形多孔电极,与金属外壁间形成了 5cm 左右的放电间隙。射频等离子电源加在金属外壁与环形多孔电极之间,使放电间隙内的气体电离形成等离子体,并由电极上的孔洞扩散

至腔体内部,形成一块厚 18cm,直径 30cm 的近似均匀等离子体介质,供电波传播实验使用。所采用的环形多孔电极,既提供了等离子体的扩散通道,又因其对称结构使电流产生的磁场抵消,还保证了等离子体内无任何金属阻挡物。

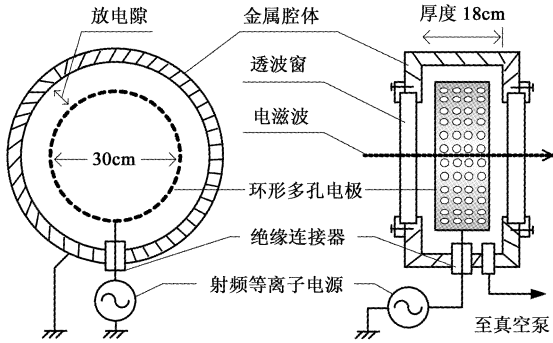


图 1 辉光放电等离子发生器结构

Fig. 1 Structure of glow discharge plasma generator

采用微波诊断法测试等离子发生器的最高电子密度(图 2)。当频率为 f_d (远高于等离子截止频率) 的电磁波在厚度为 l 的均匀等离子体内传播产生了附加相移 $\Delta\varphi$, 则电子密度可按式^[21]估算:

$$n_e \approx \frac{2\varepsilon_0 m_e \omega_d c}{e^2 l} \cdot \Delta\varphi = \frac{1.185 f_d}{l} \cdot \Delta\varphi \quad (3)$$

向放电腔体注入 2kW 峰值电功率时,用频率 10.48GHz 的微波进行诊断,测得 $\Delta\varphi = 2.5\text{rad}$, 得出其中心电子密度最高达到 $1.7 \times 10^{11}/\text{cm}^3$ 。

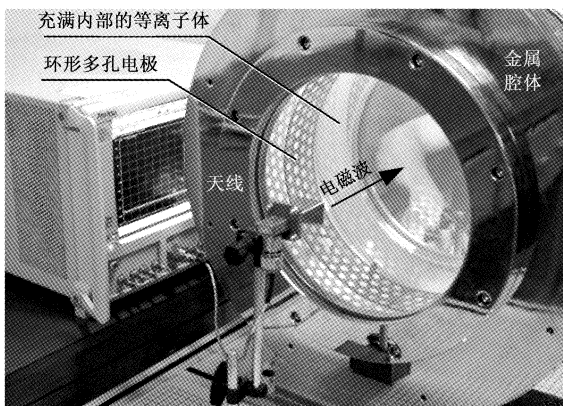


图 2 工作中的等离子发生器

Fig. 2 The photograph of glow discharge plasma generator

综上,该等离子发生器可长时间持续产生大面积、电子密度可调的等离子体,且电子密度已经达到 L、S 频段出现“黑障”的要求。

2 L、S 频段电磁波在等离子体内的传播实验

2.1 实验原理及配置

实验装置如图 3 所示。在等离子体发生器的一侧安装有金属屏蔽舱,其内壁贴有 5cm 厚泡沫吸波材料,它模拟了飞行器天线舱结构,还起到了防止绕射和反射的作用,使等离子腔体成为唯一的电波传播路径。屏蔽舱内装有信号接收天线和微波诊断天线,其中信号接收天线采用与实际飞行器接近一致的微带天线,诊断天线采用指向性的喇叭天线。

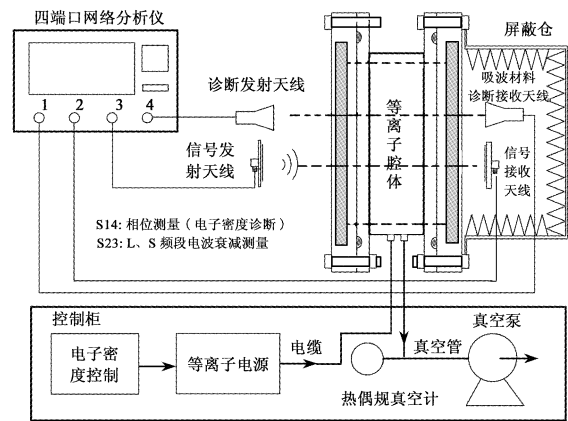


图 3 实验配置示意图

Fig. 3 The diagram of experimental setup

为了在测量电磁波衰减的同时诊断电子密度,采用了一台四端口网络分析仪(安捷伦 N5230A)同时记录接收电平值和诊断电波的相位值。

2.2 实验条件

实验条件的确定主要从以下三点考虑:

(1) 实验频点选择。分别在 L、S 频段的几何中心附近选择 1.57GHz (GPS 的 L1 频点) 及 2.49GHz (北斗上行频点),兼顾了代表性和针对性。

(2) 诊断电波频率选择。当电子密度 n_e 达到实验峰值 $1.7 \times 10^{11}/\text{cm}^3$ 时,截止频率为:

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{n_e q_e^2}{\varepsilon_0 m_e}} \approx 3.7\text{GHz} \quad (4)$$

诊断电磁波频率 f_d 大于截止频率 f_c 的 2 ~ 3 倍,取 10GHz 左右,且要避免腔体本身的谐振点。诊断天线的波束宽度约 30° ,发射天线距窗口 10cm 左右,主波束能够从窗口穿过。

(3) 实验厚度的选择。实际等离子鞘的厚度是非均匀的,且随再入过程在 3 ~ 14cm 范围内变

化^[3],模拟这种非均匀变化是极其困难的。实验更重要的目的是获得电磁波在不同密度等离子体内的衰减率,再在此基础上进一步用传输矩阵法可得到非均匀等离子鞘的衰减率。因衰减率测量实验在较厚的等离子体中会更准确,所以选择了略大于实际鞘套的厚度。

综上所述,最终确定的实验条件为:放电气压 $P_1 = 10\text{Pa}$;实验频率 $f_1 = 1.575\text{GHz}$ (L 频段), $f_2 = 2.49\text{GHz}$ (S 频段);诊断频率 $f_d = 10.48\text{GHz}$;放电功率 $P_E = 0 \sim 2000\text{W}$;等离子体厚度 $l = 18\text{cm}$ 。

2.3 实验方法

先关闭等离子发生器,让电磁波自由穿透试验区,记录下初始电平值 P_0 及诊断电磁波的初始相位值 φ_0 。然后增加放电功率使电子密度逐渐升高,过程中间隔取 10 ~ 15 个工作状态,每个工作状态下保持放电功率恒定,持续 60 秒。持续时间内每 6 秒钟记录一次接收的电平值和诊断电磁波的相位值,即每个工作状态下共记录 10 组数据。

与等离子相关的实验不确定性普遍较高,根据 10 组数据的离散度可以判断数据的有效性并剔除坏点,代价是实验次数的大幅增加。用传统激波管进行实验,共需 250 次左右实验,耗时可能多达数十天,而采用本文的方法可在 20 分钟内完成实验。

假设第 i 个工作状态下的第 j 组数据中,接收电平值为 P_{ij}/dB ,诊断电磁波的相位值为 φ_{ij} ,则电波衰减率 S_{ij} 和附加相移 $\Delta\varphi_{ij}$ 分别为:

$$S_{ij} = (P_0 - P_{ij})/l \quad (5)$$

$$\Delta\varphi_{ij} = \varphi_0 - \varphi_{ij} \quad (6)$$

将(6)式的结果代入(2)式,求得电波传播路径上的平均电子密度 n_{ej} ,再将所有的数据点绘制在以电子密度为横坐标,衰减率为纵坐标的曲线上。

3 实验结果及分析

3.1 理论预期

(1) 经典传播理论预期:

在非磁化等离子体中,电子运动方程^[18]表示为:

$$m_e \frac{d^2 r}{dt^2} = -eE - m_e v \frac{dr}{dt} \quad (7)$$

式中 r 是电子位移, E 是场强。由 $E = E_0 e^{j\omega t}$ 可进一步得到:

$$r = \frac{eE}{m_e \omega(\omega - jv)} \quad (8)$$

忽略离子电流,等离子体中电流密度为:

$$j' = j\omega \epsilon_0(\tilde{\epsilon}_r - 1)E = -en_e \frac{dr}{dt} \quad (9)$$

由式(9)可求得等离子体的复相对介电系数为:

$$\tilde{\epsilon}_r = 1 - \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2 \frac{1}{1 - j\frac{v}{\omega}} \quad (10)$$

根据电磁波传播理论可得电磁波传播矢量为:

$$\tilde{k} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\tilde{\epsilon}_r} = \beta - j\alpha \quad (11)$$

传播矢量的实部(β)和虚部(α)分别称为相移系数和衰减系数,在非磁化等离子体内, β 和 α 可以进一步表示为:

$$\beta = \frac{\omega}{\sqrt{2}\epsilon} \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + v^2} + \sqrt{\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + v^2}\right)^2 + \left(\frac{v}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + v^2}\right)^2}} \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{\omega}{\sqrt{2}\epsilon} \sqrt{\frac{\omega_p^2}{\omega^2 + v^2} - 1 + \sqrt{\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + v^2}\right)^2 + \left(\frac{v}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + v^2}\right)^2}} \quad (13)$$

电磁波在上述的等离子体内传播单位距离时,衰减率理论值为:

$$S_1 = 20\lg e^{-\alpha} \approx -8.68\alpha(\text{dB/m}) \quad (14)$$

(2) 薄层传播理论预期:

少量文献提出,当电磁波波长与等离子体厚度相近时,实验结果与经典理论差异较大^[12-13,20]。该现象曾于 80 年代末在激波管实验中被观测到,其产生机理仍存在争议,有学者认为可能是电波与等离子体流发生某种耦合效应^[13,20],衰减率应按如下式计算:

$$S_2 = 20\lg \left[\frac{1 + (v/\omega)^2}{[\pi \cdot (l/\lambda) \cdot (\omega_p/\omega) + v/\omega]^2 + 1} \right] (\text{dB}) \quad (15)$$

式(7)~(15)中:

v — 等离子碰撞频率, rad/s;

ω — 电磁波频率, rad/s;

λ — 电磁波波长, m;

l — 等离子体厚度, m;

c — 光速, 299792458(m/s)。

也有学者认为差异可能是由实验误差引起,但各种解释均未得到大量的实验支持和验证。

3.2 实验结果

图4和图5分别是L频段(1.57GHz)和S频段(2.49GHz)的实验结果。图中实线、点划线和虚线分别是按照经典理论、薄层理论以及考虑透波窗(材料为 $\epsilon_r \approx 4$ 的石英玻璃)影响的计算结果。图中每10个数据点对应一个实验状态,用10个点的外接圆表示其分布离散度,用它们的重心作为当前实验状态下的结果。

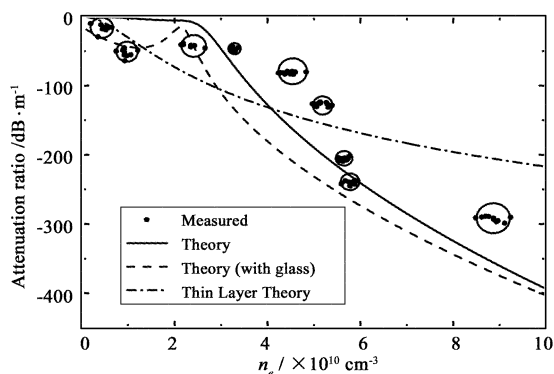


图4 L频段(1.57GHz)电磁波衰减率曲线

Fig.4 Attenuation ratio vs. plasma density at 1.57GHz

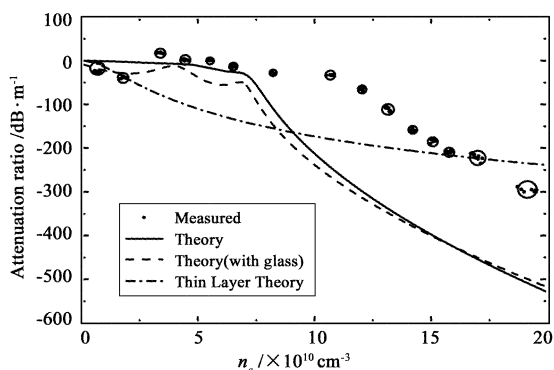


图5 S频段(2.49GHz)电磁波衰减率曲线

Fig.5 Attenuation ratio vs. plasma density at 2.49GHz

3.3 数据处理及误差分析

对实验结果以及可能的误差,分析如下:

(1) 在每个实验状态下持续的1分钟时间内,10次测量的数据点相对集中,说明等离子发生器能够稳定持续,实验状态的重复性较好。

(2) 两次实验都在电子密度高时误差较大,可能原因主要有:首先是产生高电子密度需要注入高功率,引起温度、气压等参数变化导致误差;其次是高电子密度时,等离子截止频率更接近诊断电磁波频率,公式(2)中被忽略的非线性项会导致误差。

(3) 实验中不确定度最大的参量是电子密度,其误差通常用数量级来表示。将理论衰减率与实测衰减率分别通过(14)与(13)式折合为电子密度 n_{er} 和 n_{et} ,再按(16)式表示为误差数量级,结果见表1和表2。

$$E = \lg(n_{et}/n_{er}) \quad (16)$$

表1 1.57GHz的实验结果误差折合为电子密度误差
Table 1 The Experiment error (1.57GHz) equivalent to electron density error

实测 衰减率	实测 电子密度	电子密度误差(数量级)	
		经典理论	薄层理论
-81.7 dB/m	4.47×10^{10}	0.21	0.30
-127.2 dB/m	5.18×10^{10}	0.20	0.13
-206.7 dB/m	5.64×10^{10}	0.19	-0.20
-240.6 dB/m	5.74×10^{10}	-0.03	-0.35
-292.8 dB/m	8.86×10^{10}	0.12	-0.39

表2 2.49GHz的实验结果误差折合为电子密度误差
Table 2 The Experiment error (2.49GHz) equivalent to electron density error

实测 衰减率	实测 电子密度	电子密度误差(数量级)	
		经典理论	薄层理论
-66.1 dB/m	1.21×10^{11}	0.23	0.62
-111.7 dB/m	1.32×10^{11}	0.23	0.41
-160.0 dB/m	1.42×10^{11}	0.23	0.21
-183.9 dB/m	1.51×10^{11}	0.23	0.13
-208.9 dB/m	1.58×10^{11}	0.23	0.03
-220.0 dB/m	1.69×10^{11}	0.25	0.01
-297.2 dB/m	1.93×10^{11}	0.22	-0.27

结果表明:实验结果与经典传播理论值趋势相符,存在0.25数量级以内且基本固定的偏差。由于本文采用的微波法误差约为0.3~1数量级^[14]。有理由认为实验偏差是由于电子密度诊断的固有误差造成的。

(4) 1.57GHz和2.49GHz电磁波的波长分别为19cm和12cm,都与等离子厚度(18cm)相近,满足薄层的条件,但实验结果的趋势明显与薄层理论所描述的趋势明显不符,且误差呈发散趋势。

(5) 等离子腔体前后透波窗引起了一定的驻波反射,体现在衰减曲线上出现的起伏(谐振点),但起伏不大于6dB,未对实验结果整体趋势产生影响。

4 结论

本文提出的等离子中电波传播实验方法,在实验室环境下,使L、S频段电波持续产生了“黑障”现象(30dB以上的衰减)。实验结果验证了本文所提出的新实验方法的有效性及其优点。该方法可以为后

续的等离子抑制技术、时变等离子内电波传播、等离子鞘下通信技术等相关研究提供一种新的等离子环境模拟手段。

实验结果支持了经典理论,即使在厚度与波长相近的非磁化均匀等离子体中,电磁波传播特性也与经典理论基本相符,未观测到明显的薄层效应。在厚度远小于波长的等离子体是否会出现薄层现象,以及是否在高速流体中才会观测到该现象,还有待进一步的实验验证。

参 考 文 献

- [1] Rybak J P, Churchill R J. Progress in reentry communication [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1971, 7(5): 879 - 894.
- [2] Daniel G, Joseph S, Robert S. Electromagnetic wave propagation in unmagnetized plasmas [R]. Malibu, CA: Hughes Research Laboratories, March 1992.
- [3] Hartunian R A, Stewart G E, Ravn O. Causes and mitigation of radio frequency blackout during reentry of reusable launch vehicles [R]. El Segundo: Aerosp. Corporation, ATR - 2007 (5309 - 1), Jan. 2007.
- [4] Potter D L. Introduction of the PIRATE program for parametric reentry vehicle plasma effects studies [C]. The 37th AIAA Plasma dynamics and Lasers Conference, San Francisco, USA, June 5 - 8, 2006.
- [5] 王柏懿. 再入等离子体鞘的电波传播特性[J]. 宇航学报, 1982 (2): 81 - 101. [Wang Bai-yi. Characteristic of electromagnetic wave in reentry plasma sheath [J]. Journal of Astronautics, 1982(2): 81 - 101.]
- [6] 石磊, 郭宝龙, 刘彦明, 等. 临近空间飞行器综合信道模型研究[J]. 宇航学报, 2011, 32(7): 1557 - 1563. [Shi Lei, Guo Bao-long, Liu Yan-ming, et al. Research on integrated channel model for near-space hypersonic vehicle [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(7): 1557 - 1563.]
- [7] 于哲峰, 刘佳琪, 任爱民, 等. 磁窗天线增强等离子体鞘套透波特性研究[J]. 宇航学报, 2011, 32(7): 1564 - 1567. [Yu Zhe-feng, Liu Jia-qi, Ren Ai-min, et al. Research on magneto window antenna for improving propagation characteristic of electromagnetic wave in plasma sheath [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(7): 1564 - 1567.]
- [8] James P, Stewart D E, Ferguson S D, et al. Causes effects and diagnostic Measurements of the reentry plasma sheath [R]. Fort Collins, Colorado: Colorado State University, December 1970.
- [9] Akey N D, Cross A E. Radio blackout alleviation and plasma diagnostic results from a 25000 foot per second blunt-body reentry [R]. Hampton, USA: NASA Langley Research Center, February 1970.
- [10] 柴霖. 临近空间飞行器测控与信息传输系统频段选择[J]. 航空学报, 2008, 29(4): 1007 - 1012. [Chai Lin. Selection of work frequency for near space vehicle TT&C and information transmission system [J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2008, 29(4): 1007 - 1012.]
- [11] 刘嘉兴. 发展 Ka 频段测控通信系统的思考[J]. 宇航学报, 2008, 29(6): 1685 - 1688. [Liu Jia-xing. Ideas on development of Ka band tracking, telemetry, command and communication system [J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(6): 1685 - 1688.]
- [12] 竺乃宜, 李学芬, 周学华, 等. 激波管用于磁等离子体中电波传输的研究[J]. 气动实验与测量控制, 1993, 7(3): 69 - 74. [Zhu Nai-yi, Li Xue-fen, Zhou Xue-hua, et al. A study of electromagnetic wave propagation in magnetic plasma by shock tube [J]. Aerodynamic Experiment and Measurement & Control, 1993, 7(3): 69 - 74.]
- [13] 马平, 曾学军, 石安华, 等. 电磁波在等离子体高温气体中传输特性实验研究[J]. 实验流体力学, 2010, 24(5): 51 - 58. [Ma Ping, Zeng Xue-jun, Shi An-hua, et al. Experimental investigation on electromagnetic wave transmission characteristic in the plasma high temperature gas [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2010, 24(5): 51 - 58.]
- [14] Heald M A, Wharton C B. Plasma diagnostics with microwaves [M]. New York: R. E. Krieger Publisher, 1978.
- [15] Francis F C, Jane P C. Principles of plasma processing [M]. New York: Kluwer Academic/Plenum Publisher, 2003.
- [16] Huber P W, Akey N D, Crosswell W F, et al. The entry plasma sheath and its effect on space vehicle electromagnetic systems [R]. Hampton, Virginia: NASA Langley Research Center, October, 1970.
- [17] 乐嘉陵, 高铁锁, 曾学军, 等. 再入物理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 115 - 120.
- [18] 金兹堡. 电磁波在等离子体中的传播 [M]. 钱善璋译. 北京: 科学出版社, 1978.
- [19] 张禹涛, 马腾才, 任春生, 等. 空气中交流针 - 板大气压辉光放电 [J]. 核聚变与等离子体物理, 2006, 26(4): 323 - 326. [Zhang Yu-tao, Ma Teng-cai, Ren Chun-sheng, et al. AC pin-to-plate atmospheric glow discharge in air [J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2006, 26(4): 323 - 326.]
- [20] Rudderow W H. A study of electromagnetic wave interaction with air plasma [M]. Dallas, Texas: Defense Technical Information Center, 1975.
- [21] 朱士尧. 等离子体物理基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1983: 114 - 115.
- [22] Swift C T. Ram-C-III S-band diagnostic experiment [C]. NASA 4th Plasma Sheath Symp., Washington D. C., USA, October, 1970: 137 - 155.
- [23] 王甲寅, 时家明, 袁忠才, 等. 等离子体的三频点微波透射衰减诊断方法 [J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(4): 621 - 624. [Wang Jia-yin, Shi Jia-min, Yuan Zhong-cai, et al. Plasma diagnostic method using the transmission attenuation of microwaves at three frequencies [J]. High Power Laser And Particle Beams, 2007, 19(4): 621 - 624.]

作者简介:

谢楷(1983 -), 男, 副教授, 主要研究方向为临近空间测控与通信技术。

通信地址: 西安电子科技大学 283 信箱(710071)

电话: 13571889820

E-mail: kaixie@mail.xidian.edu.cn

(编辑: 张宇平)