

# 等离子体电磁信号多维度特征测量系统研究\*

吕亮亮<sup>1</sup>, 郭 凯<sup>1</sup>, 钟育民<sup>1</sup>, 姚 博<sup>2</sup>  
(1 北京遥测技术研究所 北京 100094  
2 西安电子科技大学 西安 710071)

**摘要:**为进一步研究等离子体鞘套特性及其对电磁波传输的影响,研制等离子体电磁信号多维度特征测量系统。系统可在地面实验环境中对高速目标等离子体下通信信号进行多维度特征测量,分析信号传输衰减、相位畸变等特性。系统完成 Ka 测控通信频段等离子体透射测量实验,验证多维度特征测量系统宽带测量、大动态微弱信号的检测能力。对采集的数据进行分析,初步验证等离子体对通信信号的衰减和相位特性的影响。

**关键词:** 等离子体; 测量系统; 测控通信

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: CN11-1780(2021)02-0042-06

## Research on multi-dimensional characteristic measurement system of plasma electromagnetic signal

LYU Liangliang<sup>1</sup>, GUO Kai<sup>1</sup>, ZHONG Yumin<sup>1</sup>, YAO Bo<sup>2</sup>  
(1. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100094, China;  
2. Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** To further study the characteristics of plasma sheath and its influence on electromagnetic wave transmission, the project developed a multi-dimensional characteristic measurement system for plasma electromagnetic signals, the system can be used to measure the multi-dimensional characteristic of communication signals under high-speed target plasma, analyze signal attenuation, phase distortion and other characteristics. The system has completed the plasma transmission measurement experiment in Ka frequency band, which verifies the capability of the multi-dimensional feature measurement system for broadband measurement and detection of large dynamic weak signals. The collected data were analyzed, and the influence of plasma on the attenuation and phase characteristics of communication signal was preliminarily verified.

**Key words:** Plasma; Measurement system; Measurement and control communication

## 引 言

高速目标在临近空间飞行所产生的等离子体鞘套带来了许多未解的电磁科学问题。高速目标等离子体的动态特性对电磁波传播有明显的影 响。目前,针对等离子体造成的信号衰减,许多学者已经从提高载波频率、增强接收灵敏度、提高发射功率等提高通信能力的传统技术途径,开展了充分的研究,能够继续发掘的潜力有限<sup>[1-5]</sup>。全面研究和描述等离子体鞘套的电磁环境,探索可以利用的信道资源,从全局信息资源利用的角度大幅提高信息传输系统的整体性能,进而提出适应等离子体鞘套下复杂电磁环境信道的信息传输新理论与新方法,是该课题目前的前沿研究方向。

在实验环境中对高速目标等离子体下测控通信信号进行多维度特征测量,分析信号衰减、相位畸变等特性,研究高速目标等离子体下典型测控通信信号的传输特性,是研究等离子体鞘套特性及其对电磁波传输影响的有效手段,可以为全面研究和描述等离子体鞘套的电磁环境提供支撑,对实现高速目标等离子体环境下的可靠通信也具有重要的意义。

## 1 多维度特征测量系统概述

在进行等离子体地面实验验证时,大多数测量系统实验手段单一,不能从多方面对通信信号透射等

\*基金项目: 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目高速目标等离子体电磁信号多维度特征测量及通信技术研究(6162790108)

收稿日期: 2020-07-08 收修改稿日期: 2021-01-28

离子体进行特征测量<sup>[6,7]</sup>。

本文的研究内容基于国家自然科学基金重大仪器研制项目——临近空间高速目标等离子体电磁科学实验研究装置，多维度特征测量系统是该装置的一部分。

多维度特征测量系统通过实验环境中对高速目标等离子体下典型测控通信信号的多维度测量，掌握不同频段、不同体制、不同编译码技术在等离子体中的传输特性，研究等离子体对通信信号的影响，促进对等离子体鞘套与电磁波相互作用的探索，为开展抗等离子体鞘套下通信技术研究提供理论与实验基础。

等离子体电磁信号多维度特征测量系统（以下简称多维度特征测量系统），测量获取高速目标等离子体环境下通信信号的空域、时域、频域、极化域等多维度参数。分析高速目标等离子体下典型测控通信信号的传输特性，研究不同频段、不同体制、不同编译码技术等对通信质量的改善。多维度特征测量系统的研制主要完成了以下三个方面研究内容。

### 1.1 高速目标等离子体下宽频段大动态微弱信号检测技术

多维度特征测量系统针对等离子体对不同通信体制信号传输产生的强衰减和大动态变化，研究了等离子体影响下大动态变化信号的高速采样技术、微弱信号的检测技术和处理技术，实现了高速目标等离子体下宽频段大动态微弱信号的获取，为等离子体电磁信号多维度特征测量系统提供支撑。

### 1.2 高速目标等离子体下测控通信信号多维度特征测量技术

多维度特征测量系统采用伺服控制转台，控制发射和接收天线在不同空间位置开展特征测量，研究通信信号穿过高速目标等离子体后的空域分布特性。

多维度特征测量系统点聚焦天线的馈源采用双线极化设计，前后端信道设备满足极化双端口测量需求，研究通信信号穿过高速目标等离子体的极化特性。

多维度特征测量系统采用宽带高速记录器对穿过等离子体的通信信号进行采样、记录，在时域、频域开展数据分析处理，研究通信信号穿过高速目标等离子体的时频特性。

### 1.3 高速目标等离子体下测控通信信号多维度测量设备研制

多维度特征测量系统采用的点聚焦透镜天线，低频段时焦斑小，在高速目标等离子体产生尺寸有限和真空暗室尺寸受限的测量环境下，可防止电磁波绕射高速目标等离子体。

多维度特征测量系统研制了宽频段、大动态多体制通信信号射频收发设备，以及大动态范围中频信号高速采集、存储设备，研制了基于采样信号的处理分析软件，实现对高速目标等离子体下测控通信信号多维度特征的测量与提取。

多维度特征测量系统将空域、极化域、时频域特征测量方案进行综合优化，并结合防绕射测量，形成高速目标等离子体下测控通信信号的空域、时域、频域、极化域特征的最优测量方案，研究高速目标等离子体下测控通信信号的全域信息特征分析算法，实现高速目标等离子体下测控通信信号的全域信息特征获取。

## 2 多维度特征测量系统方案

### 2.1 系统组成

多维度特征测量系统由多功能数字信号发生器、宽带上变频器、宽带功率放大器、透射测量天线、伺服控制转台、宽带低噪声放大器、宽带下变频器、大动态范围中频信号高速采集、存储记录器（简称宽带高速记录器）、时码器、高稳频率基准源、数据处理终端等组成。系统工作原理如图1所示。

多功能数字信号发生器产生多种测控通信体制的1.5 GHz中频信号，经过宽带上变频器，将中频信号变频为1.5 GHz~40 GHz的信号，信号经宽带功率放大器放大后通过测量天线发射，透射经过等离子体。

接收端的测量天线接收射频信号，经宽带低噪声放大器进行放大，通过宽带下变频器，将信号变频为中频信号，由宽带高速记录器采集记录，并将数据送数据处理终端进行数据处理、分析。

时码器为系统提供统一的时间基准，可准确地将等离子体产生状态与透射测量数据处理结果进行时间同步。

高稳频率基准源为系统提供10 MHz的频率基准信号，确保频率测量的准确性。

测量天线安装于伺服控制转台上, 用于实验过程中调整发射接收天线位置和角度, 从不同角度透射等离子体, 实现空域特征测量。

### 2.2 多功能数字信号发生器

多功能数字信号发生器用于产生实验需要的典型测控通信信号, 包括: PCM-FM 体制和 PCM-CDMA-BPSK 体制及多种编码体制方式 (TPC 编码、R-S 编码、卷积编码等)。

多功能数字信号发生器主要采用 1 U 架构进行产品设计, 内部安装有嵌入式系统板、一体化收发处理平台、射频收发信道组合、电源模块。多功能数字信号发生器采用软件无线电技术, 通过软件重组技术实现无线电测控设备常用的遥测体制信号的中频调制输出。

### 2.3 宽带上、下变频器

宽带上变频器实现中频 1.5 GHz 信号上变频为射频信号输出。

宽带下变频器实现 1.5 GHz~40 GHz 射频信号下变频为 1.5 GHz 中频信号输出。

宽带上、下变频器主要包括电源模块、参考源模块、变频模块、滤波器模块、分路器模块、增益控制模块和控制显示模块。增益控制模块可以控制变频输出相应频段的信号。

宽带上、下变频器将 1.5 GHz~40 GHz 的宽带信号进行分段处理, 实现宽带变频功能。

宽带变频设备解决了多中频输出、低杂散抑制、低相位噪声等关键技术。

### 2.4 宽带功率放大器、低噪声放大器

宽带功率放大器分段实现功率放大, 频段覆盖 1.5 GHz~40 GHz, 输出功率  $\geq 2$  W。

宽带低噪声放大器分段实现接收端低噪声放大, 频段覆盖 1.5 GHz~40 GHz, 噪声系数  $\leq 2.5$  dB。

### 2.5 透射测量天线

在等离子体透射测量系统中, 为了考察通信信号透射等离子体后的特征, 需要控制电磁波能量在一定范围内聚焦传输, 将电磁波能量汇聚到很小的区域内, 以进行防绕射测量。点聚焦天线是一种具有能量汇聚特性的喇叭天线, 常用的聚焦方法为介质透镜聚焦, 其特点是能够把绝大部分能量集中于焦斑附近, 通过合理设计焦斑大小, 能够大大减小测量实验中的绕射能量。

点聚焦天线原理是电磁波能量经过介质透镜折射变成平面波电磁信号, 然后再次经过介质透镜的折射, 最终聚焦到预设的焦距处。电磁波传输示意图如图 2 所示。

多维度特征测量系统针对真空暗室产生等离子体引起的温升问题, 设计了一种耐高温、宽频带点聚焦透镜天线, 天线馈源支架和透镜支架进行一体化设计, 通过更换不同频率的馈源来实现宽频带透射测量。

点聚焦透镜天线的焦斑在全频段 1.5 GHz~40 GHz 满足小于 230 mm 指标要求, 点聚焦透镜天线设计及焦斑仿真结果如图 3 所示, 图 3 (a) 为点聚焦天线结构设计示意图, 图 3 (b) 为 1.5 GHz 点聚焦天线焦斑仿真结果, 图 3 (c) 为 40 GHz 点聚焦天线焦斑仿真结果。

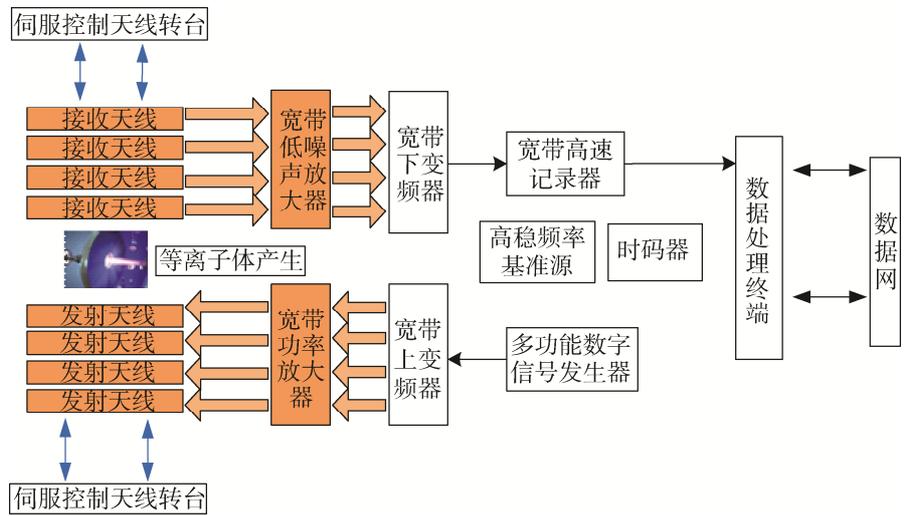


图 1 测量系统组成

Fig. 1 Measurement system composition

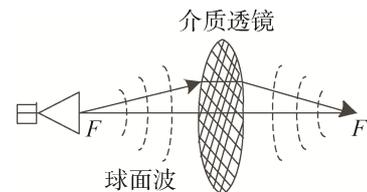


图 2 点聚焦天线电磁波传输示意图  
Fig. 2 Spot-focusing lens antenna electromagnetic wave transmission diagram

### 2.6 宽带高速记录器

大动态范围中频信号高速采集、存储记录器（简称宽带高速记录器）为一台高性能工业级单机设备。内部采用CPCI总线架构，主要包括中频信道板、宽带中频采集板、高速存储板、工控机主板及CPCI机箱等。宽带高速记录器实现了微弱信号的检测、高速采样及数据记录存储。

### 3 多维度特征测量系统工作模式

多维度特征测量系统可产生多种体制测控通信信号，包括多种调制体制和多种编码方式。

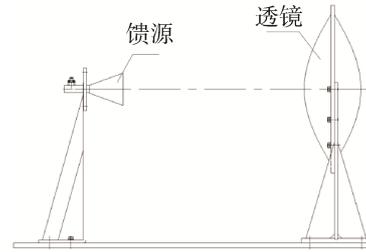
多维度特征测量系统可输出 1.5 GHz~40 GHz 的宽频带信号进行实验，完成宽频段透射测量。

多维度特征测量系统可实现线极化方式的发射和接收。发射、接收端天线均可发射、接收线极化信号，完成极化域的特征测量。

多维度特征测量系统伺服控制设备可控制天线在保持焦距不变的情况下，在产生等离子体的真空暗室内移动，接收端天线在不同位置处接收透射信号，以获取不同空间位置、不同入射角度的透射测量信号，完成等离子体空域特征测量。多维度特征测量系统工作模式如图4所示。

### 4 多维度特征测量系统 Ka 频段实验

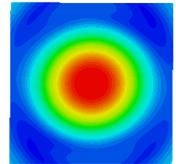
项目完成了多维度特征测量系统的研制和等离子体透射测量初步实验，验证了 Ka 频段信号的透射测量特性及等离子体对于信号衰减和相位变化的影响。实验过程中，真空暗室中等离子体产生经历了初始阶段、氩气放电阶段、空气放电阶段。随着等离子体电子密度和碰撞频率的变化，透射测量信号的衰减和相移随之变化。



(a) 天线结构示意图

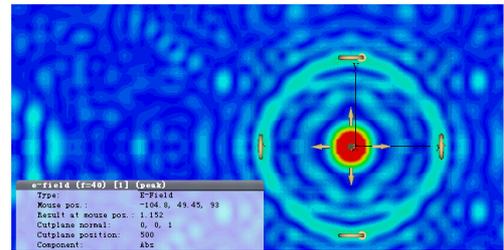
(a) Antenna structure diagram

e-field (f=1.5) [1] (peak)	
Type:	E-Field
Cutplane normal:	0, 0, 1
Cutplane position:	500
Component:	Abs
2D Maximum:	56.93
2D Max. position:	0, 0, 500
Frequency:	1.5
Phase:	11.25



(b) 1.5GHz 仿真结果

(b) 1.5GHz simulation



(c) 40GHz 仿真结果

(c) 40GHz simulation

图3 宽带点聚焦透镜天线设计及仿真结果

Fig. 3 Design and simulation of wideband spot-focusing lens antenna

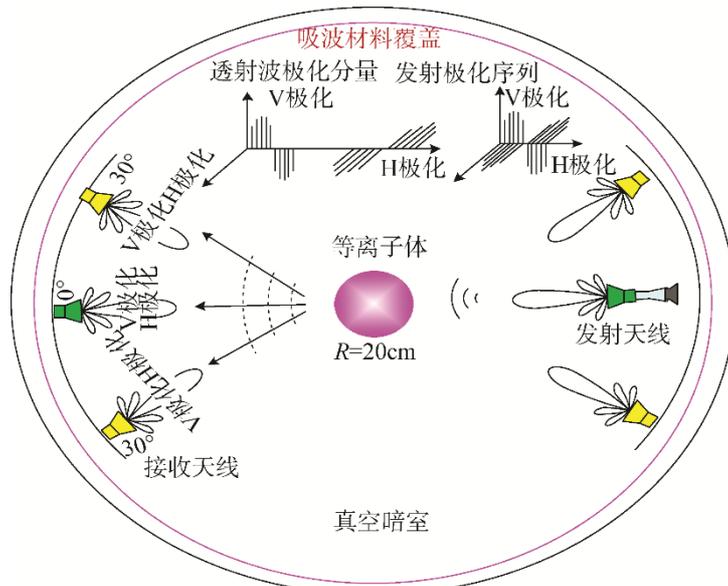


图4 高速目标等离子体下测控通信信号空域、时频域和极化域特征测量

Fig. 4 Measurement of spatial, temporal and polarization characteristics under high-speed target plasma

### 4.1 电子密度标定

等离子体电子密度主要测量方法有接触式和非接触式两种。其中, 接触法主要有静电探针、磁探针等各种探针方法; 非接触诊断方法主要有微波诊断法、光谱诊断法等。

项目实验过程中采用激光诊断方式对电子密度进行标定, 结果如图 5 所示。电子密度较高时达到  $1.7 \times 10^{19}/\text{m}^3$ , 透射测量实验验证就是在此情况下进行的。

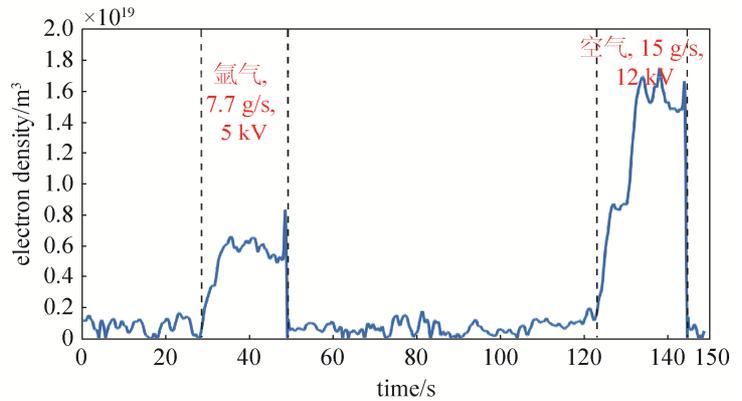


图 5 激光诊断电子密度曲线

Fig. 5 The curve of electron density by laser diagnosing

### 4.2 Ka 频段单载波信号透射测量实验

多维度特征测量系统发射 Ka 频段的单载波信号, 进行透射测量, 信号衰减和相位变化随着等离子体电子密度变化特性如图 6 所示。可知, 在氩气放电阶段 (实验开始 30 s~50 s), 等离子体电子密度升高时, 单载波信号衰减增大, 其相位特性也发生变化, 随着电子密度减小, 信号衰减随之减小。在空气放电阶段 (实验开始 120 s~140 s), 信号衰减和相位再次随电子密度的变化而变化。

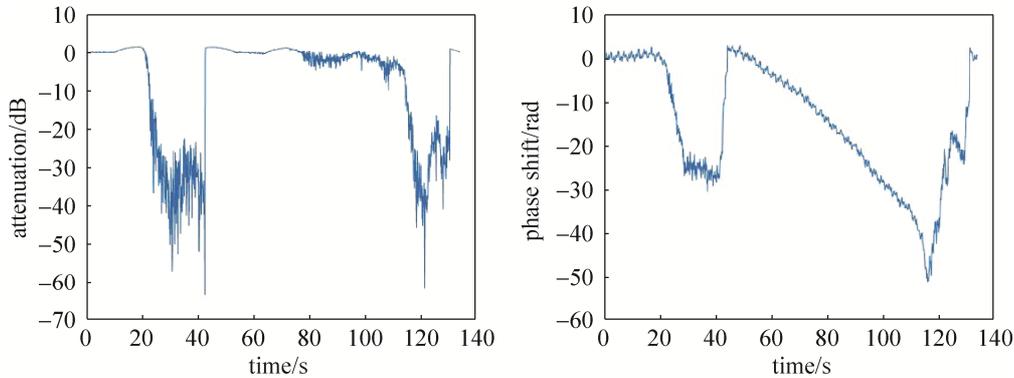


图 6 等离子体下 Ka 频段单载波信号衰减 (左)、相位 (右) 变化曲线

Fig. 6 The curve of Ka band single carrier signal attenuation (left)、phase changing (right) under high-speed target plasma

### 4.3 Ka 频段 QPSK 调制信号透射测量实验

多维度特征测量系统发射 Ka 频段的 QPSK 调制信号, 进行透射测量, 在不同阶段信号星座图随着等离子体电子密度变化特性分别如图 7、图 8、图 9 所示。

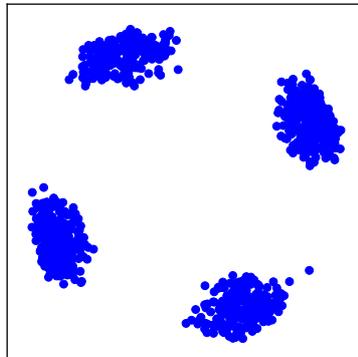


图 7 初始阶段 QPSK 信号星座图  
Fig. 7 Initial QPSK signal constellation

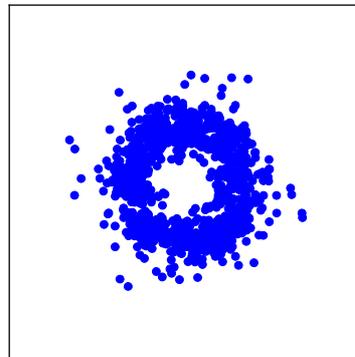


图 8 氩气放电阶段 QPSK 信号星座图 (不收敛)  
Fig. 8 QPSK signal constellation of argon discharging (no convergence)

#### 4.4 实验结果分析

多维度特征测量系统初步的透射测量实验,验证了等离子体对于通信信号影响的理论分析结果:

① Ka 频段单载波信号经过本次产生的等离子体后,衰减可达 50 dB。不同阶段,随着等离子体电子密度和碰撞频率的变化,信号衰减和相位也随之变化;

② Ka 频段 QPSK 信号经过本次产生的等离子体后,其星座图发生旋转,随着等离子体电子密度的增大,其星座图将不会再收敛。

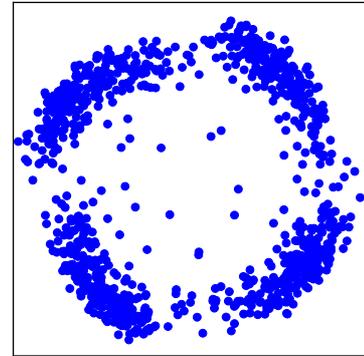


图9 空气放电阶段 QPSK 信号星座图(旋转)

Fig. 9 QPSK signal constellation of air discharging (constellation rotation)

#### 5 结束语

本文研制了等离子体电磁信号多维度特征测量系统,完成 Ka 频段等离子体透射测量实验,初步验证了多维度特征测量系统对于等离子体透射测量的可行性及有效性,为等离子体电磁信号多维度特征测量提供实验验证平台。通过多维度特征测量,进一步研究等离子体对通信信号传输的影响,为研究信号在等离子体环境中可靠通信奠定技术基础。

#### 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. 再入等离子体鞘套的电波传播特性[J]. 宇航学报, 1982(2): 81-101.  
WANG Baiyi. Characteristic of electromagnetic wave in reentry plasma sheath[J]. Journal of Astronautics, 1982(2): 81-101.
- [6] 肖礼康, 唐璞, 陈波, 等. 等离子体诊断的 Ka 波段透射测量系统研制与应用[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(6): 50-56.  
XIAO Likang, TANG Pu, CHEN Bo, et al. Development and application of Ka band transmission measurement system for plasma diagnosis[J]. Journal of weapon equipment engineering, 2017, 38(6): 50-56.
- [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.

#### [作者简介]

吕亮亮 1988 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为测控通信系统总体设计。

郭凯 1982 年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为测控通信系统总体设计。

钟育民 1985 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为测控通信系统总体设计及等离子体测控通信。

姚博 1989 年生, 博士, 讲师, 主要研究方向为高速飞行器信道特性及适应性通信方法。