



## 物理学

# 电磁波在非均匀等离子体中的衰减效应研究

陈茂林<sup>1</sup> 毛根旺<sup>1</sup> 夏广庆<sup>2</sup>

(西北工业大学燃烧、流动和热结构国家级重点实验室<sup>1</sup>, 西安 710072; 大连理工大学航空航天学院<sup>2</sup>, 大连 116024)

**摘要** 电磁波与等离子体相互作用是等离子体隐身技术的关键技术, 也是空天信息对抗的重要研究方向。采用时域有限差分法模拟了电磁波在非均匀等离子体中的衰减效应, 采用空间透射波法测量了 C 波段电磁波在非均匀等离子体中的衰减系数, 分析了等离子体分布对衰减效应的影响。研究结果表明, 非均匀等离子体相比于均匀等离子体对电磁波衰减效应更为明显, 合理的等离子体分布有助于增强对电磁波的衰减作用。

**关键词** 等离子体 电磁波 衰减效应 时域有限差分法

**中图法分类号** O539; **文献标志码** A

电磁波在通过等离子体中会被等离子体吸收、折射, 从而被衰减。主动应用电磁波对等离子体的衰减效应, 在飞行器隐身和空天信息对抗技术上有着良好的应用前景<sup>[1,2]</sup>。另一方面, 这种衰减效应也会带来一些不利的问题, 如作为航天器动力系统的电推力器喷出的等离子体喷流可能对航天器与地面监测站的通讯有影响、飞行器再入大气层时高速摩擦产生的等离子体对通讯的影响等<sup>[3~8]</sup>。

Ginzburg 和 Budden 的工作为电磁波在等离子体中的传播研究奠定了理论基础<sup>[9]</sup>, Vidmar、Laroussi 等人采用几何光学近似法和解析的方法求解了有限的几种密度分布下的等离子体对电磁波的衰减效应<sup>[10]</sup>。近年来, 基于 FDTD 的各种数值方法开始逐渐被采用, 莫锦军、胡希伟、孙爱萍等人在这方面开展了大量的研究工作<sup>[11~13]</sup>。

本文建立了非均匀等离子体对电磁波的衰减

效应模型, 采用直接 FDTD 方法计算了均匀和非均匀等离子体分布情况下电磁波的衰减系数, 分析了等离子体分布对衰减效应的影响, 并采用空间透射波法测量了微波等离子体推力器(MPT)的等离子体喷流对(4~8)GHz 电磁波的衰减效应, 对数理模型进行了验证。

## 1 数理模型与实验系统

### 1.1 数理模型

假设等离子体源假设为各向同性的、热、碰撞等离子体, 考虑电子电流<sup>[6]</sup>, 则可用如下方程组描述电磁场分布

$$\text{麦克斯韦方程 } \nabla \times \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \nabla \times \vec{H} = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{J};$$

$$\text{电子电流方程 } \frac{\partial \vec{J}}{\partial t} + \nu(\vec{r}) \vec{J} = \epsilon_0 \omega_p^2(\vec{r}) \vec{E} + \frac{e}{m} \nabla p。$$

计算中, 等离子体的密度分布分别取均匀分布和非均匀分布两种。实验用产生的等离子体是一种非均匀分布, 本文先测量了实验等离子体的电子

数密度分布,将其分布的拟合曲线作为计算依据,实验测量值和拟合曲线见图 1。

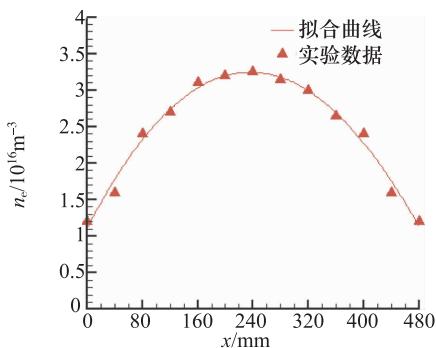


图 1 非均匀等离子体密度分布

计算中,等离子体角频率  $\omega = [n_e e^2 / (m_e \epsilon_0)]^{1/2}$ , 对应的频率可近似为:  $f = \omega / 2\pi \approx 9000 / \sqrt{n_e}$ , 这里  $n_e$  单位为  $\text{cm}^{-3}$ , 给定等离子体频率,亦可反推出等离子体密度。通讯电磁波沿传播路径在  $x$  位置的衰减值为  $R = |20 \lg E(x)/E_0|$ , 式中  $E(x)$  为  $x$  处电场强度幅值,  $E_0$  为入射通讯电磁波电场强度幅值。

## 1.2 实验系统

实验采用空间透射波法<sup>[14]</sup> 测量电磁波在等离子体中的衰减,实验等离子体由微波等离子体发生器产生,这是一种采用微波谐振电离气体工质产生等离子体的方法。实验中,网络分析仪发出的探测电磁波信号经由发射天线发出,在经过等离子体区域被衰减后由接收天线接收并返回网络分析仪,对比发射电磁波信号和接收到的电磁波信号强度,便可以得出电磁波在等离子体区域的衰减系数。实验系统如图 2 所示。

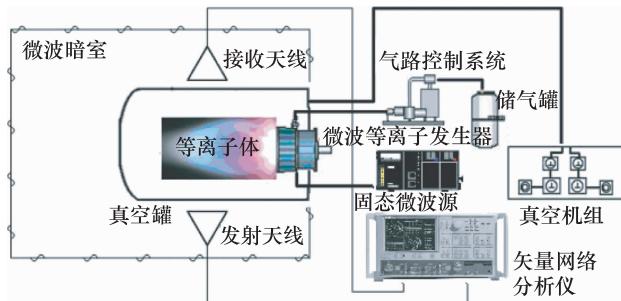


图 2 电磁波在等离子体中衰减效应实验系统示意图

## 2 结果与分析

### 2.1 均匀等离子体分布计算结果

图 3 给出了频率为 4 GHz 的电磁波在均匀等离子体中的衰减效应,这里假设均匀等离子体的密度  $n_e = 2.3 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ , 为实验等离子体的平均密度,等离子体区宽度与实验测得等离子体区域宽度一致,为 480 mm。

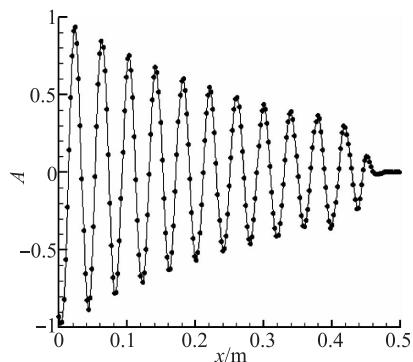


图 3 电磁波信号强度变化

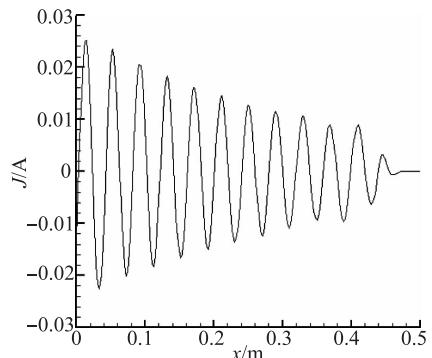


图 4 电子电流密度变化

由图 3 可见,等离子体对电磁波信号有着明显的衰减效应,4 GHz 的电磁波信号通过约 0.5 m 宽度范围的电推力器羽流区域后,衰减系数约为 5 dB,如此的信号衰减强度已不可忽视。

图 4 为等离子体中电子电流密度的分布,电磁波通过等离子体传播时,电磁波的能量通过电子电流传给重粒子,电子电流密度表征着等离子体吸收电磁波能量的效率。对于均匀等离子体,电磁波在刚刚进入等离子体时能量最高,其被等离子体吸收

的能量也最大,故电子电流在入口处最大,并随着电磁波能量的衰减逐渐变小。

等离子体频率(即等离子体密度)、等离子体碰撞频率和电磁波频率对衰减效应起着至关重要的作用,图5(a)—图5(c)分别为等离子体频率 $f_p$ 、等离子体碰撞频率 $f_c$ 和电磁波频率 $f$ 对衰减系数的影响。

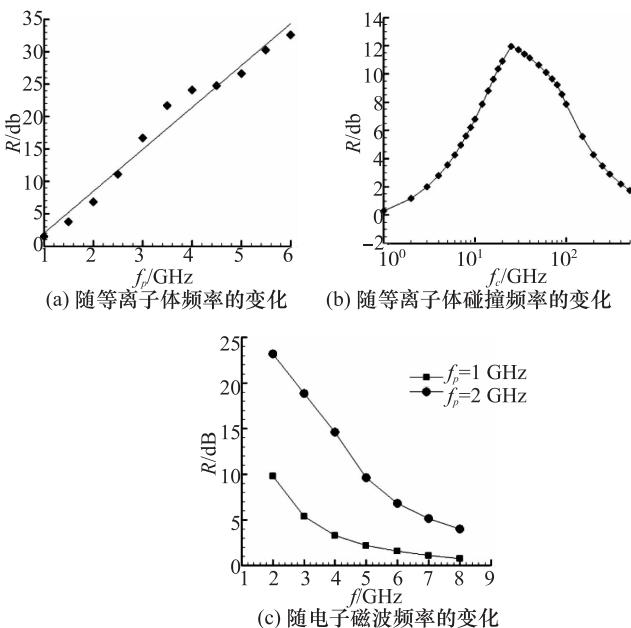


图5 衰减系数随等离子体频率、等离子体碰撞频率、电磁波频率的变化

图5(a)为电磁波频率为6 GHz,等离子体碰撞频率为10 GHz时,衰减系数随等离子体频率的变化,由图可见,随着等离子体频率的升高,衰减系数近似线性增大,即等离子体数密度越高,对电磁波的衰减效应越大;图5(b)为电磁波频率为6 GHz,喷流等离子体频率为2 GHz时,衰减系数随着等离子体碰撞频率的变化,由图可见,随着等离子体碰撞频率的增大,通讯电磁波的衰减系数呈先增大后减小的趋势;图5(c)为等离子体频率 $f_p$ 分别为1 GHz和2 GHz时,衰减系数随电磁波频率的变化关系,由图可见,随着通讯电磁波频率的增高,其在喷流中的衰减系数逐渐减小,即较高频率的电磁波受等离子体的衰减作用较小,此外,等离子体频率为2 GHz时的衰减系数,约为等离子体频率为

1 GHz的2~3倍,与图5(a)的结果相符。

## 2.2 非均匀等离子体分布计算结果

图6为非均匀等离子体中电子电流密度的分布。与均匀等离子体不同的是,电子电流密度在电磁波入口位置较小,沿着 $x$ 方向其强度有着一个先增大后减小的过程。出现这种情况的原因是电磁波入口位置等离子体密度较低,故其中电子吸收电磁波能量也低;随着等离子体密度的逐渐提高,电子电流逐渐增大,随后由于电磁波能量的衰减,电子电流从电磁波中吸收的能量也在变少,故电子电流在增加到最大值后又逐渐减小。

对比图4和图6可知,均匀等离子体对电磁波能量的吸收效率是逐渐衰减的过程,即电磁波能量的衰减主要发生在其进入等离子体区的入口附近;而非均匀等离子体对电磁波能量的吸收过程主要发生在更深入等离子体内部的区域。

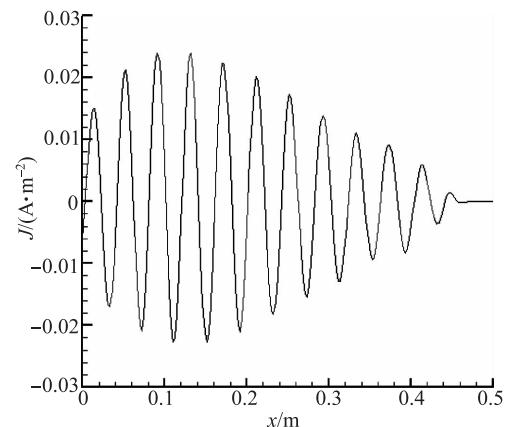


图6 电子电流密度变化

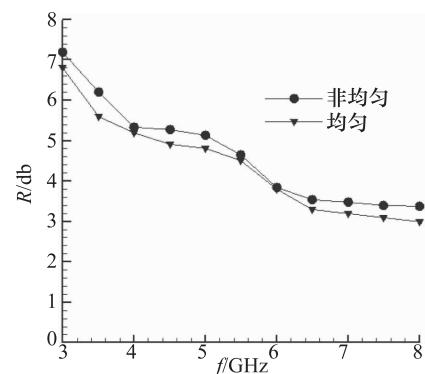


图7 衰减系数随电磁波频率的变化

与均匀等离子体区一样,电磁波通过非均匀等离子体区域时,信号强度同样被大幅度衰减。图7为均匀等离子体和非均匀等离子体两种情况下,衰减系数随电磁波频率的变化,由图7可知,随着电磁波频率的增大,衰减系数逐渐减小,即电推力器等离子体喷流对低频通讯电磁波的影响更为剧烈,对高频通讯电磁波的影响较小。此外,从图7上明显可以看出,非均匀等离子体对电磁波的衰减效果要高于均匀等离子体。

### 2.3 实验测量结果

采用空间透射波法测量电磁波在等离子体中的衰减效应。实验参数为:通讯信号取C波段电磁波,其频率为4 GHz~8 GHz,实验中分别采用4 GHz~6 GHz、6 GHz~8 GHz两套喇叭天线进行测试;实验中等离子体喷流电子数密度分布见图1。测得电磁波在等离子体喷流中的衰减系数如图8所示,图8(a)和图8(b)分别为两套喇叭天线的测量结果。

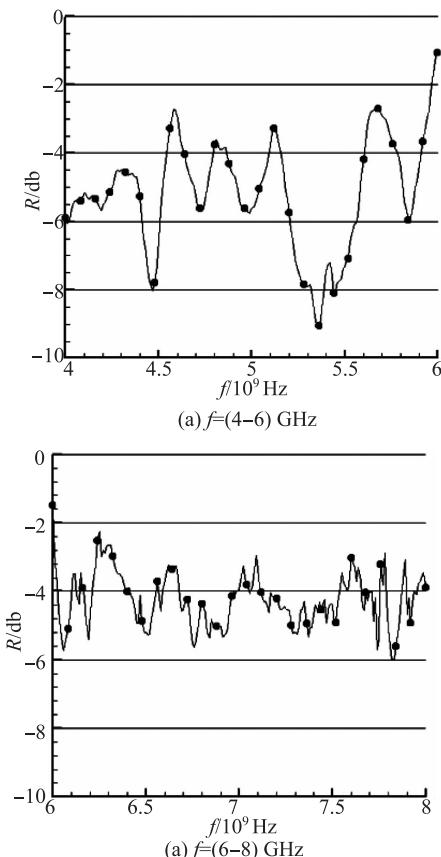


图8 实验测量结果

由图8的实验测试也可以看出,实验等离子体对C波段的通讯电磁波有着明显的衰减效应,衰减系数为(3—10) dB,计算结果与实验测量结果基本一致。

### 3 结论

论文研究了非均匀等离子体对电磁波的衰减效应,分析了其与均匀等离子体在吸收电磁波能量过程中的区别,计算并实验测量了微波等离子体发生器喷出的等离子体对电磁波信号的衰减系数,得到结论如下:

- (1) 衰减系数随着电磁波信号频率的增大逐渐减小,随着等离子体频率的升高近似线性增大,随着等离子体碰撞频率的增大呈先增大后减小的趋势;
- (2) 非均匀等离子体对电磁波的衰减效率较均匀等离子体稍高;
- (3) 非均匀等离子体的能量吸收主要发生在更深入等离子体的内部区域,而不是电磁波进入等离子体的入口区域附近;
- (4) 实验测得的微波等离子体发生器产生的等离子体对电磁波的衰减效果明显,对C波段电磁波的衰减系数约为(3~10) dB,实验测量结果与计算结果一致。

### 参 考 文 献

- 1 孙爱萍,李丽琼,邱孝明,等.电磁波与非磁化等离子体的相互作用.核聚变与等离子体物理,2002;22(3): 135—138
- 2 毕卫红,高艳东.电子对抗新途径-等离子体隐身技术.电磁场与电磁波,2006;36(5): 44—46
- 3 贺武生,毛根旺,陈茂林.电推力器等离子体喷流对航天器通讯电磁波信号衰减效应.强激光与粒子束,2010; 22 (6): 1270—1274
- 4 Noriyoshi O, Haruki T. Interaction between plasma plume of electric propulsion and spacecraft communication. 26th International Electric Propulsion Conference. Kitakyushu;1999
- 5 Korsun A G, Tverdokhlebova E M. The characteristics of the EP exhaust plume in space. 33rd Joint Propulsion Conference and Exhibit, Seattle, WA, July 6—9, 1997

- 6 Hallock G A, Austin W, James C. Development and application of the BeamServer code for plume impact analysis on satellite communication. 37th Joint Propulsion Conference and Exhibit Salt Lake City, UT, July 8—11, 2001
- 7 Kuninaka H, Nishiyama K, Funaki I, et al. Assessment of plasma interactions and flight status of the HAYABUSA asteroid explorer propelled by microwave discharge ion engines. IEEE Transactions on Plasma Science, 2006;34(5): 2125—2132
- 8 Khayms V, Werthman L, Kannenberg K, et al. Status of hall thruster integration activities at lockheed martin space systems company. 39th Joint Propulsion Conference and Exhibit, Huntsville, Alabama July 20—23, 2003
- 9 Ginzberg V L. The propagation of electromagnetic waves in plasma. New York: Pergamon Press, 1970
- 10 Vidmar R J. Electromagnetic wave propagation in unmagnetized plasma. AD-A250710, 1992
- 11 Liu S B, Mo J J, Yuan N C. FDTD simulation of electromagnetic reflection of conductive plane covered with inhomogeneous time varying plasma. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2002;23(8):1179—1191
- 12 庄钊文,袁乃昌,刘少斌.等离子体隐身技术.北京:科学出版社,2005
- 13 项志连,俞昌旋.高温等离子体诊断技术.上海:上海科学技术出版社,1982
- 14 朱冰.导弹雷达舱等离子体隐身原理研究.西安:西北工业大学,2006

## Attenuation Effects of Electromagnetic Wave in Non-uniform Plasma

CHEN Mao-lin<sup>1</sup>, MAO Gen-wang<sup>1</sup>, XIA Guang-qing<sup>2</sup>

(National Key Laboratory of Combustion, Flow and Thermo-structure, Northwestern Polytechnical University<sup>1</sup>, Xi'an 710072, P. R. China;

School of Aeronautics and Astronautics, Dalian University of Technology<sup>2</sup>, Dalian 116024, P. R. China)

**[Abstract]** Interaction between electromagnetic wave and plasma is the key of plasma stealth technique, and one of the important direction of aerospace information confrontation. The attenuation effect of electromagnetic wave in non-uniform plasma was simulated with the FDTD method, and the attenuation coefficient of C-band electromagnetic wave in a non-uniform plasma was diagnosed with the space transmission method. Then influences of plasma distribution to the attenuation effect were analyzed. Research results show that non-uniform plasma has a more obvious attenuation effect than uniform plasma, and a reasonable plasma distribution can improve this attenuation effect.

**[Key words]** plasma      electromagnetic wave      attenuation effect      FDTD