

文章编号: 2095-4980(2016)04-0492-05

## 等离子体天线的基本特性仿真

边明明<sup>1,2</sup>, 周菊<sup>1</sup>

(1.北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094; 2.钱学森空间技术实验室, 北京 100094)

**摘要:** 等离子体天线具有隐身、动态重构等不同于金属天线的独特的物理性质, 在卫星遥感、通信、导航领域具有潜在的应用前景。为了研究等离子体频率对天线特性的影响, 采用三维电磁仿真软件建立了柱形等离子体天线模型, 在此基础上, 针对等离子体频率对等离子体天线的  $S_{11}$  曲线、方向图、增益等性能的影响进行了仿真分析, 并给出了相关结论。

**关键词:** 等离子体; 等离子体天线; 等离子体频率; 计算仿真技术

**中图分类号:** TN971; TN961

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201604.0492

## Simulation on the basic characteristics of plasma antenna

BIAN Mingming<sup>1,2</sup>, ZHOU Ju<sup>1</sup>

(1.Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;

2.Qianxuesen Space Technology Laboratory; Beijing 100094; China)

**Abstract:** Plasma antenna has unique physical properties of stealth, dynamic reconfiguration etc., which is different from metal antenna, and it shows broad application prospects in remote sensing, communications and navigation. In order to study the influence of the plasma frequency on the characteristics of the antenna, a cylindrical plasma antenna model is established in the three-dimensional electromagnetic simulation software. It is analyzed how the plasma collision frequency influences the performance of  $S_{11}$  curve, pattern and gain etc. and some conclusions are given.

**Key words:** plasma; plasma antenna; plasma frequency; Computer Simulation Technology(CST)

等离子体(Plasma)是由大量带电粒子组成的非束缚态宏观体系, 它包含自由电子和自由离子, 也可能存在中性粒子, 是继固、液、气三态后的第 4 种物质存在形态, 是一种处于电离状态的物质高能聚集态<sup>[1-3]</sup>。通常在这种凝聚态中电子所带负电荷与离子所带正电荷的总数相等, 宏观上呈现中性, 因而称为等离子体。等离子体是宇宙空间中普遍存在的一种物质形态, 它们对电磁波的传播有着较大的影响。在一定的条件下, 等离子体能反射电磁波; 在另一种条件下, 它又能吸收电磁波。等离子体天线是采用等离子体代替普通金属传导和辐射电磁波的天线, 利用等离子体对一定频率的电磁波呈现良导体特性而制成。由于等离子体具有独特的物理特性, 等离子体天线具有许多不同于金属天线的优点<sup>[4]</sup>: a) 隐身特性。当天线关闭时, 等离子体天线系统几乎没有金属部件, 雷达散射截面将很小, 在电子战中实现隐身, 提高生存能力。b) 降低互耦。在阵列天线中, 非工作单元与工作单元之间几乎不会产生互耦, 大幅度降低了阵列单元间的干扰, 提高了天线的性能。c) 辐射部件电控制。不需要改变天线的物理结构, 通过改变等离子体的气体成分和电子浓度等物理参数就可以对天线的频率、带宽和方向性等参数进行动态重构, 实现了天线的电控。d) 解决大功率问题。采用高压脉冲等离子体天线, 可以解决目前微波天线设计中的大功率问题, 避免了高压烧毁馈线和天线的情况。e) 结构精巧。天线中的放电管可以是强度高的石英玻璃管, 相对于金属天线, 玻璃制品的重量更轻, 体积更小, 提高了装配效率<sup>[4]</sup>。

随着等离子体天线技术的发展, 在研究等离子体物理特性的基础上, 针对等离子体天线进行建模, 在参数灵活可变的条件下, 精确完成性能仿真是非常有必要的。这对等离子体天线的工程设计与应用具有一定的理论指导意义。影响等离子体天线性能的因素有很多, 例如等离子体碰撞频率和等离子体频率等, 本文主要针对等离子体频率对天线性能的影响进行仿真分析。其在遥感卫星、通信卫星、导航卫星等航天领域具有很大的应用潜力<sup>[5]</sup>。

收稿日期: 2015-06-14; 修回日期: 2016-01-06

基金项目: 钱学森空间技术实验室基金资助项目(DZYF-01)

## 1 CST 中等离子体的实现

### 1.1 等离子体物理特性

#### 1) 等离子体频率<sup>[6-7]</sup>

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}} \quad (1)$$

式中:  $\omega_{pe}$  为等离子体频率, 或郎缪尔振荡频率;  $n_e$  为粒子数密度;  $e$  为电子电荷,  $e = -1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ ;  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$ ;  $m_e$  为电子质量,  $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{kg}$ 。

#### 2) 等离子体碰撞频率

等离子体中存在大量的运动着的电子、离子和中性粒子, 它们之间不断地发生各种类型的碰撞。碰撞的结果是粒子的速度和轨道发生改变。1 s 内发生碰撞的平均次数就称为碰撞频率<sup>[8]</sup>。当知道气体的成分、电离能和电离程度, 借助碰撞截面和平均自由程概念, 可以算出带电粒子与中性粒子的碰撞频率为:

$$\nu = 1.52 \times 10^7 P \sqrt{T_e} \quad (2)$$

式中:  $P$  为气体压强;  $T_e$  为等离子体领域常用温度, 单位是 eV, 1 eV = 11 600 K。

#### 3) 等离子体电导率<sup>[9]</sup>

式(3)给出了等离子体电导率与等离子体频率和等离子体碰撞频率  $\nu$  之间的关系:

$$\sigma = \epsilon_0 \frac{\omega_{pe}^2}{\nu} \quad (3)$$

当等离子体频率一定时, 等离子体电导率与等离子体碰撞频率成反比关系, 等离子体碰撞频率越低, 等离子体电导率越大。当等离子体碰撞频率一定时, 等离子体电导率和等离子体频率成二次方的关系。

### 1.2 等离子体实现

等离子体的性质由电导率  $\sigma$ 、无限大频率处介电常数  $\epsilon_\infty$  和弛豫时间  $t_0$  等 3 个参数来确定, 而这 3 个参数由等离子体频率和等离子体碰撞频率来决定<sup>[10]</sup>。令  $\epsilon_r$  为等离子体相对介电常数,  $\omega$  为入射电磁波频率,  $\epsilon_\infty = 1$ , 则

$$\epsilon_r = \epsilon_\infty + \chi(\omega) + \frac{\sigma}{j\omega t_0} \quad (4)$$

$$\chi(\omega) = -\frac{(\omega_{pe}/\nu)^2}{1 + j\omega/\nu} \quad (5)$$

而等效介电常数  $\epsilon_s$ 、无限大频率处介电常数  $\epsilon_\infty$  和弛豫时间  $t_0$  为:

$$\epsilon_s - \epsilon_\infty = -\left(\frac{\omega_{pe}}{\nu}\right)^2 \quad (6)$$

$$t_0 = \frac{1}{\nu} \quad (7)$$

从上述推导过程可知, 当等离子体频率和等离子体碰撞频率确定后, 4 个参数  $\sigma$ ,  $\epsilon_s$ ,  $\epsilon_\infty$  和  $t_0$  随之被确定。因此, 在 CST MWS 软件中选择色散材料为德鲁特(Drude)模型时只需输入等离子体角频率(等离子体频率的  $2\pi$  倍)和等离子体碰撞频率就可以得到想要的等离子体材料类型<sup>[11]</sup>。

## 2 等离子体天线建模及性能仿真

### 2.1 等离子体天线建模

图 1 为三维电磁仿真软件 CST 中建立的等离子体天线模型。天线主要结构为被外层玻璃管罩住的等离子柱体, 等离子体采用同轴线馈电, 底部为接地金属板。仿真中选用的参数为玻璃管厚度  $d = 2 \text{mm}$ , 等离子柱体长度  $L = 160 \text{mm}$ , 半径  $R = 5 \text{mm}$ , 同轴线外径  $b = 1.6 \text{mm}$ , 内径  $a = 0.7 \text{mm}$ , 中间介质为空气, 基板为  $45 \text{mm} \times 45 \text{mm}$ 。仿真中假设等离子体在管内均匀分布。

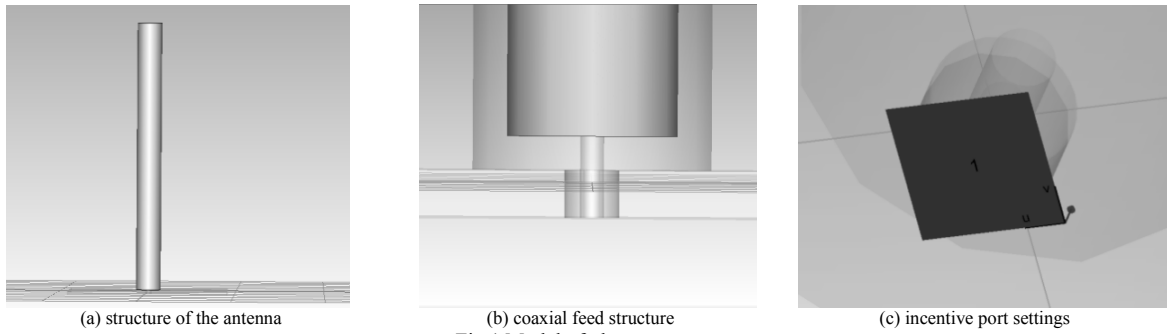


Fig.1 Model of plasma antenna  
图 1 等离子体天线模型

2.2 等离子体天线性能仿真

令等离子体碰撞频率  $\nu=5$  MHz, 改变等离子体频率  $f_{pe}$ , 仿真得到回波系数  $S_{11}$ 、方向图和增益性能如下。

1)  $S_{11}$  仿真分析

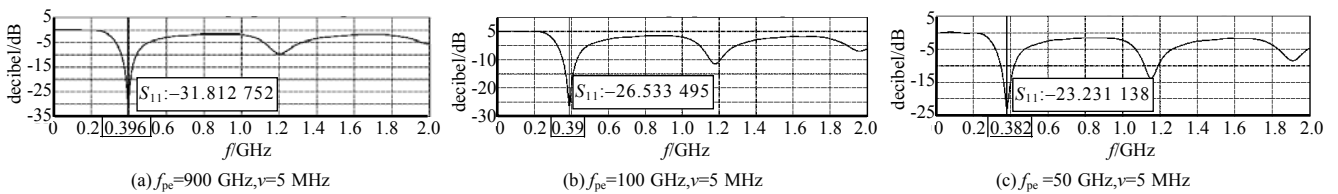


Fig.2  $S_{11}$  of antenna with different  $f_{pe}$  when  $\nu=5$  MHz  
图 2  $\nu=5$  MHz 时, 不同  $f_{pe}$  下天线的  $S_{11}$  曲线图

图 2 为不同等离子体频率下的  $S_{11}$  曲线, 进而对  $f_{pe}$  取 600 GHz, 300 GHz, 80 GHz 和 65 GHz 下的  $S_{11}$  曲线进行仿真。从图 2 中读出的谐振频率和谐振深度列于表 1 中。当等离子体碰撞频率保持不变时, 第 1 谐振频率和谐振深度都随着等离子体频率减小而减小。谐振频率随等离子体频率变化时的变化并不明显, 所以随着等离子体频率变大, 等离子体天线的电长度稍有减小, 基本保持不变。当等离子体频率较小时, 谐振深度较小,  $S_{11}$  较大, 则天线损耗变大, 天线辐射性能会下降。

表 1 第 1 谐振频率、谐振深度在不同  $f_{pe}$  下的值

$f_{pe}/\text{GHz}(\nu=5 \text{ MHz})$	resonance frequency/GHz	$S_{11}/\text{dB}$
900	0.396	-31.812 752
600	0.396	-30.715 148
300	0.395	-29.927 563
100	0.390	-26.533 495
80	0.388	-25.620 434
65	0.386	-24.610 070
50	0.382	-23.231 138

2) 方向图仿真分析<sup>[11-13]</sup>

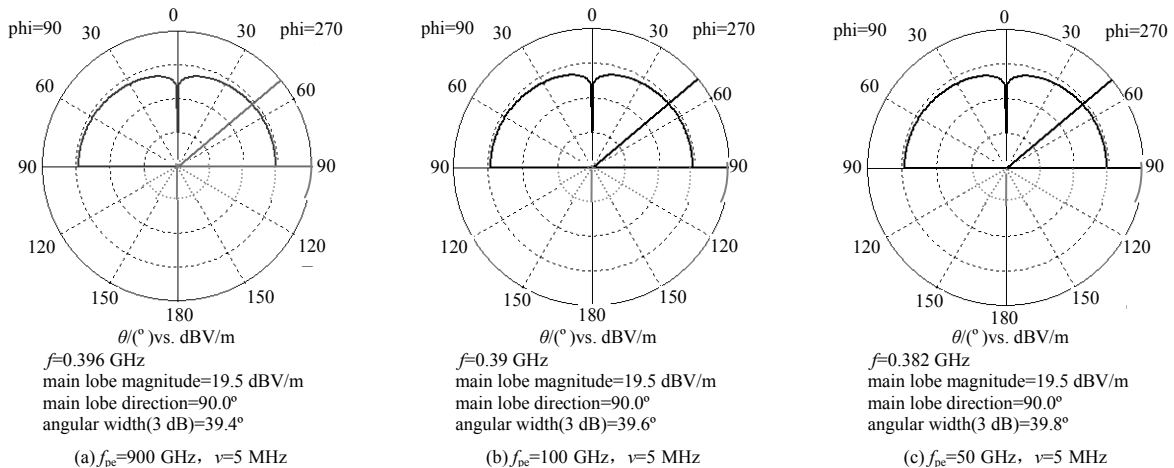


Fig.3  $\nu=5$  MHz, antenna pattern in  $E$ -plane with different  $f_{pe}$   
图 3  $\nu=5$  MHz 时, 不同  $f_{pe}$  下天线的  $E$  面方向图

由图 3 和图 4 可知,保持等离子体碰撞频率不变,改变等离子体频率时,天线的  $E$  面和  $H$  面方向图几乎完全重合,因此等离子体频率的改变对天线的方向性没有影响。

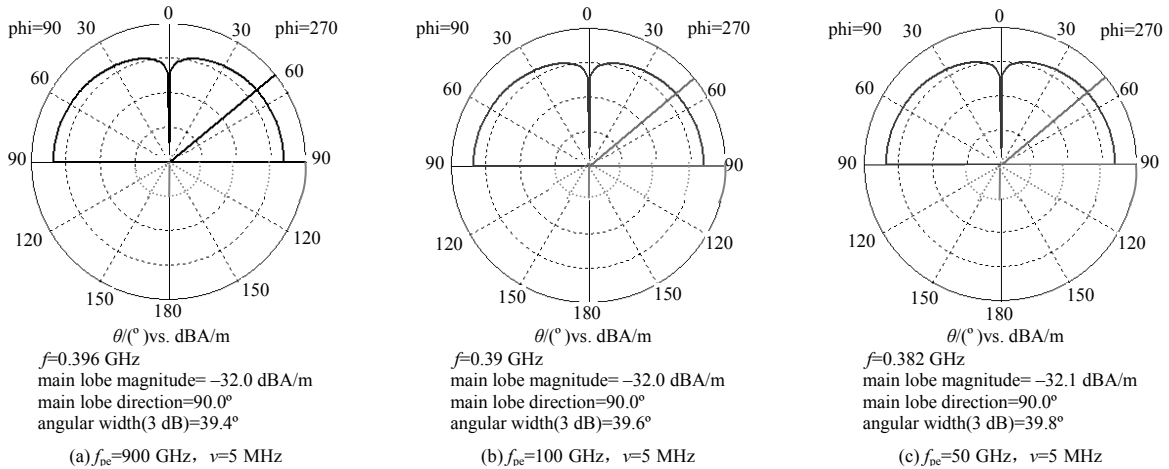


Fig.4  $\nu=5$  MHz, antenna pattern in  $H$ -plane with different  $f_{pe}$   
图 4  $\nu=5$  MHz 时,不同  $f_{pe}$  下天线的  $H$  面方向图

3) 增益仿真分析<sup>[14]</sup>

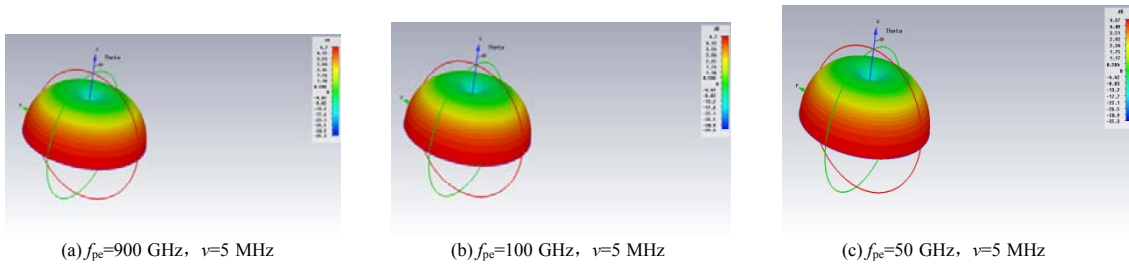


Fig.5  $\nu=5$  MHz, the first resonant frequency antenna gain with different  $f_{pe}$   
图 5  $\nu=5$  MHz 时,不同  $f_{pe}$  下的第一谐振频率处天线增益

图 5 为不同等离子体频率下的天线增益方向图,从图 5 中读出的谐振频率处各天线增益值列于表 2 中。当等离子体碰撞频率保持不变时,随着等离子体频率增高,等离子体在第一谐振频率处的增益增大,天线性能增强。当等离子体频率小于 80 GHz 时,天线增益随等离子体频率的减小而减小得更快,天线性能降低得更加明显。

表 2 不同  $f_{pe}$  下的天线增益

Table2 Antenna gain with different  $f_{pe}$

$f$ /GHz( $\nu=5$ MHz)	gain/dB
900	4.759
600	4.759
300	4.758
100	4.741
80	4.737
65	4.725
50	4.699

3 结论

本文利用 CST 仿真软件对等离子体天线进行了建模,并针对等离子体频率对等离子体柱状天线的  $S_{11}$  曲线、方向图、增益的性能影响进行了分析,初步得到结论如下:

- 1) 当等离子体碰撞频率保持不变时,第一谐振频率和谐振深度都随着等离子体频率减小而减小。谐振频率随等离子体频率变化时的变化并不明显,所以随着等离子体频率变大,等离子体天线的电长度稍有减小,基本保持不变。当等离子体频率较小时,谐振深度较小,  $S_{11}$  较大,则天线损耗变大,天线辐射性能会下降。
- 2) 保持等离子体碰撞频率不变,改变等离子体频率时,天线的  $E$  面和  $H$  面方向图几乎完全重合。
- 3) 随着等离子体频率增高,等离子体在第一谐振频率处的增益增大,天线性能增强。当等离子体频率小于某一数值时,天线增益随等离子体频率的减小而减小得更快,天线性能降低得更加明显。

参考文献:

[1] 李学识,胡斌杰,李瀚宇,等. 等离子体天线研究与应用进展[J]. 现代电子技术, 2010,33(5):66-68. (LI Xueshi,HU Binjie, LI Hanyu,et al. Research and application progress of plasma antenna[J]. Modern Electronic Technology, 2010,33(5):66-68.)

- [ 2 ] 尹昌刚. 等离子体天线的理论与应用研究[M]. 南京:南京航空航天大学, 2009. (YIN Changgang. Theory and Applications of Plasma Antenna[M]. Nanjing,China:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.)
- [ 3 ] 贺胜. 等离子体定向隐身天线的理论与技术研究[M]. 南京:南京航空航天大学, 2008. (HE Sheng. Study of Theory and Technology of Plasma Orientation Stealth Antenna[M]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.)
- [ 4 ] 夏新仁,尹成友,金贤龙,等. 等离子体天线的原理及特性[J]. 上海航天, 2009,26(6):8-12. (XIA Xinren,YIN Chengyou, JIN Xianlong,et al. Principles and properties of plasma antenna[J]. Aerospace Shanghai, 2009,26(6):8-12.)
- [ 5 ] 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]. 太赫兹科学与信息电子学报, 2015,13(2):203-204. (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):203-204.)
- [ 6 ] RAYNER J P,WHICHELLO A P,CHEEITHAMA D. Physical characteristics of plasma antennas[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2004,32(1):269-281.
- [ 7 ] 陈宗胜,时家明,王甲寅,等. 表面波等离子体天线的柱状等离子体源参数研究[J]. 真空电子技术, 2008(2):18-21. (CHEN Zongsheng,SHI Jiaying,WANG Jiayin,et al. Research on parameters of the plasma column source for the surface wave plasma antenna[J]. Vacuum Electronics, 2008(2):18-21.)
- [ 8 ] ALEXEFF I,ANDERSON T,PARAMESWARAN S,et al. Experimental and theoretical results with plasma antennas[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2006,34(2):166-170.
- [ 9 ] Theodore Anderson. Plasma Antennas[M]. USA:Artech House, 2011.
- [ 10 ] MOISAN M,ZAKRZEWSKI Z J. Plasma source based on the propagation of electromagnetic surface waves[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 1991,24:1025-1048.
- [ 11 ] 孙乃峰,王世庆. 真空等离子体天线的基本特性研究[J]. 真空, 2009,46(2):60-62. (SUN Naifeng,WANG Shiqing. Basic characteristics of vacuum plasma antennas driven by single-pole surface wave[J]. Vacuum, 2009,46(2):60-62.)
- [ 12 ] 钱志华. 等离子体天线的辐射与散射特性分析[M]. 南京:南京理工大学, 2006. (QIAN Zhihua. Analysis of Radiation and Scattering Characteristic of Plasma Antenna[M]. Nanjing,China:Nanjing University of Science and Technology, 2006.)
- [ 13 ] 赵国伟,徐跃民,陈诚. 柱形等离子体辐射场和阻抗的数值计算[J]. 物理学报, 2006,55(7):3458-3462. (ZHAO Guowei, XU Yuemin,CHEN Cheng,et al. Dispersion relation of plasma antenna and radiation field calculation[J]. Acta Physica Sinica, 2006,55(7):3458-3462.)
- [ 14 ] 吴戈雯,梁志伟. 等离子体天线原理与设计[J]. 现代雷达, 2012,34(4):59-61. (WU Gemin,LIANG Zhiwei. Principle and design of plasma antennas[J]. Modern Radar, 2012,34(4):59-61.)

#### 作者简介:



**边明明**(1985-), 男, 江西省吉安市人, 博士, 高级工程师, 研究方向为卫星微波遥感、太赫兹技术、星载 SAR 成像、高速实时信号处理。申请专利 11 项, 4 项已获得授权。在《IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing》, 《IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters》, 《Electronics Letters》等国内外权威期刊发表 SCI 期刊论文 3 篇, 在 EUSAR, ICSP, IET International Radar Conference, ICCASM, IASP、《太赫兹科学与电子信息学报》、《兵工学报》、《信号处理》、《计算机工程与应用》、《航天器工程》等国际学术会议及国内核心期刊上发表学术论文 20 余篇, 出版译著 1 部, email:bianming ming2008@163.com.

**周菊**(1987-), 女, 北京市人, 硕士, 工程师, 从事电磁场理论与技术研究。