

# 等离子体柱天线的辐射特性

夏新仁<sup>1</sup>, 尹成友<sup>1</sup>, 王光明<sup>2</sup>

(1. 解放军电子工程学院, 安徽 合肥 230037; 2. 空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

**摘要:**叙述了等离子体柱的产生,并对使用等离子体代替金属用来构成最基本的天线振子的可行性进行了分析。参考传统金属天线辐射场的求解方法,在简化的条件下求得了等离子体柱天线行波传输和驻波对称振子结构等离子体天线驻波传输的电场辐射方向图,结合方向图,分析了等离子体参数变化时对应辐射方向图的变化规律,证实了等离子体柱天线方向图的可控性,同时,也说明了利用等离子体柱天线进行信号传输有一定的应用价值。

**关键词:**等离子体柱天线; 辐射方向图; 等离子体密度

**中图分类号:** P354    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1009-3516(2008)02-0068-04

与传统金属天线相比,等离子体天线具有许多优点,它重量更轻,尺寸更小。等离子体天线不在使用状态或者需要隐蔽时,只需将天线基部的表面波耦合器关闭,它既不对探测雷达产生后向散射波,也不会吸收可降低电子对抗效能的高功率微波辐射,使得天线“隐身”成为可能<sup>[1-3]</sup>。每发射一个载波脉冲后关断等离子体天线,可以消除传统金属天线中的振铃现象,从而减少衰落。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<sup>[4]</sup>。这种等离子体柱天线具有巨大的应用前景。

## 1 等离子体柱的产生

等离子体柱天线的气体可以是密封在管子里的,也可以直接对大气中的气体进行电离。电离气体的方法也有许多种,利用直流高压、射频、波导以及激光等各种方式都可以产生等离子体。射频激励等离子体作为一种无电极激励的方式,近几年发展很快。相比其他产生方式而言,利用这种方式激励的维持时间长,对等离子体干扰小,寿命长,密度可高达 $10^{11}/\text{cm}^3 - 10^{12}/\text{cm}^3$ 等等<sup>[5-7]</sup>。

## 2 理论分析与推导

### 2.1 等离子体柱天线的可行性分析

由等离子体理论可知,等离子体中波的行为与其相对介电常数 $\tilde{\epsilon}_r$ 关系十分密切<sup>[8]</sup>。当入射电磁波的频率 $\omega$ 大于等离子体频率 $\omega_{pe}$ 时有 $0 < \tilde{\epsilon}_r < 1$ ,则等离子体的性质如同介质,电磁波以 $\lambda_0/\sqrt{\tilde{\epsilon}_r}$ 的波长在等离子体中传播,其中 $\lambda_0$ 为自由空间的波长。电磁波在等离子体中传播时,电磁波的能量被等离子体迅速吸收。当入射电磁波的频率 $\omega$ 小于等离子体频率 $\omega_{pe}$ 时有 $\tilde{\epsilon}_r < 0$ ,则等离子体的性质就如同金属,电磁波不能在等离子体内传播,只能反射。对于被绝缘管密封的高密度等离子体而言,频率低于等离子体频率的电磁波可以以表面波的模式进行传播。表面波被紧紧束缚在管壁表面,沿半径方向的波会很快衰减,但表面波会沿绝缘管的轴向进行传播。等离子体表面波的传播类似于波在金属天线振子上的传播,因此等离子体柱像金属棒一

收稿日期:2007-05-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60671057)

作者简介:夏新仁(1976-),男,安徽当涂人,博士,主要从事电磁场与微波技术方面研究;E-mail:xxr\_1016@163.com  
尹成友(1964-),男,安徽巢湖人,教授,博士生导师,主要从事电磁场数值计算等方面的研究。

样可以用来作为天线辐射振子向外发送电磁波。

## 2.2 等离子体柱天线的方向函数推导

将等离子体柱的轴向表面电流  $J_z$  近似认为等同于金属表面电流分布。等离子体柱在远场区的近似为  $R \gg h, h \gg r, R$  为从观察点到等离子体柱底端的距离,  $g$  为等离子体柱的长度,  $r$  为等离子体的半径。由传统天线的理论可知,在外部自由空间中,电流  $J_z$  引起的远区辐射电场  $E$  只有  $\theta$  方向上的分量。将等离子体柱沿  $z$  轴分成  $n$  段,每一段的长度为  $dz$ ,另外,当满足远场近似条件  $R \gg h$  时,观察点到小电流元的距离近似有  $R' = R - z \cos \theta$ ,并且只把  $R$  和  $R'$  引起的差别在相位中考虑,由每小段电流元产生的辐射电场在整个等离子体柱范围内积分,可得等离子体柱天线产生的辐射电场为

$$E_{\theta} = j \frac{\eta_0 k_0}{4\pi R} \sin \theta \exp(-jk_0 R) \int_0^h I(z) \exp(jk_0 z \cos \theta) dz \quad (1)$$

式中:  $\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} \approx 120\pi$ ;  $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$  为自由空间传播波矢量的大小;  $I$  为沿等离子体柱的表面电流大小。

当信号在等离子体柱表面传输为行波时,等离子体中的波矢量为  $k = ke_z$ ,则可得等离子体中的电流为

$$I(z) = J_z(z) = I_0 \exp[j(kz - \omega t)] \quad (2)$$

式中:  $\omega$  为信号的角频率,且假定电流幅度  $I_0$  与波矢量  $k$  无关,所以当波矢量  $k$  变化时,就不需要考虑电流幅度的变化,将式(2)代入式(1)可得

$$E_{\theta} = \frac{\eta_0 k_0 I_0}{4\pi R} \sin \theta \exp(-jk_0 R) \exp(j\omega t) \frac{\exp[jh(k_0 \cos \theta - k)] - 1}{k_0 \cos \theta - k} \quad (3)$$

由此可得未归一化的辐射电场方向函数为

$$F(\theta) = \left| \sin \theta \frac{\sin[(k_0 h \cos \theta - kh)/2]}{k_0 \cos \theta - k} \right| \quad (4)$$

由电磁理论可知,折射率  $n = k/k_0$ ,则式(4)可变为

$$F(\theta) = \left| \sin \theta \frac{\sin[k_0 h(n - \cos \theta)/2]}{n - \cos \theta} \right| \quad (5)$$

对于对称振子结构的等离子体柱天线的辐射电场方向函数的计算,仍然将信号从等离子体柱天线的中间馈入,认为与金属对称振子类似,电流按照正弦分布,且终端电流等于零,并假设振子中点在原点,轴线为  $z$  轴,则电流可以表示为

$$\begin{cases} I(z) = J_z(z) = I_0 \sin[k(h/2 - z)] \exp(j\omega t), z > 0 \\ I(z) = J_z(z) = I_0 \sin[k(h/2 + z)] \exp(j\omega t), z < 0 \end{cases}$$

将上式电流表达式代入式(1),可得对称振子结构的等离子体柱天线的未归一化辐射电场方向函数,化简后

$$F(\theta) = \left| \frac{n \sin \theta}{n^2 - \cos \theta} \left[ \cos\left(\frac{k_0 h \cos \theta}{2}\right) - \cos\left(\frac{nk_0 h}{2}\right) \right] \right| \quad (6)$$

## 3 仿真结果与分析

### 3.1 等离子体柱天线无衰减行波传输的辐射方向图

采用 30 MHz 射频激励真空度为 10 Pa 的气体柱,产生的等离子体密度约为  $5 \times 10^{11}/\text{cm}^3$ ,并且认为沿等离子体柱是均匀分布的,碰撞频率为 500 MHz,对应的等离子体频率为 6.36 GHz<sup>[9]</sup>。电磁波传输的频率为 200 MHz,等离子体柱天线的长度为  $h = 5\lambda/3$ ,图(1) - 图(3)为当等离子体折射率  $n$  变化时,仿真得到的等离子体柱天线的归一化  $E$  面辐射方向图和  $f(\theta)$  随  $\theta$  变化图。对于等离子体而言,当改变等离子体的密度时,波在等离子体中传播的波矢量要发生相应的变化,折射率  $n$  也要发生相应的变化。由图(1)、图(2)可知,随着折射率  $n$  的不断增大,辐射方向图发生周期性变化,原因是式(5)中  $n - \cos \theta$  项中  $\cos \theta$  的作用随着  $n$  的增大越来越小,当折射率  $n$  增大到一定的程度  $n - \cos \theta \approx n$ ,与方向无关,这时方向函数为  $F(\theta) = |\sin \theta \sin(k_0 hn/2)|$ ,从此可以看出,  $F(\theta)$  对  $n$  是个周期为  $2\pi/k_0 h$  的周期函数。另外,由图(3)可知,随着折射率  $n$  的不断增大,天线的增益系数不断减小。

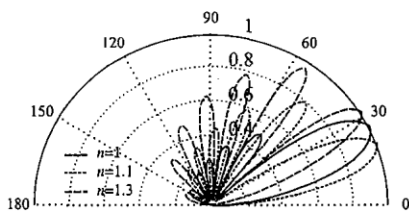


图1  $h = 5\lambda/3, n = 1, 1.1, 1.3$  时行波传输的  $E$  面方向图

Fig. 1 Radiation patterns in the  $E$  plane of traveling wave with  $h = 5\lambda/3, n = 1, 1.1, 1.3$

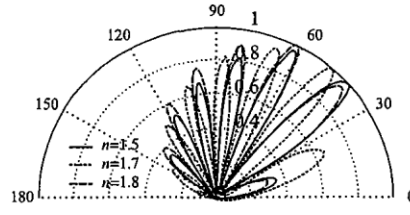


图2  $h = 5\lambda/3, n = 1.5, 1.7, 1.8$  时行波传输的  $E$  面方向图

Fig. 2 Radiation patterns in the  $E$  plane of traveling wave with  $h = 5\lambda/3, n = 1.5, 1.7, 1.8$

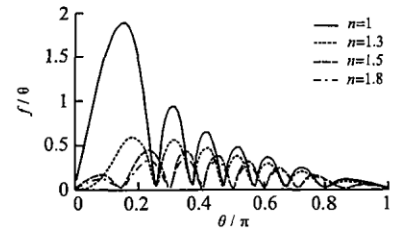


图3  $h = 5\lambda/3, n$  取不同值时  $f(\theta)$  随  $\theta$  的变化图

Fig. 3  $f(\theta)$  distribution with  $h = 5\lambda/3, n = 1.5, 1.7, 1.8$

### 3.2 等离子体柱天线有衰减行波传输的辐射方向图

若折射率  $n$  不是实数, 电磁波在等离子体表面传输有一定的衰减, 因此, 在计算辐射场之前, 必须先根据等离子体的色散关系得出等离子体的波传播矢量。在等离子体相对介电常数  $\tilde{\epsilon}$  沿等离子体柱不变的情况下, 有等离子体的色散关系为<sup>[10]</sup>

$$\tilde{\epsilon}_r T_0 I_1(T_p a) K_0(T_0 a) + T_p K_1(T_0 a) I_0(T_p a) = 0 \quad (7)$$

式中:  $T_p = k^2 - \tilde{\epsilon}_r k_0^2$ ;  $T_0 = k^2 - k_0^2$ ;  $I(\cdot)$  和  $K(\cdot)$  分别为第 1 类和第 2 类变形 Bessel 函数。仍然选用文献[9]中的参数, 由式(7)可求出等离子体中的波矢量大小, 从而求得折射率  $n = 1.15 - j0.07$ 。将设置的各个参数代入式(5)中, 并分别取  $h = 1/4\lambda, 1/2\lambda, 3/4\lambda, \lambda$ , 得到各自相应的未归一化的辐射电场方向函数, 结果如图 4、图 5 所示。由图 5 可知, 由于折射率  $n$  的虚部较小, 辐射场方向图的整体形状与没有衰减时相似, 但是随着  $h$  的增加, 影响变得相当明显, 当  $h$  分别为  $3/4\lambda, \lambda$  时, 图中多出了一对小尖峰, 且随着  $h$  增大, 天线增益系数也不断增大。

当等离子体的密度  $n_0$  变化, 其他参数不变时, 从式(7)可以得到折射率  $n$  随着等离子体的密度  $n_0$  变化的相应值, 把它们代入式(5), 并取  $n = \lambda$ , 可以得出随等离子体密度变化时的全波电场辐射方向图, 如图 6 所示。从图中可知, 当等离子体密度  $n_0$  比较小时, 折射率  $n$  的虚部较大, 电场辐射方向图近似为“8”字形, 且最大辐射方向接近  $\pm 90^\circ$  方向, 当等离子体密度  $n_0$  逐渐增大时, 相对应的折射率  $n$  的虚部越来越小, 实部趋近于 1, 当等离子体的密度  $n_0 > 1 \times 10^{12}/\text{cm}^3$  时, 基本上与金属天线的辐射方向图相当。

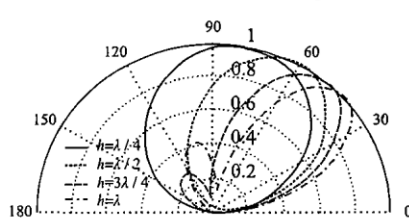


图4  $h$  取不同值时, 有衰减行波传输的  $E$  面方向图

Fig. 4 Radiation patterns in the  $E$  plane of decaying traveling wave with different  $h$

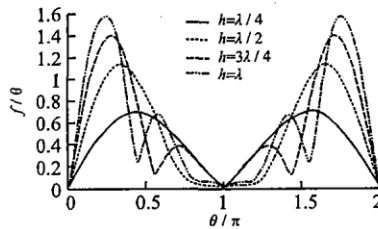


图5  $h$  取不同值时, 有衰减行波传输的  $f(\theta)$  随  $\theta$  的变化图

Fig. 5  $f(\theta)$  distribution of decaying traveling wave with different  $n$

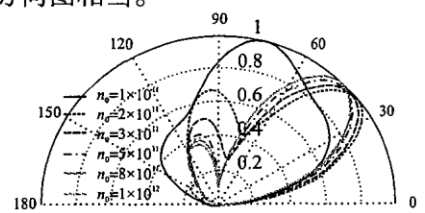


图6  $n$  取不同值时, 有衰减行波传输的  $E$  面方向图

Fig. 6 Radiation patterns in the  $E$  plane of decaying traveling wave with different  $n$

### 3.3 对称振子结构等离子体柱天线的辐射方向图

等离子体的参数不变(同 3.2 中的参数), 取信号源的频率为 225 MHz, 分别取等离子体柱长度  $h$  为  $\lambda, 3/2\lambda$ , 应用式(6), 得到相应的  $E$  面辐射方向图(如图 7 所示)。由于等离子体传播的波矢量的实部接近自由空间传播的波矢量的大小, 而等离子体传播的波矢量的虚部较小, 所以全波等离子体柱天线的  $E$  面辐射方向图与金属天线的比较类似, 只是在中间稍微有些突出, 但 3 倍半波等离子体柱天线的  $E$  面辐射方向图与金属天线的差别就比较明显了, 中间的旁瓣有些减小, 两侧的主瓣有些增大, 且由图 7 可知, 随着  $h$  的增大, 天线的增益系数减小。

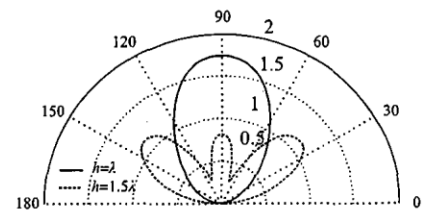


图7  $h$  变化时, 对称振子结构等离子体柱天线的辐射场

Fig. 7 Radiation field of plasma dipole with different  $h$

## 4 结论

通过计算和仿真,可以看出,对于远场来说,等离子体柱天线的辐射图和金属天线的辐射图有很多类似之处。但当等离子体的某些参数发生变化时,由于等离子体中的传播波矢量会随之变化,从而会引起辐射方向图的变化,因此通过调节等离子体某些参数可以控制等离子体柱天线的辐射方向图。

### 参考文献:

- [ 1 ] Norris E G. Gas Tube RF Antenna;US Patent number,5594465[P]. 1997-01-14.
- [ 2 ] Anderson T R, Multiple. Tube Plasma Antenna;US, Patent number 5963169[P]. 1999-10-05.
- [ 3 ] 邓素芬. 等离子体隐身技术分析[J]. 电子对抗, 2006, 29(1): 7-10.  
DENG Sufen. Analysis of Plasma Stealthy Technique[J]. Electronic Warfare, 2006, 29(1): 7-10.
- [ 4 ] Norris E G. Reconfigurable Plasma Antenna;US, Patent number 6369763 [P]. 2002-04-09.
- [ 5 ] 李应红, 吴云, 宋慧敏, 等. 大气等离子体流动控制实验[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2006, 7(3): 1-4.  
LI Yinghong, WU Yun, SONG Huimin, et al. Preliminary Experimental Investigation of Atmosphere Plasma Flow Control Technology[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2006, 7(3): 1-4. (in Chinese)
- [ 6 ] 张前悦, 王光明, 夏冬玉, 等. 一种阵列天线的波束赋形设计[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2006, 7(5): 17-20.  
ZHANG Qian Yue, WANG Guangming, XIA Dongyu, et al. A design of Beam Shaping of an Array Antenna[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2006, 7(5): 17-20. (in Chinese)
- [ 7 ] 魏沅亭, 宋慧敏, 李应红, 等. 等离子体激励控制圆柱绕流的影响因素分析[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2007, 8(3): 1-4.  
WEI Fengting, SONG Huimin, LI Yinghong, et al. Analysis of Factors Affecting Plasma Actuation Based Cylinder - Around - Flow Control[J]. Journal of Air Force Engineering University: National Science Edition, 2007, 8(3): 1-4. (in Chinese)
- [ 8 ] Goldston R J, Rutherford P H. Plasma Physics[M]. [s.l]: Institute of Physics publishing, 1995.
- [ 9 ] Borg G G, Harris J H. Plasmas as Antennas - theory, Experiment and Applications[J]. Phys Plasma, 2000, 7(5): 2198-2202.
- [ 10 ] Borg G G, Harris J H. Application of Plasma Columns to Radiofrequency Antennas[J]. Applied Physics Letters. 1999, 74(22): 3272-3275.

(编辑: 田新华, 徐楠楠)

## Study of Radiation Characteristics of Plasma Column Antenna

XIA Xin-ren<sup>1</sup>, YIN Cheng-you<sup>1</sup>, WANG Guang-ming<sup>2</sup>

( 1. PLA Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, Anhui, China; 2. The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, Shaanxi, China )

**Abstract:** The development of plasma column is described in this paper. The feasibility of replacing metal by plasma column in making the fundamental antenna vibrator is analyzed. According to approach to radiation pattern of metal, the radiation patterns of traveling wave in a plasma antenna and standing wave transmitting in a plasma dipole antenna in simple condition are calculated. Based on the radiation patterns, the variation law of radiation patterns for plasma parameters being changed is analyzed, the controllability of plasma column antenna's radiation patterns is confirmed, and the result shows that utilizing plasma column antenna for transmitting signals is of certain value in application. **Key words:** plasma column antenna; radiation pattern; plasma density