

•测试、试验与仿真•

等离子体抛物柱面天线的设计

曾 杰,袁忠才,刘 洋,张继魁,李志刚,时家明

(电子工程学院 脉冲功率激光国家重点实验室,合肥 230037)

摘 要:利用等离子体的电磁波反射特性,等离子体可用于设计反射面天线,设计了金属抛物柱面天线和发光等离子体抛物柱面天线,并利用CST仿真软件计算了他们的辐射特性,分析影响发光等离子体抛物柱面天线辐射和散射性能的关键参数。仿真结果表明,选取适当等离子体柱间距,等离子体频率,碰撞频率,发光等离子体抛物柱面天线具有和金属抛物柱面天线一样的辐射性能,同时在等离子体天线工作和不工作时其RCS均比金属天线小,特别在等离子体不工作时其双站RCS缩减程度大于以往相关文献的设计。

关键词:等离子体;抛物柱面天线;RCS

中图分类号: O539

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2016)-05-0066-05

Design of Plasma Parabolic Cylindrical Antenna

ZENG Jie, YUAN Zhong-cai, LIU Yang, ZHANG Ji-kui, LI Zhi-gang, Shi Jia-ming

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: By using the electromagnetic wave reflection characteristics of the plasma, the plasma can be used to design the reflector antenna. A metal parabolic cylindrical antenna and a plasma luminescence parabolic cylindrical antenna are designed. The computer simulation technology (CST) software is used to calculate the radiation characteristics and the key parameters influencing on plasma luminescence parabolic cylindrical antenna radiation and scatter characteristics are analyzed. The simulation results show that selecting appropriate plasma column spacing, plasma frequency and collision frequency, the plasma luminescence parabolic cylindrical antenna has the same radiation characteristic as metal parabolic antenna, at the same time, the radar cross-section (RCS) of plasma antenna in operation and without operation are all smaller than that of the metal antenna, especially in plasma without operation, the bistatic RCS reduces to a greater extent than that of the previous related literature design.

Key words: plasma; parabolic cylindrical antenna; radar cross-section (RCS)

随着电磁环境的日益复杂,电磁信号越来越密集,威胁目标种类越来越多样化,以常规的单波束天线组成的系统越来越难于适应现代装备的需要,抛物柱面天线因其高增益和强方向性而被雷达和卫星广泛采用^[1]。抛物柱面反射天线可以在一定的方位面、俯仰面内形成同时多方向的波束簇,在宽频带范围内,能快速地对应于不同方位、不同仰角方向上的各种目标,实现频率和方向的双重瞄准^[2],同时

由等离子体对入射电磁波的反射特性可设计等离子体反射面天线。图1和图2为等离子体抛物天线和抛物天线的实物图^[3]。

1 仿真实验

用CST软件设计了等离子体偏馈栅形抛物柱面天线来替代金属偏馈抛物柱面天线,通过改变等

收稿日期:2016-08-03

基金项目:国防预研基金资助

作者简介:曾杰(1994-),男,江西吉安人,硕士,主要从事等离子体的研究。

离子体频率,碰撞频率,柱间距观察其对天线辐射性能的影响,并分析等离子体抛物柱面天线的隐身性能。

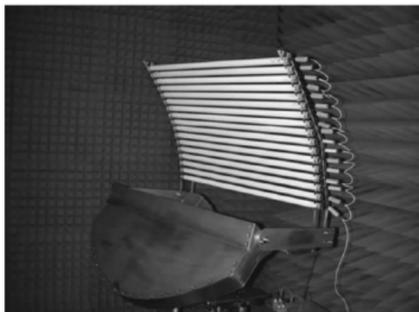


图1 等离子体反射面天线



图2 金属反射面天线

反射体由以 $x^2=100y$ 的抛物线母线绕焦线平移而成,其截面侧视图如图3所示。

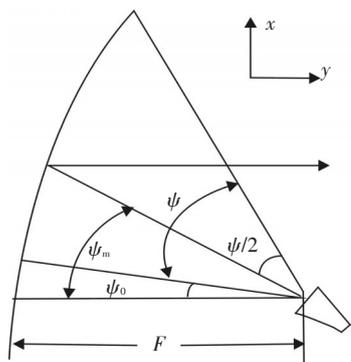


图3 天线截面图

$F=25\text{ mm}$, $T=25\text{ mm}$, 天线采用偏馈形式, 为了避免抛物柱面反射波对馈源的影响, 截去抛物柱面张角小于 $\psi_0=5^\circ$ 的部分, 抛物柱面夹角为 $\psi=55^\circ$, 其中 $\psi_0+\psi=60^\circ$, ψ_m 为抛物柱面夹角平分线指向, $\psi_m=30^\circ$ 。馈源采用TEM喇叭馈源, 结构如图4所示。

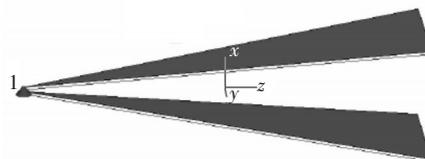


图4 TEM喇叭馈源

它是一个两导体构成的端射行波天线, 它由两个三角形金属板构成TEM波传播系统^[4], 金属天线模型如图5所示。等离子体模型如图6所示。其中等离子体采用Drude模型, 碰撞频率为0.1 GHz, 等离子体频率为100 GHz, 等离子体柱为17根, 柱间距约为3.2 mm。

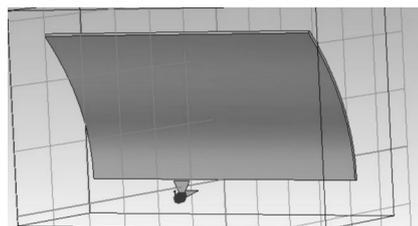


图5 金属偏馈抛物柱面天线

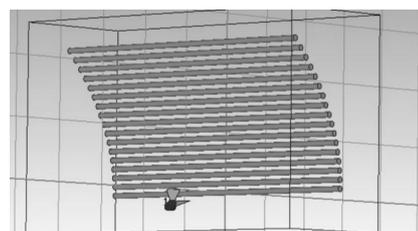


图6 等离子体偏馈抛物柱面天线

通过仿真可得, 它们的S11值如图7和图8所示。

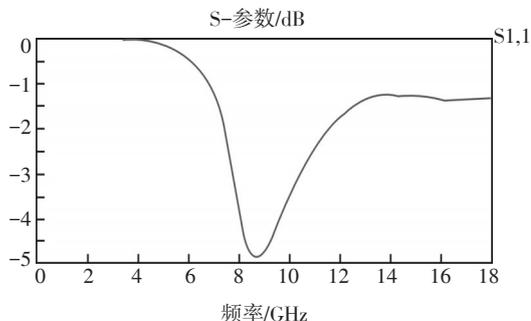


图7 等离子体柱形抛物面天线S11

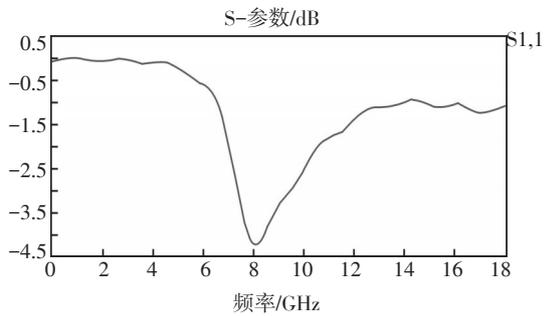


图8 金属柱形抛物面天线S11

从图中可以看出,等离子体构成的抛物柱形天线谐振点频率只是略微向右漂移,其S11值与相同尺寸的金属柱形抛物面天线的S11值大体一致。因此它的性质基本上和金属构成的反射面的性质相同,也就是说,可以用等离子体来代替金属构成的反射面。

2 结果与讨论

2.1 柱间距

构建了由11根等离子体管组成相同尺寸的柱形抛物面如图9所示。

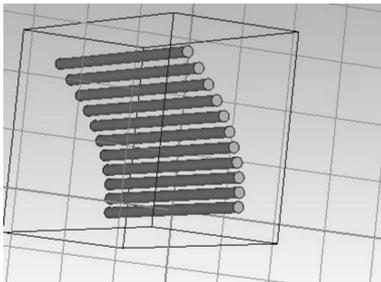


图9 柱间距为5.1 mm

柱间距约为5.1 mm,分析柱间距对整体天线辐射性能的影响。在9 GHz处,比较其与金属天线和柱间距为3.2 mm时的等离子体天线的H面辐射图和E面辐射图,如图10和图11所示。

由图可知,在谐振点处,相同尺寸内随着等离子体柱数目增加即柱间距减小时,等离子体构成的柱形抛物面天线其H面和E面方向图主瓣增益也越接近金属抛物柱面天线。当等离子体管数为17时其主瓣增益与金属一致,但旁瓣增益仍小于金属可能是由于部分电磁波被等离子体吸收和损耗掉^[5]。

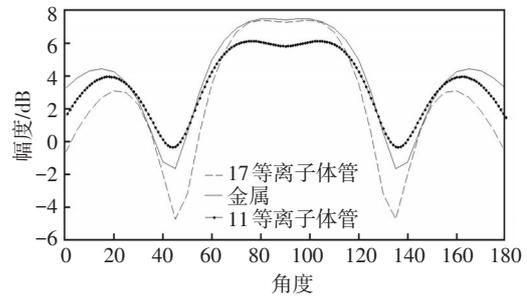


图10 E面辐射图

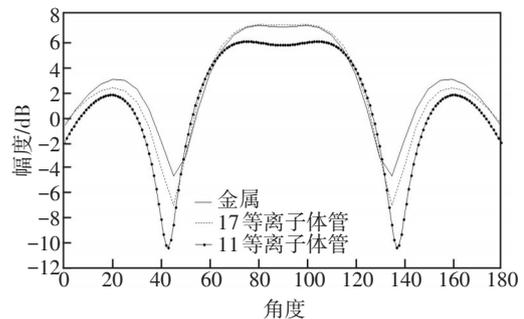


图11 H面辐射图

2.2 等离子体频率和等离子体碰撞频率

理论上当等离子体频率大于入射电磁波频率,电磁波无法在等离子体中传播,将会产生全反射。为了解等离子体频率对等离子体反射面天线的影响,通过改变构成柱形抛物面等离子体频率,天线最大增益和等离子体频率之间的关系如图12所示。

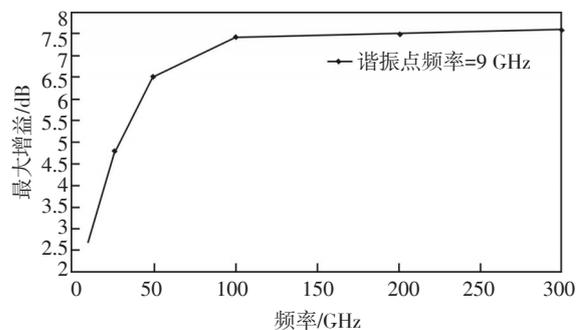


图12 天线增益与等离子体频率关系

从图中可以看出,当等离子体频率大于入射电磁波频率时,柱形抛物面天线的增益随着等离子体频率的增大而增大,并且增加的幅度较大。当等离子体频率达到100 GHz以上时,增益几乎不变,即当等离子体频率增大到一定程度后,柱形抛物面天线的增益就不再发生变化。

等离子体碰撞频率与天线增益关系如图13所示。设等离子体频率为100 GHz,通过改变等离子体的碰撞频率,得到碰撞频率在0.1~10 GHz时与天线增益的关系,如图13a、图13b所示。

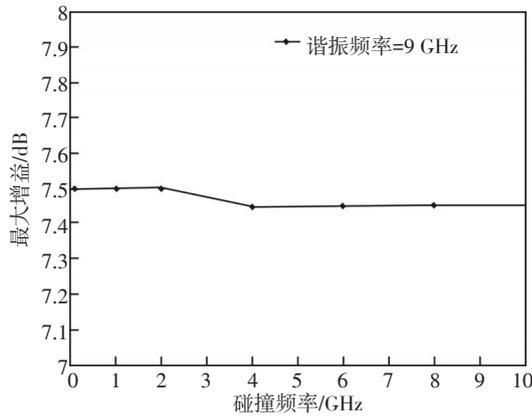


图13a 天线增益与碰撞频率关系

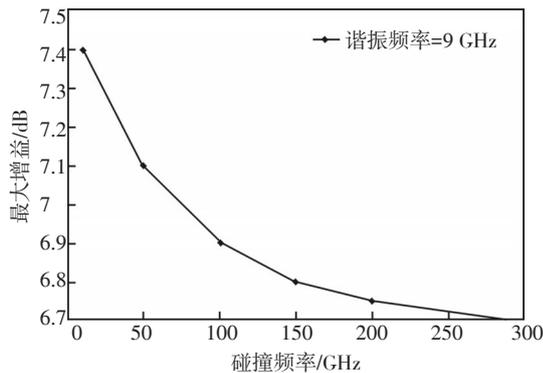


图13b 天线增益与碰撞频率关系

从图中可以看出,等离子体碰撞频率在0~10 GHz内发生变化的时候,对谐振点频率处的方向图的最大增益几乎没有影响,继续增大等离子体的碰撞频率,其结果如图所示。

从图中可以看出,当等离子体碰撞频率从10 GHz增大300 GHz时,等离子体柱形抛物面天线的最大增益随之变小。

由于等离子体碰撞频率 v_c 等离子体频率 w_p 与等离子体的介电常数 ϵ_r 和电导率 σ 的关系如下

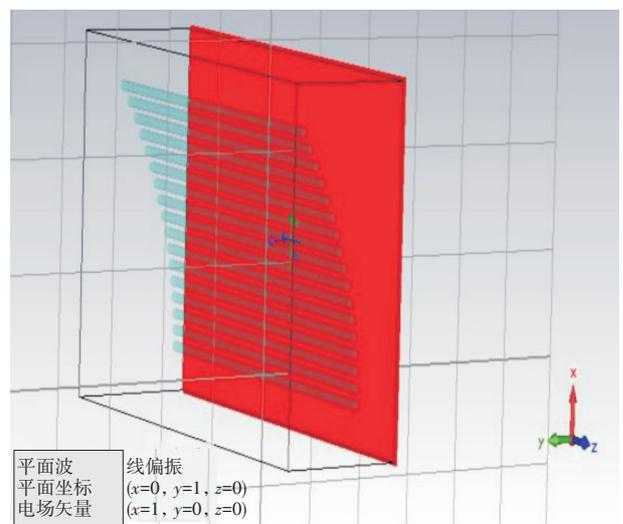
$$\epsilon_r = 1 - \frac{w_p^2}{w(w - jv_c)} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{\epsilon_0 w_p^2}{(jw + v_c)} \quad (2)$$

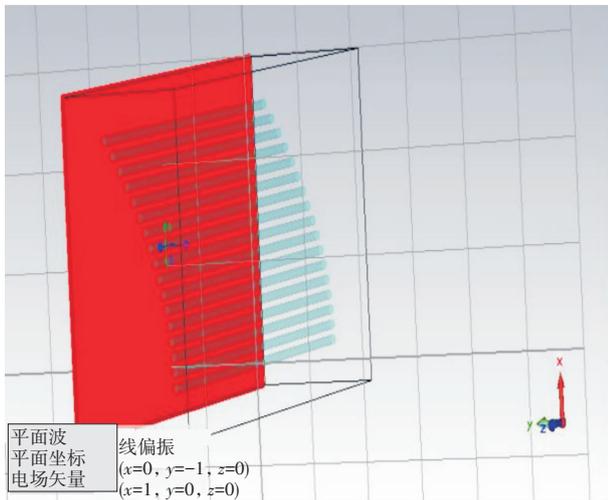
由式(1)、式(2)可以看出,当改变等离子体的碰撞频率和等离子体频率时,等离子体的介电常数和电导率都会改变。当等离子体频率远大于入射电磁波频率,并且等离子体碰撞频率较小时,等离子体的性质类似于金属的性质。此时等离子体可以代替金属作为天线的发射导体,但是,如果等离子体碰撞频率过大,等离子体介电常数和电导率都会降低,发射信号将会容易进入等离子体内,被等离子体吸收和损耗掉,使天线辐射性能降低,所以在实际应用中,等离子体的碰撞频率不宜太高。

2.3 隐身性能

为了说明等离子体天线确实有隐身作用,对比计算了等离子体抛物柱面天线工作和不工作时的双站 RCS 值,并以相同结构的金属天线作为比照。把等离子体柱材料换成内部真空的二氧化硅介质材料,以此当成等离子体抛物柱面天线不工作的状态,设置等离子体频率为100 GHz,碰撞频率为0.1 GHz时为天线工作状态。图14a设置平面波传播方向为(0,1,0),电场方向为(1,0,0),图14b设置平面波其传播方向为(0,-1,0),电场方向为(1,0,0),分别对上述两种情况进行分析,平面波的频率为0~18 GHz,仿真结果如图15、图16所示。



(a) 平面波传播方向为(0,1,0),电场方向为(1,0,0)



(b) 平面波传播方向为 $(0, -1, 0)$, 电场方向为 $(1, 0, 0)$

图14 RCS仿真模型图

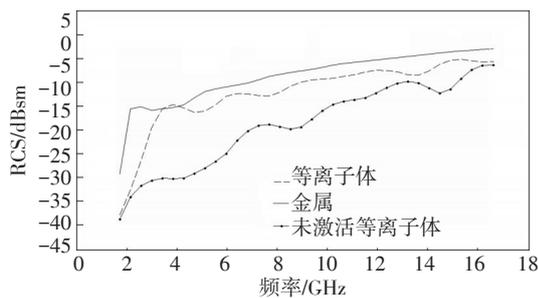


图15 前向RCS

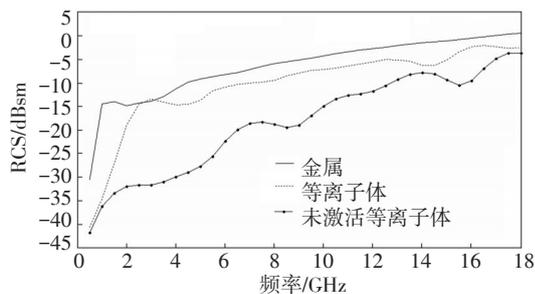


图16 后向RCS

由图15和图16可知,当等离子体抛物柱面天线工作时,它的双站RCS值也低于金属构成的柱形抛物面天线;但当等离子体柱形抛物面天线不工作的时候,它的双站RCS值要比金属柱形抛物面天线低更多,在2~6 GHz内,其平均双站RCS缩减量达到20 dB,大于相关文献[6]、文献[7]设计的天线,因为当等离子体天线不工作的时候,玻璃介质中气体未

被激发,丧失有效反射和散射电磁波的性能,因而其RCS要比相同口径金属反射面低得多,可以大大提高天线在战场上的生存能力。但在高频段等离子体天线不工作时RCS仍然有增大趋势,为进一步降低其RCS,可采用其他辅助手段,例如通过加载覆盖该频段的带同型频率选择表面,来提高隐身性能。

3 结论

用CST设计了等离子体偏馈抛物柱面天线,仿真表明柱间距越小,等离子体天线辐射性能越接近金属天线;当等离子体频率大于电磁波频率但仍比较低的时候,柱形抛物面天线的增益随着等离子体频率的增大而提高,并且增加的幅度比较大,当等离子体频率超过一定值时,虽然柱形抛物面天线的增益也会随着等离子体频率的增大而提高,但是变化幅度已经很小;同时等离子体碰撞频率不宜太高,在小于10 GHz时天线辐射性能几乎不变,当大于10 GHz时辐射性能随碰撞频率的增大而减小;等离子体天线工作和不工作时其RCS均比金属天线小,特别在等离子体不工作时,其双站RCS缩减程度大于以往相关文献的设计。

参考文献

- [1] 李毅. 雷达隐身目标电磁散射计算与实验研究[D]. 长沙:国防科技大学,2008.
- [2] 吴素云. 直线阵馈电抛物柱面天线的分析与设计:2009年全国天线年会论文集(下)[C]//2009,923-924.
- [3] 黄方意,林志丹,王超. 等离子体天线技术原理分析[J]. 舰船电子对抗,2013,36(1):76-79.
- [4] 索莹. 喇叭天线超宽带技术的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007:17-18.
- [5] TAnderson I Alexeff. An operating intelligent plasma antenna[J]. IEEE International Conference on Plasma Science, 2007, 1:294-294.
- [6] Li H, Wang B Z, Zheng G, et al. Areflectarray antenna backed on FSS for low RCS and high radiation performance [J]. Progress in Electromagnetics Research C,2010,15:145-155.
- [7] 贺胜. 等离子体定向隐身天线的理论与技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2008.