

神奇的等离子体天线

毛志国

(北方工业大学理学院 100144)

天线是发射或接收电磁波的装置,是无线电设备与外界联系的桥梁与纽带,直接决定无线电设备的功能是否能正常发挥。没有天线,我们无法使用手机、看电视、听广播和玩遥控玩具,日常生活将会遇到很多问题。而天线对于军事装备则更加重要,在战争中掌握了电磁波的主动权,不仅有效保护自己还能有力打击敌人,从而取得胜利。

目前,随着反雷达系统和信息融合等技术的飞速发展,隐身目标攻击、先进的综合电子干扰和反干扰、微波炸弹、反辐射武器攻击、低空/超低空智能目标突防等5大威胁日益严重,现代军用通讯对天线性能提出了新的特殊需求。(1)隐身性能。现代战争中各种制导武器已成为主角,因此首先要对敌方导弹的眼睛展开攻击,使其雷达网瘫痪,于是地空导弹变成瞎子,无法完成攻击任务。传统的天线在现代精准的侦查手段面前没有任何自保能力,一击即中。1982年第5次中东战争中,叙利亚设在贝卡谷地的萨姆导弹基地就是被以色列如此摧毁的,因此隐身天线对于军用电子设备抗打击、抗摧毁具有革命性意义。(2)重构性。传统金属天线在尺寸、形状确定后无法改变辐射频率、带宽和方向图而难于实现重构,相控阵天线这一缺点尤其突出。(3)抗干扰性能。现代战争中需要在同一武器装备(如航母等)上配备足够多的电子设备,不同电子设备的金属天线之间会产生严重的干扰,导致信号接收异常或遗漏,从而影响整个军事战略部署的正常开展。

等离子体天线是20世纪初提出来的,而兴起于20世纪90年代,一种基于新概念、新原理的全新型非金属天线,具有隐身性好、快速动态重构、抗干扰能力强,成为替代传统金属天线的首选。等离子体天线能够提高军用设备的抗干扰和抗摧毁能力,在

军事领域中具有极高的应用价值,仍是当前天线技术研究的热点。

1879年克鲁克斯首先提出了继固、液、气三态后物质第四态的概念,但等离子体一词是1928年由朗缪尔和汤克斯首先使用的。等离子体是由大量自由电子、离子等带电粒子以及中性粒子(原子、分子、微粒等)组成的宏观上呈准电中性且具有集体效应的混合气体。宇宙中物质存在的主要形式正是等离子体,恒星(如太阳)、星团和星云、星际物质、太阳风、脉冲星等,而在地球上天然等离子体形成的自然现象只有极光和闪电,人造等离子体却更多,如日光灯、霓虹灯、电弧、等离子体电视、等离子体传感器和癌症治疗仪、等离子体显微镜、磁流体发电、受控热核反应中的工作物质和氢弹等。

研究发现射频激励产生的高密度(等离子体的电子密度高于通讯雷达频率的截止密度)等离子体能够象金属一样反射频率小于等离子体频率的电磁波,具有天线的性能。利用等离子体导电性能做成的等离子体天线进行通信,不仅可与金属天线相媲美,而且还具有传统天线所没有的神奇之处。

神奇之一:良好的隐身性。当天线不工作时激励源关闭则等离子体完全消失,几乎没有金属部件的天线系统既不反射也不吸收电磁波,雷达信号可以直接穿过使得雷达散射截面极小,在电子战中实现彻底的隐身;而当工作在一定频段时,雷达发射的电磁波由于等离子体的吸收、折射、透射效应使目标雷达基本检测不到回波信号。此外,可快速开关的天线系统配合快速收发技术实现隐秘通讯不易被敌方雷达发现,提高了生存能力。

神奇之二:快速动态重构性。通过改变外部放电条件(如激励功率、气体类型、气压、磁场等)在不改变天线结构前提下控制等离子体密度、长度等,

瞬间实现天线最佳工作状态的快速重构,包括辐射频率、带宽、功率、效率、增益、极化、辐射方向图等天线参数。而柔性等离子体天线克服了强度低、易破损等缺点,不仅可以随意改变形状有效增加天线系统柔韧性,还可以进一步拓宽等离子体天线重构的调节范围,故柔性等离子体天线在军事上具有更大的实用价值。智能等离子体天线通过控制等离子体的开与关不仅能够调整信号的方向性和增益,还可以有效滤除背景噪声和杂散回波。一般智能天线采用天线阵列,在不改变整体布局和不移动部件前提下进行高速电控扫描,从而在更大范围内灵活实现快速动态重构。

神奇之三 抗干扰能力强。非工作状态下等离子体天线就是普通非金属材料,与邻近的电子设备和天线不形成电磁感应现象而避免互耦效应,只要控制等离子体参数就能获得所需要的天线阵列辐射方向图。等离子体天线在发射脉冲信号后通过关闭激励源来消除天线中的阻尼振荡,有效提高信噪比从而大大降低对信号处理系统的要求。与传统金属天线相比,不仅极大地提高了天线的抗干扰能力,而且大大简化了天线阵设计的难度,从而有效提高系统整体性能。

神奇之四 超宽带性能。借助调整外部放电条件迅速改变等离子体参数来消除冲击激励效应,进而提高反射效率,有利于实现超宽带而改善短脉冲雷达性能。由于等离子体能反射所有频率低于等离子体频率的电磁波,所以在理论上等离子体天线的带宽仅受雷达硬件限制。

神奇之五 高功率。等离子体天线采用高压脉冲可以解决目前金属天线设计中功率低的缺点,避免烧毁馈线和天线。与传统金属天线相比,等离子体天线能承载更高的功率。

等离子体天线根据介质存在状态可分为气态等离子体天线和固态等离子体天线。气态等离子体天线利用绝缘管中电离的惰性气体(或二甲氨乙烯[TMAE]气体)替代固态金属,根据激励方式不同可以分为等离子体介质天线和等离子体反射面天线,前者在气体柱两端加电压或强激光照射使气体

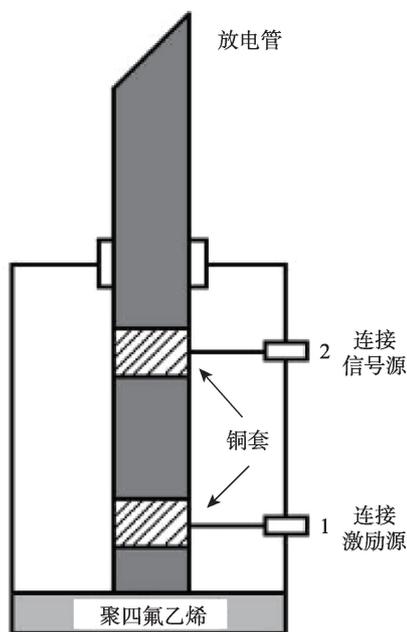


图1 柱形气态等离子体天线原理图
(引自中国科学院研究生院梁志伟博士学位论文)

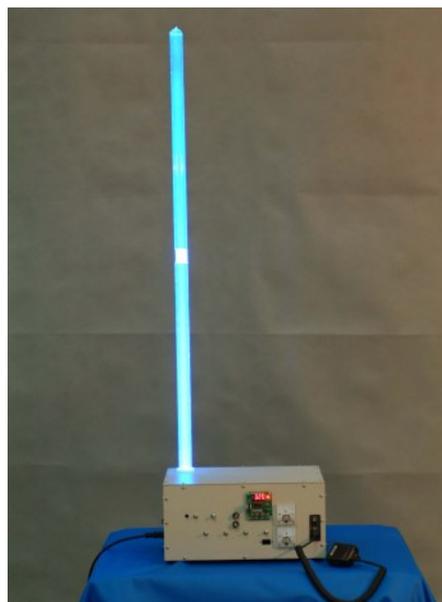


图2 工作状态下的柱形气态等离子体天线实物图
(引自中国科学院空间科学与应用研究中心赵国伟博士学位论文)

放电形成等离子体,为有源辐射器,主要应用于短波/超短波通信;后者在气体柱一端加上射频表面波激励气体柱产生等离子体,为无源反射器,主要应用于大功率超宽带脉冲雷达。固态等离子体天线以高浓度的固态等离子体区域作为辐射结构,通过带电粒子与外加交变电磁场的耦合实现对信号的

收发与传输。固态等离子体天线又分为光控固态等离子体天线和电控固态等离子体天线。

等离子体天线除在军用装备隐身和电子战中具备突出优势外,还具有设备轻、体积小、重构能力强和更好的可移动性等明显优点。因此,等离子体天线有着很广阔的发展空间,其潜在应用还包括:对海监视雷达、弹道导弹探测和追踪、替代隐形飞机天线、无人飞行器传感天线、电子对抗天线、替代水上/水下天线、替代相控阵列天线等。除军事用途外,等离子体天线技术还具有广阔的市场前景,可用于探地雷达、气象雷达、导航、遥感、风向探测、碰撞规避、移动电话、高速数据通信(如日光传输WIFI信号)、宽带通信、扩频通信、射电望远镜等方面。

制约等离子体天线应用的关键是难以达到金属天线的性能指标:(1)所能应用的频率范围取决于等离子体电子密度,由于所用气压偏低获得的电子密度不高,导致适用的频率范围不够宽;(2)通常增益较低,据国外已公开文献报道给出的等离子体天线样机的增益比同规格金属天线低20分贝左右,实用价值仍不高;(3)等离子体天线在耦合与匹配方式上与传统金属天线完全不同,不仅要馈入正常的微波信号,还需要馈入激励源用于形成并维持等离子体。而这两路射频源还必须接入天线底部的同一个耦合腔体(见柱形气态等离子体天线原理图),这样使得两路之间的相互干扰增强,导致匹配效率不高。因此,等离子体天线一方面亟待提高增益,另一方面激发等离子体天线所需能耗偏高。

鉴于等离子体天线具备的明显优势和广阔应用前景,美国、澳大利亚、英国、俄罗斯、法国、加拿大、日本、印度等国都投入大量科研力量和经费积极开发此项技术,并冠以“高度创新的技术”。我国目前从事等离子体天线技术研究的主要有中科院合肥等离子体所、中科院空间科学与应用研究中心、空军工程大学、中国科学技术大学、电子科技大学、南京航空航天大学、东南大学、大连海事大学、上海交通大学等单位,力争使我国无线电信号收发能力达到或赶超世界先进水平。

20世纪90年代美国已经开展了对等离子体天线的系统研究。美国海军实验室致力于一项称为

捷变镜(Agile Mirror)的研究计划,旨在研制一款能像镜子(用等离子体平面代替传统的金属反射面)一样反射雷达电磁波信号的雷达系统,实现自身系统的完美隐身,虽利用现有模型完成了样机鉴定但仍处于基本研制阶段。美国田纳西大学主要开展了等离子体天线隐身性能的研究工作,在1998年成功研制一种U形放电管的等离子体天线,在100MHz~1GHz内与同一配置的金属天线效果大致相同。2003年5月26日,美国《防务新闻》报道了美国马可兰德技术公司在美国政府及三军资助下研究气态等离子体天线技术,并称为“气态等离子体天线研究将是雷达设计的革命”。2003年11月23日,美国《防务新闻》又重点报道了马可兰德技术公司等离子体天线在无线网络上研究的最新进展,正朝着实用化和商业化快速迈进,军方高度重视其发展前景。2010年,东南大学崔铁军课题组将一种弯折线超材料加载于Vivaldi天线基板上。加一层弯折线时,天线增益可提高1.2 dB左右,加双层弯折线时,天线增益增加了3.6 dB。2013年,空军工程大学屈绍波课题组设计了一种超薄微波段(2~5 GHz)结构天线,在3.63 GHz下该结构厚度只是波长的四十分之一。近年来,对等离子体天线的研究已经取得长足的进步,随着等离子体天线本身研究的深入以及与通讯技术的融合,等离子体天线必将成为替代传统金属天线的实用天线。

未来战场上,隐身武器家族中将会加入新的成员!



图3 柱形气态等离子体天线实物图
(引自中国科学院空间科学与应用研究中心赵国伟博士学位论文)