



新型等离子体电扫描八木天线的关键技术研究*

Research on the Key Technology of Novel Plasma Electronic Scanning of Yagi Antenna

赵鑫¹ 戴钊阳² 孔祥鲲¹ 刘少斌^{1,3}

1 南京航空航天大学电子信息工程学院 2 95826 部队 3 东南大学毫米波国家重点实验室

摘要: 提出了一种新型等离子体电扫描八木天线,研究了基于等离子体的电扫描八木天线的关键技术。通过对等离子体半波振子的仿真,研究了等离子体半波振子天线的辐射性能、隐身性能和等离子体对电磁波的反射和吸收作用。通过实验测试了等离子体中电子密度,制作了一款等离子体电扫描八木天线原理样机,并进行了测试。

关键词: 等离子体; 八木天线; 电扫描

Keywords: plasma; Yagi antenna; electronic scanning

0 引言

现代高科技战争中,掌握军事主动权的关键因素是控制电磁权,保证整个通信系统的畅通无阻。天线作为通信系统的前端,是系统的关键部件。天线性能的好坏,直接影响通信系统的运行质量。在天线的设计上,传统金属天线的尺寸一旦确定,其工作的频段也就被

限定了,也就是说,为了达到不同的工作频率,必须改变天线的尺寸或形状。同时天线中金属部件的雷达散射截面(RCS)很大,在战场上极易被敌方雷达探测到,成为首先被打击的目标,战场上的生存性较弱。此外,由于作战的需要,往往将不同功能的电子设备集中到飞机、舰船等载体中,这些电子设备相

互产生强烈的干扰,各种天线之间存在着严重的近场耦合,大大影响了载体的工作性能。

等离子体天线是一种与传统天线结构有较大差异的低雷达截面天线,可利用等离子体的可开关特性实现天线的辐射与隐身状态的切换;可利用控制外加磁场和等离子体激励电极,

编程与仿真系统软件,通过在虚拟环境中进行加工过程的模拟仿真,使其运动位置关系可视化,及时显示干涉情况,实现了无损式系统检查;通过将计算机仿真控制语言转化输出为NC控制代码,实现了对制孔设备的数字化精确控制,从而有效提高了柔性装配制孔设备的制孔效率。 **AST**

参考文献

[1] 邢迪雄,张琦.基于CATIA V5的工业机器人运动学仿真研究[J].机械,2011(38):57-61.

[2] 陈乐生,王以伦.多刚体动力学基础[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,1995.

[3] 减铁生.装配机器人离线编程系统[D].南京:南京理工大学,2003.

[4] 李庆龄,刘加亮.六自由度工业机器人运动学分析及仿真[J].机电工程技术,2008(37):36-38.

[5] Richard M M, Li Z X, Shankar S S. A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation[M]. Beijing: China Machine Press, 1998.

[6] Hunt K H. Kinematic geometry

of mechanisms[M]. Oxford: Oxford University Press, 1978.

[7] 冯志友,李永刚,张策,等.并联机器人机构运动学与动力学分析研究现状与展望[J].中国机械工程,2006,17(9):979-984.

[8] 吴瑞祥.机器人技术与应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,1994.

作者简介

王巍,教授,硕士生导师,主要研究方向为数字化飞机制造技术、飞机装配工装的通用性及模块化设计。

实现天线电扫描；可根据实际需要选择等离子体频率和入射电磁波频率的相对大小，实现对入射电磁波的完全屏蔽、部分传输和完全传输，并利用等离子体反射、吸收等特性实现天线雷达截面的减缩控制^[1]。

目前，国内外在等离子体天线的研究主要分为三种类型，一类是利用单端表面波激励的柱状等离子体发射和接收电磁波信号，如澳大利亚国立大学等离子体实验室所研制的等离子体表面波天线^[2]；另一类是利用高频等离子体对电磁波的反射特性，构成电磁波反射面，如文献[3]中所提到的等离子体反射面；此外，台湾地区的台南大学等四家机构最近研制出一种在密闭气体管两端加高电压以生成等离子体的预电离单极子等离子体天线^[4]。

本文研究的等离子体电扫描八木天线，用激励惰性气体产生等离子体的放电管代替传统天线中的金属导体，可以克服传统机械天线的缺点，实现无惯性电扫描，也可以实现天线结构和电性能的重构。同时，还具有结构简单、重量轻、隐身性能好、互耦小等众多优点，是一种极具发展潜力的新原理智能天线。

1 电扫描等离子体八木天线的结构与分析

1.1 电扫描等离子体八木天线的结构

电扫描等离子体八木天线结构示意图如图1所示（包层可以是多圈，图1只画出一圈），八木天线由直径方向上三根等离子体管组成。当中间的放电管和直径方向对应的反射器和引向器被激励时，八木天线的指向就被

确定。通过改变受激引向单元和反射单元的位置，改变天线的指向，而整个过程完全不需要改变天线的物理结构，也不需要机械转动，因此扫描效率得到了大幅度的提高。

当外层有多层等离子体包层时，可以通过有选择地点亮不同层的等离子体管，控制等离子体管之间的距离。当对等离子体八木天线的工作频率进行电调节时，等离子体管之间的距离可以通过有选择地点亮等离子体管进行控制。对内层的等离子体振子，其长度和电导率均可实现电控制^[5]，即振子长度决定于激励源输入功率，振子电导率决定于等离子体参数，二者均能实现灵活的控制。

此外，由于等离子体的生成和复合均能随输入射频电源而高速变化，所以通过控制不同单元的输入射频电源便可高速地改变天线的指向。而且非工作单元对工作单元几乎不产生干扰。此外，该天线系统所采用的辐射单元以及用于提高定向性能的反射器和引向器均由玻璃管组成，几乎没有金属材料。当天线关闭时，该天线的雷达散射截面将很小，对周围其他电磁设备的干扰也将很小。

1.2 等离子体半波振子天线之间的互耦分析

天线作为通信系统中的重要组成部分，在国防、工业等领域有着广泛的应用。然而作为电磁波收发装置，可能因系统小型化或系统密集度提高，产生电磁兼容问题。当所设计的天线间距较小时，互耦对天线的性能影响很大。因此，本文将对等离子体八木天线之间的互耦进行深入研究。

以等离子体半波振子天线为辐射单元，用等离子体柱组成外层包层，装置示意图如图2所示。当将包层等离子体柱的激励源关闭时，包层变为普通的玻璃管。本文分析了关闭等离子体时，玻璃管对等离子体半波振子的影响，并且与单个等离子体半波振子天线进行比较，如图3和图4所示。参数设置为：辐射单元的长度400mm，半径2mm，等离子体频率28.7GHz，等离子体碰撞频率 $2 \times 10^5 \text{ Hz}$ ；包层为介电常数 ϵ_r 的玻璃管，长度430mm，半径2mm，包层与辐射单元间的距离350mm，包层中两个玻璃管之间的夹角 $\theta=15^\circ$ 。

从图3(a)可以看出，等离子体半波振子天线与加包层后的等离子体天线谐振频率很接近，分别为0.293GHz和0.305GHz；同时从图3(b)看出，其辐射方向和增益几乎相同。

对比图4(a)和图4(b)发现，带包层的半波振子天线的电场分布和单根

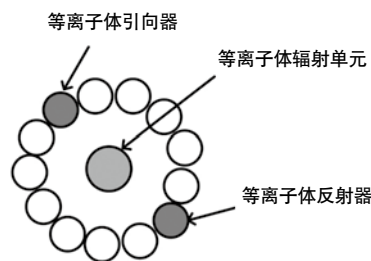


图1 电扫描等离子体八木天线结构示意图



图2 等离子体半波振子天线互耦建模仿真图

* 基金项目：航空科学基金(2009ZA52008)、国家自然科学基金(60971122)、江苏省自然科学基金(BK2011727)、毫米波国家重点实验室开放基金重点项目(K201103)、南京航空航天大学研究生创新实验竞赛。

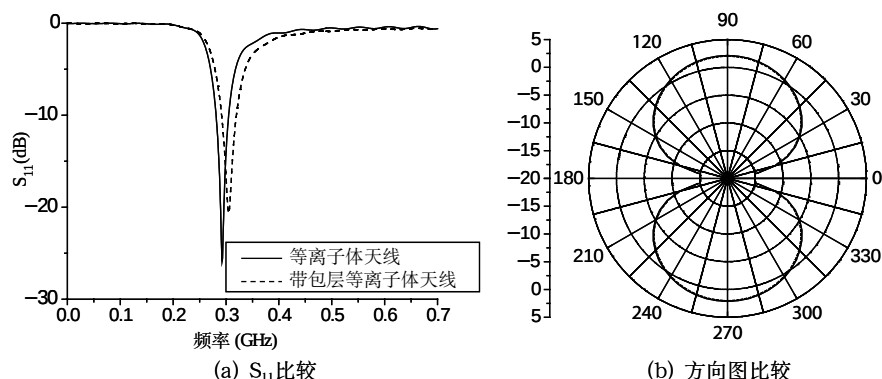


图3 等离子体半波振子天线互耦电参数比较图

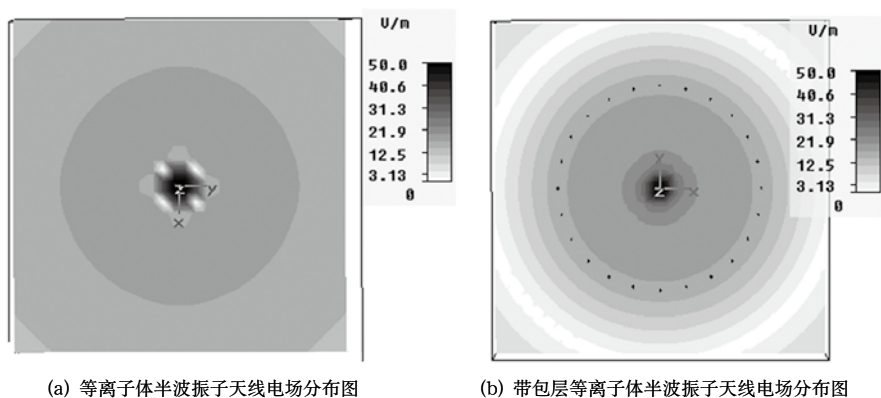


图4 等离子体半波振子天线互耦电场分布比较图

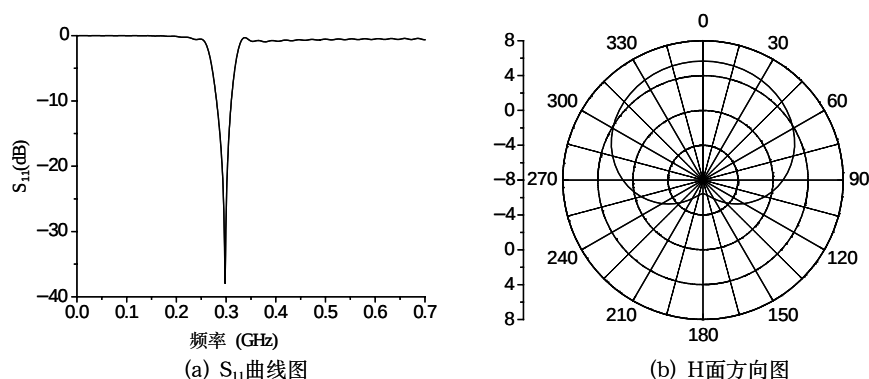


图5 电扫描等离子体八木天线的电参数

等离子体半波振子的电场分布形状相同,但是幅值略小。

因此,在等离子体半波振子阵列中,天线的包层一旦关闭时就变成了玻璃管,这一圈玻璃管包层对辐射单元的近电场和远场辐射影响很小。

1.3 电扫描等离子体八木天线分析

本文以单反射器和单引向器的两圈包层的电扫描八木天线为例,设置参

数为:反射器等离子体柱长度430mm,引向器等离子体柱长度350mm,辐射单元长度400mm,反射器与辐射单元之间的距离为200mm,引向器与辐射单元之间的距离为100mm,等离子体柱半径为2mm,等离子体频率为28.7GHz,碰撞频率为 2×10^4 Hz。

图5(a)和图5(b)分别给出了电扫描等离子体八木天线的 S_{11} 仿真曲线

和H面方向图。可以看出,该天线系统的谐振频率为0.298GHz,其增益为5.7dBi。通过改变等离子体的激励源功率,改变天线单元的长度,可以控制天线的工作频率及电导率。当改变天线单元的电导率时,天线单元之间的相互作用同时改变,天线的增益也随之改变,因此,可以通过调节天线单元的等离子体参数控制天线的增益。

2 电扫描等离子体八木天线的实验

2.1 等离子体电子密度的测量

本文中等离子体的产生采用在放电玻璃管两端加高电压激励的方式。选取的玻璃管长度为0.6m,内半径为5mm,外半径为6mm,内部填充气压为1torr(约133.3Pa)、纯度为99.99%的氩气。双端通过高压激励电源激励气体产生等离子体。

在实验室等离子体中,最常见的参数是等离子体电子密度(或等离子体频率)和碰撞频率。对于碰撞频率,由于等离子体碰撞频率对实验结果影响相对较小,且测量的工艺复杂、误差很大,目前采用模型计算的方法。因此,本文只讨论等离子体电子密度的测试。对等离子体电子密度的测试,通常采用两种方法,一是相位差测量法,二是截止频率测量法。

1) 相位差测量法

根据等离子体的基本原理,柱形放电管未激励时,电磁波在放电管内区域的相位变化为:

$$\varphi_0 = \int_0^d k_0 dr \quad (1)$$

式(1)中, d 为放电管的内直径, k_0 为真空中传播的波矢大小。当激励放电管,产生等离子体后,电磁波在放

电管内传播时的相位变化为:

$$\Phi_p = \int_0^d k dr \quad (2)$$

k 为等离子体中的传播波矢。则前后两次的相位差为:

$$\Delta\Phi = \Phi_p - \Phi_0 = \int_0^d (k - k_0) dr \quad (3)$$

当等离子体密度均匀时,式(3)变为:

$$\Delta\Phi = \Phi_p - \Phi_0 = (k - k_0)d \quad (4)$$

在没有外加磁场,不考虑碰撞的情况下,此时等离子体的色散关系为:

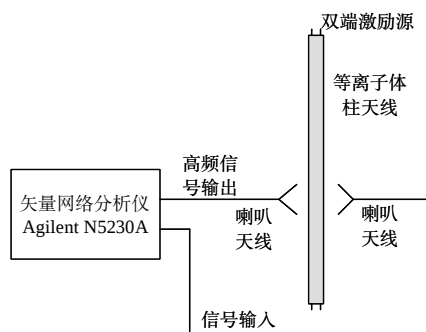
$$\omega^2 = \omega_p^2 + c^2 k^2 \quad (5)$$

则相位差为:

$$\Delta\Phi = \Phi_p - \Phi_0 = k_0 d (1 - (1 - \omega_p^2 / \omega^2)^{1/2}) \quad (6)$$

在不加外磁场条件下,等离子体的介电常数为:

$$\begin{aligned} \epsilon_r = n^2 &= 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - j\nu)} \\ &= 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} - j \frac{\nu}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \quad (7) \end{aligned}$$



(a) 测试框图



(b) 实验布局图

图6 等离子体柱电子密度测试框图和实验布局图

表1 微波频率1.2GHz时,不同激励功率下等离子体相位变化

激励功率(W)	1.5	4	7	8.8	10	16
相位变化(°)	1.3	4.6	9.8	11.1	12.9	14.6

则相位差为:

$$\Delta\Phi = \Phi_p - \Phi_0 = k_0 d (1 - \beta) \quad (8)$$

其中 β 为相位常数。

综上所述,可以通过测定相位差,得出等离子体柱的轴向电子密度。测试框图及实验布局图如图6所示。

微波频率为1.2GHz时,由测试得到不同功率激励下的等离子体相位变化,实验数据如表1所示。

由表1可得,放电玻璃管内的等离子体密度随激励功率变化曲线如图7所示。

由图7可知,等离子体密度随激励功率的增加而上升,并且随着功率的继续增加,等离子体密度的上升趋势也依然明显。实验结果表明,在不考虑等离子体碰撞频率的影响

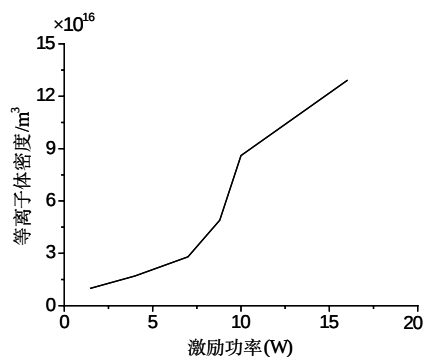
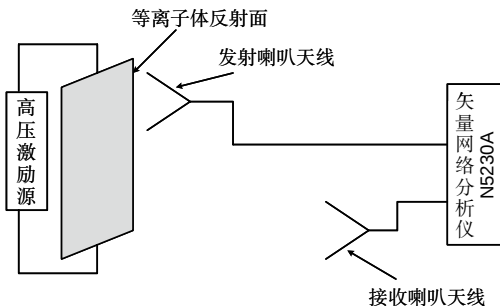


图7 不同激励功率下的等离子体密度变化曲线



(a) 测试框图

时,等离子体密度的范围为 $10^{16} \sim 10^{17} / \text{m}^3$,参考国内外类似的等离子体气体放电实验,所得到的等离子体密度

量级相同。由于放电管内是低压气体,因而产生的等离子体密度不高,对高频信号的衰减和吸收较小,而且通过矢量网络分析仪的扫频信号得到的结果波动较大。因此,为了减小环境对实验的干扰,测量时要求喇叭天线尽量紧靠放电玻璃管,并将其置于喇叭天线水平位置的中轴线上。

2) 截止频率测量法

当入射电磁波频率大于等离子体特征频率时,电磁波几乎无衰减地通过等离子体,而当入射电磁波频率小于等离子体特征频率时,电磁波急剧衰减出现截止现象。利用这种原理,本文采用了如下设计方案,如图8(a)所示,通过测量等离子体反射面的反射系数,确定等离子体特征频率 ω_p 。

等离子体频率定义为

$$\omega_p^2 = \omega_{pe}^2 + \omega_{pi}^2 \quad (9)$$

式(9)中 ω_{pe} 和 ω_{pi} 分别为等离子体电子振荡频率和等离子体离子振荡频率。由于离子的质量远大于电子的质量,故等离子体频率通常近似认为

$$\omega_p = \omega_{pe} \quad (10)$$

等离子体电子振荡频率可写为

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}} \quad (11)$$



(b) 实验布局图

图8 等离子体反射面测试框图和实验布局图

式(11)中 n_e 是等离子体电子密度; e, m_e 分别是电子电量和质量($e=-1.60\times 10^{-19}\text{C}$, $m_e=9.11\times 10^{-31}\text{kg}$); $\epsilon_0=8.854\times 10^{-12}\text{F/m}$, 是真空中介电常数。

因此, 等离子体电子密度可近似为

$$n_e = \left(\frac{2\pi f_e}{56.34} \right)^2 \quad (12)$$

将18根规格相同的放电玻璃管并排放置, 组成等离子体反射面, 放电管间距为5mm, 发射和接收喇叭天线在等离子体反射面的同一侧, 距离反射面较近的喇叭是发射天线, 较远的喇叭是接收天线, 两者位置相距5m, 满足远场条件, 实验布局如图8(b)所示。

由于实验条件的限制, 本文采用将放电玻璃管分组并联的工作方式组成反射面。但是在实验过程中, 考虑到制作工艺及误差, 每根放电管内填充的气体压强不可能完全相同, 使得等离子体柱的临界电离功率也有差异。采用并联工作方式后, 当其中一根放电玻璃管导通时, 导致其余玻璃管两端的电压急剧下降, 从而使得剩余玻璃管因两端电压未能达到击穿电压而不能被激励。因此, 实验中采用在每根放电管上串联一个大功率匀流电阻(约100K Ω)的方法, 起到平衡电压的作用, 使得所有放电管都能同时激励、稳定放电。

实验中, 将发射喇叭天线接入矢量网络分析仪的1端口, 接收喇叭天线接入矢量网络分析仪的2端口。发射天线的信号经过等离子体反射面反射到达接收天线, 矢量网络分析仪的 S_{21} 参数, 即为反射面的反射系数。为了提高测试的准确性, 通过在反射面后面放置吸波材料, 尽可能地减小外界对测试的干扰。本文分别测试了等离子体反射面不工作时的 S_{21} 曲线与工作时的 S_{21} 曲线, 对比图如图9所示。当反射面不工作时, 曲线比较平稳,

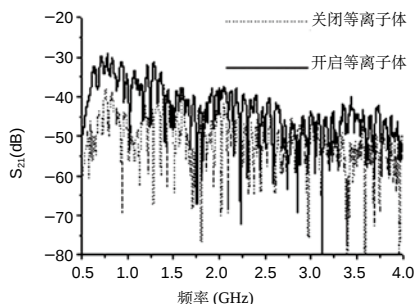


图9 等离子体反射面关闭与开启时的 S_{21} 对比曲线

且基本小于 -40dB 。当反射面工作时, 频率小于1.5GHz时, 反射系数较大, 接近 -30dB ; 而频率大于1.5GHz时, 反射系数较小, 且与反射面关闭时的曲线相差不大。通过比较, 可以发现等离子体反射面对频率低于等离子体频率的入射波的反射效果明显, 结合等离子体的高通滤波特性可知, 等离子体反射面的截止频率大约为1.5GHz。对应的等离子体电子密度约为 $2.8\times 10^{16}\text{m}^{-3}$, 与采用相位差测量法得到的等离子体电子密度在同一数量级。

2.2 等离子体电扫描八木天线测试

按照图1的原理图, 本文制作了电扫描等离子体八木天线的原理样机, 并进行测试。采用Agilent E8267D信号源为辐射单元提供耦合信号, 其工作频率是800MHz。外层为等离子体包层, 其半径为15cm, 共35根。频谱仪Agilent E4440A通过喇叭天线接收等离子体天线的辐射信号, 接收喇叭天线与等离子体天线相距5m, 满足天线辐射的远场条件。

对天线主瓣方向及背瓣方向频谱曲线进行测试表明, 在800MHz时, 天线主瓣方向频谱曲线有个峰值, 为 -38dBm , 说明等离子体天线的信号已经通过接收天线传到频谱仪; 在背瓣方向处, 频谱曲线也有个峰值, 但是幅值降低为 -47dBm , 两者相差9dBm。受研

究经费限制, 本项目只对该等离子体八木天线的原理验证机进行了初步测试。

3 结论

本文分别从原理分析、建模仿真及制作原理样机几个方面, 分析了电扫描等离子体八木天线, 表明这款天线能够实现电扫描、结构和电性能重构等功能, 是一款具有较高应用价值的等离子体隐身天线。

AST

参考文献

- [1] 寇艳玲, 刘志勇. 等离子体天线发展概况[J]. 测控与通信, 2006(3): 56-64.
- [2] Borg G G, Harris J H, Miljak D G, et al. Application of plasma columns to radiofrequency antennas[J]. Appl Phys Lett, 1999, 74(5): 3272-3274.
- [3] Anderson T R. Standing wave plasma antenna with plasma reflector[P]. United States Patent: 6046705, 2000.
- [4] Chung M, Chen W S, Huang B R, et al. Capacitive coupling return loss of a new preionized monopole plasma antenna[C]. Taipei: TENCON 2007, 2007.
- [5] 尹昌刚. 等离子体天线的理论与应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.

作者简介

赵鑫, 硕士, 主要从事天线与滤波器研究。

戴钊阳, 硕士, 助理工程师, 主要从事等离子体天线设计与实验研究。

孔祥鲲, 博士研究生, 主要从事电磁波在等离子体中的传播研究。

刘少斌, 教授, 主要从事计算电磁学、等离子体隐身技术、目标与环境电磁特性等方面研究。

航空发动机高空模拟航空科技重点实验室

Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Altitude Simulation

航空发动机高空模拟航空科技重点实验室于1997年1月正式运行，以中航工业燃气涡轮研究院为依托，主要从事航空发动机高空模拟试验技术研究。十五年来，重点实验室在三十多项关键试验技术上实现突破，逐渐形成了一套规范的试验程序、试验方法、数据处理方法、试验结果评定方法等，解决了三十多种机型、上百台次发动机高空模拟试验的技术难题，为我国航空发动机研制提供了高空模拟试验和测试平台。

重点实验室核心设备为连续气源高空模拟试车台（简称高空台），主要用于在地面模拟航空发动机在空中飞行的条件，对航空发动机进行性能试验、功能试验、飞行前规定试验、设计定型鉴定试验、故障再现和排故试验、先进航空动力装置试验研究等。实验室目前拥有SB101和SB121两座高空台，三个高空舱，占地约50公顷，总装机功率近18万千瓦，设备规模和技术水平为我国唯一，亚洲第一。

目前，重点实验室正在加速航空发动机高空模拟试验基础能力建设，大力开展先进航空发动机特种试验、动态模拟和新型动力装置的高空模拟试验技术研究，同时加大与科研院所、高校技术合作力度，目标是成为我国航空发动机高空模拟试验鉴定中心。



航空发动机高空模拟航空科技
重点实验室主任 侯敏杰



直径3米的高空模拟试验舱



高空模拟试验操纵间



由美国国防部预研局 (DARPA) 负责开发的“视频合成孔径雷达”，其提供的透过云层的图像与目前使用的红外系统在晴朗天气条件下的效果类似，重点是解决在恶劣天气和其他不可预知的环境下无人机的图像丢失问题。该雷达将使用射频 (RF) 技术和先进处理算法，安装在远程无人机上可提高无人机图像的质量，增加空袭的精确度和减少对战区攻击带来的附加损害。

(图片来源: DARPA)