

高超声速飞行器雷达回波强度测试技术

王述东, 柯旭, 王志鹏

(成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610000)

摘要: 为实现对高超声速飞行器的有效探测, 雷达需发射高功率信号以克服飞行器高速飞行带来的信号衰减; 这种长时间高功率运行会使雷达发射组件中的电子器件因承受较大功率负荷而产生热量积聚, 引发天线增益下降, 导致雷达对目标回波信号的接收能力下降, 使回波强度测试结果出现偏差; 针对该问题, 提出了基于相控阵的高超声速飞行器雷达回波强度测试技术; 结合高稳定频率源产生频率和正交相位解调处理的正交参考信号, 通过相位解调可逆性, 重构原始的雷达回波信号; 设计相控阵雷达系统结构, 通过波束赋形、空时自适应处理压制干扰, 利用单光束相控阵技术高效追踪探测目标, 基于新波束形成方法实现波束灵活电子扫描; 建立光强相关性校验标定回波强度, 对各单元特征参数定标, 克服热量积聚导致天线增益下降等问题, 保证回波强度测试准确可靠; 由实验结果可知, 该技术雷达散射截面四点坐标分别为(-200 m, 150 m)、(-300 m, -300 m)、(300 m, 300 m)、(200 m, 150 m), 方位角为0°时的回波信号幅度最大为0 dBm, 回波信号相位最大值为150°, 最小值为30°, 获取的结果均与实验指标一致, 具有良好的测试效果。

关键词: 相控阵; 高超声速飞行器; 雷达回波; 强度测试; 正交相位解调

Radar Echo Intensity Testing Technology for Hypersonic Aircraft

WANG Shudong, KE Xu, WANG Zhipeng

(Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., AVIC, Chengdu 610000, China)

Abstract: To achieve the effective detection of hypersonic aircraft, it is necessary for a radar to emit high-power signals to overcome the signal attenuation caused by the high-speed flight of aircraft. This long-term high-power operation will cause heat accumulation in the radar transmission module's electronic components due to a significant power load, resulting in the decreased antenna gain and reduced radar reception capability of target echo signals, leading to deviations in echo intensity testing results. To address above issues, a phased array based radar echo intensity testing technology for hypersonic aircraft is proposed. By combining the frequency generated from a high stable frequency source with orthogonal reference signals for orthogonal phase demodulation processing, an original radar echo signal is reconstructed through the reversibility of phase demodulation. Design a phased array radar system structure, suppress interference through beamforming and space-time adaptive processing, efficiently track and detect targets using a single beam phased array technology, and achieve beam flexible electronic scanning based on a new beamforming method. Establish a light intensity correlation verification to calibrate the echo intensity, calibrate the characteristic parameters of each unit, overcome the decrease of antenna gain caused by heat accumulation, and ensure the accuracy and reliability of echo intensity testing. Experimental results show that by using this technology, the four point coordinates of the radar cross section are (-200 m, 150 m), (-300 m, -300 m), (300 m, 300 m), and (200 m, 150 m), respectively. When the azimuth is 0°, the maximum amplitude of echo signals is 0 dBm, with a maximum value of 150° and a minimum value of 30° for echo signals. The obtained results are consistent with the experimental indicators, with a good testing effect.

Keywords: phased array; hypersonic aircraft; radar echo; intensity testing; orthogonal phase demodulation

0 引言

高超声速飞行器雷达回波强度测试相关描述中, 此类飞行器是指以吸气式发动机为动力, 速度超过8 Mach、

飞行高度25 km、飞行距离大于1 500 km的巡航飞行器^[1]。由于其在巡航段内飞行时间长、机动动作少, 容易被雷达探测从而降低生存和突防能力, 因此开展并优化其雷达回波强度测试以减小雷达可探测特征十分有意

收稿日期:2025-07-15; 修回日期:2025-09-08。

作者简介:王述东(1972-),男,大学本科。

引用格式:王述东,柯旭,王志鹏.高超声速飞行器雷达回波强度测试技术[J].计算机测量与控制,2026,34(5):8-14,24.

义。然而,飞行环境中往往存在大量雷达反射特性相近的不同目标,如不同形状、材质的飞行器部件或周围相似散射体等,在这种情况下根据传统雷达回波特性的变化,很难对其进行有效地判别和辨识。从理论上讲,每一种物体对雷达信号的反射特征都不相同,其回波的强度取决于目标表面的雷达散射特征,该特征可以实现对多种目标的区别^[2]。因此,回波强度是一个非常重要的指标。

针对上述问题,相关学者进行了深入研究。文献[3]提出了卡尔曼滤波的测试技术,利用卡尔曼滤波算法剔除激光雷达数据中的野值,建立数据硬性约束条件,获取数据流形规则,提取激光雷达数据特征,利用支持向量回归算法完成雷达回波强度测试。然而,该方法受到不规则雷达回波信号影响,导致测试结果出现较大程度的异常;文献[4]提出了基于纯自注意力机制的测试技术,采集正面视角的时序回波数据,对数据进行三维快速傅里叶变换,并将这些特征传入基于纯自注意力机制网络的雷达特征变换网络,以此进行回波强度测试。然而,该方法容易受到较大接收噪声干扰,导致回波强度测试结果存在较大误差;文献[5]提出了基于深度展开网络的测试技术,将快速迭代收缩阈值算法的迭代过程映射到深度网络架构中,加入卷积神经网络模块作为成像区域的稀疏表示及其逆过程,以此实现回波强度测试。然而,该方法需要对参数进行人工调优,影响测试精度;文献[6]提出了基于RD识别的测试技术,在此基础上,研究一种新的等距间隔配准方法,以提高目标的准确定位与识别能力,并在此基础上,研究区域自适应方法,完成源域与目标域的特征匹配,由此测试雷达回波强度。然而,该方法在复杂电磁环境下,受到电磁干扰,导致测试结果不精准。

由于其特殊的工作原理,相控阵列天线在雷达系统中显示出优异的性能和应用前景^[7]。相控阵雷达可在不需要机械地旋转天线的情况下,对多个单元的发射信号进行准确的相位和幅值调控,从而实现对雷达的快速电子扫描和柔性瞄准,极大地提高了对目标的反应速度和跟踪性能。基于这一相控阵原理,提出了相控阵高超声速飞行器雷达回波强度测试技术。该技术的应用将充分发挥相控阵雷达的优点,精确捕获高超声速飞行器高速运动时的微弱回波,为深入研究其性能奠定基础。

1 高超声速飞行器雷达回波信号重构方法

在高超声速飞行器雷达回波信号获取的强度测试环节,外界电磁环境复杂,干扰源种类繁多,精准分离出有效回波信号能够保证所获取回波信号的完整性与准确性。高超声速飞行器的目标电磁特征复杂,反射回波强度动态范围大^[8]。高超声速飞行器雷达回波信号获取结

构应具备较宽的信号接收动态范围,能够适应不同距离、不同电磁反射特性的飞行器回波信号。该信号获取结构设计会考虑对各类电磁干扰信号的抑制,使得回波强度标定与测试结果更能真实反映高超声速飞行器的实际雷达回波特性^[9]。高超声速飞行器雷达回波信号获取结构采用高稳定度高频信号源产生的频率 $f(t)$,利用脉冲调制和功率放大技术对目标进行定向发射,实现对高超声速飞行器雷达回波信号的重构。重构信号可以反映出信号在各个环节中的变化情况,通过重构信号,能够在信号获取和处理过程中精确提取出多普勒频率等信息,进而准确测量高超声速飞行器的速度等参数。高稳定频率源产生频率的计算公式为:

$$f(t) = \frac{v_r(L_a - v_r t)}{L \sqrt{d_u^2 + (L_a - v_r t)^2}} \quad (1)$$

式中, v_r 表示目标运动速度^[10]; L 表示雷达工作波长^[11]; L_a 表示参考点在时间 t 为0的情况下目标与最接近点的距离^[12]; d_u 表示雷达收发天线与目标点的最短距离。接收天线阵列接收高超声速飞行器目标反射的回波信号,经低噪声放大后与接收机本振源产生的信号混频,混频器输出经中频滤波与放大后与频率为 $f(t)$ 的中频相参基准信号进行正交解调,从而输出 I 、 Q 基带多普勒特征信号。

假设信号在时间 t 为0情况下的相位为 φ ,在正交相位解调过程中,使用两个正交参考信号,可表示为:

$$\begin{cases} I = \xi \cos(\varphi) \\ Q = \xi \sin(\varphi) \end{cases} \quad (2)$$

式中, ξ 表示信号幅度,决定了信号强度大小^[13]。这两个正交参考信号由高稳定频率源结合正交信号生成电路产生。高稳定频率源为整个系统提供稳定、精确的基础频率信号,该信号输入到正交信号生成电路中。此电路一般采用移相技术,比如利用移相器,将输入的基础频率信号进行相位调整,生成两个幅度相等,但相位相差 90° 的正交信号,即两个正交参考信号。它们与高稳定频率源紧密相关,高稳定频率源的频率稳定性、准确性直接决定了正交参考信号的相应特性。因为正交信号生成电路仅对频率源输出的信号进行相位变换处理,不改变其频率本质。所以,只有高稳定频率源性能良好,才能保证产生的正交参考信号质量可靠,进而保障在正交相位解调过程中, I 、 Q 基带多普勒特征信号能准确反映回波与发射信号的相位差,为精确提取多普勒频率信息、准确测量飞行器速度等参数奠定基础。

由于系统具有全相参性,在正交相位解调过程中, I 、 Q 基带多普勒特征信号能够准确地反映出回波信号与发射信号之间的相位差变化,进而精确提取出多普勒频率信息^[14]。如果系统不具备全相参性,各信号源之间的相位随机波动,会导致多普勒信息提取出现误差,

无法准确测量高超声速飞行器的速度等参数^[15]。因此,在该结构中增加超稳时钟基准源锁相,为各个信号源提供了高稳定性的频率基准,从而保证高超声速飞行器回波信号获取系统的全相参性。

基于此,构建的高超声速飞行器雷达回波信号获取结构如图 1 所示。

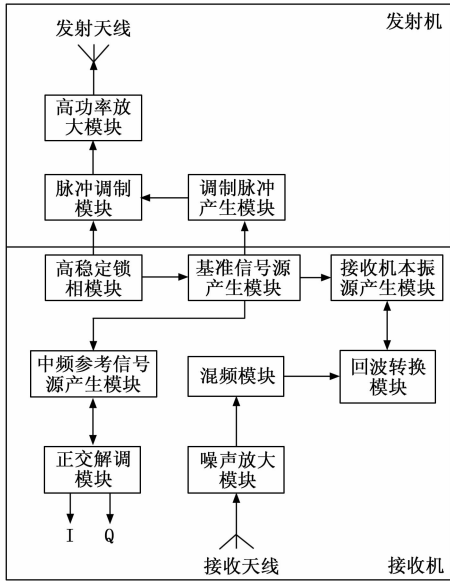


图 1 高超声速飞行器雷达回波信号获取结构

图 1 中的发射部分由高功率放大模块、脉冲调制模块、调制脉冲产生模块组成,其中高功率放大模块是用来提高传输信号的功率,以保证信号可以传送到足以侦测到高超声速飞行器的高度^[16]。脉冲调制模块通过对连续信号的调制,使其易于实现脉冲型的收发,增强信号的抗干扰性同时,也增强了距离分辨率,从而实现高超声速飞行器的精确跟踪;调制脉冲产生模块根据高超声速飞行器的探测要求,产生脉冲序列,实现对发射信号的调制^[17]。

接收部分由高稳定锁相频模块、混频模块、正交解调模块、噪声放大模块,高稳定锁相频模块保证了发射系统的高精度和高稳定性;混频模块将回波信号与本机信号进行混频处理,并将高频回波信号转换为易于放大的中频信号^[18];正交解调模块对中频的相参信号作正交解调,输出在基带的多普勒信号,并对其进行处理,得到速度和距离等信息;由于回波信号很弱,因此,在对信号进行放大的过程中,必须尽可能地降低其本身的噪音,从而改善信号的信噪比。

通过得到的 I、Q 基带多普勒特征信号,可结合正交相位解调的可逆性,重构原始的雷达回波信号,公式为:

$$x = I\cos(2\pi ft) - Q\sin(2\pi ft) \quad (3)$$

从发射信号经过目标反射形成回波,再到接收、混频、放大、解调等一系列处理过程,重构信号可以反映

出信号在各个环节中的变化情况。通过重构信号,能够对相控阵雷达进行更全面地测试。

2 基于相控阵的雷达回波强度测量方法

对于高超声速飞行器而言,由于飞行状态、姿态等因素的影响,其回波特征也会发生改变。该方法在实际应用中充分考虑到了这种差异,并对雷达参数进行了相应的调节,从而实现了对各种飞行状态下回波强度的自适应。然而,由于其工作环境的复杂性,雷达需发射高功率信号降低信号衰减,由此引发了热量积聚问题。采用波束赋形、空时自适应处理等方法,可以有效地压制相控阵雷达中的干扰,在一定程度上克服因热量积聚导致的天线增益下降对探测结果产生的不利影响,改善回波信号的信噪比,保证测试结果的可靠性。为此,提出了基于相控阵的高超声速飞行器雷达回波强度测量标定方法,采用单光束相控阵技术,通过单束光束实现对目标方位角±60°的电子扫描,从而实现对目标的高效追踪与探测。

相控阵雷达系统结构,如图 2 所示。

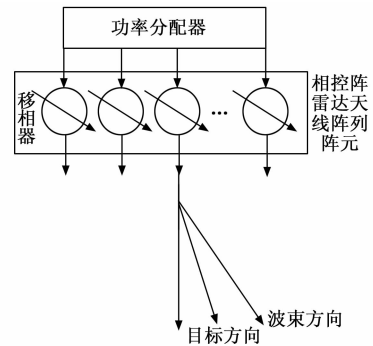


图 2 相控阵雷达系统结构

相控阵列天线的各阵元是组成相控阵的最基本单位,其各自具有独立收发功能。在此基础上,提出了一种新的波束形成方法,即通过对每个单元进行不同的相位和幅值控制,从而达到对波束进行电子扫描和波束成形的控制。

入射电磁波信号经过耦合馈电结构进入到阵列天线波导中,电磁波束经功率分配网络由一路分为多路。当各阵元发射的电磁波束之间不存在相位差异时,不会发生干涉效应且到达等相位区域所需的时间相同,电磁波束只进行简单的功率叠加而不发生方向偏转^[19]。当相邻阵列单元间电磁波束存在相位差值时,会导致电磁波束发生方向改变。因此,通过调控各阵元在不同方向上的相位差值能实现波束的灵活电子扫描。在参考点的单缝衍射振幅和光强,可表示为:

$$\eta = \eta_p \frac{x\sin\theta_r}{\theta_r} \quad (4)$$

$$E = E_h \left(\frac{\sin\theta_r}{\theta_r} \right)^2 \quad (5)$$

上述公式中, η_0 表示初始光强; θ_e 表示入射角度; E_e 表示原始回波强度测量值^[20]。此处光强表达的是雷达电磁波在参考点经类似单缝衍射(原理类比)后所呈现出的强度特征。借助该光强与初始光强、入射角度等参数的关系,能建立起各测点间的光强相关性。以参考点单缝衍射光强为基准,可对多个测点的回波强度进行校验、标定,进而提高雷达探测精度与一致性,并为检测系统灵敏度及范围标定提供依据。根据单缝衍射的幅值与强度在不同的位置上有对应的对应关系,由此可将各测点间的光强相关性建立起来。在对多个测点进行回波强度测试时,利用参考点处的单狭缝绕射光强作为参考,利用相对强度关系对各测点的回波强度进行校验与标定,从而提高探测精度与一致性。在此基础上,通过对参考点的单缝衍射强度进行准确地测定,就能获得给定的绝对强度。此光强可作为一种参考,在对回波强度进行校正时,对检测系统的灵敏度及范围进行标定。

由于回波信号的校准过程中,各单元的性能一致性、通道间的幅度相位特征等因素的影响,需要对各单元的特征参数进行准确地定标;移相器是用来改变信号相位的,通过调节各单元前移相元件的相位值,就能对光束进行定向,从而达到电子扫描的目的;功率分配器对每个单元均分或按比例地发送信号,并在接收端综合每个单元所收到的信号;目标方向是指高超声速飞行器的方位,雷达则是通过调节光束的指向实现对这一方位的探测;波束指向显示了雷达波束角,即 (x_e, y_e) ,利用相控阵技术,可以实现对高超声速目标回波的跟踪与测量。

已知雷达在某一扫描角时,其波束在方位和俯仰角的偏离,分别为 θ_e, θ_u ,则波束指向与目标方向之间的夹角可表示为:

$$\theta = \arctan \sqrt{(\eta \tan \theta_e^2 + E \tan \theta_u^2)} \quad (6)$$

天线增益是指天线在最大发射方向上的能量密度与非定向天线在这个方向上的能量密度的比值,它的发射和接收增益是一个重要的指标。影响雷达探测性能的收发增益,计算公式为:

$$\begin{cases} Z_a = Z_{a0} \cdot \cos \theta \\ Z_b = Z_{b0} \cdot \cos \theta \end{cases} \quad (7)$$

式中, Z_{a0} 、 Z_{b0} 分别表示初始收、发增益。

在雷达波束角测量中,波束角是衡量波束强度的重要参量。波束宽越小,则说明雷达波束聚度越高,指向性越好,则可获得较高之角度分辨力,并可获得较准确之方位。波束宽度,计算公式为:

$$\mu = \frac{\mu_x \mu_y}{\cos \theta} \quad (8)$$

式中, μ_x 、 μ_y 分别表示天线水平、垂直波束宽度。

雷达发射装置将电磁波发射到空间中,在与高超声

速飞行器目标相遇时,将产生反射或散射效应。这些电磁波有一部分沿着特定的路径返回,并被天线所接收,而这部分的能量即为回波的能量。雷达到达天线辐射器处的回波功率,计算公式为:

$$P(x) = K \cdot \frac{\mu \lambda(x)}{R^2} \quad (9)$$

式中, K 表示雷达常数,通过标定获得,它包含了雷达系统参数、天线增益、波束宽度等因素的影响; R 表示目标物到天线的距离; λ 表示目标的雷达散射截面。

在不考虑大气、云对电磁波的衰减以及根据实际情况调整为其他散射模型的情况下,雷达回波强度测量方程可表示为:

$$P_r(x) = \frac{P(x) E Z_a Z_b v \mu}{\ln 2 R^2 L^2} |\eta|^2 \quad (10)$$

式中, v 表示光速。工作一段时间后,由于雷达系统参数的变化(如天线增益下降、接收机噪声系数增加等),这就要求定期对雷达进行回波强度标定,以确保测试结果的准确性和可靠性。

3 实验与分析

3.1 实验环境

以猎鹰高超声速飞行器在 20~100 公里外的实际飞行环境为研究对象,在其上搭载雷达在不同高度、不同飞行姿态条件下,对山地、建筑等目标的雷达回波强度特征进行研究,以期对雷达性能优化、飞行器隐身设计和飞行安全等方面的应用奠定基础。选取直径在 3 m 以上、长 15 m 以上的大型高海拔模拟风洞开展研究,以满足飞机模型和相关试验装备的需求。空气流速可以在 5 到 15 m/s 之间进行调整,以涵盖猎鹰典型的飞行速度。该系统具有 1~1 000 Pa 的气压可调,可在 -100 °C ~200 °C 范围内实现对邻近空间不同高度的大气参数的准确模拟。

采用归一化校正方法对回波激光点获取过程中的回波强度值进行了校正处理,计算公式为:

$$P'_r(x) = \frac{E_b d_r^2}{d_a^2 \cos \theta} \quad (11)$$

式中, $P'_r(x)$ 表示标准化后的回波强度值; d_r 表示回波激光点与传感器之间的距离值; d_a 表示是参考距离值。归一化校正方法具体应用原理是,假定记录的回波强度值与目标表面反射率呈比例关系,与激光点到传感器的距离呈线性关系或者平方反比,通过计算对距离值、入射角变化引起的差异进行归一化处理。此方法假设目标表面为朗伯体,且目标表面平坦,忽略目标表面倾角对激光脉冲回波强度的影响,且通常只针对单次回波和首次回波的激光点有效。

为使回波雷达具有良好的抗电磁干扰性能,在此基础上建立了一套消噪室,保证了对该系统的回波信

号进行精确的检测与分析。为适应大型飞机、障碍物等模型实验需要,使用了一种新型的无源激光雷达系统。内壁均包覆高效的金字塔形吸波材料,在毫米波(30~300 GHz)范围内的电磁波吸收率不小于 99%,可有效降低电磁波的反射与散射。

3.2 实验装置

对于复杂形状的高超声速飞行器,以数控四轴 YL-N 系列的多轴联动转台为实验装置,以模拟飞行器在三维空间中的各种姿态变化,更全面地获取雷达散射特性。该装置结构如图 3 所示。



图 3 YL-N 系列多轴联动转台

YL-N 系列多轴联动转台的多轴协作操作,能够实现高超声速飞行器飞行姿态和雷达信号的准确仿真。同时,多轴联动作业的实施离不开高精度 CNC 控制。在此数控系统中,程序的编写与处理可使系统的性能得到很大的提高,能够实现转台各轴的协调联动控制,以满足高超声速飞行器回波强度试验的需要。具体而言,基于预先设定的高超声速飞行器的航迹和雷达信号获取策略,通过对转盘的多轴运动轨迹进行控制,使得搭载于转台的仿真靶或雷达接收装置可以在三维空间内准确地再现载体的姿态变化,进而实现对不同姿态、场景下高精度回波的精细化检测。

该装置相关参数,如表 1 所示。

表 1 多轴联动转台相关参数

参数名称	参量
工作台直径	120 mm
中心高度	125 mm
中心孔径	30 mm
台面 T 型槽	10 mm
基准定位键	15 mm
最小设定单位	0.001°
减速比	1 : 20
最高转速	85 rpm
容许切削扭矩	0.5 kg · m

以猎鹰高超声速飞行器为研究对象,通过对其进行照明和回波,获得类似于真实飞机的雷达散射特征参

数。其中,AN/APG-78 毫米波雷达是该试验的核心检测装置,其主要任务是将毫米波段的电磁波传输到飞机模型上,并对其进行反射。该回波信号中含有目标物的位置、形状和材料等信息,是进行目标回波强度分析的重要依据;多轴联动转台是一种对飞行器进行多轴高精度转动的仿真平台,它可以模拟真实飞行中飞机的俯仰、偏航、横摆等多种姿态。通过对飞机模型进行姿态变换,可以检测出飞机在不同姿态下的回波强度。

3.3 实验指标

在高超声速飞行器雷达回波强度测试实验过程中,利用校正网络针对各个信号通道的幅度和相位一致性展开修正工作,以此保证各通道之间具备良好的一致性,为后续精准测量雷达回波强度奠定基础。紧接着进入发射信号准备阶段,数字波束形成(DBF)系统对数字衰减器与移相器模块(DAM)内的直接数字频率合成器(DDS)参数实施控制。由 DDS 内部搭载的现场可编程门阵列(FPGA)生成高精度的中频信号。此中频信号作为初始发射信号,其质量直接关系到后续雷达探测的效果。随后,DDS 输出的发射波形会依次经过一本振和二本振进行两次上变频操作,并在此过程中进行信号放大,经过处理后的信号被传送至天线的输入端。此时,裂缝波导线阵将射频信号向空间中辐射出去,从而形成专门用于探测高超声速飞行器的发射波束。这一发射波束如同雷达的“探照灯”,精准地投向目标区域,为获取准确回波信号做好准备。在接收回波信号阶段,天线接收到来自高超声速飞行器的回波信号后,经过数据整理,可得到雷达散射截面、回波信号幅度、回波信号相位,如图 4 所示。

由图 4 (a) 可知,雷达散射截面是一个四边形,对应的 4 个点坐标分别为 A 点(-200 m, 150 m)、B 点(-300 m, -300 m)、C 点(300 m, 300 m)、D 点(200 m, 150 m)。

由图 4 (b) 可知,回波信号变化幅度呈对称性,在方位向为±75 m 时,幅度为-8 dBm。在方位向为 0 时,幅度为 0 dBm。

由图 4 (c) 可知,当雷达发射信号频率为 2 kHz 时,相位差最小为 30°,当雷达发射信号频率为 12 kHz 时,相位差最大为 150°。

3.4 实验结果与分析

实验采用了对比方式,将卡尔曼滤波的测试技术(文献[3]方法)、基于纯自注意力机制的测试技术(文献[4]方法)、基于深度展开网络的测试技术(文献[5]方法)、基于 RD 识别的测试技术(文献[6]方法)作为传统技术,与相控阵雷达扫描测试技术进行对比分析,同时将实验指标作为参照组,以此验证所研究技术的可行性。

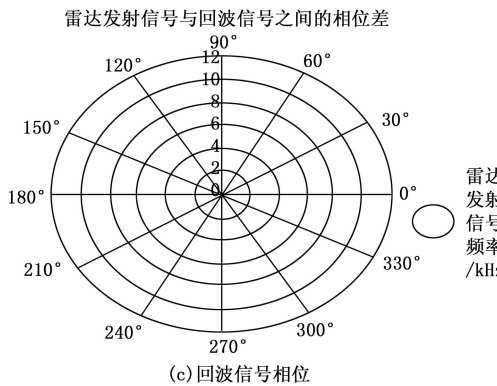
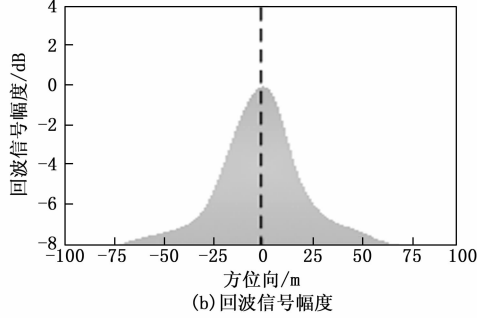
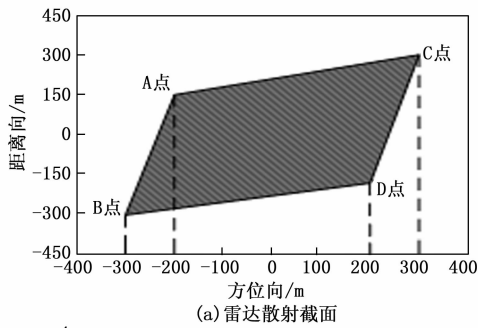


图 4 实验指标

使用不同方法对比分析雷达散射截面, 对比结果如图 5 所示。

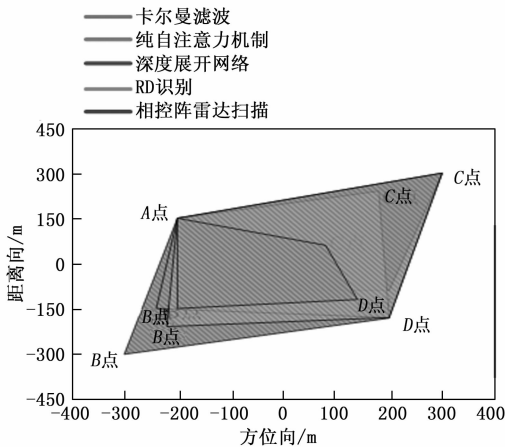


图 5 不同方法雷达散射截面对比结果

由图 5 可知, 使用卡尔曼滤波的测试技术会受到噪声非高斯影响, 出现估计误差, 因此, 只有 A 点坐标与实验指标一致; 使用基于纯自注意力机制的测试技术

忽略局部细节, 导致局部信息缺失, 因此, 只有 A 点和 D 点坐标与实验指标一致; 使用基于深度展开网络的测试技术, 会受到过多噪声干扰, 导致只有 A 点和 C 点坐标与实验指标一致; 使用基于 RD 识别的测试技术分辨率有限, 可能导致坐标点模糊或偏移, 因此, B 点坐标与实验指标不一致; 使用相控阵雷达扫描测试技术具有高分辨率、高灵活性和强抗干扰能力, 因此, A 点、B 点、C 点、D 点坐标与实验指标均一致。

使用不同方法对比分析回波信号幅度, 对比结果如图 6 所示。

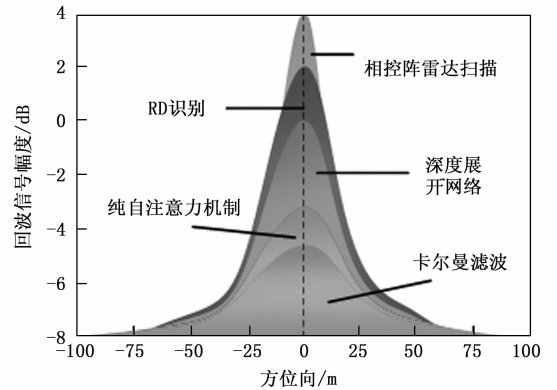


图 6 不同方法回波信号幅度对比结果

由图 6 可知, 雷达回波信号往往是非线性的, 尤其是在高超声速飞行器这种复杂目标的情况下, 当方位向为 0 时, 使用卡尔曼滤波的测试技术回波信号幅度变化与实验指标相差最大, 对应的最大幅度值为 -5.5 dBm。其次是基于 RD 识别的测试技术、基于纯自注意力机制的测试技术、基于深度展开网络的测试技术, 对应的最大幅度值分别为 4、-3、2 dBm。出现这种现象的原因是使用这 4 种方法无法准确捕捉信号幅度的真实变化, 导致测试结果与实际不符。而使用相控阵雷达扫描测试技术具有强大的信号处理能力, 获取的回波信号幅度变化与实验指标一致, 对应的最大幅度值为 0 dB。

使用不同方法对比分析回波信号相位, 对比结果如图 7 所示。

由图 7 可知, 使用卡尔曼滤波的测试技术对于非线性较强的雷达回波信号处理可能存在局限性, 只有在雷达发射信号频率为 2、4、8 kHz 时, 相位差与实验指标一致, 其余均不一致, 且与实验指标存在最大为 30° 的误差; 使用基于纯自注意力机制的测试技术缺乏对雷达信号物理特性的深入理解, 只有在雷达发射信号频率为 2、6、15 kHz 时, 相位差与实验指标一致, 其余均不一致, 且与实验指标存在最大为 15° 的误差; 使用基于深度展开网络的测试技术存在泛化能力不足的问题, 只有在雷达发射信号频率为 2、6、8 kHz 时, 相位差与实验指标一致, 其余均不一致, 且与实验指标存在最大为 30° 的误

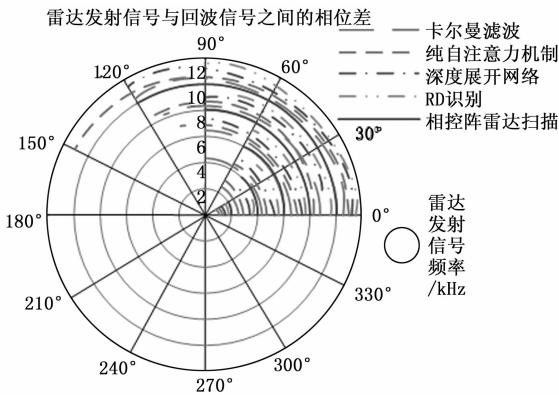


图 7 不同方法回波信号相位对比结果

差；使用基于 RD 识别的测试技术侧重于距离和多普勒信息的提取，对相位信息的处理可能不够精细，只有在雷达发射信号频率为 2 kHz 时，相位差与实验指标一致，其余均不一致，且与实验指标存在最大为 60° 的误差；使用相控阵雷达扫描测试技术，能够更准确地捕捉信号特征，减少因波束不准确或信号失真导致测量误差，因此，所有雷达发射信号频率下的相位差与实验指标均一致，误差为 0。

总而言之，相控阵雷达扫描测试技术在抗干扰、信号处理、波束控制等方面优势显著，在各测试指标的准确性和可靠性上体现突出。

抗干扰方面，该技术能有效压制干扰，克服因热量积聚导致的天线增益下降对探测结果的不利影响，改善回波信号信噪比。在对比实验中，其他传统技术受噪声非高斯、过多噪声干扰等问题影响，出现估计误差、坐标点缺失或偏移等情况，而相控阵雷达扫描测试技术凭借其抗干扰能力，使雷达散射截面的 A、B、C、D 点坐标与实验指标均一致，保证了测试的准确性。

信号处理上，它具有强大的信号处理能力，能准确捕捉信号幅度的真实变化。在回波信号幅度测试中，其他方法无法准确获取信号幅度变化，与实际不符，而该技术获取的回波信号幅度变化与实验指标一致，体现了其信号处理的可靠性。

波束控制方面，该技术通过调控各阵元相位差值实现波束灵活电子扫描，能更准确地捕捉信号特征，减少因波束不准确或信号失真导致的测量误差。在回波信号相位测试中，其他方法在不同频率下存在相位差误差，而该技术所有雷达发射信号频率下的相位差与实验指标均一致，误差为 0，进一步凸显了其优越性。

4 结束语

高超声速飞行器雷达回波强度测试校准是高超声速飞行器雷达探测应用中必不可少的一项关键工作，测试校准效果与回波强度数据的精度有着紧密关联。从相关

研究和实践分析中不难发现，如果能够及时、精确地获取到高超声速飞行器雷达回波强度，那么就能保障回波强度测试结果准确性。为此，提出了基于相控阵的高超声速飞行器雷达回波强度测试技术，通过计算高稳定频率源产生频率和正交参考信号，构建雷达回波信号获取结构，捕捉信号幅度真实变化。在构建了相控阵雷达系统结构基础上，通过采用相控阵技术能够跟踪和测量高超声速飞行器的回波信号，以此测试雷达回波强度。实验结果表明，该技术雷达散射截面、回波信号幅度、回波信号相位测试结果与实验指标一致，有效验证了该技术应用的可性。

参考文献：

- [1] 王子昕, 王咏青, 胡志群, 等. 双多普勒雷达观测在一次雹云结构中的应用 [J]. 气象科学, 2023, 43 (2): 225-234.
- [2] 徐瑾薇, 马中元, 郑媛媛, 等. 玉山雷暴大风雷达回波特征分析 [J]. 气象科学, 2023, 43 (2): 167-176.
- [3] 郑冬花, 邓铭毅, 叶丽珠. 卡尔曼滤波下激光雷达扫描大数据检测算法 [J]. 计算机仿真, 2024, 41 (6): 15-18.
- [4] 张春杰, 王冠博, 陈奇, 等. 基于纯自注意力机制的毫米波雷达手势识别 [J]. 系统工程与电子技术, 2024, 46 (3): 859-867.
- [5] 孙延鹏, 尹鑫戊, 屈乐乐. 基于深度展开网络的 SFGPR 压缩感知成像方法 [J]. 雷达科学与技术, 2024, 22 (4): 427-433.
- [6] 石晓荣, 张康, 倪亮, 等. 复杂环境下少样本域自适应雷达 RD 智能识别技术 [J]. 航天控制, 2023, 41 (4): 20-26.
- [7] 李荣华, 邓源, 薛豪鹏, 等. M8 激光雷达回波的非接触式发射率三维分布测量方法 [J]. 红外与激光工程, 2024, 53 (4): 165-179.
- [8] 王丹, 丁琼, 张润源, 等. LiDAR 辐射强度信号校正研究进展及趋势 [J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61 (14): 31-41.
- [9] 廖英琦, 杨苏辉, 宋健, 等. 利用涡旋光场计算水中前向散射的频率响应 [J]. 红外与激光工程, 2023, 52 (9): 115-124.
- [10] 曹翔, 王波, 杜友强, 等. 浙东南沿海两次雷暴大风过程环境参数和雷达回波特征对比研究 [J]. 科技通报, 2025, 41 (1): 1-7.
- [11] 赵子杭, 庄庭, 李建勇, 等. 天津区域鸟类活动的双偏振天气雷达回波分析 [J]. 气象, 2024, 50 (9): 1142-1152.
- [12] 刘黎平. 基于 Ka/Ku 双波段回波强度差约束和多普勒功率谱的微物理和动力参数反演方法和应用 [J]. 大气科学, 2023, 47 (6): 1827-1842.

(下转第 24 页)