

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003102

改进的着陆引导雷达天线角基准校验仪

田 韵 侯灿靖 李爱琴

(95801 部队 北京 100078)

摘要:针对传统的着陆引导雷达天线角基准校验方法的电磁辐射量大、抗环境干扰能力弱、工作效率低等缺点,提出并实现了一种改进的校验仪。改变被测天线主动发射大信号方式为被动接收小信号,校验仪远端采用三轴程控转台加伺服控制机构实现对标准源天线的精确控制,配合近端的操作软件,在天线测试外场 150~250 m 遥控源天线动作,具有自动寻峰、数据判断存储功能。改进后对人体辐射量仅为原来的 1/850 000,测试人员数量从 4 人减少为 2 人,时间从 2 h 缩短到 30 min 以内。实验证明改进的雷达天线角基准校验仪完全可以替代传统的校验仪。

关键词: 校验仪;着陆引导雷达;天线角基准;辐射;三轴程控转台;被动式;自动寻峰

中图分类号: TP23 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Improved calibrator for antenna angular reference of landing guidance radar

Tian Yun Hou Canjing Li Aiqin

(Unit 95801 of PLA, Beijing 100078, China)

Abstract: For traditional calibrating method of the antenna angular reference of landing guidance radar, a large amount of electromagnetic radiations is unavoidable, the capacity of resisting disturbance is lower and the work is inefficient. An improved method is proposed. The measured antenna received small signal instead of transmitting large signal during the testing procedure. Three axis programmable turntable and servo controller were adopted at far field testing to control the horn antenna move precisely, and working with the near-end operational software. The horn antenna can be remotely controlled between the distance of the 150 to 250 meters. Peak-seeking automatically and data logging and storage were realized as well. Compared with the traditional calibrating method, the electrical radiation reduced to 1 : 850 000, the testing stuff reduced from 4 to 2 and the testing time reduced from 5 hours to 0.5 hour. The improved calibrator which is proved by the experiments can replace the old one completely.

Keywords: calibrator; landing guidance radar; antenna angular reference; radiation; three axis programmable turntable; passive mode; peak-seeking automatically

0 引言

大多数普通天线的测量是测定其远场的辐射特性,如定向波瓣图、增益或相位波瓣图等。基本步骤是将一架发射的或接收的源天线放在相对于待测天线(AUT)等距离的不同位置上,借以采集大量波瓣图取样值。通常,其不同位置借助待测天线的原地旋转来实现的。为使波瓣图能保真地取样其锐变形状,在待测天线与源天线之间应该只存在直接的传播途径,这就要求实现无反射的

环境,如吸收波室或自由空间^[1]。

由天线测量中的互易性可知,待测天线的辐射参量既可按发射模式,也可按接收模式测量,因此待测天线既可用做接收天线,也可用做发射天线^[1]。将待测天线作为发射天线主动发射信号的测试方法称为主动测试法,作为接收天线被动接收源天线发出的信号的测试方法称为被动测试法。

天线测试系统是包括天线、RF 仪表、机械、控制和软件等部分的十分复杂的系统。天线测量的研究方法多见的有计算机仿真,文献[2]进行多路输入多路输出

(MIMO) 矢量信号特征分析、信号分析测试仿真研究, 针对 MIMO 发送模式波束赋形多天线建模和测试仿真, 实现多天线模式下 MIMO 信号检测。近些年随着无人机技术的发展, 利用无人机作为测量手段成为了研究的一个方向, 文献[3]构建了一种基于小型无人机的天线测量系统, 利用实时差分 GPS 信号作为导航控制信号, 提高了无人机的飞行轨迹精度, 测试方向图和增益的误差小于 1 dB。文献[4]对于不具备可机械旋转的数字波束形成(digital beam forming, DBF)天线方向图测试, 提出了一种基于波束扫描的测试方法。文献[5]研究了天线参数的时域和频域测量方法, 分别建立了天线方向性测量系统, 并对两种方法的特点进行了比较。在转台的选择方面, 文献[6]介绍了两种不同的转台形式。精度方面, 文献[7]提出的转台的角位置分辨率达到了 $\pm 0.005^\circ$ 。

在自动化控制及软件方面, 文献[8]针对船载雷达天线方向图检测手段单一, 以手动和半自动为主, 研究了一种自动测试系统, 采用虚拟仪器技术的 GPIB 及串行接口方案, 远程控制测试仪器。文献[9]提出的测试系统在微软操作系统的 PC 计算机环境下进行, 采用 VB 和 VBA 编程, 使用 GPIB 总线与硬件系统进行通信。文献[10]设计了一种基于液晶显示的天线测量系统。硬件采用 STM32 系列微处理器作为整个系统的核心, 脱离了上位机的束缚, 为小型天线的实验室测试带来了便利。文献[11]通过 FPGA 逻辑时序设计的系统实现对控制脉冲的精准收发, 进而灵活地辅助测试和校准有源相控阵天线。

天线测量的典型误差源主要有有限测试距离所致的相位误差和幅度锥削; 受周围物体反射波的干涉; 对准误差, 未仔细对准源天线将会增大测试区域的幅度误差, 并造成不对称的照射^[1]。如何减小测量误差也是研究的一个重要方向。

文献[12]从分析天线远场测试条件出发, 通过对双脊喇叭天线远场方向图的实验测试和结果分析, 给出微波暗室和斜天线测试场地对天线远场测试影响的特点和规律。文献[13]提出由于转台功能的限制, 不能保证天线所有端口的相位中心均位于转轴上, 将给测试带来误差。文献[14]提出传统远场天线测试场环境中易受到电磁干扰的影响, 分析了误差的来源, 并提出了两种修正误差的方法。

以上天线测量的研究方法在具体应用场合里各有独到之处。方法的选择是影响天线测量效果的一个十分重要的因素, 结合待测天线的测量要求, 找到合适的测量方法显得尤为重要。

近进着陆引导雷达(以下简称为雷达)为三坐标雷达, 天线为机械扇扫天线。使用两个反射面天线分别在空域的航向面和下滑面搜寻目标给飞机提供三

维的位置信息。这类设备的天线在一定空间范围内做扇扫运动, 需要通过特定的传动系统将主电机的运动转化为固定角度范围内的机械动作。雷达的天线面和传动系统为一体化设计, 体积较大, 重量较重, 在测试这类天线的特性时, 不能采取常见的自动转台测试的方式。传统的做法是用主动测试法校验天线的角基准。

角基准是指天线波束(或波瓣)最大值的指示方向与确定的空间方向一致, 并通过下滑和航向天线的机械刻度(主刻度与指向刻度)表示出来。角基准校验即校准天线使雷达在方位角和仰角观察范围内, 测定的目标角度数据的精确度满足战术指标的要求。

角基准的校准采用半功率点测量法。天线波瓣图的最大值部分比较平滑, 不易找到最大值所对应的角度, 而在最大值两侧的半功率点处, 场强变化显著, 根据两个半功率点对应的角度取平均值即可精确确定天线波束最大值所对应的角度。

通常, 很难对天线的使用环境建模, 即使能算出理想天线的性能, 仍需要通过测量来检验^[1]。最好的测试位置正是该天线的使用环境^[1]。

传统主动测试法校验雷达天线角基准的缺陷如下: 1) 操作人员受大量电磁辐射; 2) 抗环境干扰能力较弱; 3) 存在人员高空作业的危险; 4) 人工操作的方式工作效率较低。

目前主动校验法除了传统的大功率、全手动的方法外, 近些年兄弟单位研制了改进的主动式校验法, 使全手动改进为半自动, 提高了工作效率, 减少了高空作业危险, 但仍不能避免大功率信号的辐射危害。被动式校验法近些年来被雷达生产厂家用来测试雷达的角基准, 但仍是较原始的手动操作, 效率较低, 且不能完全避免对准误差。此外, 测试方法的环境适应性是一个不容被忽视的问题, 不少单位受场地狭小、场地障碍物多的限制而得不到理想的测试数据, 因此环境适应性好的测试方法对雷达天线测试有很高的实用价值。总的来看该测试领域的发展趋势必然是朝着小信号、自动化和环境适应性好的方向发展。

针对传统测试方法辐射大、抗环境干扰能力弱等缺点的技术改进需求, 根据天线测量中的互易性^[1], 提出用安装在遥控转台上的标准喇叭源天线发射小信号、雷达天线接收的被动校准模式, 通过遥控源天线自动对焦, 操作软件自动读取收信号功率, 从而求得天线角基准的测试方法。在测量场地的选择上, 因待测天线不方便移动, 考虑到测试的成本、安全以及效率等因素, 采用源天线高架的斜式场^[15]。该方法一方面减少了信号辐射, 另一方面利用雷达天线接收波束窄的特性, 有效消除了周边障碍物产生的反射波对测试的影响, 增强了测试抗干扰能

力,同时提高了工作效率。

1 系统组成与功能

改进的着陆引导雷达角基准校验仪由主机与遥控终端两部分组成,实物如图 1 所示。主机是自动转台一体化设计的由标准喇叭天线发射的小信号源。其主要功能是为信号源提供三维运动平台支撑。遥控终端,即在雷达天线操作端实时监测天线收信号强度并实现对主机无线遥控的监控平台。



图 1 校验仪系统组成

Fig. 1 Composition of the calibrator

2 主要模块技术设计与实现

2.1 主机

由三轴程控转台、信号源、喇叭天线、无线通信模块、电源模块等组成。

1) 信号源功率的确定

由雷达方程设有一天线置于自由空间中,当天线与接收机匹配时,则在距天线 r 处的接收天线上的功率为:

$$P_r = \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 P_T G_T G_r \quad (1)$$

式中: G_T 为发射天线的增益; P_T 为输入功率; G_r 为接收天线增益; λ 为信号波长。

对式(1)两边取对数:

$$\lg P_r = 2\lg \lambda + \lg P_T + \lg G_T + \lg G_r - 2\lg 4\pi r$$

有:

$$10\lg P_r = 20\lg \lambda + 10\lg P_T + 10\lg G_T + 10\lg G_r - 20\lg 4\pi r \quad (2)$$

发射天线采用增益为 19.8 dB 的标准喇叭口天线,雷达航向天线、下滑天线为接收天线,增益已知。采用微波功率计在被测天线后端波导处接收信号,灵敏度为 $-30 \sim +20$ dBm,即 $-30 \text{ dBm} < P_r < 20 \text{ dBm}$,这里主要考虑功率下限,若功率超过上限,可增加衰减器。 G_T 、 G_r 、 λ 为已知, $10\lg P_r$ 、 $10\lg P_T$ 为 dB 形式的功率, $10\lg G_T$ 、 $10\lg G_r$ 为 dB 形式的天线增益,外场测试距离 $150 \text{ m} < r < 250 \text{ m}$,根据式(2)取信号功率 P_r 为 0 dB (30 dBm),即 1 W 可满足微波功率计的测试范围。

2) 转台的选择

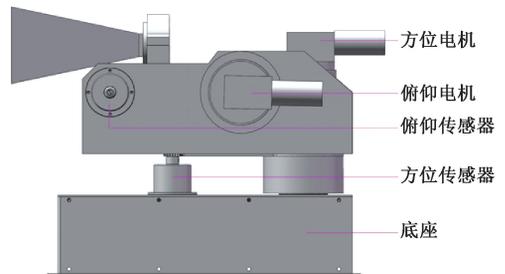
在考查成本、体积、复杂程度等的基础上转台选用的是错交结构设计而非正交结构,它的 3 个轴除极化外,方位、俯仰轴并不是以喇叭口天线中心为轴运动,因此在测量过程中如果不断调整天线的方位角和俯仰角,则水平角和仰角会发生细微的改变,导致后续的测量结果发生偏差,因此本方案的操作步骤要求先天线对焦,然后测量初始水平角和仰角,在之后的测量中就不再操控源天线做方位和俯仰动作,仅在从测量航向天线转为下滑天线时控制源天线改变极化方式,以此规避误差的产生。主要技术指标如表 1 所示。

表 1 三轴程控转台的主要技术指标

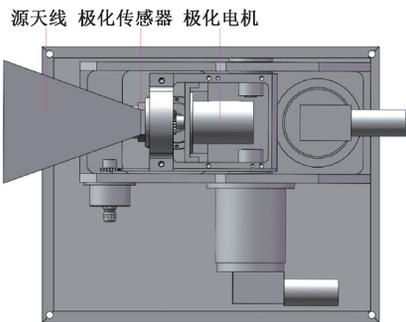
Table 1 Main specification of turntable

项目	技术指标
结构形式	极化-俯仰-方位
极化轴	$-5^\circ \sim 95^\circ$
俯仰	$-10^\circ \sim +10^\circ$
重量	$\leq 25 \text{ kg}$

机械结构如图 2 所示。



(a) 侧视图
(a) Side view



(b) 俯视图
(b) Vertical view

图 2 三轴程控转台结构示意图

Fig. 2 Diagram of the antenna turntable

采用直流电机伺服控制方式驱动方位轴、俯仰轴及极化轴,电气系统组成如图 3 所示。

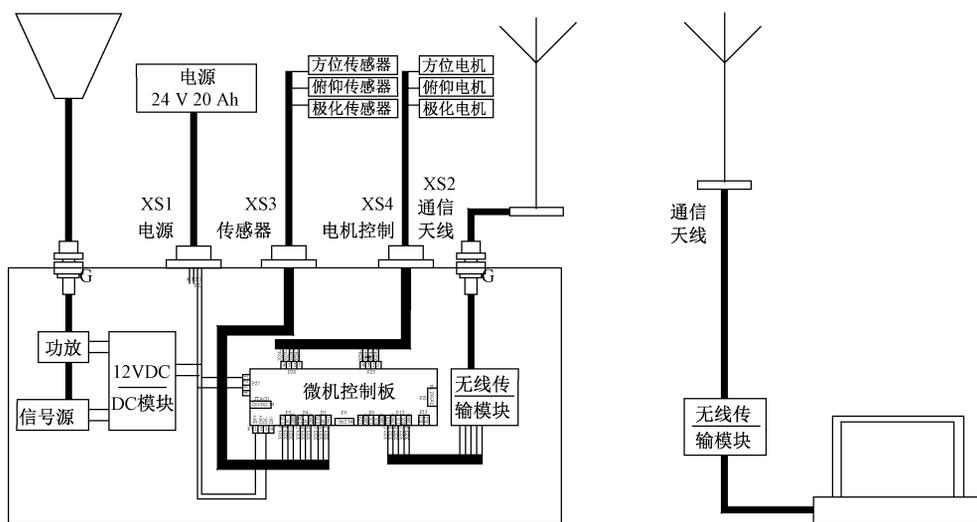


图 3 三轴程控转台电气连接

Fig. 3 Electrical connection diagram

3) 三轴程控转台角度步进的选取

满足天线测试精度要求前提下,设计转台转动的角度步进。从约束条件上看,设计步进取决于功率计的分辨率,其出厂分辨率为 0.1 dB,实验中发现 0.1°的步进即可满足角基准校验要求,测试数据如表 2 所示,可以看出对功率敏感的最小角度变化为 0.1°,因此把三轴程控转台的设计精度确定为 0.1°(6′)。尽管转台本身设计精度可达到 2′,但一味强调转台的精度会增加不必要的机加工难度,同时提高了成本。

表 2 一组微波功率模块对转台角度的灵敏度实测数据

Table 2 A set of sensitivity data of the microwave power module to turntable

转台角度/(°)	接收功率/dBmW
0	-4.09
0.05	-4.09
0.1	-4.09
0.2	-4.20
0.4	-4.20
0.6	-4.20
0.8	-4.20
1.0	-4.32
1.2	-4.32
1.6	-4.44
2.0	-4.56
2.4	-4.69
2.8	-4.95

4) 微机控制板 (MCU)

MCU 是伺服控制的核心,其核心器件是单片机,通过数据采集模块采集当前姿态信息,并通过无线数传模块与上位机通信,一方面将当前姿态信息传送到上位机显示,另一方面接收上位机的控制指令,通过电机控制模块驱动电机转动,完成相应动作。

方位、俯仰、极化轴均有软限位保护功能,当检测到转台位置超出限值后停止当前动作。当限位信号反馈给控制主板,单片机将读取到的限位信号一路上传给上位机,一路给伺服驱动器控制电机,并通过对方位、俯仰轴转动发出的脉冲数的记录,转换成角度值通过通讯接口发送给上位机或显示在人机对话界面上。

5) 无线数传模块

选用了市场成熟产品,一款具备收发一体的无线透明传输模块,在其应用基础上进行应用二次开发而实现。工作频率 433 MHz 免费 ISM 频段,支持无线唤醒,开阔地通信距离不小于 250 m。

做实验时,天线自动对焦出现过软件死机情况。经分析发现转台动作时电机产生的脉冲宽度调制信号干扰了无线模块的信号传输,导致设备与 PC 连接中断。后采用了增大无线模块发射功率,更换高增益天线的方法。功率由原来的 100 增加到 500 mW,天线由原来的增益只有 2.5 dBi 的天线更换为 6 dBi 的天线后,通信速率从原来的 2 提高到 5 fps。经试验该方法可行、有效。

6) 角度调整方式

可手动输入目标值并自动跟踪或步进调整,手动与自动方式时步进值均为固定 0.1°。

7) 自动对焦时间

在实现过程中出现了自动对焦时间过长的的问题。经分析认为软件实现自动对焦功能采用了“十字遍历法”,每 0.1°采集一次数据,两地交换数据较多,大约需要 1.5 min,时长难以忍受;后将软件实现方法改为“爬坡法”,粗测时步进为 1°,在接近最大点时步进减小为 0.1°,这样大大减少了数据量,时间缩短到 0.5 min,用户

感受良好。

2.2 遥控终端

遥控终端包括一台安装有“着陆引导雷达角基准测试软件”的笔记本、一个带 USB 接口的无线数据传输模块和一个带 USB 接口的微波功率计。遥控终端主要实现对主机的遥控功能,对主机回传的数据信息进行实时动态显示,并对校验过程中的相关结果进行判决显示。

“着陆引导雷达角基准测试软件”基于 Visual Studio 平台开发。操作软件可以在远场测量方式下完成对天线转台各运动轴的控制,同时记录源天线的位置信息。操作界面简单直观,并自动判断指标是否合格。点击导入后在后台保存成检验验收书的表格形式。界面如图 4 所示。程序初始化后,分为两部分,为界面控制的主机三维程控转台相应操作指令发送;对主机回传数据的解析与显示。界面指令主要是对主机三维程控转台完成“自动”与“步进”方式接收喇叭口指向三维调整的控制,并“一键”控制主机三维程控转台“自动寻峰”。



图 4 着陆引导雷达角基准测试软件界面

Fig. 4 Software interface of the calibrator

3 测试数据对比

校验仪样机试制完成后,经调试和试用,评审认为达到了项目设计要求。这里给出两组对比数据。表 3 为该样机与传统校验仪的航向主刻度测试对比数据。

表 3 一组改进的校验仪与传统校验仪的航向主刻度测试对比数据

Table 3 A set of comparison data of azimuth main scale between the improved calibrator and the traditional calibrator

项目	第 1 半功率点	第 2 半功率点	航向主刻度角基准 ($\leq 3'$)	结论
主动校验仪	左 42'	左 30'	6'	不合格
改进的校验仪	右 30'	右 30'	0'	合格

这是在我单位雷达大修测试场测试一部雷达时的航向角基准数据。天线左前方大约 80 m 距天线中心 20 m 处树木比较茂盛,树高约 7 m。用传统的主动法测试时数据不合格,经分析认为树冠对信号的反射波对直射波造成了干涉,致使左半功率点产生了偏差。而在这种环境下使用被动法测试的数据是合格的,说明在被动法中不存在反射干涉的情况。为了验证该假设,砍去了一半的树冠,之后用主动法测试也得到了合格的数据,证实了假设的正确性。

在雷达生产厂家测试的对比数据如表 4 所示,从数据中可以看出虽然都是被动法,但改进的校验仪比厂家使用的手动测试法测得的数据更为精确,这是因为天线自动对焦消除了对准误差,且数据自动录取避免了人工判读引入的人为误差。

表 4 一组改进的校验仪与手动的被动校验仪的测试数据对比

Table 4 A set of comparison data between the improved calibrator and the manual passive calibrator

项目	要求	改进的校验仪	手动的被动校验法	结论
航向主刻度的校准	$\leq \pm 3'$	0'	0'	合格
航向指向刻度的校准	$\leq \pm 30'$	4'	5'	合格
下滑主刻度的校准	$\leq \pm 6'$	0.5'	1'	合格
下滑指向刻度的校准	$\leq \pm 30'$	2'	2'	合格

4 不同校验方法优劣对比

4.1 抗环境干扰能力对比

1) 天线角基准测试中的环境干扰模式分析

正常情况下,接收天线口面接收到的信号是源天线照射的直射波,信号同幅同相,但有时除了直射波,还会有来自地面、周围物体的反射波进入接收天线口面,使得组合信号幅度、相位发生变化,造成测试偏差。

测试时采用的斜天线测试场,属于高架测试场的一个特例,它是收发天线架设高度不等的一种测试场^[16],源天线架高,而待测天线架设的高度低于源天线。这样架设的目的是为了尽量削弱地面反射波的影响^[16],利用待测天线方向图对反射线强度进行抵制^[16]。测试时雷达天线上仰 3° ,源天线的打地点在雷达天线垂直面波瓣的副瓣区^[16],主截面上的副瓣区对反射信号的抑制在 20 dB 量级,因此在本方案中分析环境干扰模式中不再考虑地面反射的影响。分析测试中会发生的干扰模式如图 5 所示。

雷达天线副瓣电平都在 20 dB 以上,由副瓣电平定义 $SL = 10 \log \frac{P}{P_{max}}$,可知副瓣的功率低于主瓣 20 dB (2 个

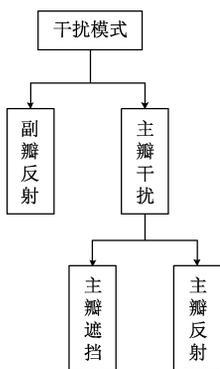


图 5 干扰模式分析

Fig. 5 Analysis of interfere mode

数量级)以上,对测试数据的影响非常小,因此在分析干扰时可以不考虑副瓣对主瓣的影响。

考虑到比主瓣功率最大值小 10 dB (1 个数量级)以下的信号即使产生干扰对测试数据也影响不大,因此在确定无干扰的最小范围时,选取了 10 dB 波束宽度作为划分干扰和不被干扰的分界角度。在水平面内设该角度为 θ_{10AZ} , 即考虑障碍物在水平张角 θ_{10AZ} 范围内的干扰情况,在 θ_{10AZ} 范围外的障碍物则不予考虑。

着陆引导雷达的天线主波束很窄,如果因为主瓣被遮挡造成明显的测量误差,则障碍物必位于水平张角 θ_{10AZ} 范围内,对于长度 $L = 150 \sim 250$ m 的测试场来说,障碍物距喇叭天线的水平距离最大为 $L \cdot \tan(\theta_{10AZ}/2)$, 实际结果只有几米,垂直方向上亦然。一般来讲,天线测试外场至少能保证在这个范围内无障碍物,因此在分析雷达角基准测试的干扰模式时可以排除主瓣被遮挡的情况,主要考虑主瓣被反射造成的干扰。

2) 主瓣反射干扰模式在主动法测试中发生的时机

半功率点测试法测试时航向天线会左右转动 $\frac{1}{2}\theta_{3AZ}$

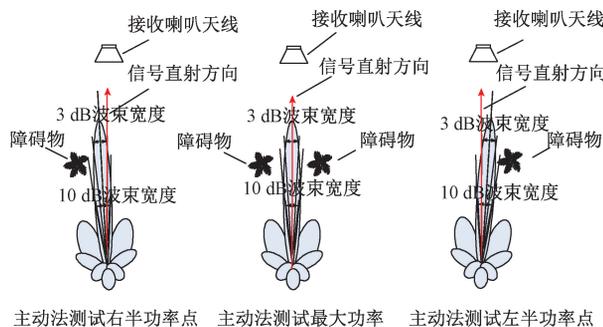
的角度,下滑天线会俯仰转动 $\frac{1}{2}\theta_{3EL}$ 的角度,分析整个测试过程,对测试数据有影响的反射干扰只可能发生在天线转动时,且障碍物在雷达天线主波束 10 dB 波束宽度至向外扩展 3 dB 波束宽度范围内,即水平面内从 $\theta_{10AZ} \sim \theta_{10AZ} + \theta_{3AZ}$ 、垂直面从 $\theta_{10EL} \sim \theta_{10EL} + \theta_{3EL}$ 角度范围内。

3) 主动测试法的最小无干扰角度范围

如图 6(c) 所示,在雷达天线右边 $\frac{1}{2}\theta_{10AZ}$ 波束宽度至 $\frac{1}{2}(\theta_{10AZ} + \theta_{3AZ})$ 波束宽度范围内有一障碍物(如高大树木),注意此角度不等于 $\frac{1}{2}\theta_{13AZ}$ 波束宽度,在测试最大功率时

对接收信号并未造成干扰(因为在 $\frac{1}{2}\theta_{10AZ}$ 之外),但

在测试左半功率点时天线向右偏转 $\frac{1}{2}\theta_{3AZ}$, 这时障碍物就会遮挡右半波束($\frac{1}{2}\theta_{10AZ}$ 之内)并形成反射,此反射信号进入接收喇叭天线,与接收到的左半波束信号幅值相当,且同频不同相,抵消了正常信号,使本来应该是半功率点的角度测到的功率达不到最大功率的一半,造成左半功率点测试偏差。同理当测试右半功率点时,天线向左偏转 $\frac{1}{2}\theta_{3AZ}$, 如果在雷达天线另一边主波束 $\frac{1}{2}\theta_{10AZ}$ 波束宽度至 $\frac{1}{2}(\theta_{10AZ} + \theta_{3AZ})$ 范围内有一障碍物,也会造成右半功率点测试偏差,如图 6(a) 所示。因此主动测试法的最小无干扰水平角度范围是雷达天线垂直极化 ($\theta_{10AZ} + \theta_{3AZ}$) 波束宽度范围内。



主动法测试右半功率点 主动法测试最大功率 主动法测试左半功率点

图 6 主动测试法中主瓣干扰模式分析

Fig. 6 Interfering analysis of main lobe active mode

同理可推导出主动法测试时最小无干扰垂直角度范围是雷达天线水平极化 ($\theta_{10EL} + \theta_{3EL}$) 波束宽度范围内。

4) 被动测试法的最小无干扰角度范围

被动法测试航向天线左半功率点时,同样以在雷达

天线右边主波束 $\frac{1}{2}\theta_{10AZ}$ 波束宽度至 $\frac{1}{2}(\theta_{10AZ} + \theta_{3AZ})$ 范围内有一障碍物(如高大树木)进行分析,该障碍物也遮挡了喇叭口天线发出的波束并发生了漫反射,但由于此时接收天线是雷达天线,而雷达天线的 θ_{10AZ} 波束宽度很窄,此反射信号很难进入雷达天线,在主动法中造成测量误差的干扰反射对被动法基本不造成影响。这与实际测量时的情形相符合。

因此可以得出结论,被动法测试时,雷达航向天线的最小无干扰水平角度范围是航向天线主波束水平面 θ_{10AZ} 波束宽度范围内,即在此范围内没有障碍物对主瓣造成遮挡干扰即可。同理最小无干扰垂直角度范围是航向天线主波束垂直面 θ_{10EL} 波束宽度范围内。

5) 主动法和被动法的最小无干扰角度范围对比

综上所述给出两种方法工程上近似的最小无干扰范围角度如表 5 所示,对测试场地的选择有一定的参考

作用。

表 5 两种方法工程上近似的最小无干扰范围角度

Table 5 Comparison of no interference approximate angular range between two methods

最小无干扰范围角度	主动法	被动法
水平	$\theta_{10AZ}^{(1)} + \theta_{3AZ}^{(2)}$	θ_{10AZ}
垂直	$\theta_{10EL}^{(3)} + \theta_{3EL}^{(4)}$	θ_{10EL}

注: (1) θ_{10AZ} 为雷达航向天线垂直极化 10 dB 波束宽度; (2) θ_{3AZ} 为雷达航向天线垂直极化 3 dB 波束宽度; (3) θ_{10EL} 为雷达下滑天线水平极化 10 dB 波束宽度; (4) θ_{3EL} 雷达下滑天线水平极化 3 dB 波束宽度

可见被动法的最小无干扰范围的水平角度比主动法

表 6 三种角基准校验方法的特性比较

Table 6 Comparison of characters between three methods

时效性	操作	自动程度	人员所受辐射最大功率密度的瞬时峰值/($W \cdot m^{-2}$)	对场地周围环境要求	备注
传统主动法	4人×2h 需反复加高压、降高压	手动	39.8×10^3	较高	需发射机工作状态良好
改进的主动法	3人×1h 需反复加高压、降高压	半自动	39.8×10^3	较高	需发射机工作状态良好
改进的被动法	2人×0.5h 无需开发射机	半自动	3.4×10^{-4}	较低	和发射机工作状态无关

功率密度由公式:

$$S = \frac{P_t G_t}{4R^2} \quad (3)$$

式中: G_t 为所测试位置的增益,如测后瓣则为后瓣增益,如测副瓣则为副瓣增益。 P_t 为发射功率。

若以 dB 表示:

$$10\lg S = 10\lg P_t + 10\lg G_t - 10\lg 4\pi R^2 \quad (4)$$

150 m < r < 250 m, 发射天线采用增益为 19.8 dB 的标准喇叭口天线,发射信号源为 30 dBm (0 dB) 的连续波信号。将以上数据代入式(4)。

当 $r = 150$ m, $S = 3.4 \times 10^{-4} W/m^2$; 当 $r = 250$ m, $S = 1.2 \times 10^{-4} W/m^2$ 。

因此被动法中人员所受辐射最大功率密度的瞬时峰值为 $3.4 \times 10^{-4} W/m^2$ 。

操作过程中人员站在天线后面,经计算得知对操作人员的最大辐射来自天线后瓣, $S = 39.8 \times 10^3 W/m^2$ 。

由表 6 可看出,相比主动式校验法,改进的被动式角基准校验法有人员辐射小、时效性高及对场地要求相对较低等无可代替的优点。

5 结论

改进的着陆引导雷达角基准校验仪解决了传统角基准测试方法辐射大、对场地要求相对苛刻、受制于雷达主机的功能正常与否、自动化程度低等问题。测试指标相

的大 3 dB 水平波束宽度,其垂直角度比主动法的也大 3 dB 垂直波束宽度。

6) 被动法抗环境干扰能力优于主动法的原因分析

被动法比主动法抗干扰能力强的原因归根结底是因为被动法用雷达天线做接收天线,其增益高、波束窄,反射信号不易进入主波束,所以抗干扰能力比喇叭天线的高。因此被动校验法的场地适应性相对较强,某些主动式校验法测试无法通过的天线测试场,使用被动式校验法可以得到合格的测试数据。

4.2 特性对比

把改进的被动式校验法(即本文所述方法)与两种主动式校验法从时效性、辐射等方面加以对比,详如表 6 所示。

4.2 特性对比

把改进的被动式校验法(即本文所述方法)与两种主动式校验法从时效性、辐射等方面加以对比,详如表 6 所示。

当于或优于传统的角基准测试方法的指标。目前已在生产、定期校验和大修过程中使用。

参考文献

- [1] KRAUS J D, MARHEFKA R J. Antennas: For All Applications [M]. 3rd Edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.
- [2] 张煜. MIMO 波束赋形测试技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(7): 122-130.
ZHANG Y. Research on MIMO beamforming test [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(7): 122-130.
- [3] 马松辉, 芦永超, 刘可佳, 等. 基于小型无人机的高精度天线测试方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(5): 36-42.
MA S H, LU Y CH, LIU K J, et al. Accurate antenna measurement method based on micro UAV [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(5): 36-42.
- [4] 周建卫, 李道京, 胡焯. 基于波束扫描的 DBF 天线方向图测试方法[J]. 中国科学院大学学报, 2016, 33(4): 542-547.
ZHOU J W, LI D J, HU X. DBF antenna pattern measurement based on beam scanning [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2016, 33(4): 542-547.
- [5] 胡昆明, 李高升, 王晖. 天线方向性测量系统设计与实现[J]. 电子测量技术, 2012, 35(1): 112-115.

- HU K M, LI G SH, WANG H. Design and implementation of measurement system for antenna directivity [J]. Electronic Measurement Technology, 2012, 35(1): 112-115.
- [6] 杨先超, 任超, 王凯, 等. 天线方向图测试中的俯仰角定义与转台选择[J]. 河南科技, 2015(18): 139-141.
YANG X CH, REN CH, WANG K, et al. Definition of pitch angle and selection of turntable in antenna pattern measurement [J]. Journal of Henan Science and Technology, 2015(18): 139-141.
- [7] 宋斌, 齐永龙, 刘尧峰. 一种外场天线测试转台设计[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(6): 1896-1898.
SONG B, QI Y L, LIU R F. Design of rotation table for antenna testing in far-field[J]. Computer Measurement & Control, 2014, 22(6): 1896-1898.
- [8] 孙永江, 金华松, 邱冬冬, 等. 船载雷达方向图自动化测试系统研究与实现[J]. 电子测量技术, 2013, 36(7): 78-82.
SUN Y J, JIN H S, QIU D D, et al. Research and realization of ship-based antenna pattern automatic testing system [J]. Electronic Measurement Technology, 2013, 36(7): 78-82.
- [9] 韩烽, 王雅娜. 天线测试系统自动控制技术探讨与实践[J]. 信息通信技术与政策, 2018(7): 81-85.
HAN F, WANG Y N. Technology of the automatic control and practice of the antenna testing system [J]. Information and Communication Technology and Policy, 2018(7): 81-85.
- [10] 彭可卿, 王新君, 金玲玲. 基于液晶显示的天线测量系统设计[J]. 电子测量技术, 2019, 42(17): 11-15.
PENG K Q, WANG X J, JIN L L. Design of antenna measurement system based on liquid crystal display [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(17): 11-15.
- [11] 姚文琦, 张允赛, 黄彪, 等. 基于 FPGA 的脉冲辅助测试系统的设计[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(2): 112-115.
YAO W Q, ZHANG Y S, HUANG B, et al. Pulse-assisted test system design based on FPGA [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2018, 37(2): 112-115.
- [12] 王向阳, 于新霞, 何洪涛. 两种远场测试场天线方向图测试分析[J]. 微波学报, 2012, 28(S3): 249-252.
WANG X Y, YU X X, HE H T. Antenna pattern measurement and analysis on two far-field test grounds [J]. Journal of Microwaves, 2012, 28(S3): 249-252.
- [13] 张申科, 邓遜林. 天线测试转台及支架系统对测试的影响分析[J]. 电信技术, 2016(8): 54-59.
ZHANG SH K, DENG Y L. The analysis of the effects of the antenna turntable and the support to testing [J]. Telecommunications Technology, 2016(8): 54-59.
- [14] 郑才特. 远场天线测试系统的研究与实现[J]. 中国新通信, 2017, 19(9): 85-86.
ZHENG C T. Research and realization of far-field antenna testing system [J]. China New Communication, 2017, 19(9): 85-86.
- [15] 刘辉. 某型雷达天线方向图在线测量方法与分析[J]. 电子测量技术, 2013, 36(6): 105-108, 116.
LIU H. Research on antenna pattern measurement on line of a certain radar [J]. Electronic Measurement Technology, 2013, 36(6): 105-108, 116.
- [16] 王玖珍, 薛正辉. 天线测量实用手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013.
WANG J ZH, XUE ZH H. Antenna Measurement Engineering Handbook [M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2013.

作者简介



田韵, 1993 年于空军工程大学获得学士学位, 1998 年于空军工程大学获得硕士学位, 现为中国人民解放军 95801 部队高级工程师, 主要研究方向为测试与故障诊断、智能化仪表应用。

E-mail: tianyun0326@sohu.com

Tian Yun received her B. Sc. degree from Engineering Institute of AF in 1993, M. Sc. degree from Engineering Institute of AF in 1998. Now she is a senior engineer of Unit 95801, PLA. Her main research interests include testing and fault diagnosis and applications of the intelligent instrument.



侯灿靖, 2002 年于空军工程大学获得学士学位, 2007 年于空军工程大学获得硕士学位, 现为中国人民解放军 95801 部队工程师, 研究方向为测试与故障诊断。

E-mail: hcj654321@126.com

Hou Canjing received his B. Sc. degree from Engineering Institute of AF in 2002, M. Sc. degree from Engineering Institute of AF in 2007. Now he is an engineer of Unit 95801, PLA. His main research interests include testing and fault diagnosis.



李爱琴, 2001 年于空军工程大学获得学士学位, 现为中国人民解放军 95801 部队工程师, 研究方向为智能化仪表应用。

E-mail: liaiqin0620@sina.com

Li Ai Qin received her B. Sc. degree from Engineering Institute of AF in 2001. Now she is an engineer of Unit 95801, PLA. Her main research interests include applications of the intelligent instrument.