

doi: 10.7690/bgzd.2018.12.010

基于移动式测试车的二次雷达天线外场测试方法

李红辉, 李宏伟, 夏 鸿

(四川九洲电器集团有限责任公司识别事业部, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为解决在二次雷达阵地或外场试验场等环境下, 天线不易转动或移动的二次雷达天线方向图测试困难的问题, 采用基于移动式测试车在行进中实施天线方向图测试的方法。分析常规天线远场测试原理, 详细阐述文中方法的测试原理、系统组成、流程及误差计算, 并在某外场试验场对实装天线方向图进行测试。结果表明: 该方法基本与暗室测试结果保持一致, 能解决上述受限外场环境下天线方向图测试问题。

关键词: 外场天线测试; 二次雷达天线; 天线方向图

中图分类号: TP206 **文献标志码:** A

Secondary Radar Antenna Test Method Based on Mobile Test Vehicle

Li Honghui, Li Hongwei, Xia Hong

(Identification Department, Sichuan Jiuzhou Electric Group Co., Ltd., Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to solve the problem that the antenna pattern of secondary radar is difficult to be measured when the antenna is not easy to rotate or move in an environment like the secondary radar position or the outfield test, a method of antenna radiation pattern test based on the mobile testing vehicle is adopted. This paper analyzes the principle of far-field test of conventional antenna, and elaborates the test principle, system composition, procedures and error calculation of the method in this paper, and the mounted antenna pattern is tested in the outfield. The results show that the method is basically consistent with the test results of the dark room, and can solve the problem of antenna pattern test in the confined external environment above.

Keywords: outfield antenna test; secondary radar antenna; antenna pattern

0 引言

二次雷达天线是实现询问信号的发射和应答信号接收的重要分系统。天线波瓣图对二次雷达性能有着直接的影响, 也是分析二次雷达天线及整体工作性能的重要参考依据^[1]。

二次雷达系统在阵地加装后, 受周围地理环境等影响, 天线方向图可能出现畸变, 影响天线性能, 需采用相应手段在外场阵地对天线波瓣图进行测试。受阵地起伏、有坡度等条件限制, 常规天线近场/远场测试方法已不适用, 特别是采用相控阵体制的二次雷达天线, 因天线不能转动或转动受限, 对其测试更加困难。基于此, 笔者提出在外场环境(如雷达阵地、装备试验场)对二次雷达平面阵列天线的发射和接收方向图(特别是天线不易转动和移动的平台)做快速测试、诊断, 帮助技术人员快速掌握天线性能和排查问题。

1 实现方法

本系统采用移动式测试车携带测试仪器, 沿垂直于被测天线法线方向的路径, 在行进间进行天线

方向图测试。与常规天线远场测试方法相比, 被测天线不需要转动, 不需要安置在测试转台上, 适合外场阵地环境下的方向图测试。

1.1 常规天线远场测试原理

天线远场测试是指在天线辐射的远场区域内, 直接获得天线的远场性能参数。

对于远场测试法, 假设待测天线最大截面尺寸为 D , 待测天线与辅助测试天线间距离为 r , 当 $r \geq (2D^2 / \lambda)$ (λ 为波长)^[2], 可近似为投射到待测天线上的电磁波是平面电磁波。在测试场地上, 待测天线在转台驱动下转动, 测试设备可测得待测天线的远场散射方向图, 如图 1 所示。

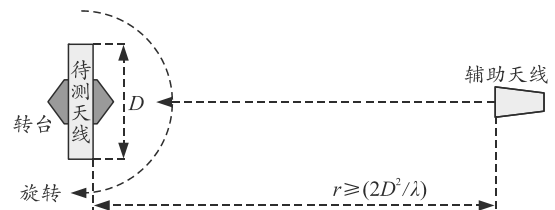


图 1 天线远场测试原理

采用常规远场测试, 待测天线需要由转台驱动

收稿日期: 2018-09-04; 修回日期: 2018-09-18

作者简介: 李红辉(1972—), 男, 四川人, 硕士, 高级工程师, 从事航空电子技术·二次雷达系统研究。

旋转，且对场地条件、设备架设都有很多要求。对于在雷达阵地等外场环境中，天线不便于移动和旋转的二次雷达天线方向图测试需求而言，常规远场测试难以适用。

1.2 系统测试原理

针对外场环境中天线不便于移动和旋转等限制条件，本测试方法不需要搬移被测天线，也不需要将被测天线安置在测试转台上。在被测天线固定不动的情况下，通过移动式测试车携带测试设备，沿着一定的直线路径实现天线方向图测试。

如图 2 所示，待测天线固定在 O 点，测试车距离待测天线距离满足远场测试条件，测试车携带测试设备沿着与待测天线法线垂直的方向，在满足远场测试条件的 AC 点之间移动并实施测试。在移动过程中，通过差分 GPS 实时获取被测天线与测试车上辅助天线间距离、相对角度等信息，同时测试软件实时修正路径差带来的幅度测试误差。在 AC 间移动完成后，可测出待测天线的幅度方向图、波束宽度等参数。

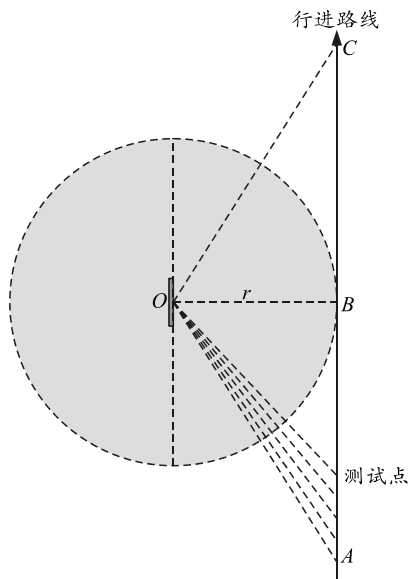


图 2 测试系统基本原理

其中： O 为被测天线中心所在位置； OB 为天线的法线方向， OB 的大小应满足天线远场测量条件。

测量过程将所有实际测试点的功率经计算后等效到以 O 为圆点， OB 为半径的圆上，得不同角度下的功率，最终得到增益方向图。

在直线 AC 的测量过程中，辅助天线理想情况下的移动轨迹，测试过程中，通过差分 GPS 实时测得的收发天线的距离等信息，系统软件完成路径差异带来的幅度测试误差修正。

1.3 系统组成

如图 3 所示，系统组成包括定位和跟踪、辅助天线伺服、场站数据通信、射频收发测量、主控分析软件以及载车。

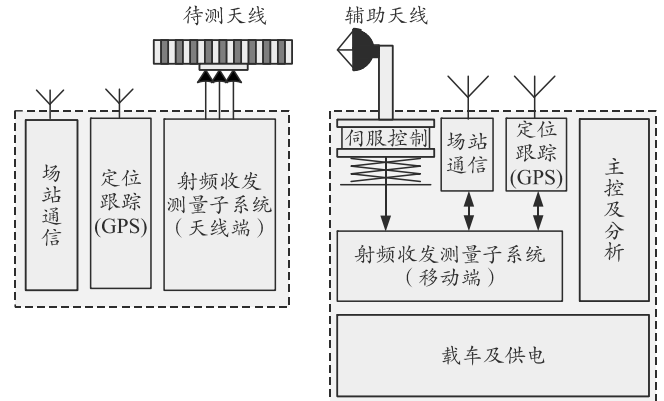


图 3 测试系统组成

1) 定位和跟踪子系统。

用于定位和测量辅助天线和被测天线间的相对位置，为主控计算机提供定位信息输入。

2) 辅助天线伺服子系统。

为辅助天线提供支撑、水平位置调整、水平方位角调整和极化方向控制等。该系统主要由水平升降台、水平转台、极化方向转台和必要的机械装置组成。

3) 场站数据通信子系统。

为各个子系统之间的控制和数据回读提供通信支撑，便于主控计算机对各路信息的获取和分析，实现各子系统间有序控制和误差修正等。

4) 射频收发测量子系统。

主要实现测试信号的生成发射，以及对天线各通道射频信号的接收和幅度的提取，包括信号源、射频信号测量分析设备。

5) 主控及分析软件。

是该系统正常工作的核心，其作用包括各个部分的通信功能、测量参数计算、各子系统的控制以及测量数据的记录和后处理等。

6) 载车子系统。

主要负责整个系统的承载、供电和机动等功能，以轻型卡车为基础，配以发电机和配电系统，再加上设备安装和移动相关的必要装置。

1.4 二次雷达天线测试流程

针对常规机扫平台(天线可以连续转动)，采用类似天线远场测试的方法进行测试，文中不再详述。笔者主要针对部署在雷达站、试验场等有场地条件

限制的相控阵天线(难以转动)的天线方向图测试。

1.4.1 发射特性测试流程

二次雷达天线发射特性测试流程如图 4 所示。

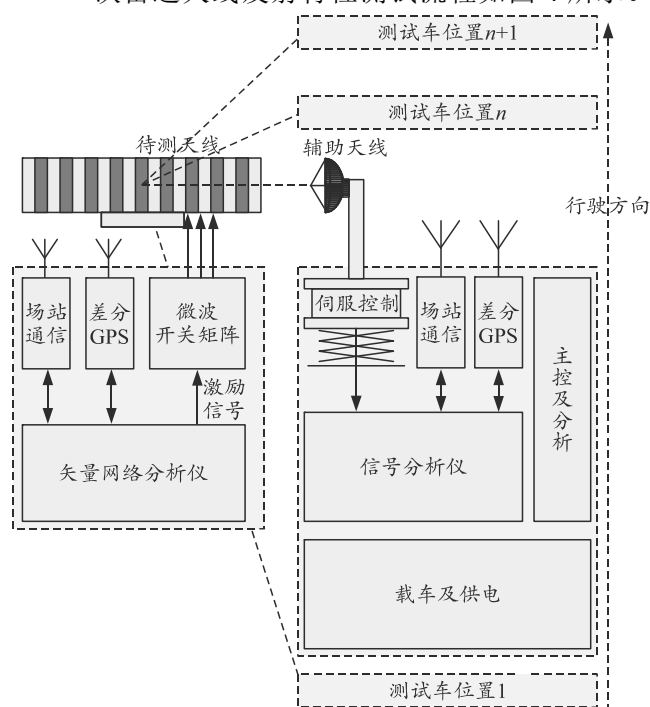


图 4 相控阵天线发射特性测试

1) 完成测试仪器的准备,测试车测试路径规划完毕;

2) 通过差分 GPS 确定被测天线和辅助天线的初始位置角度信息,并控制调节辅助天线伺服机构,使得被测天线与辅助接收天线对准;

3) 利用矢网提供激励信号,车载系统按照规划好的路线沿垂直被测天线法线方向直线运动,每隔固定距离利用信号分析仪采集幅度信息;

4) 由于载车运动轨迹非理想直线,指向随动机构实时调整辅助接收天线,保证测试全程与被测天线对准,并实时采集天线间的距离,根据路径差修正幅度测试误差;

5) 在运动中对多个测试点完成数据采集,最后通过软件处理与误差修正,输出被测天线发射状态天线方向图数据。

1.4.2 接收特性测试流程

接收特性测试原理和测试步骤与发射特性测试基本相同,只是激励信号的收发正好相反。如图 5 所示,在接收特性测试中,利用信号源提供激励信号,由辅助天线发射出去,将被测天线各端口连接至矢网设备,对被测天线各个通道幅度信息进行采集。

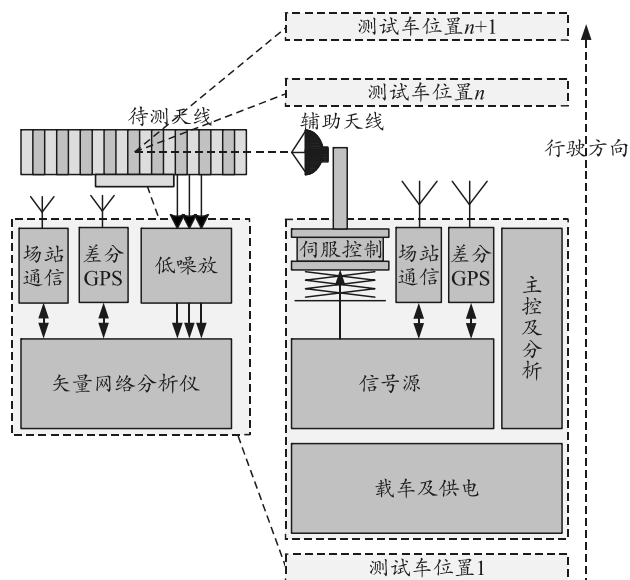


图 5 相控阵天线接收特性测试

1.5 误差计算

1.5.1 距离归一化补偿

天线测试过程中,理论上测试车应沿垂直被测天线法线的方向直线行进,并在行进间进行测试。这与常规远场测试方法不同。

常规远场测试中,被测天线固定架设在测试转台上,测试设备与被测天线间距离保持不变。而系统中,测试车在行进过程中,测试距离动态变化,同时测试场地道路情况也会造成距离变化。

测试车在行进过程中采集的辐射强度数据还需归一化处理,归一到以被测天线为圆心的同心圆上,如图 6 所示。

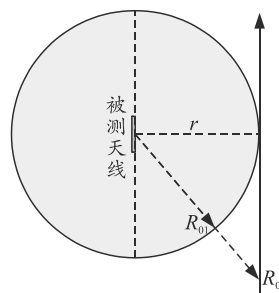


图 6 距离补偿原理

假设天线对正位置距离为 R_0 ,接收信号幅度为 P_{r0} ;假设 R_0 投影在同心圆上的距离为 R_{01} ,信号幅度为 P_{r01} 。根据二次雷达方程^[3]计算:

$$P_r = P_t G_t \times \frac{1}{4\pi R^2} \times A_e \quad (1)$$

根据天线孔径与增益间关系^[3]可得

$$A_e = \frac{G_t \lambda^2}{4\pi} \quad (2)$$

其中 λ 为电磁波波长, 其他含义和雷达方程参数相同, 经代入可得

$$P_r = P_t G_t G_r \times \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2. \quad (3)$$

令 $k = P_t G_t G_r \times \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2$, 并对式(3)取分贝:

$$P_r (\text{dB}) = 10\lg k - 20\lg R. \quad (4)$$

距离归一化补偿即为补偿 P_{r01} 与 P_{r0} 间的差值。

$$C = P_{r01} (\text{dB}) - P_{r0} (\text{dB}) = 20\lg \frac{R_0}{R_{01}}. \quad (5)$$

在天线测试数据处理中, 按照式(5)进行距离归一化补偿。

1.5.2 被测天线与辅助天线间距离计算

将两点的纬度、经度、高度 (B, L, H) 转换为大地直角坐标系(笛卡尔坐标系), 再计算 3 维空间两点距离。

$$x = (N + H) \cos B \cos L; \quad (6)$$

$$y = (N + H) \cos B \sin L; \quad (7)$$

$$z = \left(N(1 - e^2) + H\right) \sin B. \quad (8)$$

式中: $N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}$; e 为椭球的第一偏心率(离心率), e^2 为 0.006 694 38; a 为地球赤道半径, 637 813 7 m(WGS84)。

3 维空间两点距离计算:

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}. \quad (9)$$

1.5.3 测量角度计算

计算测试车在行进间测试方向图时, 测试车辅助天线相对被测天线法线的角度。

方位换算原理: 依据被测天线和测试车两点的经纬度, 计算测试车辅助天线相对被测天线的方位, 需经过 2 次旋转和 1 次平移完成。

已知两点的经纬度坐标, 先转换为大地直角坐标, 再计算两点的相对矢量(以被测天线为基点, 目标 x 、 y 、 z 位置减去基点), 再依据当前的经纬高转换为北、西、天坐标系(以被测天线为中心的北西天坐标系)^[4]。

(B_1, L_1, H_1) 与 (B_2, L_2, H_2) 对应的大地直角坐标系为: (x_1, y_1, z_1) 与 (x_2, y_2, z_2) 。1 为被测天线位置。两点的相对矢量:

$$\Delta \mathbf{x} = x_2 - x_1; \quad (10)$$

$$\Delta \mathbf{y} = y_2 - y_1; \quad (11)$$

$$\Delta \mathbf{z} = z_2 - z_1. \quad (12)$$

矢量转换为以被测天线法线的北、西、天 (N, W, U) , 如图 7 所示。

$$N = -\Delta x \sin B \cos L - \Delta y \sin B \sin L + \Delta z \cos B; \quad (13)$$

$$W = \Delta x \sin L - \Delta y \cos L; \quad (14)$$

$$U = \Delta x \cos B \cos L + \Delta y \cos B \sin L + \Delta z \sin B. \quad (15)$$

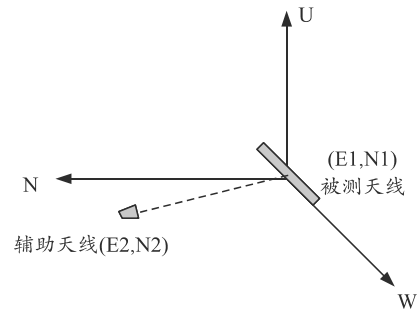


图 7 大地坐标系与经纬度坐标系关系

依据北西天坐标计算目标位置的方位:

$$A = \arctg\left(\frac{W}{N}\right). \quad (16)$$

1.5.4 场地适应性分析

理想情况下, 本系统应在完全水平的场地工作。但实际场地的路面存在起伏、水平倾斜等情况, 会影响测试系统与被测天线对准状态, 最终影响测试结果^[5]。

为简化分析, 假设被测天线和辅助天线等高, 即 α 为 0° , 相距距离为 b 。由于实际场地存在水平倾斜角度 γ 的情况, 辅助天线实际高度和理想情况下的垂直距离 Δh 会引入 ε 的角度对准误差, 如图 8 所示。

角度对准误差为:

$$\varepsilon = \arctan(\Delta h / b). \quad (17)$$

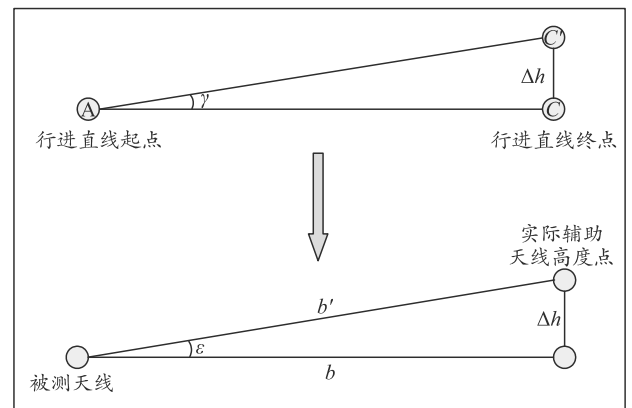


图 8 场地倾斜度 γ 对测量影响

4 结论

笔者同时考虑了无人机定位不确定性和作图完整性,提出了一种基于最优控制的主动 SLAM 算法,并使用简化的无人机平面模型进行验证。与随机 SLAM 算法的仿真结果相比,该算法在定位精度和搜索速度方面都得到了较好的结果。

参考文献:

[1] NEWMAN P M. On the structure and solution of the simultaneous localization and map building problem[D]. Australian: University of Sydney, 1999.

[2] 姜超, 宋科璞, 周海军. 基于 L1 自适应方法的尾坐式无人机控制律设计[J]. 兵工自动化, 2017, 36(8): 14-19.

[3] 张恒, 樊晓平. 移动机器人同步定位与地图构建过程中的轨迹规划研究[J]. 机器人, 2006, 28(3): 285-290.

[4] FEDER H, LEONARD J, SMITH C. Adaptive mobile robot navigation and mapping[J]. International Journal of Robotics Research, 1999, 18(7): 650-668.

[5] LIU Y, SUN F. A solution to active simultaneous localization and mapping problem based on optimal control[C]. Proceeding of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Harbin, China, 2007: 314-319.

[6] 苑晶. 未知环境中移动机器人主动同时定位与地图构建技术研究[D]. 天津: 南开大学, 2007.

[7] 曲鹏, 周应旺, 崔雷. 小型无人机发动机控制系统 CAN 总线通信技术[J]. 兵工自动化, 2017, 36(8): 57-61.

(上接第 42 页)

为了符合实际使用需求,抵消由于场地倾斜度的影响,需要对辅助天线伺服系统的垂直升降装置提出实时控制的要求,即在测试过程中,根据辅助天线实际的垂直距离变化,改变垂直升降装置的状态,通过车载跟踪稳定平台中的升降装置调节高度,通过惯导系统测得的数据调节转台的方位、高度、俯仰,从而使辅助天线和被测天线恢复对准状态,然后再重新测试。

2 试验结果与分析

在某外场试验场,对实装天线方向图进行测试,其测试效果如图 9^[6]所示,测试结果主要反映了阵地及试验场地环境影响下的天线方向图效果。

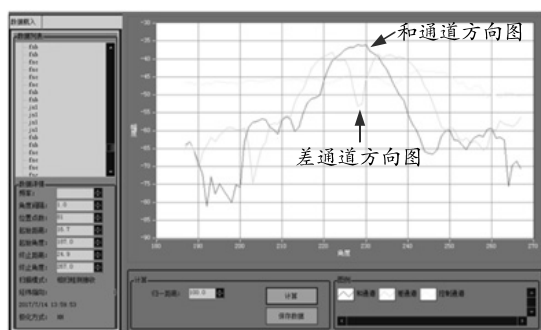


图 9 测试系统对外场天线测试效果

3 结论

经验证,采用测试车垂直天线法线方向直线行驶并实施数据采集和方向图计算的方法实现方向图测试,其测试结果基本与暗室测试结果保持一致,解决了天线方向图测试受外场环境,以及天线不易转动或移动限制的问题。

该测试系统通过对二次雷达天线方向图的测试,主要目的是天线性能外场快速测试和检测,为装备外场排故、维护保障提供支撑。

参考文献:

[1] 郝永刚, 李家杰, 谢来阳. 航管二次雷达天线波瓣测量的探讨[J]. 空中交通管理, 2007(4): 12-17.

[2] 窦晓杰, 程乃平, 倪淑燕. 相控阵天线远场测试场测量方法[J]. 现代电子技术, 2013(9): 54-56.

[3] 陈宵. 外场天线测试系统的数据处理及软件设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2016: 35-37.

[4] 刘明忠, 高留洋, 苗振坤. 机载遥测系统发射天线辐射规律研究[J]. 兵工自动化, 2017, 36(8): 72-76.

[5] 张培忠, 郑建福, 苏伟丽, 等. 机载预警雷达转台的疲劳寿命相似物理模型设计[J]. 兵器装备工程学报, 2017(5): 10-13.

[6] 许刘林, 沈新民, 周建钊, 等. 基于单线激光雷达数据拼接的地面环境感知技术[J]. 兵工自动化, 2017, 36(9): 17-22.