

电大尺寸平面数字相控阵外场通道校准测试方法

刘首岚¹, 朱忠福², 陈 剑¹, 赵 波¹, 赵 强¹

(1 北京遥测技术研究所 北京 100076;

2 中国人民解放军 95875 部队 酒泉 735018)

摘要: 电大尺寸平面数字相控阵通道校准测试对暗室规模和质量要求极高, 扫描架探针移动速度受限导致通道校准的暗室测试时间长达数小时, 且长时间测试引起的温度变化会造成通道相位漂移从而导致测试结果不准确。针对存在的问题, 提出了一种外场通道校准测试方法, 整个阵面中所有通道单次校准测试仅需几分钟, 可有效解决由于长时间测试引起的温度变化进而造成的通道相位漂移问题, 并通过引入基准通道来解决外场通道校准测试中存在的收发不同源问题。测试方法可有效缩短电大尺寸平面数字相控阵的通道校准时间, 提高测试准确性, 降低天线测试过程中的时间成本和暗室硬件建造成本。最后, 通过某 Ka 频段电大尺寸平面数字相控阵测控系统的外场测试, 验证了方法的可行性和正确性。

关键词: 电大尺寸; 相控阵; 通道校准; 外场测试

中图分类号: TN821+.8; TN98 文献标志码: A 文章编号: 2095-1000(2023)05-0035-06

DOI: 10.12347/j.ycyk.20230525001

引用格式: 刘首岚, 朱忠福, 陈剑, 等. 电大尺寸平面数字相控阵外场通道校准测试方法[J]. 遥测遥控, 2023, 44(5): 35-40.

A testing method of channel calibration for electrically large planar digital phased array in outdoor

LIU Shoulun¹, ZHU Zhongfu², CHEN Jian¹, ZHAO Bo¹, ZHAO Qiang¹

(1. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China;

2. 95875 Command of the People's Liberation Army, Jiuquan 735018, China)

Abstract: Channel calibration testing of electrically large planar digital phased array has extremely high requirements for the scale and quality of the microwave anechoic chamber. The limited speed of the scanning probe results in channel calibration tests conducted in microwave anechoic chamber lasting several hours. Further more, the temperature changes caused by prolonged testing can cause channel phased drift, leading to accurate test results. In response to the existing problems, this paper proposed an outdoor channel calibration testing method, and single calibration of all channels in the entire array only takes a few minutes, which can effectively solve the problem of channel phased drift caused by temperature changes caused by prolonged testing. By introducing a reference channel, the problem of receiving and transmitting difference in sources in outdoor calibration testing can be solved. This method not only effectively shortens the channel calibration time of electrically large planar digital phased arrays and improve the accuracy in test, but also reduces the time cost and microwave anechoic chamber hardware construction cost in the testing process. Finally, the feasibility and correctness of this method were verified through the Field test results of an electrically large planar digital phased array measurement and control system in Ka-band.

Keywords: Electrically large size; Phased array; Channel calibration; Field test

Citation: LIU Shoulun, ZHU Zhongfu, CHEN Jian, et al. A testing method of channel calibration for electrically large planar digital phased array in outdoor[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(5): 35-40.

引言

相控阵天线具有波束扫描速度快、波束多、可靠性高等特点^[1-6]。近年来,随着相控阵天线的迅速发展,测控系统对电大尺寸数字相控阵的需求越来越多^[7,8]。由于相控阵天线系统相对复杂,传统的暗室调试环节使得系统从装配到调试完成的交付周期很长。如何可靠地缩短调试测试时间是亟待解决的问题。文献[9]提出了一种用于小型相控阵天线快速测量的方法;文献[10]介绍了一种针对近场暗室测试的多频点多波束的自动化测试系统;文献[11]提出了一种天线阵面中场、近场自动测试的高效联试方法;文献[12]介绍了数字化相控阵的远场测试方法;文献[13]介绍了一种有源相控阵天线近场测试的调试优化方法;文献[14]至文献[18]介绍了相控阵天线的自动化测试方法。上述测试方法均受暗室测试环境的局限性影响。文献[19]至文献[21]介绍了在外场中利用无人机对天线进行测试的方法,但此方法并不适用相控阵天线的通道校准。文献[22]中介绍了相控阵天线 T/R 组件幅相在外场的测试方法,但该方法限制了中场的测试距离,没有详细介绍配合测试的喇叭天线如何放置,并且没有给出当测试距离较远无法保证测试系统收发信号同源时的解决办法。

针对电大尺寸平面数字相控阵,本文提出了一种外场通道校准测试方法,该方法利用上位机快速控制天线单元射频链路通道开关,使天线所有单元通道在短时间内完成远场信标机微波信号的接收,解决了外场测试时收发信号不同源的问题。该方法具有单次通道校准时间短、可靠性高、成本低的特点。

1 天线空间场划分

天线空间的场区分为感应近区和辐射场区域。辐射场区又分为菲涅尔近场辐射区(Fresnel 区)和夫琅禾费远场辐射区(Fraunhofer 区)。实际上各个区域之间的边界并不是突变的。

在感应近区中,区域内的每个对象实际上都是天线的一部分,都会影响其周围的场。但是辐射场区域中的每个物体都不影响天线周围的场。

图 1 所示为天线场的划分示意图,夫琅禾费远场辐射区的范围是:

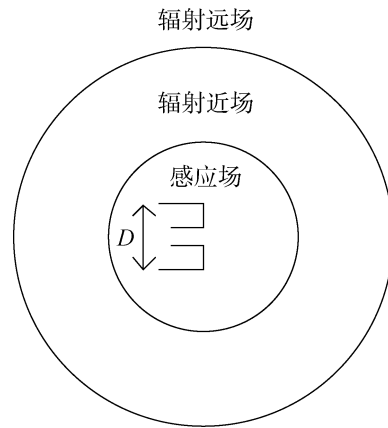


图 1 天线场的划分示意图

Fig. 1 The sketch map of antenna field division

$$\frac{2 \cdot D^2}{\lambda} \leq r \leq \infty \tag{1}$$

式中, D 为天线的口径, λ 为天线工作波长。夫琅禾费远场辐射区是天线实际使用的区域。在此区域,场的幅度与离开天线的距离成反比。场的角分布(天线方向图)与离开天线的距离无关,天线方向图的主瓣、副瓣和零点都已形成。

菲涅尔近场辐射区的范围是:

$$0.62 \cdot \left(\frac{D^3}{\lambda}\right)^{0.5} \leq r \leq \frac{2 \cdot D^2}{\lambda} \tag{2}$$

菲涅尔近场辐射区的差异会极大地影响天线的辐射场方向图的形状,进而影响其方向性。此时天线辐射场方向图取决于离天线的距离。

在感应场区域中,场分布与辐射源的关系更大,甚至无法识别最终的辐射图形状;在辐射近场辐射方向图的形状开始分化;在辐射远场区域边界之后,辐射方向图随距离几乎不变,且与无限远处的辐射方向图非常相似。

天线平面近场测试是用一个特性已知的探头在距离待测天线几个波长(3~10 λ)的某一平面上进行扫描,测量天线在该平面离散点的幅度与相位分布,近场与远场是傅里叶变换的关系,通过严格的数学变换确定被测天线的远场区辐射特性进而确定天线的远场方向图。

远场测试需要满足最小测试距离,当仅知道被测天线口径尺寸为 D 时,最小测试距离为:

$$r_{\min} = \frac{2 \cdot D^2}{\lambda} \tag{3}$$

为保证远场测试精度,需要满足横向幅度测试条件,即被测天线口径边缘处入射场的幅度相

对中心不得低于某个值，这样就要求被测天线口径对发射天线中心张角应远小于发射波瓣宽度。

2 电大尺寸平面数字相控阵在暗室中的通道校准

常规相控阵通道校准一般在微波暗室中进行。测试系统通过读取单元坐标文件来控制扫描架移动位置，同时上位机通过读取对应的开关文件来控制单元通道射频链路的开或者关。对于电大尺寸平面数字相控阵，暗室中的测试有诸多缺点及不便。

2.1 耗时长且相位温漂不可控

受扫描架探针移动速度的制约，综合考虑探针移动的过程以及采集数据停留的时间，平均单通道测试所需时间约为8 s。以某电大尺寸平面数字相控阵测控系统为例，该相控阵测控系统的阵面单元通道数约为3 700个(单流工作时)，完成整个阵面中所有通道的幅度相位数据采集工作所需时间约为8.25 h，若系统双流工作，则通道校准时间增加一倍。由此看来，电大尺寸相控阵暗室通道校准所需的工作时间长，很大程度上制约了电大尺寸数字相控阵天线系统的测试速度。

同时，测试时间跨度长会导致天线阵面各个子阵在不同时刻由于温度不同而产生相位漂移的现象，所需的补偿机制十分复杂，相位漂移无法准确量化，因此影响通道相位数据测试结果的准确性。

2.2 调平操作难且误差大

常规电尺寸平面阵会通过三坐标标定将阵面法向与扫描架探针轴向之间的角度误差控制在 0.01° 之内。而对于电大尺寸平面阵，由于阵面尺寸过大，其机械安装面与棱镜的距离超出常规三坐标标定试验台探针所能移动的范围。若将天线的伺服系统搬入暗室，则对暗室的尺寸要求增大，测试成本升高。人工调平电大尺寸平面阵的操作十分复杂，且误差较大，会造成阵面电轴与阵面法向之间的偏差。

2.3 软件工作量大

在暗室中采用平面近场方法测试电大尺寸相控阵的方向图对接收机的动态需求比较大，在通道校准模式和任务模式之外，中心机软件需要根据近场测试模式流程进行二次编制才能实现方向图合成，电大尺寸阵面通道数量多导致软件工作量增加。

3 外场单通道幅度相位校准测试

3.1 外场校准流程

电大尺寸平面数字相控阵外场通道校准测试的主要流程如图2所示。首先对整个系统进行三轴标定，将天线系统的机械轴、光轴和电轴统一，将天线阵面水平调平；然后通过调整伺服系统的方位角和俯仰角，利用微光电视和望远镜将阵面的几何中心对准高处的信标机；信标机发射微波信号，系统上位机遍历所有通道采集幅度相位数据，信标机和天线在整个数据采集过程中无需移动；判断采集到的幅度数据是否处于合理区间，若过低或者饱和则调整信标机功放后重新采集阵面通道的幅相数据，直至幅度数据满足要求；最后将采集到的相位数据进行后处理，再进行波控码的计算与生成。

对于“通道遍历”以及“相位数据后处理”进行详细的解释与分析：平面数字相控阵在暗室中进行通道校准时，扫描架上探针的源发射信号

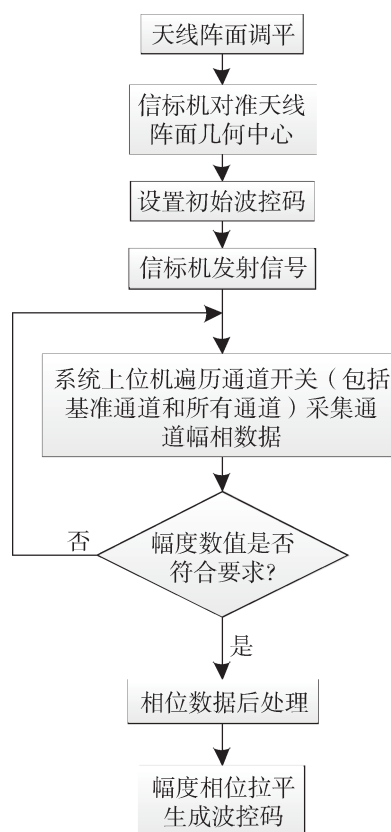


图2 外场通道校准主要流程

Fig. 2 Main process of channel calibration in outdoor

由系统中的数字波束合成(Digital Beam Forming, DBF)产生, 发出的源信号经由探针发送给不同的通道, 再经由阵面接收回来, 可实现信号收发同源。外场测试中相控阵系统接收到的信号与信标机发射的信号收发不同源, 这就会导致阵面通道信号相位采集的不稳定。

为了解决信号收发不同源带来的相位不稳定问题, 在测试时采用参考通道比较测试方法, 即在测试时选取某一路固定通道作为参考通道, 系统上位机在遍历所有通道(通道数为 N)的同时, 将该参考通道的幅相数据采集 N 次。每次同时采集参考通道与被测通道的幅度与相位。如图 3 所示, 设阵面通道数为 N , 则基准数据为 $[A_{01}P_{01}; A_{02}P_{02}; \dots; A_{0N}P_{0N}]$; 遍历数据为 $[A_1P_1; A_2P_2; \dots; A_NP_N]$; A_{0i} 、 P_{0i} 、 A_i 和 $P_i (i=1, 2, \dots, N)$ 均为同一时刻采集的数据。

相位后处理首先需要消除外场测试环境下信号收发不同源带来的相位影响, 将遍历通道的相位减去同一时刻基准通道的相位: $P_{1i}=P_i-P_{0i} (i=1, 2, \dots, N)$, P_{1i} 即为各个通道的绝对相位。

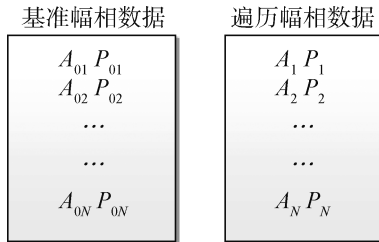


图 3 参考通道数据与遍历通道数据

Fig. 3 The data of reference channel and ergodic channel

得到绝对相位后, 需消除阵面不同通道间由于波程差所产生的相位延迟。图 4 所示为外场高处信标机与天线阵面之间的几何关系示意图, 信标机距离阵面几何中心的直线距离为 L_0 , 阵面上各个单元距离阵面几何中心的距离为 $L_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$, (x_i, y_i) 为阵面第 i 个单元在以阵面几何中心为原点的坐标系下的坐标。则每个通道的波程差为 $\Delta L_i = \sqrt{L_0^2 + L_i^2} - L_0 (i=1, 2, \dots, N)$, 由该波程差产生的相位延迟为 $\delta_i = 360^\circ/\lambda \times \Delta L_i (i=1, 2, \dots, N)$, 其中 λ 为工作波长。将相位后处理得到的通道相位值加上对应通道的相位延迟值即得到: $P_{2i} = P_{1i} + \delta_i (i=1, 2, \dots, N)$, 通过 P_{2i} 即可计算出相位的波控码。(注:

外场测试环境下 $L_0 \gg L_i (i=1, 2, \dots, N)$, 所以 ΔL_i 的数值接近于零, 对于低频段如 L、S 频段, 由于波程差带来的幅度相位差异可忽略不计。对于高频段如 Ka 频段, 由于波程差带来的幅度相位差异不可忽略。)

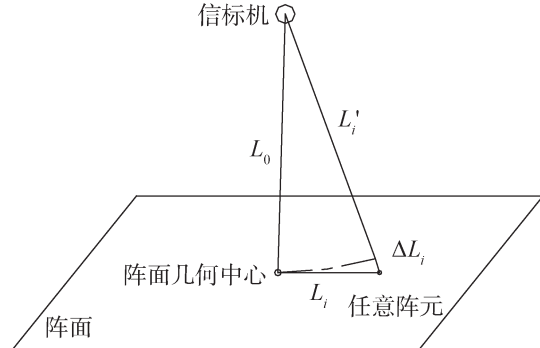


图 4 外场信标机与阵面之间的几何示意图

Fig. 4 The geometric schematic diagram between beacon and phased array in outdoor

3.2 外场通道校准的优点

3.2.1 测试时间短且相位温漂可控

外场通道校准测试时阵面和高处信标机均无需移动, 系统通过上位机来进行射频链路通道开关的快速控制, 经实际项目测试验证, 整个阵面所有通道单次校准测试仅需 2 min~3 min。耗时极短, 系统在短时间内的温度可认为不变, 可有效避免因温度变化引起的子阵模块间的相位漂移问题, 无需考虑复杂的补偿机制。

3.2.2 伺服控制调平精度高

相较于暗室空间大小的局限性, 外场测试由于不受场地大小的限制, 可以利用伺服系统来调整天线阵面的方位角和俯仰角, 伺服系统的精度为 0.001° , 配合使用微光电视和望远镜可保障高处信标机口面法向对准阵面的几何中心。

3.2.3 软件工作量无增加

外场远场方向图测试使用系统中已有的任务模式即可进行方向图测试。

4 可靠性分析

将通过外场通道校准计算得出的波控码进行加载, 某 Ka 频段电大尺寸平面数字相控阵外场整阵面测试所得方向图如图 5 和图 6 所示, 测试结果与仿真结果相当。利用公式(4), 采用相关系数进行判断, 可以计算出图 5 和图 6 中方向图的方位面和

俯仰面在测试范围内的相关系数分别为：0.900 3(方位面)、0.900 4(俯仰面)；证明了外场通道校准测试方法的可行性与准确性。

$$r(X, Y) = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sqrt{\text{Var}(X)\text{Var}(Y)}} \quad (4)$$

式中: X 代表仿真结果; Y 代表测试结果; $\text{Cov}(X, Y)$

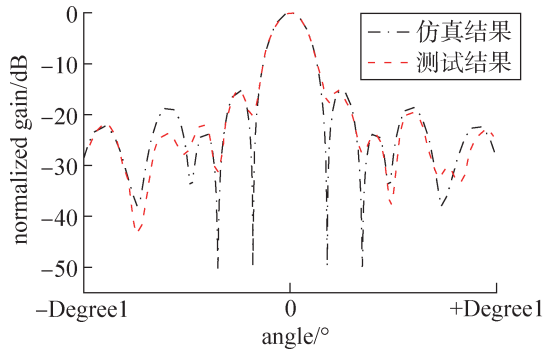


图 5 某电大尺寸平面数字相控阵方位面方向图
Fig. 5 The azimuth pattern of an electrically large planar digital phased array tested in outdoor

为 X 、 Y 的协方差; $\text{Var}(X)$ 为 X 的方差, $\text{Var}(Y)$ 为 Y 的方差。

表 1 总结了电大尺寸平面数字相控阵暗室通道校准与外场通道校准的对比。对于电大尺寸平面数字相控阵天线, 外场通道校准测试时间短, 伺服控制精度高, 且数据采集稳定。

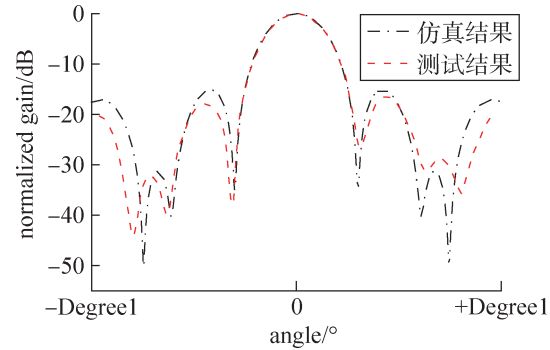


图 6 某电大尺寸平面数字相控阵俯仰面方向图
Fig. 6 The elevation pattern of an electrically large planar digital phased array tested in outdoor

表 1 电大尺寸平面数字相控阵暗室通道校准与外场通道校准对比

Table 1 Test results in dynamic scenarios

对比项	暗室通道校准	外场通道校准
整阵面单次通道测试时间	时间长约数小时	时间短约为 2 min~3 min
阵面控制精度	手动控制难度大误差大	伺服控制精度高
采集数据稳定性	收发同源,但是由于测试时间过长导致模块之间在不同时间由于温度不同而产生的相位漂移无法确定	参考通道可有效解决收发不同源的问题,单次测试时间短可避免温度变化产生的相位漂移

5 结束语

本文介绍了一种针对电大尺寸平面数字相控阵的外场通道校准测试方法。该方法可有效缩短电大尺寸平面数字相控阵的通道校准时间, 避免了因长时间测试引起的温度变化进而造成的通道相位漂移问题, 降低了天线测试过程中的时间成本和暗室硬件建造成本。通过在某 Ka 频段电大尺寸平面数字相控阵测控系统的外场测试, 验证了该方法的可行性和正确性, 对后续电大尺寸平面数字相控阵的测试具有重要的指导意义。

参考文献

[1] 王晓波, 王铁, 李铁, 等. 数字多波束相控阵天线在测控系统中的应用研究[J]. 遥测遥控, 2018, 39(1): 35-40.
WANG Xiaobo, WANG Tie, LI Tie, et al. Research on ap-

plication of digital multi-beam array antenna in aerospace TT&C system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2018, 39(1): 35-40.

[2] 翟江鹏, 尹继凯, 王金华, 等. 全空域数字多波束天线技术研究[J]. 遥测遥控, 2022, 43(2): 10-16.
ZHAI Jiangpeng, YIN Jikai, WANG Jinhua, et al. Research on hemispherical coverage digital multi-beam antenna[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(2): 10-16.

[3] 孟明霞, 史永康, 姜智楠, 等. 航天相控阵天线技术发展综述[C]//中国航天科技集团公司第九研究院科学技术委员会, 第三届航天电子战略研究论坛论文集(遥测遥控专刊), 2017: 47-51.

[4] 李中伟. 基于相控阵的全空域多目标测控天线分析[J]. 现代雷达, 2019, 41(12): 66-68.
LI Zhongwei. Analysis of whole airspace multi-target TT

- & C antenna based on phased array[J]. Modern Radar, 2019, 41(12): 66-68.
- [5] 俄广西, 柴霖, 刘云阁. 全空域多目标测控天线技术研究[J]. 电讯技术, 2015, 55(10): 1112-1117.
E Guangxi, CHAI Lin, LIU Yunge. Study on TT&C antenna for multi-target in hemispherical coverage[J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(10): 1112-1117.
- [6] 王鹏毅, 孔永飞, 吴海洲. 灵活的全空域同时多波束测控技术[J]. 飞行器测控学报. 2013, 32(1): 42-47.
WANG Pengyi, KONG Yongfei, WU Haizhou. Flexible hemispherical simultaneous multi-beam TT&C technology[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2013, 32(1): 42-47.
- [7] 邹伟. 测控与雷达天线跟踪方式现状研究及发展趋势[J]. 信息系统工程, 2016, (11): 116-120.
- [8] 陈帅, 杨宜康, 叶旅洋. 测控技术的发展现状与展望[J]. 计算机与网络, 2020, (14):70-73.
- [9] 丁若梁, 阎云涛, 陈金龙. 相控阵天线多波束自动测试系统设计[J]. 电子测量技术, 2020, 43(11): 148-152.
DING Ruoliang, YAN Yuntao, CHEN Jinlong. System design of multi-beam automatic test for phased array antenna[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(11): 148-152.
- [10] 乔兴旺, 陶成忠, 王春艳. 一种相控阵天线自动化测试系统设计[J]. 电子技术与软件工程, 2021, (12).
- [11] 程亮, 薛一凡, 周建华. 机载有源相控阵雷达天线自动化测试方法研究与实现[J]. 现代雷达, 2021, 43(4): 59-64.
CHENG Liang, XUE Yifan, ZHOU Jianhua. Study and implementation of automatic testing method for airborne active phased array radar antenna[J]. Modern Radar, 2021, 43(4): 59-64.
- [12] 吴文超, 钱阳, 贾守波, 等. 数字化相控阵天线远场测试系统设计[J]. 测控技术, 2021, 40(7): 19-23.
WU Wenchao, QIAN Yang, JIA Shoubo, et al. Far field test system for digital phased array antenna[J]. Measurement & Control Technology, 2021, 40(7): 19-23.
- [13] 方鑫. 有源相控阵天线近场测试方法研究[J]. 船舶电子对抗, 2018, 41(5): 108-110.
FANG Xin. Research into near field test method of active phased array antenna[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2018, 41(5): 108-110.
- [14] 李冰, 赖光霖, 任超群, 等. 相控阵天线自动化测试研究与实现[J]. 航天制造技术, 2017, 10(5): 59-63.
- [15] 郑楷, 耿江东, 杨士义, 等. 一种高效率相控阵天线自动测试系统[J]. 测控技术, 2015, 34: 357-360.
- [16] 钟洋, 卢刚, 王伟豪. 基于紧缩场暗室的相控阵天线快速测试系统设计研究[J]. 电子制作, 2022, 30(23): 87-90.
- [17] 邬家旺, 冉黎林. 有源相控阵天线远场测试系统设计[J]. 测控技术, 2022, 41(11): 65-70.
WU Jiawang, RAN Lilin. Active phased array antenna far field test system[J]. Measurement & Control Technology, 2022, 41(11): 65-70.
- [18] 崔雷, 安刚. 相控阵天线波束指向的近场测试方法[J]. 空间电子技术, 2014, 11(4): 23-26.
CUI Lei, AN Gang. A near-field measurement method for boresight of phased array antenna[J]. Space Electronic Technology, 2014, 11(4): 23-26.
- [19] 宋森杉, 罗志明, 王正鹏. 基于无人机的天线测量系统研究[J]. 遥测遥控, 2023, 44(1): 64-71.
SONG Miaoshan, LUO Zhiming, WANG Zhengpeng. Research on antenna measurement system based on UAV[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(1): 64-71.
- [20] 颜振, 刘伟, 唐静双, 等. 基于无人机的天线测试系统设计[J]. 微波学报, 2020, 36(S1): 376-379.
YAN Zhen, LIU Wei, TANG Jingshuang, et al. Design of antenna test system based on UAV[J]. Journal of Microwaves, 2020, 36(S1): 376-379.
- [21] 居鹏, 侯飞. 基于多旋翼无人机平台的天线远场测试系统设计[J]. 现代雷达, 2020, 42(10): 82-85, 90.
JU Peng, HOU Fei. Design of antenna far-field test system based on multi-rotor UAV platform[J]. Modern Radar, 2020, 42(10): 82-85, 90.
- [22] 武昕伟, 蒋一. 有源相控阵雷达 T/R 组件幅相外场检测系统[J]. 现代雷达, 2018, 40(9): 55-58.

[作者简介]

- 刘首岚 1994年生, 硕士, 工程师。
朱忠福 1978年生, 学士, 高级工程师。
陈剑 1979年生, 硕士, 研究员。
赵波 1982年生, 硕士, 研究员。
赵强 1985年生, 本科, 工程师。

(本文编辑: 杨秀丽)