

文章编号: 2095-4980(2025)01-0066-07

基于近场测量的数字相控阵校准系统

杨森浩¹, 王晓飞¹, 崔鑫铭², 李 焱¹

(1.北京航天长征飞行器研究所, 北京 100076; 2.北京市大数据中心, 北京 101117)

摘 要: 为解决数字相控阵不能利用传统的矢量网络分析仪进行校准的难题, 提出一种基于近场测量的数字相控阵校准系统。通过矢量网络分析仪外加混频器和信号源提供变本振的方法, 设计了发射态和接收态下的数字相控阵天线校准系统架构, 实现了数字相控阵采用矢量网络分析仪的同频率网络参数测量; 通过设计时序分配单元, 实现了多频点数字相控阵的自动化测试, 大大缩短了测量时间。经过实际测量, 顺利完成了 20 个天线单元的接收与发射幅相校准工作, 校准后的相位一致性能稳定保持在 $\pm 7^\circ$ 范围内。

关键词: 数字相控阵; 校准系统; 混频器; 近场测量

中图分类号: TN821^{+.8}

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024542

A digital phased array calibration system based on near-field measurement

YANG Senhao¹, WANG Xiaofei¹, CUI Xinming², LI Yao¹

(1.Beijing Institute of Long March Vehicle, Beijing 100076, China;

2.Beijing Big Data Center, Beijing 101117, China)

Abstract: To address the challenge that digital phased arrays cannot be calibrated using traditional vector network analyzers, a near-field measurement-based digital phased array calibration system is proposed. By employing a method of providing a local oscillator through a mixer and signal source in addition to the vector network analyzer, the architecture of the digital phased array antenna calibration system for both transmission and reception states has been designed, achieving the same frequency network parameter measurement of the digital phased array using the vector network analyzer. By designing a timing distribution unit, the automated testing of multi-frequency digital phased arrays has been realized, significantly reducing the measurement time. After actual measurement, the reception and transmission amplitude and phase calibration of 20 antenna units are successfully completed, and the phase consistency after calibration can be stably maintained within a range of $\pm 7^\circ$.

Keywords: digital phased arrays; calibration system; mixer; near-field measurement

随着电子技术和计算机技术的飞速发展, 相控阵技术逐渐实现了高度数字化和集成化。现代相控阵系统利用多种高度集成的半导体器件(如硅、氮化镓、砷化镓)构建发射/接收(T/R)组件, 这些模块能够灵活控制每个天线单元的相位和幅度, 实现波束的快速切换和精确控制。T/R 组件和变频组件的一体化设计成为当今相控阵技术发展的主流。

数字相控阵天线将当前的数字化技术用于相控阵天线中, 在天线阵列单元间通过数字化的方式产生和接收波束。数字相控阵对每个收发通道的信号进行数字化处理, 实现发射波形产生和接收信号处理的全数字化。其物理实现的基础基于直接数字合成(Directed Digital Synthesis, DDS)在数字域形成发射波形, 采用 AD 转换器将接收的模拟信号转化为数字信号进行数据处理。数字相控阵^[1]具有易于生成多波束和复杂波束的优点, 广泛用于卫星通信、雷达探测、无线电视等领域。相控阵天线性能的发 挥取决于控制器对各单元天线幅相的精确控制, 对于数字相控阵, 采用传统的矢量网络分析仪进行校准的方法存在困难, 已不能用于数字相控阵的校准。文献[2]提出了一种相控阵快速校准系统, 文章中介绍了其组成、工作流程以及进行相控阵通道间幅相信息校准补偿的方法。文献[3]通过外校准的方法对阵面进行校准测试, 实现了阵面自动化校准, 提高了阵面校准的效率和精确度。这些新型的校准方法均实现了具有上下变频模块的数字相控阵幅相校准。文献[4]介绍了相控阵天线测试技

术的原理、系统构架、多探头测试技术、开路短路和匹配负载(Open-Short-Match, OSM)校准方法。文献[5]利用一套校准源和相应的开关控制系统，对接收通道的幅度相位和功分网络幅度相位误差进行校准。这些校准方法实现了无变频模块的相控阵校准系统建立与分析。

本文提出一种基于近场测量的数字相控阵校准系统^[6-8]，使用外部混频器实现数字相控阵天线在变频模式下的接收和发射校准测试，最终实现了矢量网络分析仪的同频率网络参数测量。采用全自动化采样架测试并引入时序分配单元实现数字相控阵天线的多频点自动化测量，大大缩短了大型数字相控阵天线的校准测试时间。

1 校准原理

数字相控阵系统校准^[9]模型如图 1 所示。以 4 个发射通道和 4 个接收通道为例，每个天线单元连接 T/R 组件和变频组件，中频发射信号经过上变频传递到 T 组件放大器，经天线单元辐射到自由空间；自由空间的射频信号经天线单元接收，经过限幅器(Limiting Amplitude, LM)和低噪声放大器(Low Noise Amplifier, LNA)后经过下变频变为中频接收信号。在天线单元的近场区域使用近场探头对射频信号进行接收和发射，对 4 个天线单元不同状态下的幅度和相位进行采集，然后以第 1 个天线单元为基准，将其他 3 个天线单元的幅度和相位进行补偿，将补偿后的结果进行测量并进行对比，直至满足预期目标。

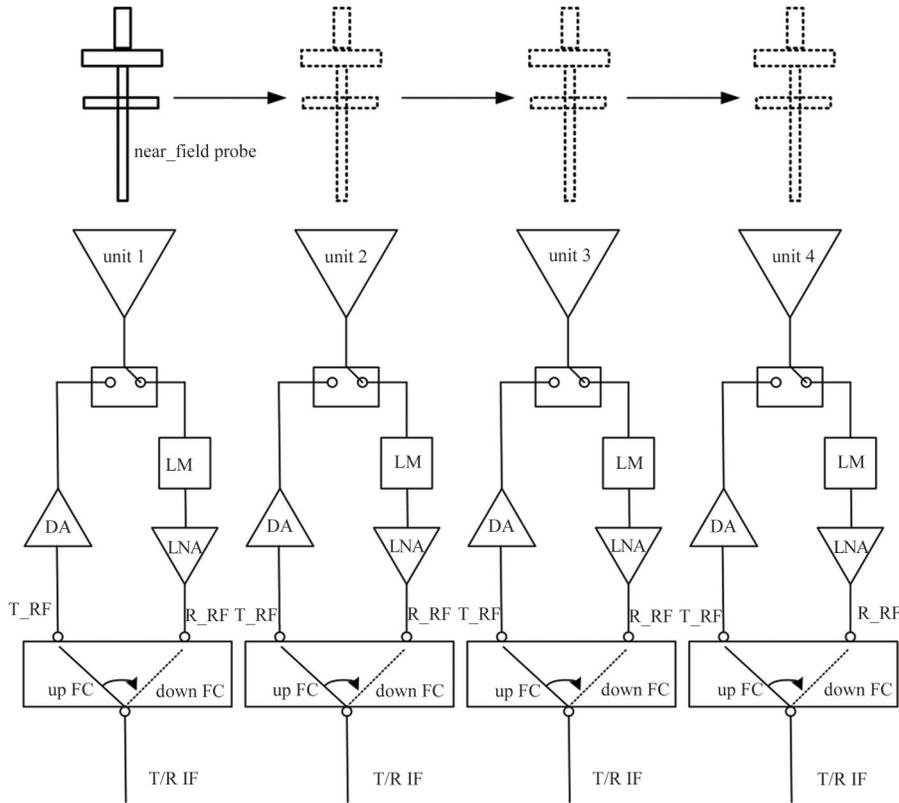


Fig.1 Calibration model for digital phased array system
图 1 数字相控阵系统校准模型

对于均匀线阵，为使天线波束指向在 θ_a (天线波束最大指向) 方向，各天线单元之间的相位差为：

$$\Delta\phi_a = \frac{2\pi}{\lambda} d \times \sin \theta_a \tag{1}$$

式中： d 为天线单元间距； λ 为对应测试频率的波长。

在此基础上，假定相控阵天线每个单元的方向图一致，为 $f_c(\theta)$ ，则直线阵天线的方向图函数 $F(\theta)$ 近似为：

$$F(\theta) = f_c(\theta) \times \sum_n a_n e^{j(n-1)\left(\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta - \Delta\phi_a\right)} \tag{2}$$

式中： θ 为方向图扫描角度； a_n 为阵列天线系统等效到第 n 个阵元中的幅度和相位误差分量； N 为阵列天线的阵元总数。

2 数字相控阵天线校准系统组成

基于近场测量的数字相控阵校准系统由 10 部分组成，分别为微波屏蔽暗室、近场采样架、近场采样控制台、相控阵天线转台、相控阵天线转台控制台、矢量网络分析仪、信号源、混频器、时序分配单元、测试软件，如图 2 所示。

微波屏蔽暗室必须满足相对封闭的电磁环境、良好的平面波传输条件及干净的环境条件等试验要求；近场采样架具备为近场探头提供移动和旋转能力，共 4 轴运动，分别为 X 轴、Y 轴、Z 轴、P 轴；近场采样架控制台控制采样架的移动，并提供测试工控机通过网口控制的用户数据报协议 (User Datagram Protocol, UDP)；相控阵天线转台具备为相控阵天线提供移动和任意空间角旋转能力，共三轴运动，分别为 Z 轴、方位轴、旋转轴；相控阵天线转台控制台控制相控阵天线转台的移动和旋转，并提供测试工控机通过网口控制的 UDP 通信协议；矢量网络分析仪具备 10 Hz ~40 GHz 的双端口网络参数测试能力和远程网口通信功能；信号源具备 9 kHz~40 GHz 的信号输出能力和远程网口通信功能；混频器将天线单元提供的射频信号和信号源提供的变本振信号合成中频信号；时序分配单元接收采样架和天线转台位置触发脉冲，然后对相控阵天线单元进行频率切换和矢量网络分析仪采集时序的分配，并提供测试工控机通过网口控制的 UDP 通信协议；测试工控机控制近场采样架、相控阵天线转台、矢量网络分析仪、信号源、时序分配单元，并完成数字相控阵的校准。

本系统采用时序分配单元实现多频率校准。多任务控制器接收采样架或相控阵天线转台的位置触发信号后，控制信号源、矢量网络分析仪进行频率切换，实现多频校准测量；同时控制矢量网络分析仪进行幅相采集，为相控阵同步采集提供同步时序控制。

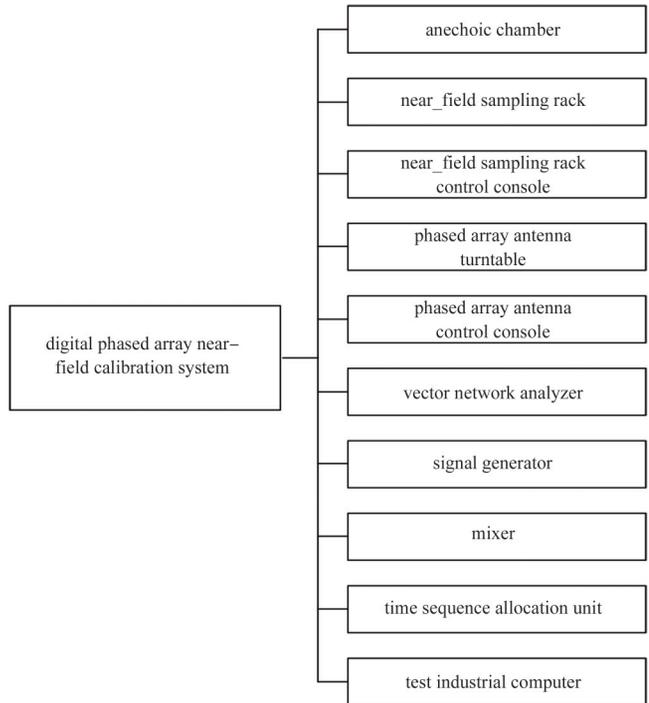


Fig.2 Composition of digital phased array near-field calibration system
图 2 数字相控阵近场校准系统组成

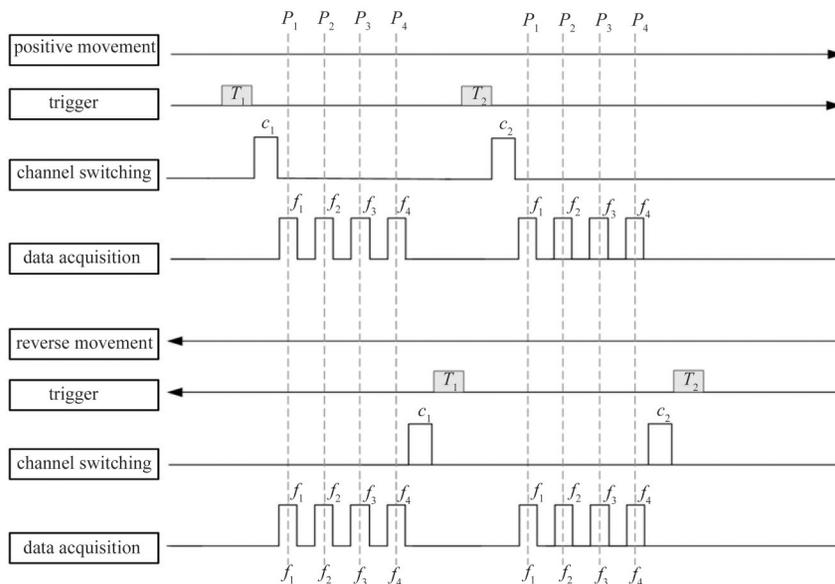


Fig.3 Schematic diagram of timing control
图 3 时序控制示意图

3 数字相控阵天线校准系统架构

为实现数字相控阵的接收和发射校准^[10]，本文提出数字相控阵发射状态和接收状态两种校准系统。发射态数字化相控阵校准系统框图如图 4 所示。测试工控机通过交换机控制天线转台控制台、近场采样架控制台、时序分配单元、矢量网络分析仪和信号源。测试过程中，将矢量网络分析仪、信号源与数字相控阵的同步时钟连接，进行时钟同步。发射态时，数字化相控阵接收由矢量网络分析仪提供的中频发射信号，经过数字相控阵内部的上变频模块变换至射频信号；然后经过 T/R 组件的功率放大器由天线单元辐射。近场探头在天线单元近场区域接收射频信号，由信号源提供的本振信号经过混频器下变频为中频信号，传输至矢量网络分析仪的接收端口进行传输参数测量。

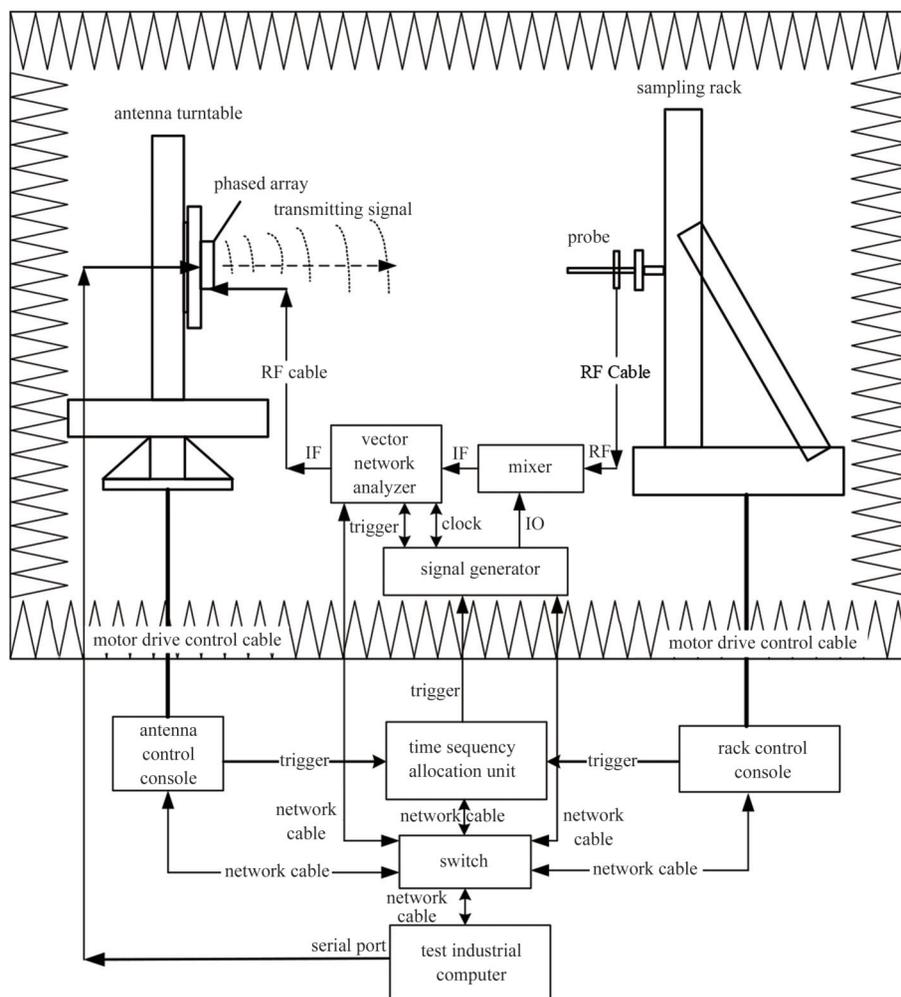


Fig.4 Digital phased array calibration system of transmission state
图 4 发射态数字化相控阵校准系统

以 20 个相控阵天线单元为例进行发射态相位校准。测量过程中由多任务控制器进行时序分配，一次性进行 5 个频点的校准，如图 5 所示。校准前各单元相位一致性在 0°~360°范围内波动，校准后相位一致性保持在±6°范围内。

接收态数字化相控阵校准系统框图如图 6 所示。接收时，矢量网络分析仪发射射频信号，经过近场探头将射频信号辐射至空间中；天线单元接收到射频信号后，经过 T/R 组件的低噪声放大器后传输至数字相控阵内部的下变频模块，变换至中频信号；信号源提供的本振信号经过混频器上变频为射频信号，传输到矢量网络分析仪的接收端口进行传输参数测量^[11]。

在多频点测试过程中，由信号源提供变本振信号，保证发射态时矢量网络分析仪的中频信号^[12]始终处于同频率；接收态时信号源提供变本振信号保证矢量网络分析仪的射频信号始终处于同频率。

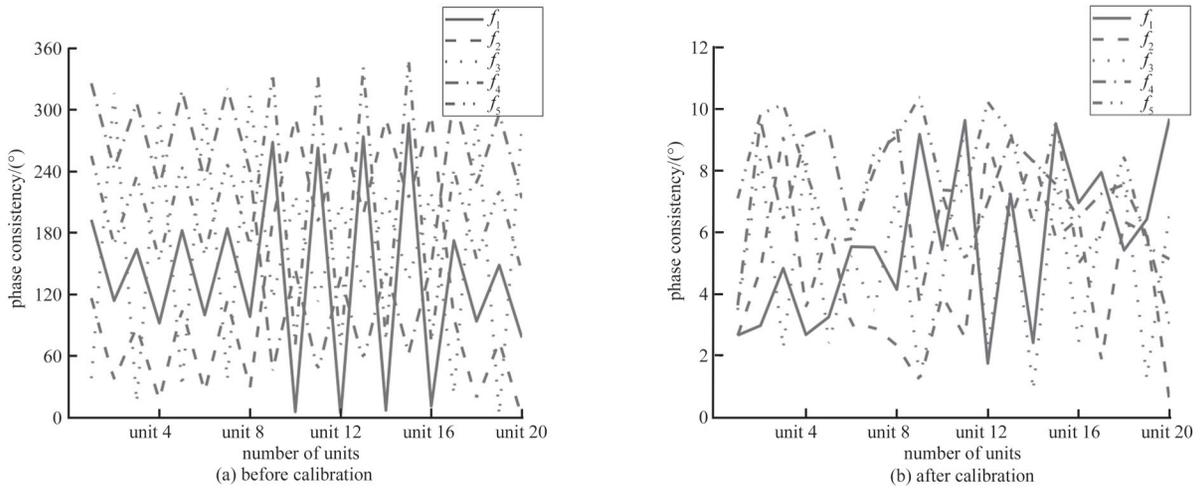


Fig.5 Multi-frequency phase calibration of transmission state
图5 发射态多频点相位校准

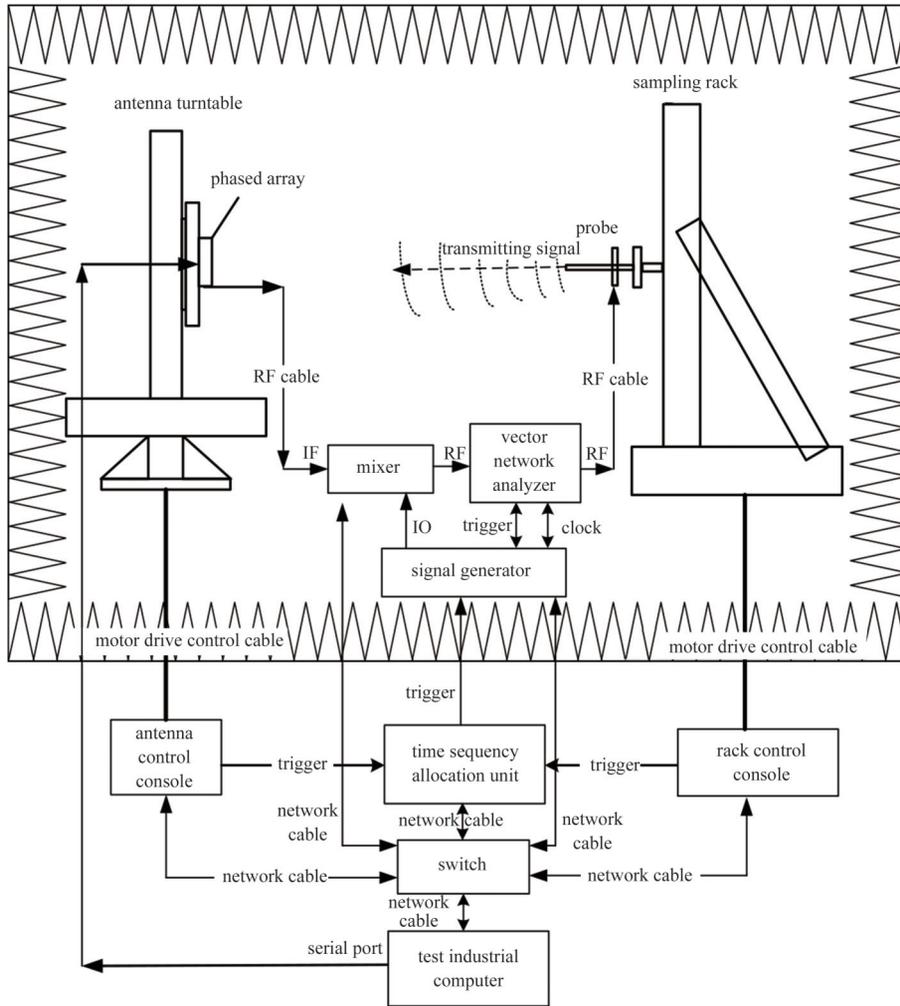


Fig.6 Digital phased array calibration system of receiving state
图6 接收态数字化相控阵校准系统

以 20 个相控阵天线单元为例进行接收态相位校准，测量过程中由多任务控制器进行时序分配，一次性进行 5 个频点的校准。校准前各单元相位一致性在 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 范围内波动，校准后相位一致性保持在 $\pm 7^{\circ}$ 范围内，如图 7 所示。校准前各单元幅度一致性在 $0\sim 6$ dB 范围内波动，校准后幅度一致性保持在 ± 0.7 dB 范围内，如图 8 所示。

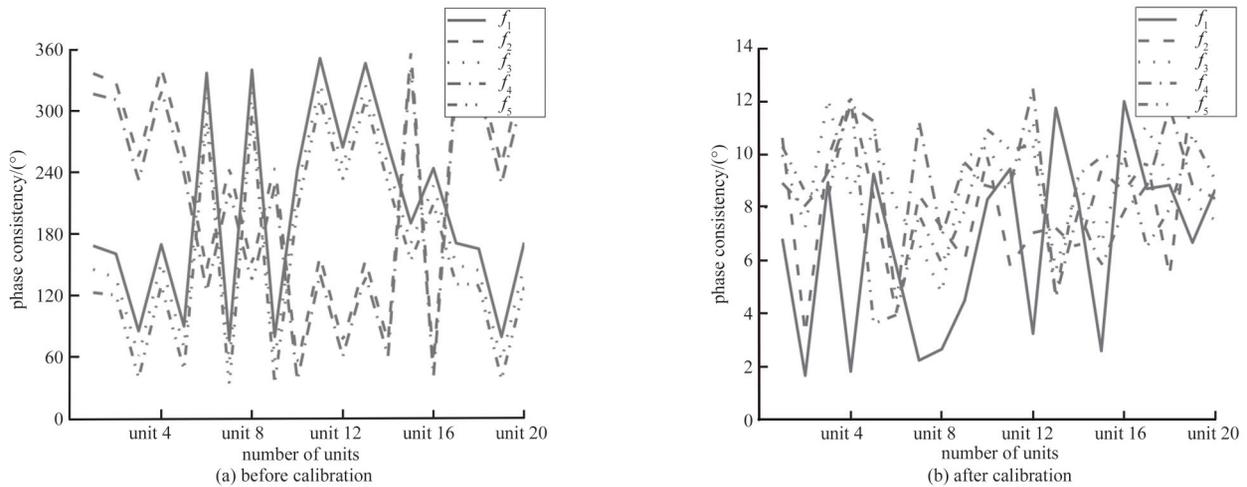


Fig.7 Multi-frequency phase calibration of receiving state
图 7 接收态多频点相位校准

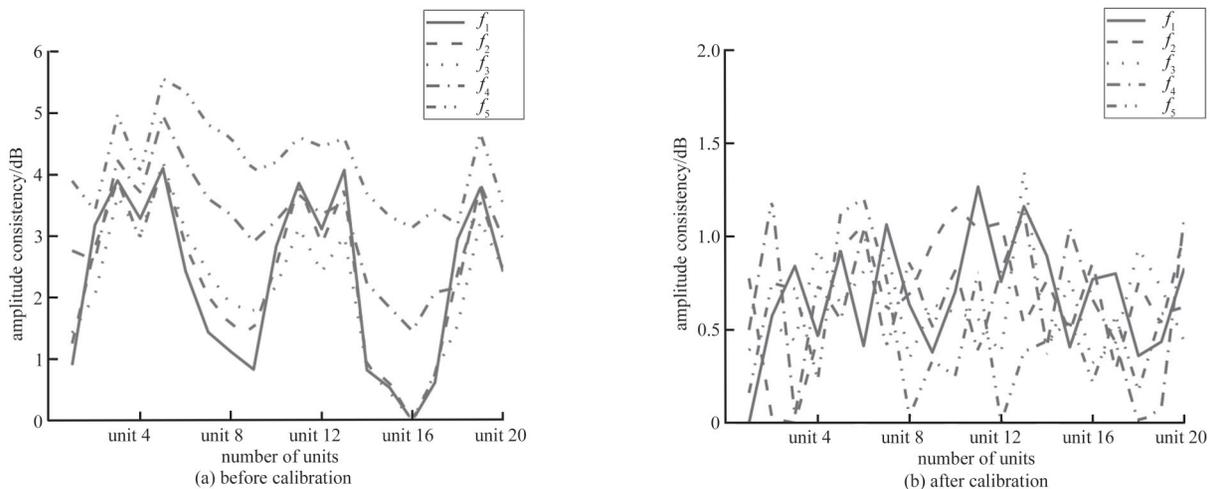


Fig.8 Multi-frequency amplitude calibration of receiving state
图 8 接收态多频点幅度校准

由于接收态同时进行幅度和相位一致性的校准，T/R 组件固有的调幅寄生移相和移相寄生调幅会使校准后的幅相一致性与发射态的精确度有些差距。

4 结论

本文使用信号源提供的变本振信号和外部混频器，实现数字相控阵天线在变频模式下的接收和发射校准测试，最终实现了矢量网络分析仪的同频率网络参数测量。采用全自动化采样架测试并引入时序分配单元实现数字相控阵天线的多频点自动化测量，大大缩短了大型数字相控阵天线的校准测试时间。未来相控阵天线测量技术将更加智能化和自适应，通过引入人工智能和机器学习等先进技术，可以实现对天线阵列性能的实时监测和自动调整，提高系统的稳定性和可靠性。

参考文献：

- [1] (美)Mailloux R J. 相控阵天线手册[M]. 北京:电子工业出版社, 2007. (MAILLOUX R J. Phased array antenna handbook[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2007.)
- [2] 黄蕾,王萍,周哲帅,等. 相控阵快速校准系统研究[J]. 电子科学技术, 2016,3(4):468-470. (HUANG Lei,WANG Ping,ZHOU Zheshuai,et al. Study on the fast calibration system for phased array antenna[J]. Electronic Science & Technology, 2016,3(4): 468-470.) doi:10.16453/j.issn. 2095-8595. 2016.04.024.
- [3] 代睿. 一种相控阵雷达阵面自动校准方法研究[J]. 现代导航, 2021,12(6):459-461,465. (DAI Rui. Automatic calibration method for phased array radar[J]. Modern Navigation, 2021,12(6):459-461,465.) doi:10.3969/j.issn.1674-7976.2021.06.015.

- [4] 方志鹏. 相控阵天线测试系统实时校准方法构架和分析[J]. 中国高新技术企业, 2016(17):79–81. (FANG Zhipeng. Architecture and analysis of real time calibration method for phased array antenna testing system[J]. China High-Tech Enterprises, 2016(17):79–81.) doi:10.13535/j.cnki.11-4406/n.2016.25.038.
- [5] 陈少林,吴昊. 一种相控阵接收通道的幅相校准方法[J]. 数字通信世界, 2018(8):93. (CHEN Shaolin,WU Hao. A method for amplitude and phase calibration of phased array receiving channels[J]. Digital Communication World, 2018(8):93.) doi:10.3969/J.ISSN.1672-7274.2018.08.071.
- [6] 尚军平. 相控阵天线快速测量与校准技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2010. (SHANG Junping. Study of fast measurement and calibration techniques for phased array antennas[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2010.) doi:10.7666/d.Y1707001.
- [7] 韩旭,于大群. 相控阵天线指向测量误差分析及消除方法研究[J]. 微波学报, 2023,39(2):52–57. (HAN Xu,YU Daqun. Analysis of the measurement errors of phased array antenna beam pointing and its elimination method[J]. Journal of Microwaves, 2023,39(2):52–57.) doi:10.14183/j.cnki.1005-6122.202302011.
- [8] 沈晓宇,张亮,曹旭,等. 一种互相关法测量相位噪声理论及仿真分析[J]. 宇航计测技术, 2022,42(3):60–67. (SHEN Xiaoyu,ZHANG Liang,CAO Xu, et al. Theory and simulation analysis of a cross-correlation method for measuring phase noise[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2022,42(3):60–67.) doi:10.12060/j.issn.1000-7202.2022.03.11.
- [9] 李闯,刘宇轩,沈晓宇,等. 宽带超低相位噪声测量系统设计与实现[J]. 微波学报, 2023,39(5):136–141. (LI Chuang,LIU Yuxuan,SHEN Xiaoyu,et al. Design and implementation of phase noise measurement system with wide test bandwidth and ultra-low noise bottom[J]. Journal of Microwaves, 2023,39(5):136–141.) doi:10.14183/j.cnki.1005-6122.202305017.
- [10] 杨磊,于大群,毛建军. 相频扫描阵列通道幅相测试方法研究[J]. 微波学报, 2022,38(2):80–85. (YANG Lei,YU Daqun,MAO Jianjun. Research on amplitude and phase testing method of the phase-frequency scanning array[J]. Journal of Microwaves, 2022,38(2):80–85.) doi:10.14183/j.cnki.1005-6122.202202017.
- [11] 高铁,王金元. 大型有源相控阵校准的MCM法及其误差分析[J]. 微波学报, 2002,18(1):6–10,19. (GAO Tie,WANG Jinyuan. MCM of large active phased array calibration and tolerance analysis[J]. Journal of Microwaves, 2002,18(1):6–10,19.) doi:10.3969/j.issn.1005-6122.2002.01.002.
- [12] 施长海,章传芳,陈振中,等. 有源相控阵中场测量中的空间误差研究[J]. 航空电子技术, 2008,39(1):28–32,45. (SHI Changhai,ZHANG Chuanfang,CHEN Zhenzhong,et al. Study on the space errors of the mid-field measurement for active phased-array radars[J]. Avionics Technology, 2008,39(1):28–32,45.) doi:10.3969/j.issn.1006-141X.2008.01.007.

作者简介:

杨森浩(1996–),男,硕士,工程师,主要研究方向为相控阵测量与校准技术研究,email:542035767@qq.com.

王晓飞(1982–),男,博士,研究员,主要研究方向为阵列天线设计技术、数字相控阵技术、数据链通信技术研究.

崔鑫铭(1995–),女,硕士,工程师,主要研究方向为相控阵测量与校准技术研究.

李 垚(1984–),男,学士,工程师,主要研究方向为相控阵测量与校准技术研究.