



## 5G 相控阵近场多探头 OTA 校准

马梦露<sup>1</sup>, 赵德双<sup>1\*</sup>, 杨周明<sup>1</sup>, 梁 锋<sup>1</sup>, 曹卫平<sup>2</sup>, 王秉中<sup>1</sup>

(1. 电子科技大学物理学院 成都 611731; 2. 广西无线宽带通信与信号处理重点实验室 桂林 541004)

**【摘要】**为解决 1.8~6.0 GHz 频段内 5G 相控阵的大批量、快速、高效的幅相校准, 该文提出一种新型近场多探头空口幅相校准方法。该方法先用多探头阵列, 从校准阵获取基准的校准参数, 然后利用校准阵近/远场之间的传递函数关系, 对待测阵各通道进行幅相校准。文中分析了校准误差的来源与影响, 并用 4×4 多探头近场测量阵列, 研制出了测试系统, 对方法的可行性与准确性进行了实验验证。仿真与实测结果表明, 幅度校准误差在±0.5 dB 之内、相位校准误差在±5°之内。相比已有空口校准系统, 该系统体积更小、效率更高, 校准精度与远场校准基本相当, 展现出对大批量小型 5G 相控阵进行产线快速幅相校准的能力。

**关键词** 5G 相控阵; 校准; 近场; 空口

**中图分类号** TN82

**文献标志码** A

**doi:**10.12178/1001-0548.2021157

## Calibration Array Based Near-Field Multi-Probe OTA Calibration for 5G Phased Arrays

MA Menglu<sup>1</sup>, ZHAO Deshuang<sup>1\*</sup>, YANG Zhouming<sup>1</sup>, LIANG Feng<sup>1</sup>, CAO Weiping<sup>2</sup>, and WANG Bingzhong<sup>1</sup>

(1. School of Physics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731;

2. Guangxi Key Laboratory of Wireless Broadband Communication and Signal Processing Guilin 541004)

**Abstract** In order to quickly and efficiently calibrating a large number of 5G phased arrays operating in 1.8~6.0 GHz, a novel near-field multi-probe OTA (over the air) calibration method is presented in this paper. In this method, the reference data is firstly extracted from a calibration array, Then the channels' amplitudes and phases of DUT (device under test) are calibrated according to the linear transfer functions of the calibration array from the near field to the far field. The reasons for the calibration errors and their influences have also been studied. A principle verification system with a 4×4 near-field probe array is fabricated to validate the feasibility and accuracy of the proposed method. The measured results show that the amplitude and phase of the calibration error are within ±0.5dB and±5°, respectively. Comparing the existing OTA calibration systems, the new system has much smaller size, higher efficiency, the very close calibration accuracy, which demonstrate a promising ability of fast calibrating batched 5G phased arrays on production lines.

**Key words** 5G phased array; calibration; near field; over the air

在实际生产中, 由于制造公差、装配误差和射频通道差异等原因, 5G 相控阵的各个通道与理想状态有明显的幅相差异, 这些差异如果不进行精确的校对, 严重时会引起相控阵的辐射效率下降、方向图畸变从而会影响 5G 无线通信质量<sup>[1]</sup>。因此, 在投入使用前, 对 5G 相控阵天线的各个通道进行精确的幅相校准, 是产品校测中一个必不可少的关键环节。

与传统的相控阵天线不同, 5G 相控阵的天线单元与射频电路通道被有机地集成在一起, 构成一个完整的有源天线单元 (active antenna unit, AAU)。在 AAU 成型后, 一般不宜将二者拆解用传导方法进行幅相校准, 因此, 空口 (over the air, OTA) 校准便成为当前最主要的 5G 相控阵校准手段<sup>[2]</sup>。OTA 校准是指, 在待测阵的辐射区, 用探头天线采集 AAU 的辐射场信息, 在不需拆解射频通道与

收稿日期: 2021-06-08; 修回日期: 2021-09-09

基金项目: 国家自然科学基金 (61671133); 四川省科技计划 (2019YJ0170); 广西无线宽带通信与信号处理重点实验室 2020 年开放基金项目 (GXKL06200201)

作者简介: 马梦露 (1996-), 女, 博士生, 主要从事相控阵天线、5G 相控阵测量以及赋形场等方面的研究。

\*通信作者: 赵德双 E-mail: dszhao@uestc.edu.cn

天线的情况下,完成相控阵天线通道间的幅相校准。OTA 校准主要有远场、近场、紧缩场等几种手段<sup>[3]</sup>。其中,近场 OTA 校准因为无需建造大型暗室,也无需特殊的平面波产生装置,具有占地小、成本低、效率高等优势,因此,成为目前解决 Sub-6 GHz 频段内 5G 相控阵幅相校准的一个主导技术。

从当前研究来看,近场 OTA 校准主要以单探头近场扫描为主,通过单个探头在近场区扫描,获取天线近场信息,然后基于平面波谱展开理论,将采集到的近场转换为远场,进一步反推至待测阵(device under test, DUT)的口径场,通过近/远场变换、近场/口径场变换完成阵列诊断<sup>[4]</sup>。为提高校准精度与效率,文献[5-7]对近场扫描法进行了误差分析和方法改进,但其需求扫描采样点多、校准算法复杂且需要事先已知探头天线信息等,导致校准效率不高、速度比较慢。相比单探头近场扫描法,近场换相法避免了探头天线的扫描,在简化校准测量流程的同时,加快了校准效率<sup>[8-10]</sup>。但是,由于忽略了阵元间耦合对幅相的影响,仅校准了阵列的射频通道误差,因此,换相法的校准精度相对不高。为了同时提高校准效率和精度,学者们也研究了多种多探头 OTA 校准法。其中等效源重建方法,可利用近场探头阵列的测量数据,基于积分方程和格林函数构建待测阵的等效源,从而获得待测阵的远场方向图<sup>[11]</sup>。该方法可避免探头机械移动,能够提高校准效率和准确性。为了进一步简化探头阵列,文献[12]针对平面待测阵,提出一种 3 探头天线校准法,探头天线位置固定,无需扫描。该方法同样能够实现校准效率的提升,但其对测试场地要求较高,需要足够大的暗室箱体,以满足几乎接近远场的测量距离要求。另外,也有通过计算探头与各个待测通道之间的理想接收功率替代实测,以减少对近场数据的实测采样<sup>[13]</sup>。此方法使校准效率得到一定提升,但是,对于大批量阵列而言,实际值与计算值间的误差往往具有不可预测性,不太适用于批量化相控阵校准。

为实现 1.8~6.0 GHz 频段内小型 5G 相控阵的大批量、快速、高效的幅相校准,本文提出一种基于校准阵的近场多探头 OTA 幅相校准方法。本方法主要借鉴矢量网络分析仪的测试端口校准与测量思路,在进行待测阵测试前,先用一个已计量好的校准阵,放入多探头 OTA 校准系统,对整个 OTA 校准系统进行自校准,获取基准的校准参数以及校准阵近/远场之间的传递函数;然后,再将

待测阵放入测试系统,利用待测阵的近场测量数据以及校准阵的近/远场传递函数关系,对待测阵的各个通道进行幅相校准。在给出基于校准阵的近场多探头 OTA 测试原理后,本文利用 4×4 多探头天线,研制出了一个测试系统,对方法进行了实测试证和误差分析,证实了本方法的可行性、准确性和高效性。

## 1 基于校准阵的近场多探头 OTA 校准原理

图 1 为二维近场多探头 OTA 校准系统的探头阵列和待测阵列的阵元排布侧面示意图,下方是待测相控阵,上方为多探头二维平面阵列,二者的天线单元一一对应,阵面间距  $d=3\lambda(1.8\text{ GHz})\sim 9\lambda(6.0\text{ GHz})$ ,  $\lambda$  为相控阵工作时的信号波长。探头为双极化超宽带 Vivaldi 天线,全部安装在上方的二维扫描架平台上,探头间距可程控调节,以方便对阵元不同排布的、不同型号 5G 相控阵进行幅相校准。为防止外界干扰,所有测量均在高 1.0 m、宽 1.2 m、长 1.5 m 的小型暗箱中进行,待测阵则由暗箱底部的托台通过侧面箱门滑动送入。

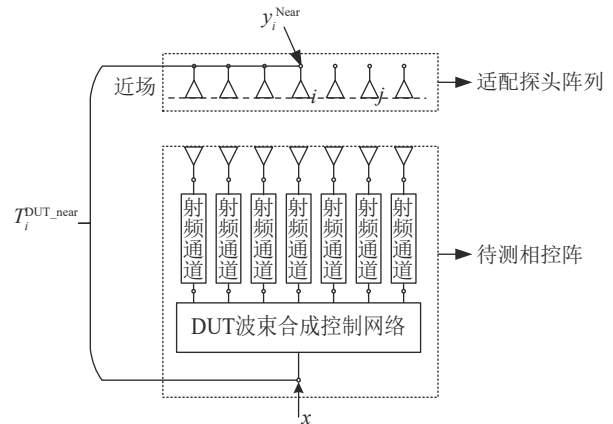


图 1 二维多探头 OTA 校准系统的一对一阵元排布侧面示意图

首先,将预先计量好的校准阵放入天线托台,用近场多探头 OTA 校准系统对校准阵进行近场测量,实测得到校准阵各通道的近场数据,并利用校准阵在计量系统下测试得到的远场数据,计算得到各通道的近/远场传输函数。校准阵的功能非常类似于矢量网络分析仪中的校准件:一是用作待测阵的基准参考;二是基于近远场数据获取校准阵的近/远场线性传递函数;三是起到消除系统部分测量误差的作用。此过程也可等同看成是系统的自校准测量。

然后,对待测阵进行近场测试,并结合校准阵的近/远场传递函数,进行近/远场变换,得到待测

阵在远场的各通道幅相数据。

最后, 从待测阵中选取参考通道, 计算出各通道与参考通道之间的幅相差异, 并对各通道的幅相差异进行补偿与校对, 以完成待测阵各个通道的幅相校准。校准原理如下。

设 $x(\omega)$ 为系统馈入到校准阵每个通道的输入测试信号,  $T_i^{\text{cal\_near}}(\omega)$ 为校准阵每个通道的馈入端口到其对应近场测试探头之间的传递函数, 其中 $i = 1, 2, \dots, N$  ( $N$ 为相控阵阵元个数), 此传递函数包含了射频通道、天线结构以及近场空间链路的传输特性。利用信号传输关系, 可知由近场多探头 OTA 校准系统测试得到的校准阵各通道接收信号为:

$$y_i^{\text{cal\_near}}(\omega) = T_i^{\text{cal\_near}}(\omega)x(\omega) \quad (1)$$

式中,  $y_i^{\text{cal\_near}}$ 为校准阵在近场多探头 OTA 系统中测量得到的通道接收信号。

同理, 基于远场计量校准并通过事先保存的校准阵远场测试数据 $y_i^{\text{cal\_far}}(\omega)$ , 校准阵各通道的馈入信号与远场接收信号之间有关系式:

$$y_i^{\text{cal\_far}}(\omega) = T_i^{\text{cal\_far}}(\omega)x(\omega) \quad (2)$$

式中,  $T_i^{\text{cal\_far}}(\omega)$ 为校准阵的各通道馈入端口到远场测量天线之间的传递函数;  $x(\omega)$ 为测试信号。

将式 (1) 中近场测试数与式 (2) 中远场数据相除, 得到校准阵各个通道的近/远场传递函数关系:

$$T_i^{\text{cal\_near\_far}}(\omega) = \frac{y_i^{\text{cal\_far}}(\omega)}{y_i^{\text{cal\_near}}(\omega)} = \frac{T_i^{\text{cal\_far}}(\omega)}{T_i^{\text{cal\_near}}(\omega)} \quad (3)$$

运用上述近/远场传递函数关系, 将测量得到的近场接收信号 $y_i^{\text{DUT\_near}}(\omega)$ 变换到远场, 得到待测阵各通道在远场区信号:

$$y_i^{\text{DUT\_far}}(\omega) = T_i^{\text{cal\_near\_far}}(\omega)y_i^{\text{DUT\_near}}(\omega) \quad (4)$$

由于相控阵校准只需要获取阵列各通道间的幅相关系, 因此, 在得到所有通道远场区信号后, 选择待测阵的各通道接收信号的平均值作为参考, 再运用式 (5), 将各通道远场区信号与平均值这一参考值相比对, 由此得到待测阵各通道在远场区的信号差:

$$\Delta y_i^{\text{mea\_far}}(\omega) = \frac{y_i^{\text{DUT\_far}}(\omega)}{y_{\text{ref}}^{\text{DUT\_far}}(\omega)} = \frac{T_i^{\text{cal\_near\_far}}(\omega) y_i^{\text{DUT\_near}}(\omega)}{T_{\text{ref}}^{\text{cal\_near\_far}}(\omega) y_{\text{ref}}^{\text{DUT\_near}}(\omega)} \quad (5)$$

再对式 (5) 分别取幅值和相位, 得到各通道之

间的幅度差和相位差:

$$\Delta A_i^{\text{mea\_far}} = |\Delta y_i^{\text{mea\_far}}| = \left| \frac{T_i^{\text{cal\_near\_far}}(\omega) y_i^{\text{DUT\_near}}}{T_{\text{ref}}^{\text{cal\_near\_far}}(\omega) y_{\text{ref}}^{\text{DUT\_near}}} \right| \quad (6)$$

$$\Delta \phi_i^{\text{mea\_far}} = \angle \Delta y_i^{\text{mea\_far}} = \angle \left( \frac{T_i^{\text{cal\_near\_far}}(\omega) y_i^{\text{DUT\_near}}}{T_{\text{ref}}^{\text{cal\_near\_far}}(\omega) y_{\text{ref}}^{\text{DUT\_near}}} \right) \quad (7)$$

最后, 利用上述测量计算得到的幅相差值, 分别对各个通道进行补偿, 实现对整个待测阵的幅度和相位校准, 使其各通道实际与理想的初始相位相同和幅度一致。

## 2 校准误差分析

### 2.1 校准误差分析

为衡量所提方法的幅相校准精度, 校准误差定义为各通道基于近场推导到远场的幅相差 $\Delta y_i^{\text{mea\_far}}(\omega)$ 与其真实远场幅相差 $\Delta y_i^{\text{real\_far}}(\omega)$ 之比:

$$e_i(\omega) = \frac{\Delta y_i^{\text{mea\_far}}(\omega)}{\Delta y_i^{\text{real\_far}}(\omega)} \quad (8)$$

式中,  $\Delta y_i^{\text{real\_far}}$ 为:

$$\Delta y_i^{\text{real\_far}}(\omega) = \frac{y_i^{\text{DUT\_real\_far}}(\omega)}{y_{\text{ref}}^{\text{DUT\_real\_far}}(\omega)} \quad (9)$$

幅度校准误差为:

$$e_i^A(\omega) = |e_i(\omega)| = \left| \frac{\Delta y_i^{\text{mea\_far}}(\omega)}{\Delta y_i^{\text{real\_far}}(\omega)} \right| \quad (10)$$

相位校准误差为:

$$e_i^P(\omega) = \angle e_i(\omega) = \angle \left( \frac{\Delta y_i^{\text{mea\_far}}(\omega)}{\Delta y_i^{\text{real\_far}}(\omega)} \right) \quad (11)$$

对于测量系统而言, 校准误差来源主要有两类: 系统误差和随机误差。其中, 随机误差是测量时由噪声等引入的, 通常通过多次平均测量能有效抑制。

本方法利用线性近/远场传递函数建立起待测阵近场区信号与远场区信号的关系, 如式 (4) 所示, 其中待测阵近场区信号可由系统直接测量获得, 远场区信号为校准目标。理想情况下待测阵与校准阵的各通道近/远场传递函数相同, 因此本方法利用计量好的校准阵获取该函数。但由于校准阵与待测阵在系统中实际测量时, 两者间的放置位置

与阵元结构均会存在微小偏差,因此通过校准阵列获取的与待测阵实际的近/远场传递函数存在差异,从而导致系统误差的产生。本文利用全波电磁仿真软件,对影响该系统误差的几个可能的关键参量进行了仿真分析。

## 2.2 误差仿真分析

为了验证本文提出校准方法的准确性与可行性,需要研究几个关键参数对校准误差的影响。因此本文分别对待测阵与校准阵两者间的放置位置偏差以及阵元结构偏差两个参量进行仿真分析。校准阵与变化前的待测阵结构模型相同,如图2a所示,为 $4 \times 4$ 平面微带阵列,单元尺寸 $50 \text{ mm} \times 38.4 \text{ mm}$ ,相邻间距 $d=90 \text{ mm}$ ,工作频率 $2.45 \text{ GHz}$ ,带宽 $100 \text{ MHz}$ ,距离多探头测量阵列 $300 \text{ mm}$ 。阵列各通道的近场信号幅相值,通过近场探针获取,如图2b所示。阵列各通道的远场幅相值,则利用远场方向图获取。

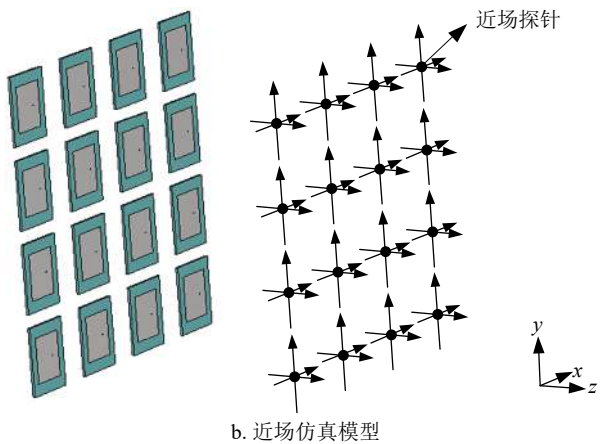
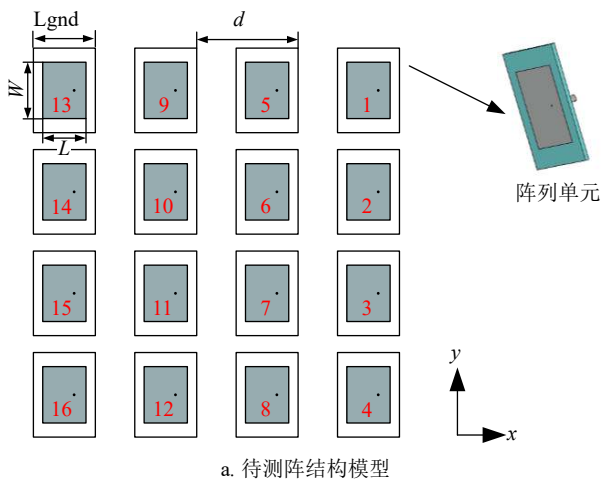
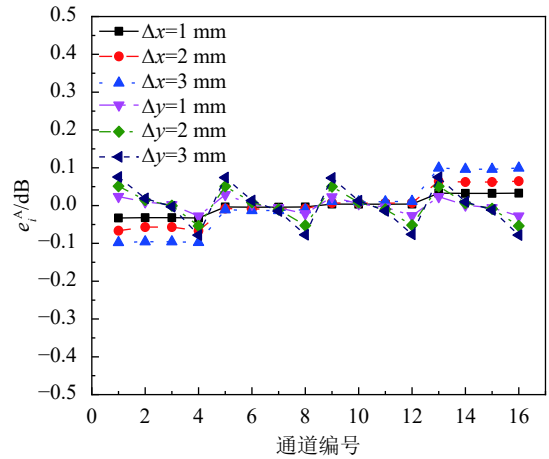


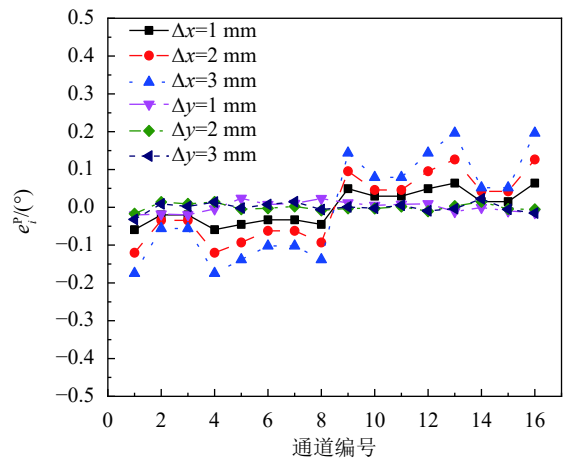
图2  $4 \times 4$  二维平面待测阵仿真模型

首先,研究了待测阵与校准阵间在放置位置上的偏差对校准误差的影响。共设置了6组参数,即保证校准阵的状态不变,将待测阵沿 $x$ 轴整体偏

移 $1 \text{ mm}$ ,  $2 \text{ mm}$ ,  $3 \text{ mm}$ 和沿 $y$ 轴整体偏移 $1 \text{ mm}$ ,  $2 \text{ mm}$ ,  $3 \text{ mm}$ 。校准误差根据式(8)进行计算,结果如图3所示。幅度和相位校准误差分别在 $\pm 0.2 \text{ dB}$ 以内和 $\pm 0.3^\circ$ 以内。结果显示,当阵列水平偏移在 $3 \text{ mm}$ 以内,引起的校准误差相对较小。



a. 校准误差幅度



b. 校准误差相位

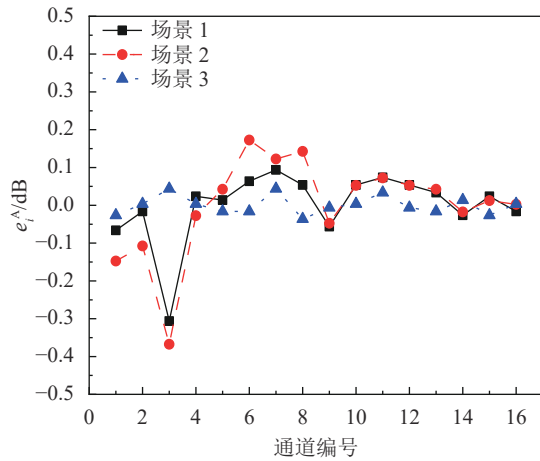
图3 待测阵与校准阵间的位置差异对校准误差影响的仿真结果

其次,研究了待测阵与校准阵天线间的阵元结构差异对校准误差的影响。保证校准阵状态不变,共设定了3种不同待测阵的结构变化场景,如表1所列。表中左侧为选取的结构或位置变化的阵列单元编号,右侧的参量 $L_{\text{gnd}}$ 为变化前待测阵的单元地板长度, $L_{\text{gnd}}=55 \text{ mm}$ , $L$ 为单元贴片长度, $L=38.4 \text{ mm}$ , $W$ 为单元贴片宽度, $W=50 \text{ mm}$ ,如图2a所示。通过仿真得到的校准误差结果如图4所示,幅度和相位校准误差分别在 $\pm 0.4 \text{ dB}$ 以内和 $\pm 4.5^\circ$ 以内。相比阵列的整体位置偏移,阵元位置微变所引起的校准误差相对较大,但都在可接受的范围内,初步证实所提校准方法的可行性和准确性。

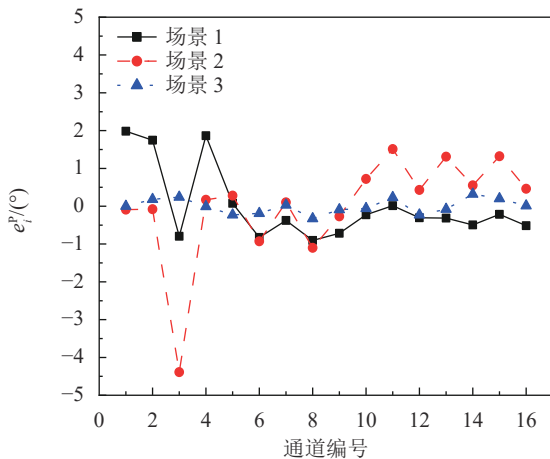


表 1 待测阵的阵元结构差异及位置偏移取值

阵列单元编号	结构差异与位置偏移/mm		
	场景1	场景2	场景3
1	Lgnd-1	Lgnd-3	沿-y轴平移1
3	L-1	L-3	沿-x轴平移1
9	W-1	W-3	-
10	-	-	沿-x轴平移1
11	L-1	L-3	-



a. 校准误差幅度



b. 校准误差相位

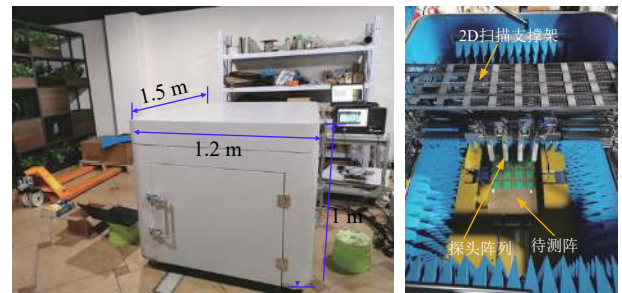
图 4 待测阵与校准阵间的阵元结构差异对校准误差影响的仿真结果

### 3 实验验证

基于 4×4 双线极化超宽带多探头阵列, 研制出一个基于校准阵的近场 OTA 幅相校准测量系统, 如图 5a 所示, 对校准方法的可行性与准确性进行了进一步的实验验证。

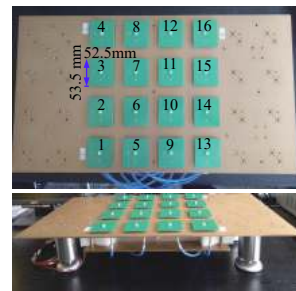
实验验证中, 设计并制作两个阵列: 待测阵与校准阵。其中待测阵为 4×4 空气微带相控阵, 长 600 mm, 宽 300 mm, 如图 5b 所示; 其阵元长 53.5 mm、宽 52.5 mm, 工作中心频率 2.45 GHz, 带宽 100 MHz。校准阵是一个由远场校准系统进行

标定过的同款空气微带阵列。待测阵的阵面距离探头阵面 470 mm (约 3.84 个波长), 如图 5c 所示。探头为双极化 Vivaldi 天线, 工作带宽 1.8~6.0 GHz、尺寸 25 mm×25 mm×150 mm, 如图 5d 所示。待测阵和探头阵均放置于小暗箱中, 暗箱高 1 m、宽 1.2 m、长 1.5 m, 暗箱底部为待测阵或参考阵放置平台, 暗箱顶部为 4×4 多探头近场测量阵, 探头阵列装在 2 维平面扫描架上, 用以构建不同阵列大小、不同阵元间距的探头阵列, 从而适应不同类型 5G 相控阵的幅相校准。为保证测试结果的准确性和可靠性, 对待测阵进行多次重复测量。



a. 近场校准系统

c. 校准系统内部图



b. 待测阵



d. 探头天线单元

图 5 基于校准阵的近场 OTA 幅相校准系统

首先, 将待测阵经本文校准方法测试推导所得的远场结果  $\Delta y_i^{mea\_far}(\omega)$  与真实远场的测试结果  $\Delta y_i^{real\_far}(\omega)$  进行对比, 对应各通道的远场间幅度差  $\Delta A_i^{DUT\_far}$  与相位差  $\Delta \phi_i^{DUT\_far}$  分别如图 6a、6b 所示, 4 次重复校准测量获得的待测阵各通道的远场间幅相差均与各通道的真实远场间幅相差近似。其次, 计算 4 次近场测试推导获得的校准远场结果对应的校准误差, 如图 7 所示, 4 次重复校准测量中, 待测阵的幅度校准误差均在  $\pm 0.5$  dB 以内, 相位校准误差在  $\pm 5^\circ$  以内。与 2.2 小节中的仿真结果对比, 由于实际测试中随机误差等的存在, 总的校准误差有一定程度的增大, 但仍能够控制在可接受范围内, 也进一步验证了校准方法的准确性。而且, 4 次重复测量结果基本一致, 幅度最大偏差小于 0.2 dB, 相位最大偏差小于  $1.7^\circ$ , 表明测试系统稳定、测试结果准确可靠。

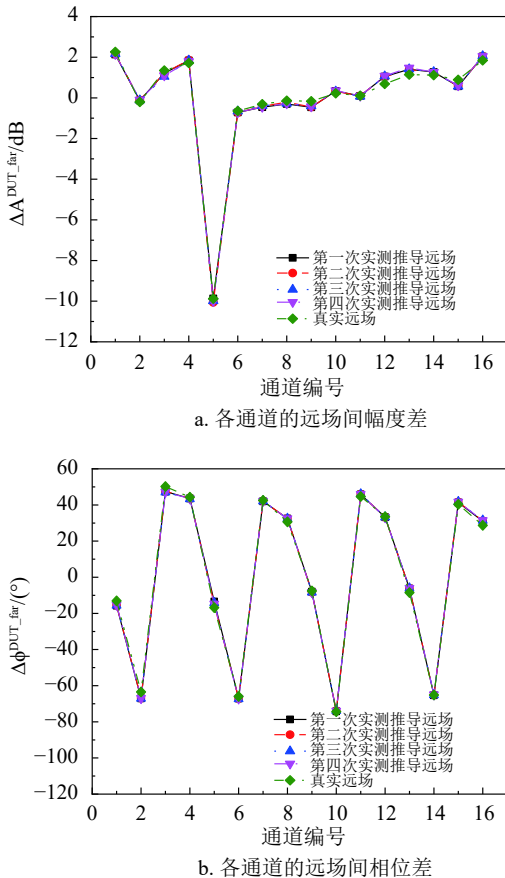


图6 待测阵各通道测试推导远场结果与真实远场结果对比

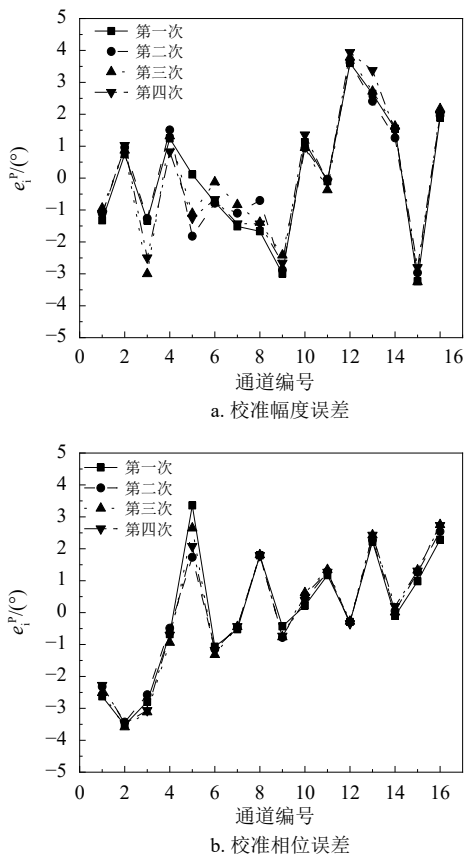


图7 待测阵各通道的校准误差测试结果

## 4 结束语

本文提出了一种基于校准阵的5G相控阵近场多探头OTA的快速校准方法。此方法通过多探头阵列对校准阵与待测阵进行参照比对测量,不仅避免了探头扫描移动、缩减了测试时间、提高了校准测量效率,而且可将暗室高度压缩到1.0 m,极大地缩减了暗箱尺寸,为测试产线安装带来极大的便利。仿真与实测试验验证结果证实了方法的可行性、准确性与测试结果的稳定性,校准误差范围均在 $\pm 0.5\text{ dB}/\pm 5^\circ$ 以内,重复实验校准偏差均在 $0.2\text{ dB}/1.7^\circ$ 以内,校准精度基本接近远场幅相校准精度。相比远场幅相校准测量系统,基于校准阵的近场多探头OTA校准法具有校准速度快、所需暗箱尺寸小等优点,在Sub-6 GHz频段内的5G相控阵的快速大批量校准应用上展现出很好的应用前景。

## 参考文献

- [1] LI R X, ZHANG J B, LI C G, et al. An accurate mid-field calibration technique for large phased array antenna[C]//2017 6th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation. Xi'an: IEEE, 2017: 1-3.
- [2] CHANG D C. The challenges of 5G OTA measurement[C]//2020 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference. Hong Kong, China: IEEE, 2020: 8-9.
- [3] SACCARDI F, SCIALACQUA L, SCANNAVINI A, et al. Accurate and efficient radiation test solutions for 5G and millimeter wave devices[C]//2018 IEEE MTT-S Latin America Microwave Conference. Arequipa, Peru: IEEE, 2018: 1-4.
- [4] LEE J J, FERREN E M, WOOLLEN D P, et al. Near-field probe used as a diagnostic tool to locate defective elements in an array antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1988, 36(6): 884-889.
- [5] 胡鸿飞, 高雪, 傅德民. 基于FFT的近场-口径场变换方法[J]. *微波学报*, 2001, 17(2): 1-6.  
HU H F, GAO X, FU D M. A transformation technique from near-field to aperture-field based on FFT[J]. *Journal of Microwaves*, 2001, 17(2): 1-6.
- [6] LU P P, YANG S, YANG G H, et al. The position sampling affect on error in planar near-field radiation measurement[C]//2015 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications. Chiang Mai, Thailand: IEEE, 2015: 1-4.
- [7] VARELA F R, SANCHEZ R T, MORALES M J L, et al. Near-field to far-field transformation for fast linear slide measurements[C]//2020 14th European Conference on Antennas and Propagation. Copenhagen, Denmark: IEEE, 2020: 1-5.
- [8] 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 J P. Study of fast measurement and calibration techniques for phased array antennas[D]. Xi'an: Xidian

- University, 2010.
- [9] KEIZER W P M N. Fast and accurate array calibration using a synthetic array approach[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, 59(11): 4115-4122.
- [10] LONG R, OUYANG J, YANG F, et al. Multi-element phased array calibration method by solving linear equations[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(6): 2931-2939.
- [11] PETRE P, SARKAR T K. Planar near-field to far-field transformation using an array of dipole probes[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1994, 42(4): 534-537.
- [12] ZHENG X F, GAO T, CHEN X L. Mid-field calibration technique of active phased array antennas[C]//2005 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings. Suzhou: IEEE, 2005: 4-7.
- [13] CHEN T B, ZHANG L, DU H L. An amplitude-phase measurement method of phased array antenna based on self-calibration RF channel[C]//2018 10th International Conference on Communication Software and Networks. Chengdu: IEEE, 2018: 460-464.

编辑 叶芳