

一种改进型有源相控阵校准天线设计与验证

吕苗, 张欢, 王刚

西安导航技术研究所, 陕西 西安

收稿日期: 2024年6月19日; 录用日期: 2024年7月12日; 发布日期: 2024年7月23日

摘要

本文提出一种用于有源相控阵校准的改进型波导天线。首先在相控阵对角线位置设置4个固定式波导天线, 通过与主阵面单元能量耦合, 实现对阵元的幅相校准功能, 其次为了解决校准耦合能量动态范围过大, 导致后端监测校准链路设计难度大的问题, 在波导天线上引入缝隙结构, 增大校准波导天线与主阵天线的耦合能力, 降低了耦合能量的动态范围。

关键词

相控阵, 校准, 波导天线, 动态范围

Design and Validation of an Improved Calibration Antenna for Active Phased Array

Miao Lyu, Huan Zhang, Gang Wang

The Xi'an Research Institute of Navigation Technology, Xi'an Shaanxi

Received: Jun. 19th, 2024; accepted: Jul. 12th, 2024; published: Jul. 23rd, 2024

Abstract

An improved waveguide antenna for active phased array calibration is proposed and designed. Four fixed waveguide antennas are placed respectively at four corners of the array, and the calibration ability can be obtained by coupling with the array elements. For the reason of the large dynamic range and the difficulty in the design of the calibration modular, slots are etched at the broader face of the waveguide antenna, leading to an enhancement of the coupling with the array elements, thus a decreasing of the dynamic range.

Keywords

Phased Array, Calibration, Waveguide Antenna, Dynamic Range

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近些年来,相控阵天线技术得到了飞速发展,相控阵的校准问题也日益凸显[1]-[3]。首先,在相控阵天线调试测试阶段,通常需要对阵面口径的幅度和相位进行经常性的测试并对其进行校准补偿,以对所设计的相控阵天线阵面远场特性进行准确的测试验证,但是在一些特殊条件和环境下,在暗室进行上述测试可能是不具备条件的,而需要在外场进行阵面的幅相测试量和补偿,因此天线阵面在完成其主要功能的同时还需要具备校准功能。另一方面,作为舱外设备,天线阵面受工作环境影响较大,随着其工作时间的增加,阵面内部电子器件,尤其是例如 TR 组件、变频模块等有源器件的电性能会发生一定程度的恶化,此时阵面口径幅度和相位分布与暗室测试得到的基准数据相比会发生较大程度的变化,导致系统总体性能,例如波束指向精度,零深等发生变化,对系统的正常使用带来严重影响,而天线阵面从外场返回暗室进行重新测试又需要花费较长时间以及人力物力,此时校准系统及其设计就显得尤为关键。

过去几年中,研究学者对校准方法进行了深入的研究。牛宝君等人在文献[4]中提出在中场区域(对阵面不满足远场条件,对单个单元满足远场条件的区域)使用一个或者多个探头进行阵面校准的原理和方法,Mulcahey 等人在文献[5]中提出一种利用阵面中的 4 个特定位置的监测天线耦合单元信号,先通过平面近场校准阵面,测量此时的幅度相位分布,得到其“黄金标准”,需要校准时再次测量,得到和“黄金标准”的差,此方法可实现多达上万个单元阵面幅度相位的校准,每个校准天线与阵面 1/4 单元相对应,通过开关切换选取的校准天线从而实现对整个天线阵面单元幅度和相位的监测校准,在该方法中,对于有些阵面单元而言,其与校准天线为弱耦合,这就使得耦合能量的动态范围很大,对校准系统的设计提出了非常高的要求。

本文提出一种用于有源相控阵校准的改进型波导天线。首先在相控阵对角线位置设置 4 个固定式波导天线,通过与主阵面单元能量耦合,实现对阵元的校准功能,其次为了解决耦合能量动态范围过大,导致后端监测校准系统难以设计的问题,在波导天线上引入缝隙结构,增大校准波导天线与主阵天线的耦合能力,使得校准天线与阵元的耦合变为中等强度的耦合,降低了耦合能量的动态范围。

2. 校准架构与问题描述

相控阵天线阵面及校准波导天线的布局示意图如下图 1 所示(图中黑色原点表示阵面天线单元,为简化目的,示意图中只给出部分天线单元),天线阵面为二维相控阵,四个角去掉部分单元,在实现结构锥削的同时可预留出一定空间安装辅助阵元和校准天线。校准天线布局基于[5]中给出的设计思路进行设计,4 个波导天线分别放置在四个阵列切角的位置,两两位于阵面对角线上,且连线通过阵面中心。4 个校准波导天线分别与阵面的 4 个象限相对应,以发射校准为例,当前待校准单元所在象限的校准天线处于工作状态,校准天线接收到阵面单元从空间耦合的信号后,通过校准网络将信号传输到校准模块,再通过

变频采样，将校准数字信号发送到数据处理。

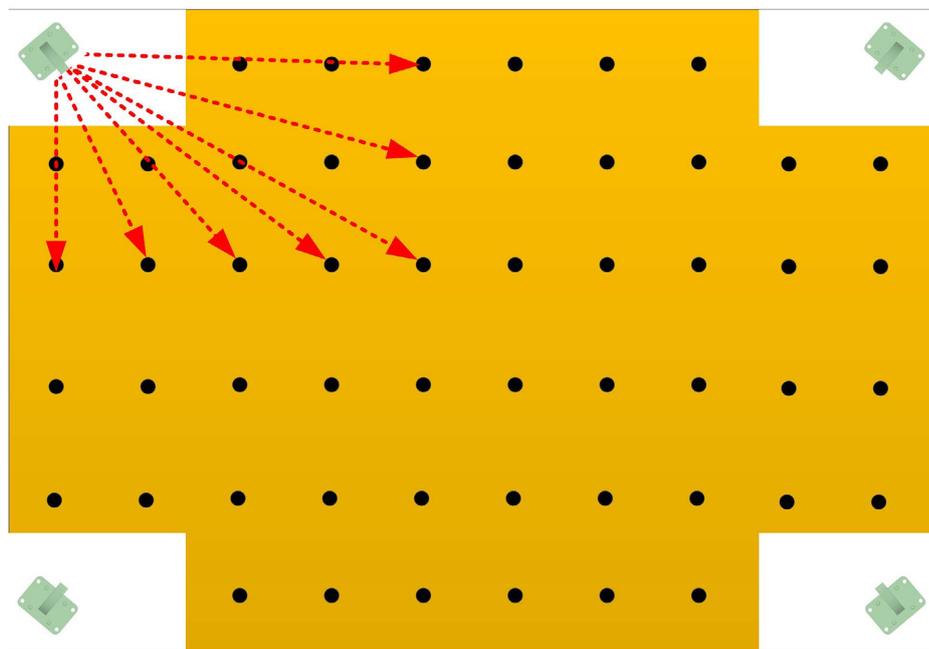


Figure 1. Calibration scheme
图 1. 校准架构框图

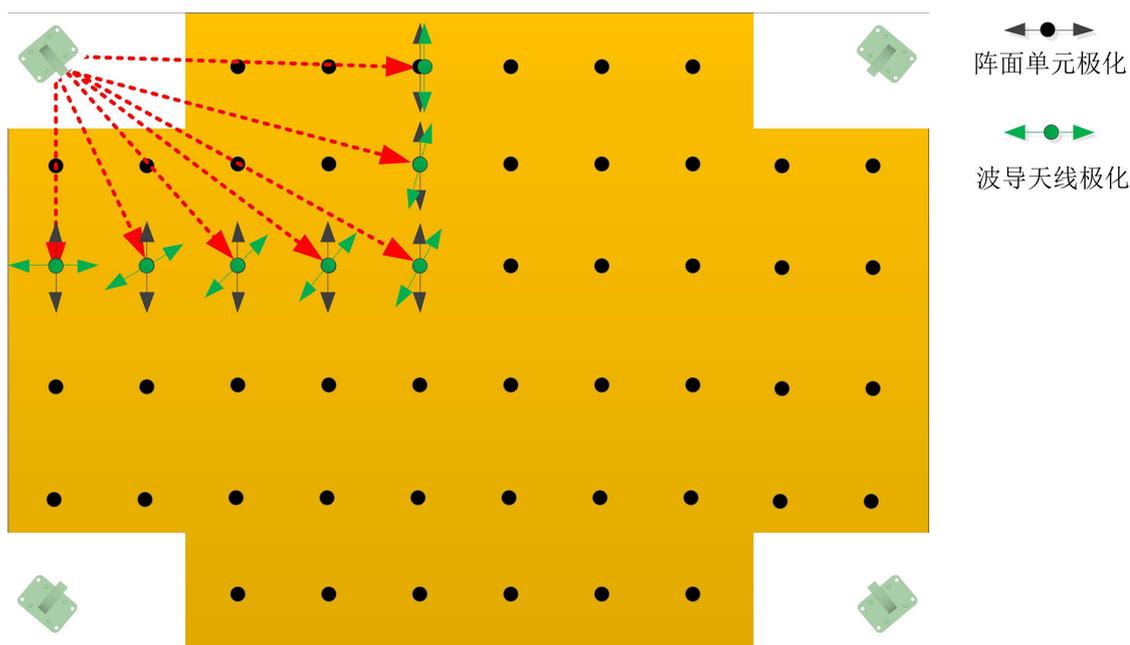


Figure 2. Polarization mismatch between array element and calibration antenna
图 2. 阵面单元与校准天线间的极化失配

该种校准架构的关键问题在于如何保证从阵面单元耦合到校准天线能量的动态范围处于良好的范围，以使得校准链路设计具有可实现性。造成动态范围较大的原因在图 2 中给出，从图中可以看到，对给定象限的校准天线而言，其所在象限的阵面单元相对于该校准天线的极化匹配程度是不相同的，对于阵面

第二象限中的天线单元，左下角的阵面单元极化与校准天线的极化是正交的，此时该阵面单元能耦合到校准天线的能量最小，而第二象限右上角的天线单元与校准天线的极化是匹配的，该单元能耦合到校准天线的能量最大，故而导致校准系统的动态范围增大，校准链路难以设计。校准天线与阵面单元之间的极化失配是当前待校准阵面单元在阵面坐标系中位置的函数，这种极化匹配的不同导致每个阵面单元耦合到校准天线的能量多少也各不相同，假设当前待校准阵面单元的位置坐标为 (x, y) ，则阵面单元与校准天线的能量耦合程度可表示为

$$Power_{coupled} = f(Pol_{mismatch}) = g(x, y)$$

其中 $Power_{coupled}$ 表示从阵面单元耦合到校准天线的能量多少， $Pol_{mismatch}$ 表示阵面单元与校准天线的极化失配程度， $f(\cdot)$ 表示极化失配与能量耦合之间的转化函数， $g(\cdot)$ 表示阵面单元坐标与能量耦合之间的转化函数。如何在保证函数 $g(\cdot)$ 取值域不变，减少其值域范围，也即如何减少校准时能量耦合的动态范围成为限制外校准应用的关键因素。

3. 改进型校准波导天线设计

为了减少校准链路射频信号的动态范围，本文采取的方案为提高校准波导天线的交叉极化电平，尤其是偏离校准天线法向方向较大时的交叉极化电平。首先给出传统的校准波导天线结构示意图，如下图 3(a) 所示，天线为 90 度弯折开口波导天线，天线工作在 Ku 频段，传统校准波导天线仿真 VSWR 曲线和远场方向图如下图 4 和图 5 所示。

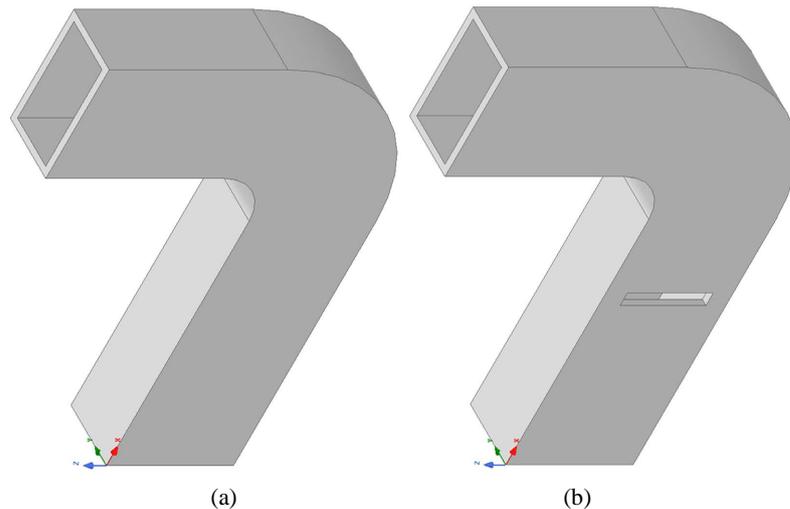


Figure 3. Different type of calibration antennas; (a) Traditional and (b) Improved
图 3. 不同形式的校准天线；(a) 传统形式，(b) 改进形式

从图 4 可以看出，给出的传统校准天线在所设计的频带内具有良好的阻抗匹配特性，全频带内 VSWR ≤ 1.7 。图 5 给出了传统校准天线在不同频点处的远场方向图，从图中可以看出，天线在不同频点、不同角度上的交叉极化电平均低于 -30 dB，说明校准天线的极化纯度较高，这也是容易造成校准天线与阵面单元极化失配的原因所在。

为了减少校准天线与阵面单元极化失配造成的耦合能量动态范围过大，本文提出了一种改进型校准波导天线，该天线结构示意图如图 3(b) 所示，在波导天线宽边蚀刻缝隙，缝隙极化与波导天线口面极化正交，从而达到提高校准波导大角度时交叉极化电平的目的。改进型波导天线 VSWR 曲线如图 6 所示，从图中可以看出改进后的天线在频带内仍然具有良好的阻抗匹配特性，保证了天线的高辐射效率。

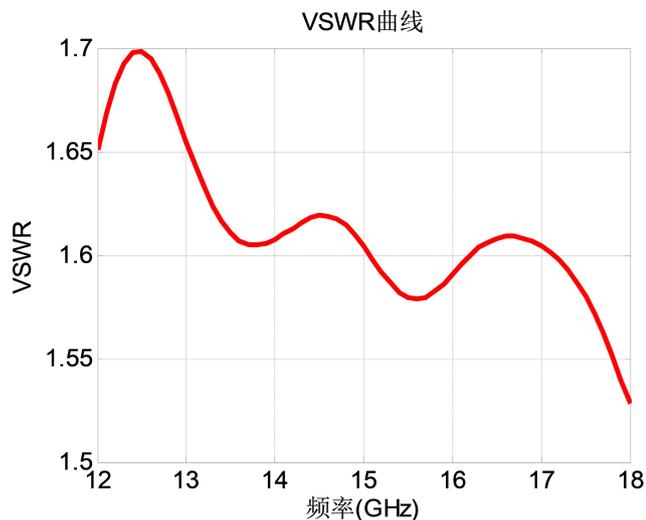


Figure 4. VSWR versus frequency of traditional calibration antenna
图 4. 传统校准天线电压驻波比随频率的变化曲线

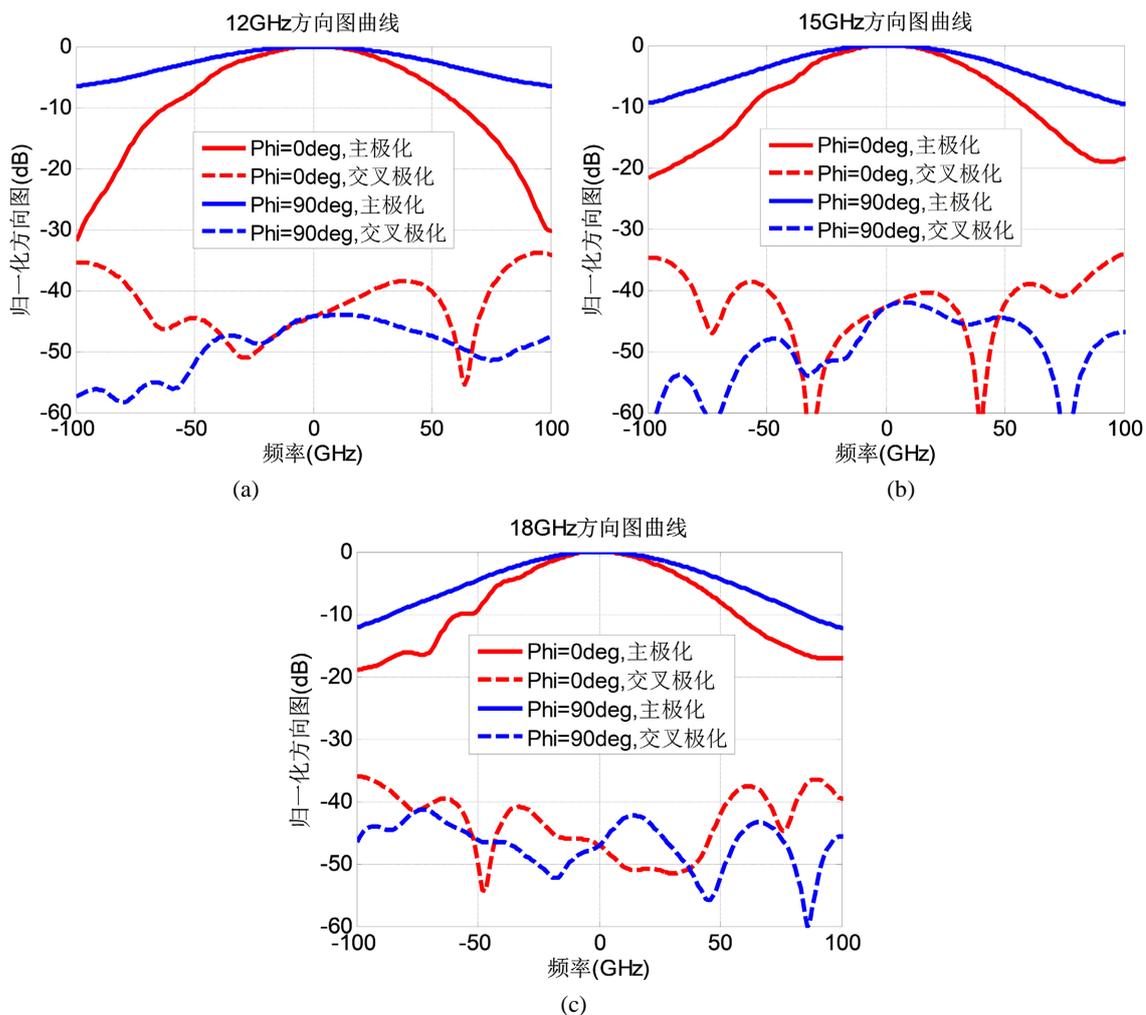


Figure 5. Patterns of traditional calibration antenna at different frequencies
图 5. 传统校准天线不同频点的方向图



Figure 6. VSWR versus frequency of improved calibration antenna
图 6. 改进型校准天线电压驻波比随频率的变化曲线

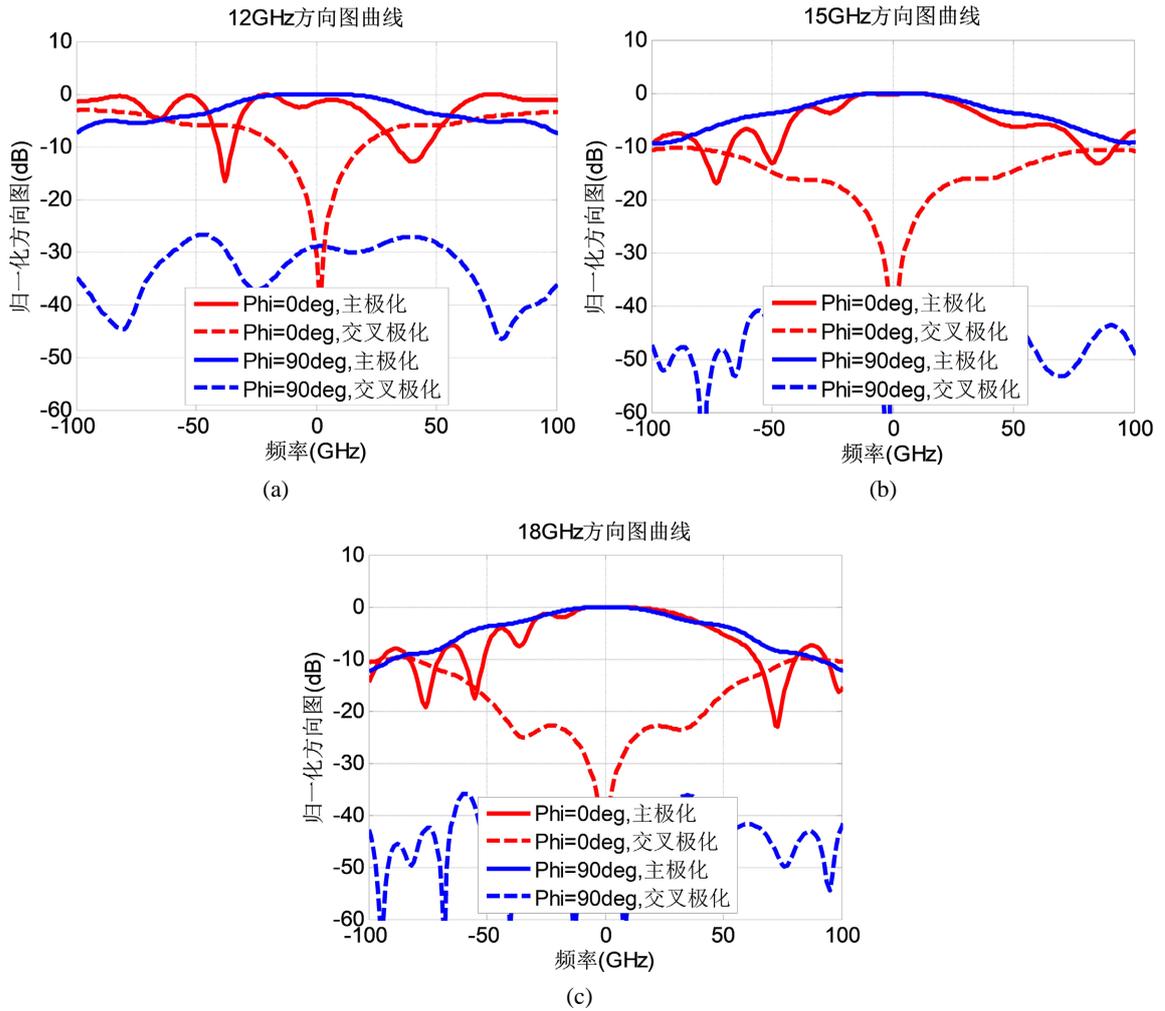


Figure 7. Patterns of improved calibration antenna at different frequencies
图 7. 改进型校准天线不同频点的方向图

改进型校准波导天线不同频点处的辐射方向图如图 7 所示，从图中可以看出相比于传统的校准波导天线，改进型天线在 $\Phi = 0 \text{ deg}$ 主面内的交叉极化电平得到了有效的提升，增强了校准天线与阵面极化失配较大单元之间的能量耦合，从而可有效减少校准链路射频信号的动态范围。同时对比图 5 和图 7 也可以看出，缝隙结构的引入使得天线在 $\Phi = 0 \text{ deg}$ 主面上的波束宽度得到了一定的展宽，校准天线在空域的覆盖范围增大，其功率可覆盖更多的阵面单元，这也是减小校准链路射频信号功率动态范围的一个因素。

4. 测试验证

将上述设计方法和改进后的校准喇叭天线在某项目中进行实测验证。天线阵面示意图如下图 8 所示。其中阵面的子阵规模为 8×8 。以第一象限作为测试象限，并选取第一象限中编号为 [1, 2, 5, 9, 13, 14, 18] 的子阵中的 66 个单元进行测试验证，并保证选取的单元位置涵盖各个角度，以保证测试验证的全面性。测试得到采用传统校准天线和改进型校准天线时，校准天线与不同阵面单元耦合量以及信号动态范围对比结果如下图 9 所示。从图 9 可以看出，当采用传统校准波导天线时，测试单元与校准天线耦合量的最大值在 -50.5 dB 以上，且耦合量的最小值在 -45 dB 以下，耦合能量的动态范围在 23 dB 到 55 dB 之间。而当采用改进型校准波导天线后，测试单元与校准天线耦合量的最大值在 -51 dB 以上，且耦合量的最小值在 -36 dB 以下，耦合能量的动态范围在 6 dB 到 33 dB 之间。故而校准链路所需要的动态范围从原来的 55 dB 下降到了 33 dB ，且最小待监测信号也由 -89 dB 提高到了 -80 dB ，降低了校准链路的放大增益，降低了系统的设计难度。同时从图 9(b) 可以看出，当采用改进型校准波导天线后，阵面单元耦合量动态范围的一致性也得到一定程度的提升，从原来的 32 dB 改善到了 27 dB ，有助于进一步改善校准系统的整体性能。

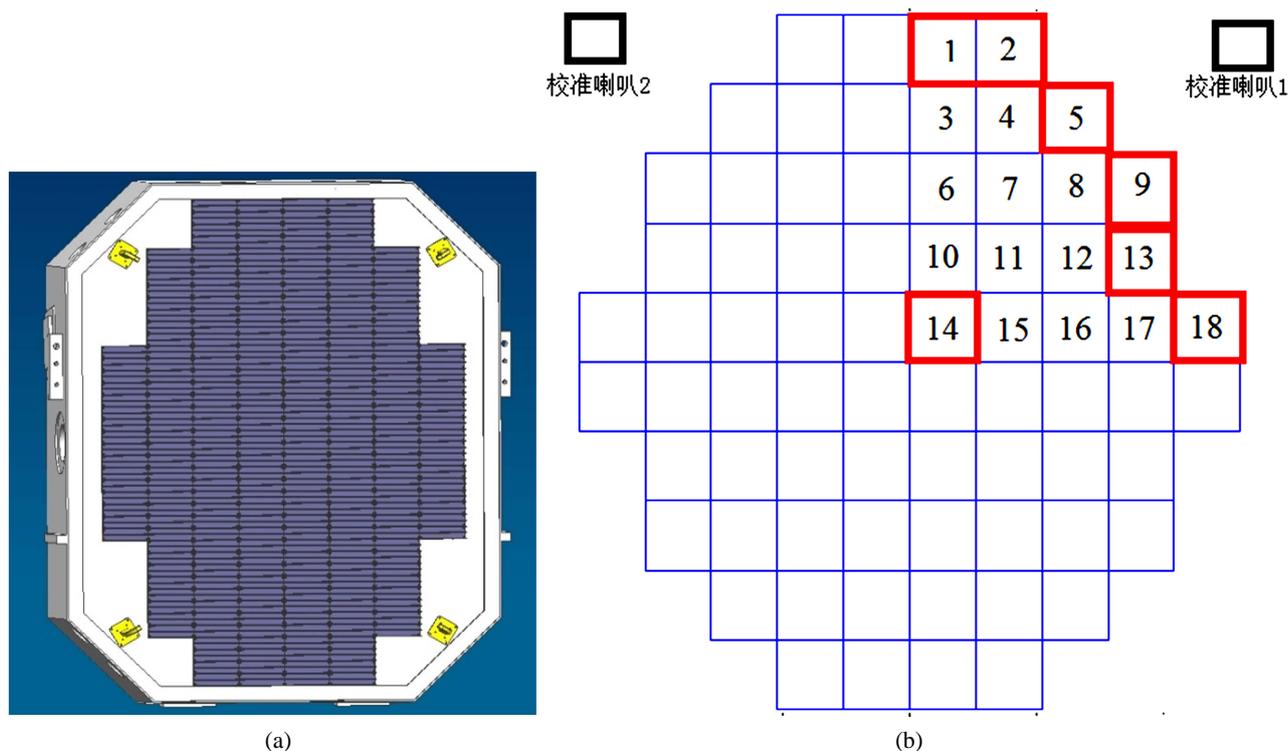


Figure 8. Layout of (a) Antenna array and (b) Selected sub-arrays
图 8. (a) 天线阵面和 (b) 选取的子阵布局图

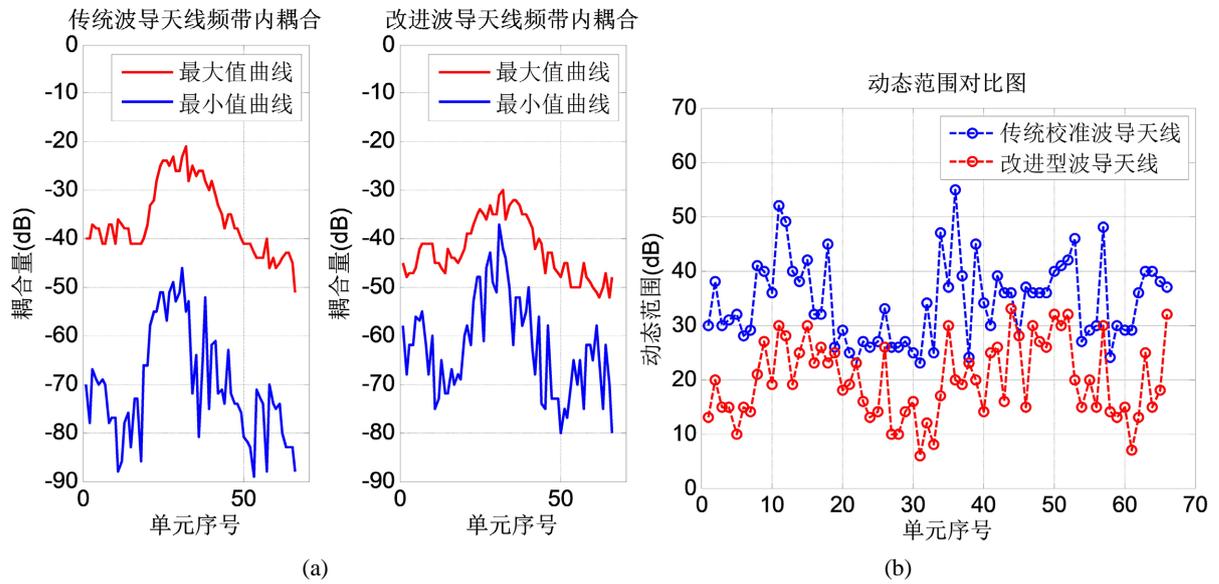


Figure 9. Measured results; (a) Minimum and Maximum coupled energy of different calibration antenna and (b) Improvement of dynamic range

图 9. 测试结果; (a) 不同校准天线对应的最大和最小耦合量, (b) 校准动态范围的改善

5. 结论

本文设计了一种用于大型相控阵外校准的改进型波导天线, 通过在校准天线传输段加载缝隙结构, 有效地提高了天线交叉极化电平, 实现了校准天线宽角域的覆盖, 进而降低了校准天线与阵面单元间耦合能量的动态范围, 降低了校准链路及系统的设计难度, 改善了阵面单元校准能量的一致性, 提高了校准系统的电性能。测试结果表明, 该阵列天线在工作频率范围内可实现 22dB 校准动态范围的改善, 而且具有 5 dB 动态一致性的改善。该改进型校准天线设计思路简洁, 电性能良好, 对解决大型相控阵外校准大动态范围问题具有较好的研究价值。

参考文献

- [1] 林昌禄. 天线测量技术[M]. 成都: 成都电讯工程学院出版社, 1987.
- [2] 毛乃宏, 俱新德. 天线测量手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1987.
- [3] Newell, A.C. (1988) Error Analysis Techniques for Planar Near-Field Measurements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **36**, 754-768. <https://doi.org/10.1109/8.1177>
- [4] 牛宝君. 大型相控阵外监测系统[J]. 现代雷达, 1999, 21(1): 5.
- [5] Mulcahey, J.K. and Sarcione, M.G. (1996). Calibration and Diagnostics of the THAAD Solid State Phased Array in a Planar Nearfield Facility. *Proceedings of International Symposium on Phased Array Systems and Technology*, Boston, 15-18 October 1996, 322-326. <https://doi.org/10.1109/past.1996.566108>