

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209859

一种高功率微波有源相控阵天线单元设计

刘 嵘¹ 吴鸿超^{1,2} 王乃志^{1,2} 李 彤¹

(1. 中国电子科技集团公司第十四研究所 南京 210039; 2. 天线与微波技术国防重点实验室 南京 210039)

摘要: 根据工程需要,本文提出了一种新型高功率微波有源相控阵天线单元,通过改造同轴波导变换器结构提升了功率容量和驻波特性,在同轴探针与阶梯波导之间引入方形金属块实现阻抗匹配,在波导末端添加过渡腔和匹配槽结构,并在喇叭段加入了单脊结构改变了波导阻抗,单脊伸出口径面降低了反射系数,进一步提升了功率容量。在 X 波段内 VSWR 小于 2,带宽提升为 1.25 GHz,功率容量为 33.24 kW,比常规同轴波导变换器下喇叭天线功率容量提升了 230%,7×7 相控阵阵面可以实现 1.62 MW 的发射功率,具备高功率微波发射能力。阵列可实现±30°圆锥扫描,满足高功率宽角度扫描的需求。

关键词: 高功率微波;有源相控阵;同轴波导变换器;功率容量;宽波束扫描

中图分类号: TN820 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

Design of a high-power microwave active phased array antenna element

Liu Rong¹ Wu Hongchao^{1,2} Wang Naizhi^{1,2} Li Tong¹

(1. The 14th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210039, China;

2. Science and Technology of Antenna and Microwave Laboratory, Nanjing 210039, China)

Abstract: According to engineering needs, this paper proposes a new type of high-power microwave active phased array antenna unit. The power capacity and standing wave characteristics are improved by modifying the structure of the coaxial waveguide converter. A square metal block was introduced between the coaxial probe and the stepped waveguide to achieve impedance matching, a transition cavity and matching slot structure were added at the end of the waveguide, and a single ridge structure was added to the horn section to change the waveguide impedance. The single ridge extends out of the aperture surface to reduce the reflection coefficient and further improve the power capacity. In X-band, the VSWR is less than 2, the bandwidth is improved to 1.25 GHz, and the power capacity is 33.24 kW, which is 230% higher than that of the horn antenna under the conventional coaxial waveguide converter. The 7×7 phased array can achieve MW-level transmission power and has the ability to transmit high-power microwaves. The array can achieve ±30° conical scanning to meet the needs of high-power wide-angle scanning.

Keywords: high-power microwave; active phased array; coaxial to waveguide converter; power capacity; wide-angle scan

0 引 言

高功率微波(high power microwave, HPM)可以有效应用于电子对抗、高功率雷达和高功率传输等领域^[1]。高功率微波系统包括微波源、传输器件、发射天线和电源等,其中天线在其中扮演着极为重要的角色^[2]。常见的高功率微波天线有 Vlasov 天线^[3]、螺旋天线^[4,6]、波导缝隙天线^[7]、喇叭天线^[8-10]和抛物反射面天线^[11]等。随着实际应用中微波源产生的功率不断提高,单一的发射天线难以满足对平均发射功率的要求,同时为了使得发射波束不仅在轴向辐射,还能实现一定程度的扫描,应用阵列天线将功率

提升一个量级是很有必要的。

由于历史发展的问题,相比于等离子物理和脉冲功率技术,高功率微波与传统微波技术结合相对较少,传统微波天线领域中的诸多技术并未很有效地应用到高功率微波中。对于将相控阵天线技术引入高功率微波发射系统中,国内外研究鲜有报道。而相控阵具备灵活波束扫描、低副瓣、易于组阵、拆卸维修方便和机动性高等优点,可以弥补现有高功率微波天线的不足。传统的相控阵天线单元^[12-14]种类繁多,其中具备大功率发射的天线有喇叭天线、Vivaldi 天线、贴片天线等。喇叭天线具有功率容量大、结构简单的特点,本文在传统的喇叭天线基础上,对其进行结构的重新

设计,旨在大幅提升其功率容量。影响喇叭天线功率容量的关键器件是同轴波导变换器^[13],常规的同轴波导变换器功率容量不超过 10 kW,无法满足高功率微波发射要求。为了提升有源相控阵发射功率,需要增加单元和组件个数,这无疑极大地增加了成本。

针对常规同轴波导变换器功率容量不足的问题,本文提出一种新型的面向高功率微波应用的有源相控阵天线单元,在常规喇叭天线基础上改造同轴波导变换器结构在同轴探针与阶梯波导之间引入方形金属块实现了阻抗匹配,在波导末端添加过渡腔和匹配槽结构,并在喇叭段加入了单脊结构改变了波导阻抗,单脊伸出口径面减少了反射系数,进一步提升了功率容量。在频带内 VSWR 小于 2,功率容量为 33.24 kW,比常规同轴波导变换器下的喇叭天线功率容量提升了 230%,相控阵阵面可以实现 MW 级发射功率,具备高功率微波发射能力。同时经过无限大阵列法的验证,相控阵阵面可以实现±30°圆锥扫描,该设计可以满足高功率灵活扫描的需求。

1 天线单元设计

1.1 同轴波导变换器设计

常规的同轴波导转换器设计思路主要有两个,分别是模式变换和阻抗匹配。同轴线输出为 TEM 模,而矩形波导中传输的主模为 TE₁₀ 模,变换器需要通过改变腔体结构来激励新模式、消除旧模式以实现模式的转换,还必须保证变换的效率要高。常规的同轴波导变换器使用同轴探针深入波导中激发 TE₁₀ 模的方式实现变换,探针可以近似看作小型的辐射天线,通过调节底部反射面的高度和宽度来改变反射性能,但常规同轴波导变换器的功率容量难以达到 10 kW 级,同轴探针端由于结构的不稳定性,在大功率条件下极易发生空气击穿现象。对此,本文基于探针激励机理和阻抗匹配方法,在常规同轴波导变换器基础上,通过改造过渡结构来有效提高功率容量。

图 1 为本文提出的同轴探针结构,引入方形金属块作为阶梯波导和同轴线的过渡结构,并使得方形金属块的高度与第一阶梯波导高度齐平,以保证阻抗的渐变过渡。为了保证加工的可行性,如图 2 所示,在金属块内部打一个半径为 0.65 mm、长度为 2 mm 的小孔,同时将探针嵌入孔中,以保证结构的一致性。金属块的尺寸有效地影响了变换器的驻波特性和功率容量,通过在仿真软件 HFSS 中建立模型并分析可得,改变金属块的宽度会改变与侧壁的距离,调节了边界条件中的传输距离,从而改变了驻波性能。

图 3 为金属块宽度 w_1 对驻波的影响,可以看到随着 w_1 值的增大,VSWR 值会减少,但金属块尺寸过大会造成电场在附近传播的拥挤,从而导致金属块的最大场强值激增,经过对比选择 w_1 为 3.4 mm。金属块的高度决定了与短路底部的匹配距离,表 1 列举了同轴波导变换器的功率容量值的大小,说明了改变金属块的高度 h_1 会影响最大场

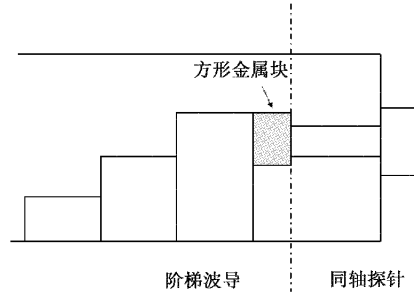


图 1 模式变换器结构

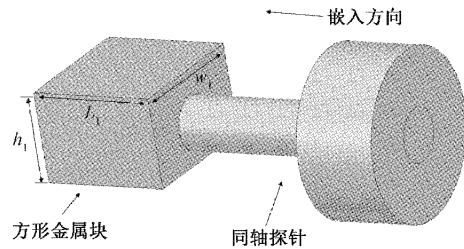


图 2 加载金属块模型

强值,从而影响功率容量值,选择 h_1 为 mm。

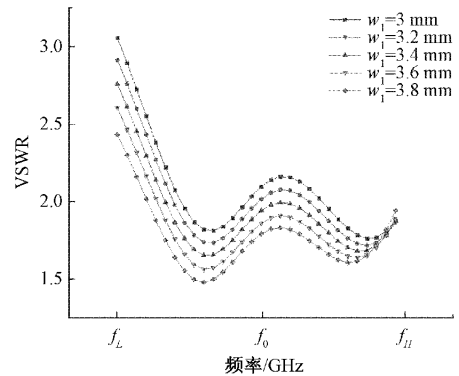


图 3 金属块宽度对驻波的影响

表 1 不同 a 值下的最大场强值

h_1 / mm	1.8	2	2.2	2.4	2.6
$E_{max} / (\times 10^6 \text{ V/m})$	1.327	1.227	1.163	1.480	1.513

图 4 为添加过渡腔和匹配槽后的同轴波导变换器结构。过渡腔的引入可以有效调节同轴探针端的功率容量,通过改变探针伸入波导端的尺寸,弥补探针特性阻抗过小的不足,作为阻抗的过渡端,起到了防止阻抗突增的作用,从而实现了与波导端更好地匹配,通过减少反射来降低最大场强值,同时过渡腔结构的加入可以提前实现高次模的衰减和消逝,避免高次模引入波导端造成模式混杂以及探针上产生的不必要电流引发的打火现象。

在过渡腔结构下部添加过渡槽,通过改变匹配槽的宽度 b_1 来降低底部电场的反射,从而保证良好的驻波特性。图 5 显示了匹配槽宽度 b_1 对驻波比的影响。

中心频点处的喇叭天线特性阻抗为几百欧姆,而馈电

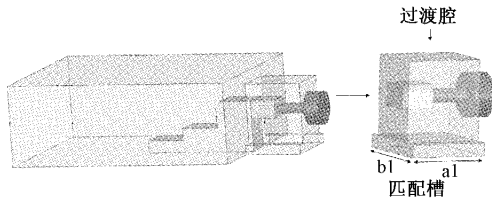


图 4 过渡腔和匹配槽结构

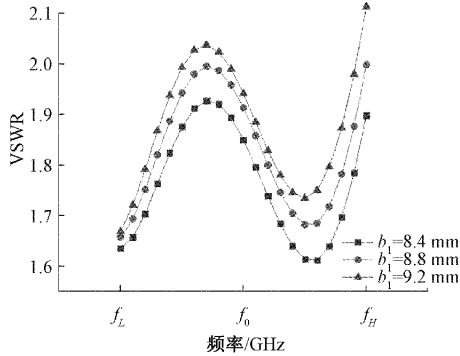


图 5 匹配槽宽度对驻波比影响

的 SMA 连接器为 50Ω ，因此需要一个阶梯波导来实现阻抗变换。本文提出了图 1 所示的三阶阶梯波导变换以实现阻抗匹配，脊波导的初始长度一般为波长的 $1/4$ 。根据脊波导理论可以很好地分析设计阶梯波导，式(1)给出了脊波导的特性阻抗，通过代入参数求得 3 个阶梯的尺寸，在脊宽度一致下，脊波导的特性阻抗取决于脊的高度。这里为了尽可能地实现宽带匹配，采用切比雪夫多项式来拟合脊的高度，经过调整得到最终参数。

$$Z_T = \frac{120\pi}{\left(\frac{a_2}{b_2} + \frac{2C_d}{\epsilon}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2}} \quad (1)$$

式中： a_2 为脊宽度， b_2 为波导高度， λ_c 表示截止波长。

本文提出的同轴波导变换器相较于常规变换器增加了更多的过渡结构，有效地减少了不平滑结构带来的场强突增。对于场强值较大的地方进行电场模拟并进行降场强处理，图 6 显示了对阶梯波导的劈尖处理，最终同轴波导变换器的功率容量得到了大幅提升。

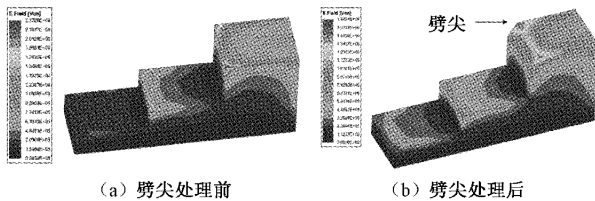


图 6 阶梯波导场强值示意图

1.2 喇叭天线设计

喇叭天线具有功率容量大、结构简单、方便加工等特点。图 7(a)所示的角锥喇叭天线可以有效应用到高功率相控阵天线系统中。为实现工程项目的圆锥宽角扫描设计要求，本文选用图 7(b)中三角形布阵方式作为阵列结构排

布方式，在同样阵面面积下，可比矩形布阵方式节省天线单元数目，对应成本较低。考虑到天线设备工作在 X 波段，天线整体厚度选择 1 mm 以保证耐高温和高强度，确定方位间距 d_x 为 27.5 mm，俯仰间距 d_y 为 19.5 mm。为降低成本和加工一致性，波导结构采用 BJ100 标准波导。设计优化后喇叭宽度 W 为 22.5 mm，喇叭高度 H 为 17 mm。喇叭长度影响天线的阻抗变换和功率容量，喇叭的长度 h 选择为 40 mm。

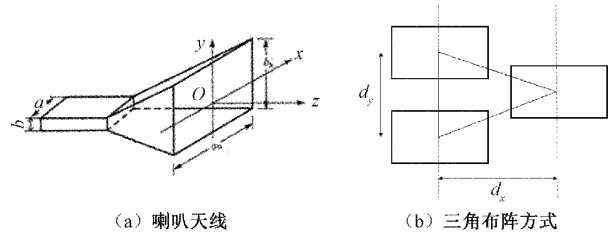


图 7 喇叭天线及三角形布阵方式

为拓宽带宽，在喇叭天线中加入图 8 所示的单脊结构^[27]。单脊结构从阶梯波导开始一直延伸到喇叭口径，相较于一般的加脊结构，本文提出的脊结构伸出口径面，以更好地与空气阻抗进行匹配，同时伸出的部分脊结构可以保证轴向辐射以正向引导电场，同时能较好地避免反向辐射，防止部分电流回流，在工程上提高发射设备的安全性。这对于高功率微波发射结构来说是至关重要的。单脊的伸出长度 $length$ 对驻波的影响关系由图 9 可知，可以看到，在单脊长度为 15 mm 时，天线整体 VSWR 小于 2 的带宽最大，能够将原有带宽扩展 50%。

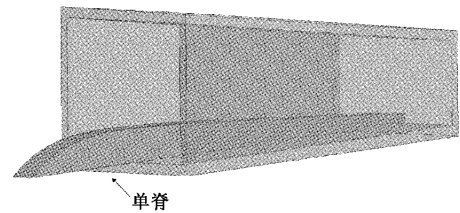


图 8 加脊喇叭天线

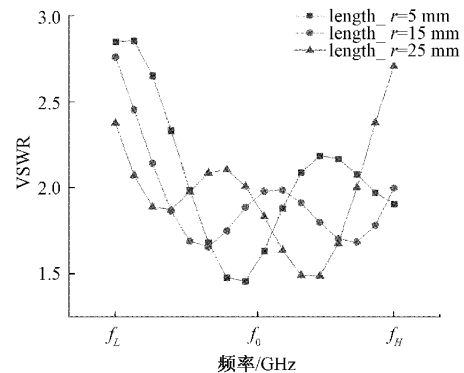


图 9 单脊伸出长度对驻波比影响

单脊结构中最重要的是脊曲线的曲率，这里使用指数型函数来拟合曲线，有式(2)可得。表 2 显示了单脊曲线

渐张曲率对功率容量的影响,经过优化选择 r 为 180。

$$y = C_1 e^{rx} + C_2 \quad (2)$$

式中: r 为脊波导的曲率, C_1 与 C_2 的值可由喇叭天线中的固定两点求得。

表 2 单脊曲率对功率容量影响

r/mm	80	130	180	230
$E_{\text{max}}/(\times 10^6 \text{ V/m})$	1.231	1.254	1.163	1.552 2

通过观察脊波导的电场强度分布图,脊波导台阶的尖端位置场强较高,是影响功率容量的关键因素,再对其进行倒圆角处理。

2 设计仿真结果

2.1 驻波比和功率容量结果

经过以上分析,在有限元仿真软件 HFSS 中建立高功率喇叭天线单元模型如图 10 所示,通过参数扫描及优化,最终设计的模型指标满足了工程需要。图 11 为天线单元在频带内的 VSWR 仿真结果图,可以看到,天线的 VSWR 在频带内小于 2,带宽相较于常规喇叭天线得到了提升,驻波性能良好。图 12 为单元方向图,增益良好,添加单脊结构后导致方向图不对称。图 13 显示天线单元的最大场强值为 $1.163 \times 10^6 \text{ V/m}$,空气的击穿场强为 30 kW/cm ,由式(3)可以计算空气传播条件下的功率容量为 33.24 kW ,而常规喇叭天线单元的功率容量很难超过 10 kW ,可以看到,整体的功率容量提升了 230% ,该设计可以适用于高功率微波天线单元中。在不考虑 T/R 组件的附加增益情况下,对于 7×7 相控阵阵列,由于固态相控阵功率合成的优越性,累加的功率至少可以实现 1.62 MW 的发射功率,相比于常规相控阵来说,该设计有效提升了高功率微波相控阵的威力。

$$P = \left(\frac{E}{E_{\text{max}}}\right)^2 P_{\text{in}} \quad (3)$$

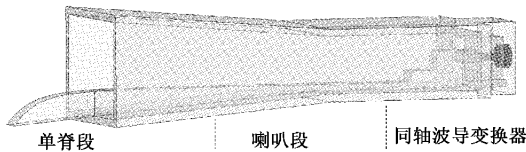


图 10 喇叭天线单元模型

2.2 无限大法仿真阵列结果

本文提出的高功率新型喇叭天线单元除了实现带宽的增加、功率容量的提高之外,还必须满足灵活波束扫描要求,这就需要在设计时尽可能地实现扫描角度的增大。

$$\sqrt{\left(\frac{\lambda}{2d_x}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{2d_y}\right)^2} = 1 + |\sin\theta_{\text{max}}| \quad (4)$$

根据式(4)代入单元间距可以求得理论上相控阵的最大扫描角为 30° ,但考虑实际仿真中天线单元的驻波性能优

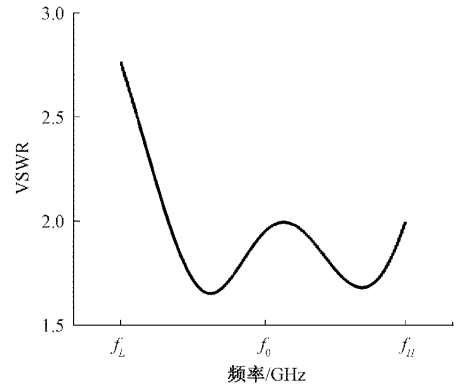


图 11 天线单元 VSWR

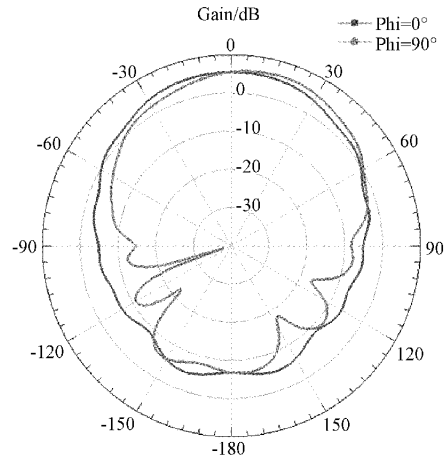


图 12 方向图特性

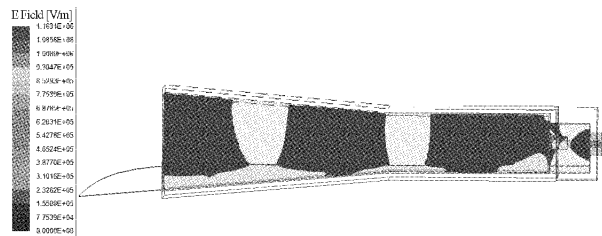


图 13 电场强度分布图

良、单元间实际互耦的差距,需利用无限大法验证能否实现 30° 圆锥扫描。最终,经过仿真计算,得到图 14 的有源驻波

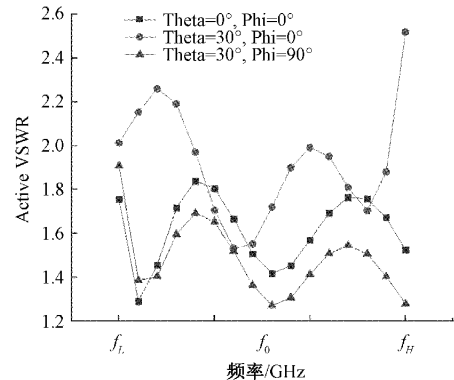


图 14 阵列有源 VSWR

比结果图。在 $\Theta=30^\circ$ 时,中心频点的 VSWR 远小于 2,除了在高频处驻波比较高之外,其他频段内的驻波特性良好,据此说明单元组阵后性能可满足要求。

3 结 论

在理论分析和仿真设计基础上提出一种新型高功率微波有源相控阵天线单元,在常规喇叭天线基础上,改造同轴波导变换器结构提升了功率容量和驻波特性,在同轴探针与阶梯波导之间引入方形金属块实现了阻抗匹配,在波导末端添加过渡腔和匹配槽结构,并在喇叭段加入了单脊结构改变了波导阻抗,单脊伸出口径面减少了反射系数,进一步提升了功率容量。最终单元在频带内 VSWR 小于 2,带宽得到提升到 1.25 GHz,功率容量为 33.24 kW,比常规同轴波导变换器下的喇叭天线功率容量提升了 230%,相控阵阵面可实现 MW 级发射功率,具备高功率微波发射能力。经过验证,相控阵阵面可以实现 $\pm 30^\circ$ 圆锥扫描,该设计可以满足高功率宽角度扫描的需求,具有很好的应用价值。

参考文献

- [1] BARKER R J. High-power microwave sources and technologies[M]. IEEE Xplore, 2001.
- [2] 张丰,王敏,于丽丽,等. 0.2~2.5 GHz 改进型超宽带双脊喇叭天线的设计与实现[J]. 电子测量技术, 2018, 41(20):68-72.
- [3] MISILMANIL H E, HUSSEINI M, KABALAN Y K, et al. Improved vlasov antenna with curved cuts for high power microwaves [C]. IEEE International Conference on High Performance Computing & Simulation, 2013:362-365.
- [4] LIANG Y, ZHANG J, LIU Q, et al. High-power dual-branch helical antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018,17(3):472-475.
- [5] KONG G, LI X, WANG Q, et al. A wideband reconfigurable dual-branch helical reflectarray antenna for high-power microwave applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(2):825-833.
- [6] LIANG Y, ZHANG J, LIU Q, et al. High-power dual-branch helical antenna [J]. IEEE Antennas Wireless Propag, 2018,17(3):472-473.
- [7] GUO L, HUANG W, CHANG C, et al. Studies of a leaky-wave phased array antenna for high-power microwave applications [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2016,44(10):2366-2375.
- [8] YADAV S V, CHITTORA A. A compact high power UWB TEM horn antenna[C]. 2020 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT), Bangalore, 2020.
- [9] Zhang Q, YUAN C, LIU L. A coaxial corrugated dual-band horn feed[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009,8:1357-1359.
- [10] 张沐群. 高功率微波宽带相控阵天线技术研究[D]. 长沙:国防科技大学,2018.
- [11] LIANG T, HUANG W, SHAO H, et al. Design and near field characteristic of high power microwave dual-reflector antenna[C]. 2012 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), Shenzhen, China, 2012.
- [12] 胡琴. 高功率 Vivaldi 天线研究[D]. 成都:电子科技大学,2016.
- [13] 宋长宏,吴群,张文静,等. 一种宽带宽角扫描相控阵天线的设计[J]. 电波科学学报, 2013, 28(6):1127-1132.
- [14] 魏志文,陈虎,陶晓瑛. 一种可折叠的米波超宽带天线阵列设计[J]. 现代雷达, 2017, 39(4):73-76.
- [15] 张辉,慕振成,荣林艳,等. 波导-同轴线的脊型转换器设计与测试[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33(10):49-54.

作者简介

刘嵘,硕士研究生,主要研究方向为高功率微波技术、宽带宽角扫描相控阵天线。

E-mail:liurong2024@163.com