

# 一种缺陷型超表面四波束天线设计

张洪, 刘宁川, 彭宇, 王磊

中原电子集团有限公司研发中心, 湖北 武汉

收稿日期: 2023年10月30日; 录用日期: 2023年11月30日; 发布日期: 2023年12月8日

## 摘要

多波束与波束扫描天线实现大范围通信区域覆盖的同时能减少多径衰落, 提高频谱资源利用率。本文设计一个基于缺陷超表面四波束天线, 以四个不同端口馈电的缝隙耦合天线作为馈源, 在馈源天线上加四个圆形贴片改善波束性能, 最后在其上方加载缺陷超表面, 基于法布里谐振腔原理实现四个不同指向的波束偏转。该天线工作频率是6.76 GHz, 增益为9.12 dB。所设计的天线具有结构简单、剖面低、成本低等优势。基于缺陷超表面的天线既可以实现低剖面、低成本的优势同时又可灵活调控电磁波辐射, 这一构思为多波束通信天线的设计提供了一个新的方法。

## 关键词

超表面, 多波束, 低剖面

# Design of a Defective Metasurface Four-Beam Antenna

Hong Zhang, Ningchuan Liu, Yu Peng, Lei Wang

Zhongyuan Electronics Group R&D Center, Wuhan Hubei

Received: Oct. 30<sup>th</sup>, 2023; accepted: Nov. 30<sup>th</sup>, 2023; published: Dec. 8<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Multi-beam and beam-scanning antennas can reduce multi-path fading and improve the utilization rate of spectrum resources while realizing the coverage of a wide range of communication areas. In this paper, a four-beam antenna based on defect metasurface is designed. Four slot coupled antennas fed from four different ports are used as feeders. Four circular patches are added to the feed antenna to improve the beam performance. Finally, the defect metasurface is loaded on the top of the feed antenna to realize the deflection of four beams with different directions based on the principle of Fabry resonator. The antenna operates at 6.76 GHz and has a gain of 9.12 dB. The designed antenna has the advantages of simple structure, low profile and low cost. The antenna based on the defect metasurface can realize the advantages of low profile, low cost and flexible regulation of electromagnetic radiation. This idea provides a new method for the design of mul-

ti-beam communication antennas.

## Keywords

Metasurface, Multi-Beam, Low Profile

Copyright © 2023 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

随着 5G 网络通信的加速建设与卫星通信高速发展,低成本、低功耗、高可靠、易部署、易集成的多波束与波束扫描天线系统在空、天、地、海多维空间一体化网络通信建设中至关重要[1] [2]。天线的多波束辐射或者波束扫描功能主要是通过相位调制、幅度调制或幅相结合调控实现。透镜天线、反射面天线、相控阵天线、基于超表面的波束赋型天线等通过不同调控手段都能实现天线多波束辐射或者波束扫描[3]。近年来,超表面的提出引起了物理学界和工程界的极大关注与研究[4]。超表面是由亚波长人工结构组成的二维阵列,它可以对电磁波的幅度和相位灵活操控,从而实现天线多波束辐射或波束扫描功能[5]。超表面的出现提供了一种新的波束形成与波束调控方法,有助于推动现代无线通信系统集成化和轻量化发展。目前国内外研究的多波束扫描天线大都以喇叭天线作为馈源,馈源天线与超表面之间距离较远导致天线系统剖面较高[6]。本文采用微带馈源天线和超表面结合既可以实现低剖面、低成本的优势同时又可灵活调控电磁波辐射。本文设计一个工作在 6.76 GHz 的超表面天线,以四个端口馈电的缝隙天线作为馈源,通过去掉馈源缝隙上方的部分贴片超表面单元,实现波束与 Z 轴夹角为  $30^\circ$  的四波束偏转。波束增益为 9.12 dB。

## 2. 缝隙天线与超表面设计

本节设计的谐振腔天线由缝隙天线作为辐射馈源。天线整体结构如图 1 所示,从上至下依次是超表

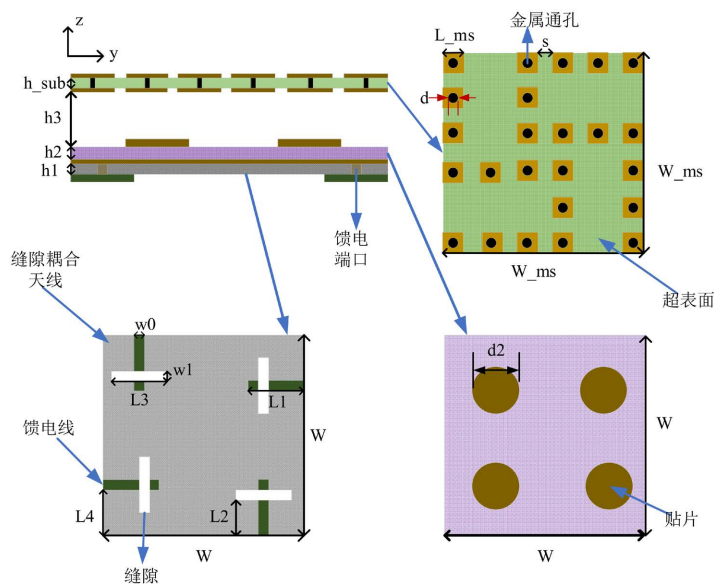


Figure 1. Overall antenna architecture  
图 1. 天线整体架构

面层、圆贴片层、馈源缝隙天线。超表面刻蚀在介电常数为 2.65，厚度为 3 mm 的 F4B 基板上。第二层介质基板是厚度为 1.5 mm 的 F4B，基板上有四个金属圆贴片，用于引导波束往 + Z 轴聚焦辐射，以提高缝隙天线的增益。最下层是微带缝隙天线，天线刻蚀在厚度为 1.5 mm 和介电常数为 4.4 的 FR4 基板上。超表面层与第二层基板之间的空气层为高度  $h_3$  的谐振空气腔，基于谐振腔天线理论，设计合适的空腔高度使反射波与透射波在谐振腔中同相叠加，从而实现波束聚焦与偏转。

缝隙天线结构图如 1 示，FR4 介质基板下方刻蚀四条馈电线，基板上方的地板开四条与馈线垂直的缝隙，电磁波由缝隙辐射。馈线与地板开缝的位置决定辐射性能的好坏，为了使辐射电磁波更好的实现波束向上辐射，在开缝隙上方放置一层介质基板，基板上方刻蚀四个方形贴片，四个大小一致的方形贴片分别对应四个缝隙开口。方形贴片用于引导波束聚焦，提高增益。图 2(a)是加方形贴片的缝隙天线 S 参数仿真结果，谐振频率为 6.8 GHz，阻抗带宽为 6.7~6.9 GHz，带宽较窄。天线四个端口的隔离度基本小于 -25 dB。天线 E、H 面的方向图如图 2(b)所示，天线在 Z 轴正上方辐射，E 面 3 dB 波瓣宽度为 57°，H 面半功率波瓣宽度为 96°，天线增益最大为 6.62 dB。

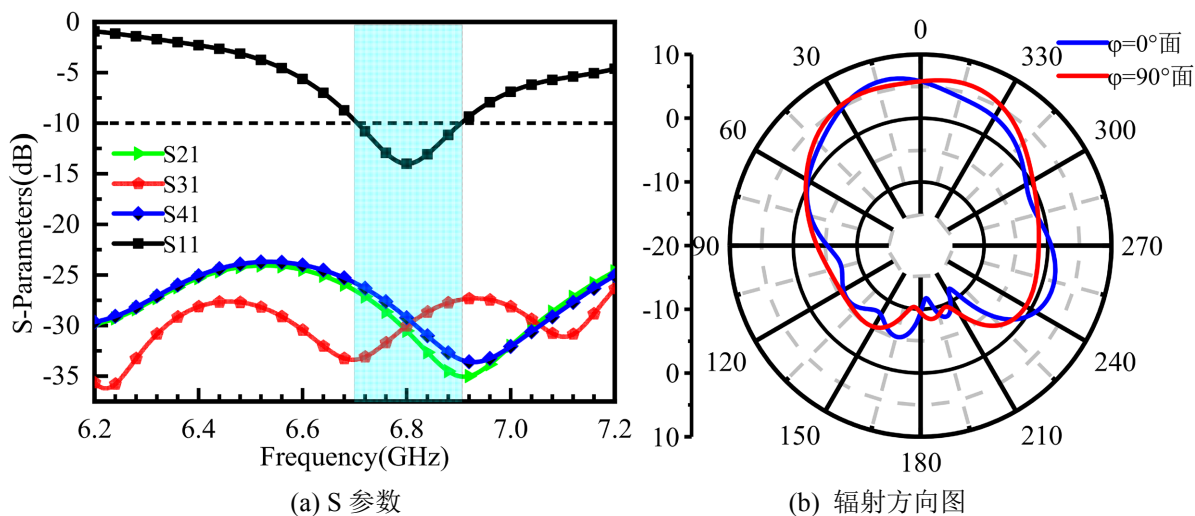
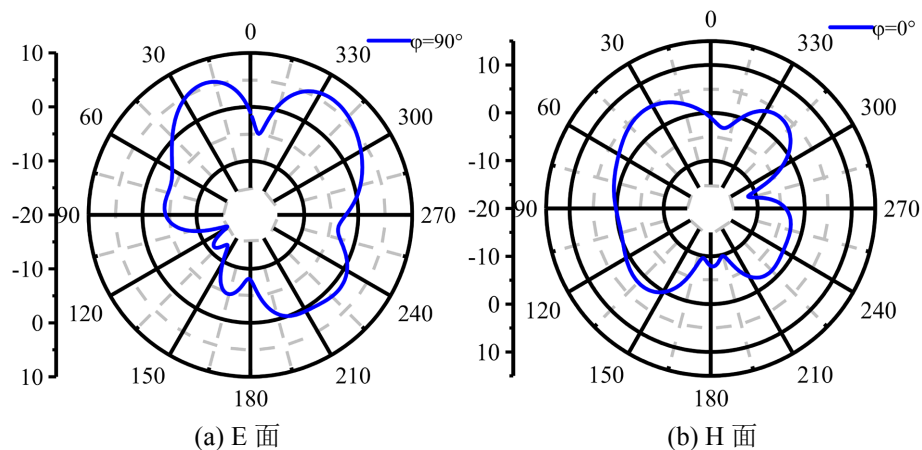


Figure 2. Simulation results of slot fed antenna  
图 2. 缝隙馈源天线仿真结果

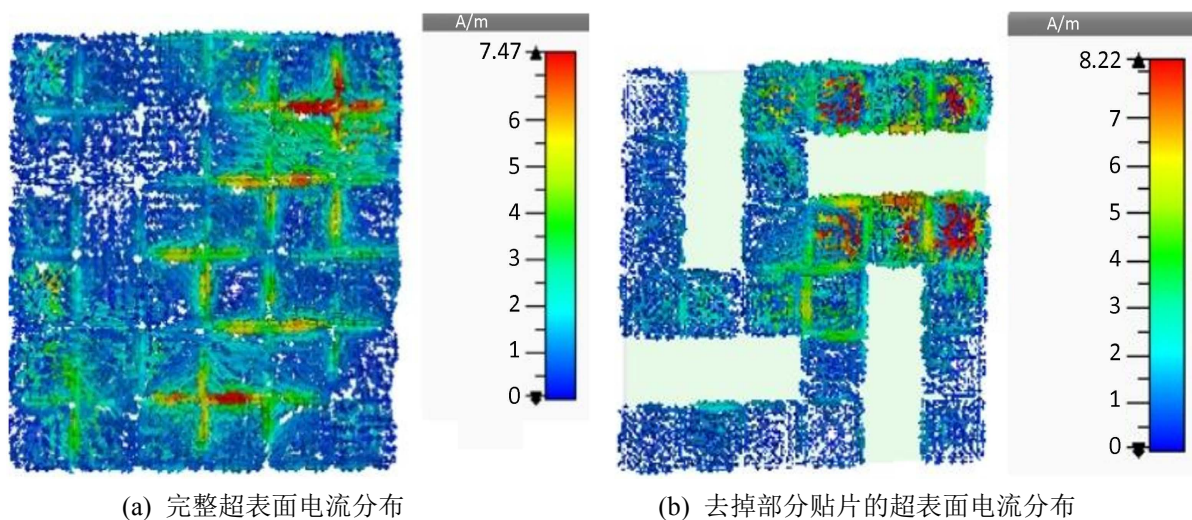
### 3. 超表面天线参数分析与优化

当超表面完整覆盖在馈源天线上方时，以一端口馈电为例，天线方向图如图 3 所示，结果表明，天线波束不集中，旁瓣向周围散射，增益较低。超表面电流分布如图 4。当激励天线一端口时，一端口正上方的超表面电流密集，电场强度大，此外电流分散分布在超表面其他区域，如图(a)所示。当电磁波照射到超表面时出射波旁瓣较多，波束无法实现高增益定向辐射。当去除馈电端口正上方的部分超表面单元之后，电流集中分布在馈电端口正上方附近的超表面区域，其他区域电流强度非常弱，如图 4(b)所示。当电磁波照射到超表面上，副瓣减少，电磁波能量集中辐射，透射波束则会往相位滞后的方向偏转，即辐射波束指向超表面电场强度弱的位置，波束偏转方向如图 5 所示。

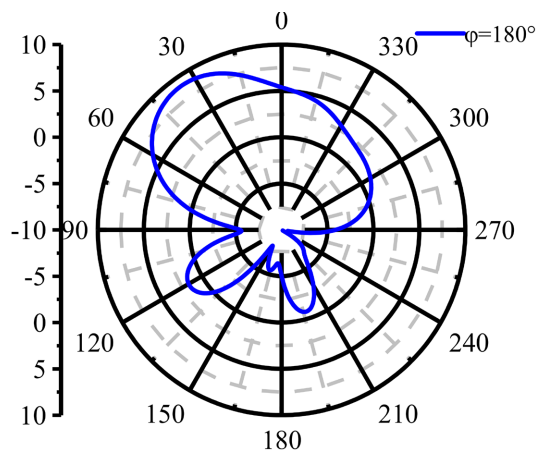
去掉缝隙正上方的部分超表面单元之后，超表面单元之间耦合被削弱，辐射波束的能量更为集中。由图 5 是去掉缝隙上方对应的部分超表面单元之后的天线二维辐射方向图。结果表明，波束辐射指向更为清晰，最大辐射波束指向 $(\varphi, \theta) = (180^\circ, 35^\circ)$ ，最大旁瓣电平为 -7.3 dB，3 dB 波束宽度为 55°，增益提高到 9.19 dB。



**Figure 3.** Two-dimensional direction diagram of the metasurface antenna  
**图 3.** 超表面天线二维方向图



**Figure 4.** Metasurface current distribution  
**图 4.** 超表面电流分布图



**Figure 5.** Two-dimensional direction diagram of metasurface antenna  
**图 5.** 超表面天线二维方向图

超表面与馈源天线之间的高度  $h_3$  是影响波束偏转角度的重要因素。根据谐振腔理论计算出  $h_3 = 5$  mm, 此时, 缝隙天线辐射的电磁波入射到超表面, 一部分的电磁波被超表面反射, 一部分电磁波透过超表面折射到外部空间, 同时设计合适的超表面单元的折射率和透射率, 将使得电磁波在谐振腔中实现透射波和反射波的同相位叠加, 天线可辐射高增益定向波束。不同高度  $h_3$  对波束偏转角度影响如图 6 所示。图中四条虚线从左到右依次代表  $\theta = 21^\circ, 24^\circ, 31^\circ, 35^\circ$ 。结果表明, 谐振腔高度影响辐射波束指向。 $h_3 = 3.5$  mm 时, 最大辐射波束指向  $(\varphi, \theta) = (180^\circ, 21^\circ)$ 。最大旁瓣电平为  $-9.3$  dB, 半功率波束宽度为  $65^\circ$ , 增益是  $9.19$  dB。 $h_3 = 4$  mm 时, 最大辐射波束指向  $(\varphi, \theta) = (180^\circ, 24^\circ)$ , 最大旁瓣电平为  $-9.1$  dB,  $3$  dB 波束宽度为  $66.2^\circ$ , 增益是  $9.09$  dB。 $h_3 = 5$  mm 时, 最大辐射波束指向  $(\varphi, \theta) = (180^\circ, 31^\circ)$ , 最大旁瓣电平为  $-8$  dB, 半功率波束宽度为  $62.7^\circ$ , 增益是  $9.12$  dB。 $h_3 = 6$  mm 时, 最大辐射波束指向  $(\varphi, \theta) = (180^\circ, 35^\circ)$ , 最大旁瓣电平为  $-7.3$  dB, 半功率波束宽度为  $55^\circ$ , 增益是  $9.29$  dB。经过优化, 最终确定  $h_3 = 6$  mm, 此时波束偏转角度最大, 增益最高, 几乎无副瓣出现。

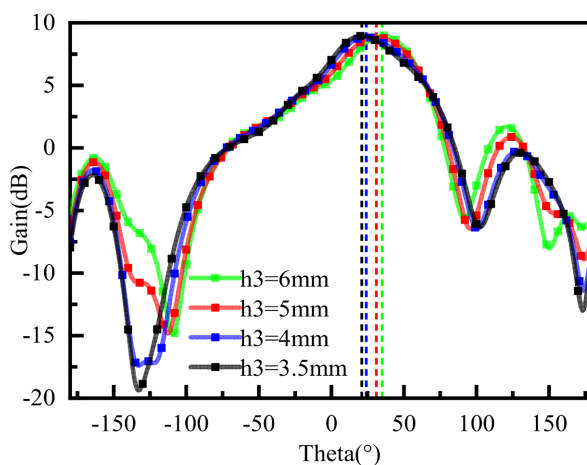


Figure 6. Influence of different  $h_3$  values on antenna pattern  
图 6. 不同高度  $h_3$  取值对天线方向图影响

#### 4. 超表面天线仿真结果

本文所设计的天线工作在  $6.76$  GHz, 天线和超表面联合仿真, S 参数仿真结果如图 7 所示。相比于

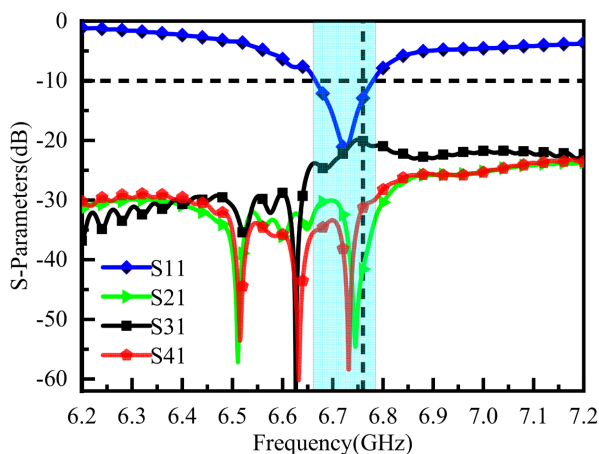


Figure 7. S-parameters of metasurface antenna  
图 7. 超表面天线 S 参数

未加载部分超表面的缝隙天线，阻抗带宽为 6.66~6.78 GHz，频段略有偏移，总体来说，工作频点阻抗匹配，天线辐射效率高，四端口之间隔离度均小于-25 dB，隔离度良好。

接下来依次对其他三个端口进行激励，波束偏转角度与半功率波束宽度如图 8 所示，图(a)、(b)、(c)分别是对二、三、四端口激励时的二维辐射方向图。如图(a)所示，对二端口进行激励，波束指向为 $(\varphi, \theta) = (90^\circ, 35^\circ)$ ，增益为 9.29 dB，半功率波瓣宽度为  $55^\circ$ 。对三端口进行激励，如图(a)所示，波束指向为 $(\varphi, \theta) = (0^\circ, 35^\circ)$ ，增益为 9.19 dB，半功率波瓣宽度为  $55^\circ$ ，对三端口进行激励，如图(c)所示，波束指向为 $(\varphi, \theta) = (270^\circ, 35^\circ)$ ，增益为 9.29 dB，半功率波瓣宽度为  $55^\circ$ 。为了更直观看出波束偏转方向，图 9 给出了天线 3D 辐射方向图，波束偏转角度较大，几乎无副瓣出现。

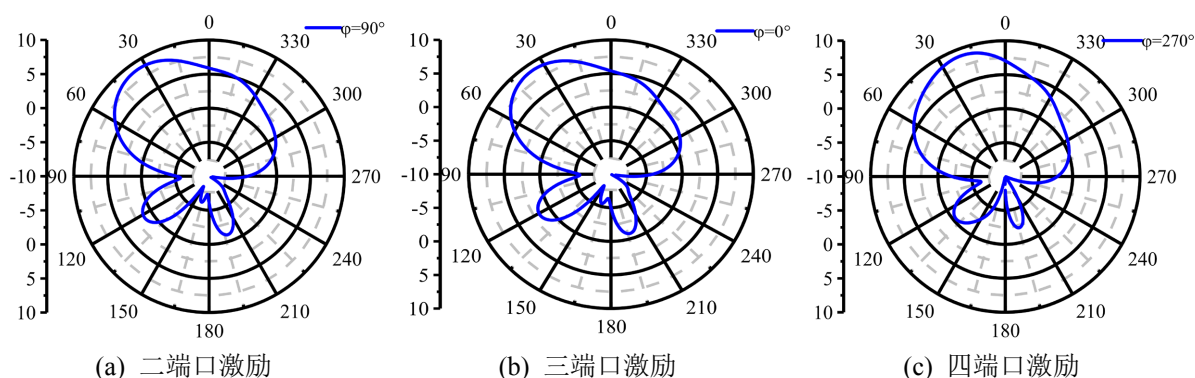


Figure 8. Two-dimensional direction diagram of the metasurface antenna  
图 8. 超表面天线二维方向图

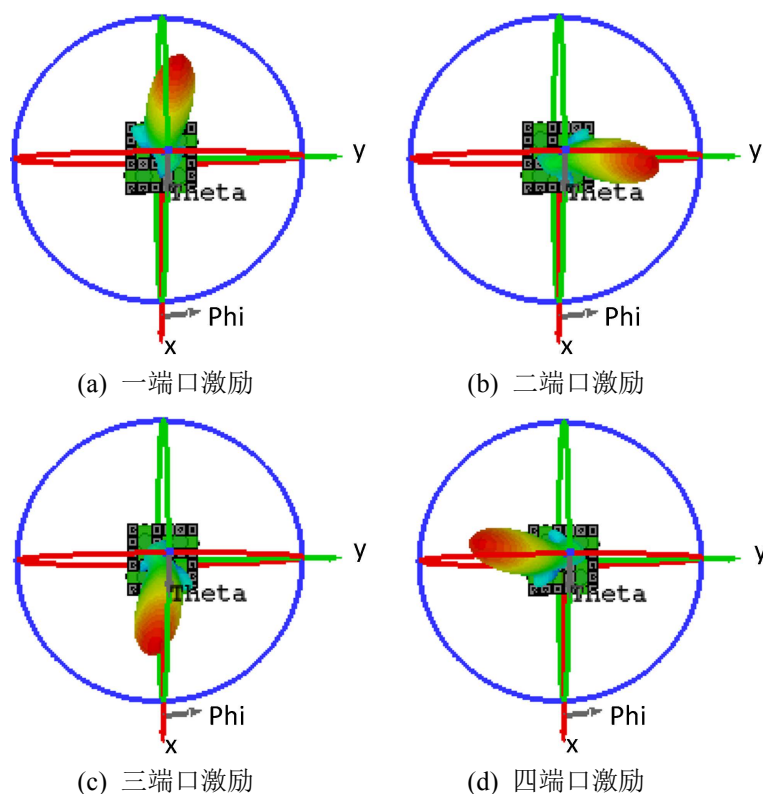


Figure 9. Three-dimensional direction diagram of the metasurface antenna when the four feed ports are stimulated in sequence  
图 9. 依次对四个馈电端口激励时超表面天线的三维方向图

## 5. 结束语

具有大角度波束扫描的高增益、低剖面、低成本的多波束扫描天线是新一代无线通信系统中重要组成部分。本文设计一个基于缺陷超表面四波束天线，以四端口馈电的缝隙天线作为馈源，在超表面上加载缺陷型超表面，分别对四个端口进行激励，实现四个波束的偏转，波束在俯仰角偏转  $35^\circ$ ，四个波束增益均为 9.12 dB。该超表面天线工作频点为 6.76 GHz，超表面距离天线上方  $0.13 \lambda_0$  处。该天线不仅能实现高增益的波束偏转，且制作成本低，架构简单。所设计的天线具有结构简单、剖面低、成本低等优势。基于缺陷超表面的天线既可以实现低剖面、低成本的优势同时又可灵活调控电磁波辐射，这一构思为多波束通信天线的设计提供了一个新的方法。

## 参考文献

- [1] Wei, H., Zhi, H.J., Chao, Y., *et al.* (2022) Multibeam Antenna Technologies for 5G Wireless Communications. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, **65**, 6231-6249. <https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2712819>
- [2] Lei, L., Wam, J. and Gong, Q. (2022) Multibeam Antennas with Reflector for High Throughput Satellite Applications. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, **37**, 34-46. <https://doi.org/10.1109/MAES.2021.3121654>
- [3] Darvazehban, A., Manoochchri, O., Salari, M.A., *et al.* (2020) Ultra-Wideband Scanning Antenna Array with Rotman Lens. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **65**, 3435-3442. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2666810>
- [4] Bantavis, P.I., Kolitsidas, C.I., Empliouk, T., *et al.* (2019) A Cost-Effective Wideband Switched Beam Antenna System for a Small Cell Base Station. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **66**, 6851-6861. <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2874494>
- [5] Manoochchri, O., Darvazehban, A., Salari, M.A., *et al.* (2022) A Parallel Plate Ultrawideband Multibeam Microwave Lens Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **66**, 4878-4883. <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2845548>
- [6] Liu, S., Jiang, K., Xu, G., *et al.* (2019) A Dual-Band Shared Aperture Antenna Array in Ku/Ka-Bands for Beam Scanning Applications. *IEEE Access*, **7**, 78794-78802. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2922647>