# 基于MEMS技术的太赫兹方向图可重构天线

#### 张 博\*,姜照昶

中国电子科技集团公司第五十四研究所,北京研发中心,河北 石家庄

收稿日期: 2025年5月26日; 录用日期: 2025年6月19日; 发布日期: 2025年6月25日

### 摘要

MEMS技术是一种集成微型机械系统和电子系统的技术,可以在微小尺寸、快速响应条件下执行机械功 能。为了满足太赫兹通信系统中的多角度波束转向需求,本文设计了一种基于MEMS技术的多状态方向 图可重构天线,工作在中心频率为340 GHz,可以实现八种状态的波束扫描。该天线由对数螺旋天线和 一组射频微机电系统(RF-MEMS)开关组成,天线结构采用两层石英玻璃衬底,整体尺寸为0.68λ×0.68λ× 0.2λ,工作带宽达到15%。该天线可以分别在垂直倾角θ=32°、50°两个平面进行90°步进的方位面波束 调控,在两个俯仰面上进行宽角波束扫描。

#### 关键词

太赫兹,方向图可重构天线,RF-MEMS开关

# **Terahertz Pattern Reconfigurable Antenna Based on MEMS Technology**

#### **Bo Zhang\*, Zhaochang Jiang**

Beijing Research and Development Center, The 54th Research Institute of Electronics Technology Group Corporation (CETC 54), Shijiazhuang Hebei

Received: May 26<sup>th</sup>, 2025; accepted: Jun. 19<sup>th</sup>, 2025; published: Jun. 25<sup>th</sup>, 2025

#### Abstract

MEMS technology is a technology that integrates micro-mechanical systems and electronic systems to perform mechanical functions at tiny sizes, with fast response conditions. In order to meet the requirement of multi-angle beam steering in terahertz communication system, a multi-state pattern reconfigurable antenna based on MEMS technology is designed in this paper. It works at the center frequency of 340 GHz and can realize eight beam scanning states. The antenna is composed of logarithmic spiral

\*通讯作者。

antenna units and a set of RF-MEMS switches. The antenna structure adopts two layers of quartz glass substrate, the overall size is  $0.68\lambda \times 0.68\lambda \times 0.2\lambda$ , and the working bandwidth reaches 15%. The antenna can config the azimuth plane beam with 90° resolution in two planes with vertical inclination  $\theta = 32°$  and 50° respectively, and scan the wide-angle beam in two pitch planes.

### **Keywords**

Terahertz, Pattern Reconfigurable Antenna, RF-MEMS Switches

Copyright © 2025 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/

CC O Open Access

# 1. 引言

随着通信技术的不断发展,太赫兹频段作为一种新兴的无线通信频段,展现出了广阔的应用前景。 普遍认为,太赫兹波段的频率范围在 0.1 THz 到 10 THz 之间,具有较高的数据传输速率和较好的穿透能 力,适用于高速通信、成像和传感等领域[1]。近些年,可重构技术取得了重大进展,根据天线可重构的 性能对象,主要分为频率可重构天线、极化可重构天线和方向图可重构天线[2]。方向图可重构天线可以 在单个天线上实现波束扫描功能,通过电子或光学器件的开关效应改变辐射贴片的等效形状,或者馈电 网络的结构,从而改变辐射波束指向[3]。为适应民用、军用卫星通信、雷达探测的不同部署环境射频前 端应用,波束扫描天线具有重要的研究价值,太赫兹电磁波可以穿透大气层中高速飞行器表面的等离子 鞘的特性使其在星间,星地通信中具有广泛的应用需求。而对于太赫兹波段,受到微纳加工技术的发展 限制,目前尚不支持小尺寸大规模集成天线阵列及 T/R 组件的集成,方向图可重构天线作为替代的解决 方案,结合先进微纳技术实现高指向性方向图可重构天线必将成为未来研究者们的关注方向。

目前针对方向图可重构天线的研究主要针对毫米波波段,通过改变开关辐射体结构、改变馈电网络 构型、寄生单元等方法调控波束。文献[4]中,采用对数螺旋天线实现波束调控,实现了在垂直倾角  $\theta$  = 49°的平面上进行四种波束转向状态; 文献[5]中利用石墨烯作为开关的八木微带天线在方位面(θ = 90°)实 现了波束转向; 文献[6]中的平面天线应用二极管开关可以在一种全向模式和两种方位面单向模式之间切 换; 文献[7]提出了一种低轮廓可切换三种状态的方向图可重构天线; 文献[8]中将四个端射天线单元与二 极管开关结合,可以使波束在 45°仰角面切换四种状态; 文献[9]将单极子天线与 Vivaldi 天线结合,可以 实现全向和单向模式两种状态的切换; 文献[10]调控寄生单元和中心贴片的连接状态, 实现了四个端射方 向的波束转向; 文献[11]提出的天线可以同时进行频率、方向图重构, 能在俯仰面上进行多模式切换。在 太赫兹频段,方向图可重构天线的研究聚焦于石墨烯技术和 MEMS 开关技术在天线中的应用。文献[12] 报道了一种基于石墨烯的频率、方向图可重构天线,天线可以在 1~2 THz 下工作,调节天线臂上石墨烯 的化学势,可以调节天线的工作频率和方向图。文献[13]报道了一种基于石墨烯的多波束天线设计思想, 工作于 1.21 THz,在六种端射波束模式中切换。文献[14]报道了一种基于 MEMS 开关的太赫兹风车状天 线,通过四个 MEMS 开关实现在方位面四个圆极化倾斜波束(θ=30°)的切换,工作在 340 GHz~350 GHz。 目前对方向图可重构天线进行的研究通常针对单仰角面的波束转向,无法在多仰角面进行波束扫描。且 在太赫兹频段,由于量子隧穿效应的高频限制,隧道半导体开关具有损耗过大(一般在5 dB 以上) [15]、 隔离度不理想等状况;石墨烯、液晶制备开关一致性差,易受环境影响;而机械切换的射频 MEMS 开关 在太赫兹波段射频性能表现依旧优异,可以实现1Db~2dB插入损耗。因此,射频微机电系统(RF-MEMS) 开关成为了一种可行的波束调控方案[16]。

本文设计了一种基于 RF-MEMS 开关的太赫兹方向图可重构天线。通过选择不同的输入端口和开关 配置,可以实现八种波束转向状态,覆盖两个仰角平面。

#### 2. 天线结构设计

螺旋天线是一种宽带的边射圆极化天线[17],可以应用在高仰角辐射应用背景。对数螺旋天线作为一 种新型的天线设计,在通信和雷达系统中具有广泛的应用前景。其独特的方向图特性使得其在信号覆盖 和接收方面具有显著的优势。通过调整天线的几何参数和材料特性,可以实现天线方向图的灵活重构, 从而适应不同的通信需求和环境条件。

在实际应用中,天线设计需要考虑到诸多因素,包括工作带宽、辐射效率、波束指向性等。同时,天 线的制造工艺和成本也是需要重点考虑的问题之一。随着通信技术的不断发展和应用需求的不断增加, 对数螺旋天线作为一种新型天线设计形式,将在未来的通信系统中扮演越来越重要的角色。

当螺旋天线起始位置在螺旋正中心位置时,波束指向正上方。若螺旋起始中心偏离正中心,波束会倾斜。根据这种特性,本文提出基于对数螺旋天线的方向图可重构天线。天线衬底为两层介电常数  $\varepsilon_r = 3.78$ ,损耗角正切 tan  $\delta = 0.0008$ 的石英玻璃基板组成,如图 1 所示。







Figure 2. Schematic diagram of the top layer antenna structure 图 2. 顶层天线结构示意图

天线结构包括层叠设置两个介质层,顶层上表面设有天线金属层,底层下表面设有底层馈电结构, 两个介质层之间设有金属层;该金属层上有四个阵列分布的圆形孔洞,通过圆形孔洞的金属柱上方与天 线金属层连接,下方连接底层馈电结构。底层馈电结构包括四个微带线转类同轴结构,在底层表面中心 旋转对称,通过金属微带线连接四个输入端口。

图 2 描绘了顶层螺旋天线的结构。天线的螺旋臂结构满足式(1) [18]:

$$R = K e^{F\beta} \tag{1}$$

其中, *R* 是螺旋半径, β 是螺旋起始位置与所求位置的夹角,其余是确定数值,在表1中给出。顶层天线 包括四个渐变螺旋臂天线单元,螺旋臂的凹侧均朝向中心,四个天线单元中心旋转对称分布,每一天线 单元均由直臂和从内端到外端宽度渐变的螺旋臂组合而成,直臂的一端连接一金属圆盘。RF-MEMS 开关 组合设置在顶层天线结构的正中心,配置结构如图3 所示,其为八个悬臂梁开关 S1~S8 的组合。



图 3. RF-MEMS 开关组结构示意图



图 4. 悬臂梁开关结构示意图

**图** 4 为开关组合中悬臂梁开关的结构,图示状态为开关的初始状态,此为断开状态。当给悬臂梁和 位于悬臂梁正下方的电极分别施加零电势和驱动电压时,二者间产生静电力,静电力将悬臂梁拉下,则 开关导通,为了减小整个开关组合的插入损耗,四个中心开关 S5~S8 由金属圆形贴片连接。天线工作时, 先从底层的四个输入端口选择一个进行信号输入,然后选择一种 RF-MEMS 开关组合的配置方式。通过 选择不同的输入端口和 RF-MEMS 开关配置,可以改变天线的电流路径,从而改变辐射方向,可以实 现特定方向的波束倾斜;经验证,通过采用不同的输入端口和开关状态的组合,可实现八种状态方向 图重构功能,在高低仰角面均可以实现全向波束扫描。该方向图可重构天线实现的八个状态的波束调 控,最大增益波束指向分别为 φ = 60°、150°、240°、330°; θ = 32°、50°。天线波束指向与配置的对应关 系如表 1 所示。

状态	开关配置	端口配置	最大波束方向
1	全部断开	端口 1	$\theta = 50^\circ,  \varphi = 60^\circ$
2	全部断开	端口 2	$\theta = 50^\circ,  \varphi = 150^\circ$
3	全部断开	端口 3	$\theta = 50^\circ,  \varphi = 240^\circ$
4	全部断开	端口 4	$\theta = 50^\circ,  \varphi = 330^\circ$
5	S1、S3、S5、S8 导通	端口 1	$\theta = 32^\circ,  \varphi = 60^\circ$
6	S2、S4、S6、S7 导通	端口 2	$\theta = 32^\circ,  \varphi = 150^\circ$
7	S1、S3、S5、S8 导通	端口 3	$\theta = 32^\circ,  \varphi = 240^\circ$
8	S2、S4、S6、S7 导通	端口 4	$\theta = 32^\circ,  \varphi = 330^\circ$

 Table 1. Mapping between antenna operating status and port and switch configurations

 表 1. 天线工作状态与端口、开关配置对应关系

天线状态 4 在一个周期内的合成电场矢量图如图 5 所示,T 为工作频率 340 GHz 下的一个信号周期。 天线上表面的电流走向随时间变化,在天线上方的自由空间,电场矢量沿逆时针方向转动,在空间传播 过程中,电场矢量末端向右旋转,故形成右旋圆极化波。所设计的天线状态 1~4 的射频开关均为关断状态,区别在于输入端口不同,电磁波极化方式均为右旋圆极化。



Figure 5. Direction of the resultant electric field on the surface of the antenna state 4 图 5. 状态 4 天线上表面合成电场方向

状态 5~8 是通过 RF-MEMS 开关将相对的两个螺旋天线连接到一起,使用一个端口馈电。端口给一个螺旋天线馈电时,产生右旋圆极化波,当该端口同时给相对的螺旋天线馈电时,由于输入端口起始馈电相位相同,相对的螺旋天线产生左旋圆极化波。

天线产生的右旋圆极化波与左旋圆极化波相互正交,右旋圆极化波垂直方向电场的相位超前水平方 向电场 90°,左旋圆极化波垂直方向电场的相位滞后水平方向电场 90°,二者可以合成单方向的电场,即 线极化波。又由于圆极化波合成改变了波束指向,垂直倾角 θ 相对于状态 1~4 减小到 32°。顶层的 RF-MEMS 开关可以通过不同组合实现波束指向不同的状态 5~8,极化方式为线极化。

表 2 为天线的结构参数。

参数	数值	参数	数值				
а	18 µm	b	890 µm				
c	$108\mu\mathrm{m}$	d	$10\mu{ m m}$				
e	30 µm	f	33 µm				
К	160	F	0.15				
H1	150 µm	H2	$50\mu\mathrm{m}$				

# Table 2. Antenna structure parameter 表 2. 天线结构参数

## 3. 天线仿真设计结果

应用表2的结构参数在ANSYS HFSS 软件中对该天线进行仿真,通过控制输入端口激励和 RF-MEMS 的结构状态来模拟方向图可重构天线状态1~8,得到仿真结果。



Figure 6. Axis ratio and return loss of the pattern reconfigurable antenna 图 6. 方向图可重构天线的轴比与回波损耗

方向图可重构天线的仿真反射系数和状态 1~4 在增益最大辐射方向的轴比曲线,如图 6 所示。在 319 GHz~388 GHz 频段,方向图可重构天线的 S11 参数低于-10 dB。在 335 GHz~390 GHz 时,状态 1~4 的 轴比低于 3 dB。由于方向图可重构天线的状态 1~4 的极化方式均为右旋圆极化,所以工作时应同时考虑回波损耗和轴比特性。状态 1~8 的共同工作频率为 335 GHz~388 GHz,工作带宽约 15%,该天线可以应用在中心工作频率 340 GHz 的太赫兹频段。

图 7 为状态 1~4 最大波束方向轴频比的模拟结果。直臂长度 f 的取值是影响轴向比的关键因素。图 中为 f = 13 um、23 um、33 um 时的轴比。发现 f 越大,轴比 < 3 dB 的带宽越大。由于 RF-MEMS 开关 的存在, f 有长度限制,取 f = 33um。在 335 GHz~390 GHz 时,轴比低于 3 dB。



**Figure 7.** Simulation results of the maximum beam direction axis ratio for states 1~4 图 7. 状态 1~4 最大波束方向轴比的模拟结果





图 8 为 340 GHz 时天线在  $\varphi = 60^{\circ}$ 平面的辐射增益方向图。由于天线的对称结构,图中只描绘了状态 1 和状态 4 的增益方向图,在俯仰面上的其他状态与这两种状态的波束增益相同。在最大增益波束方向 上,状态 1 和状态 5 的共面极化增益都比交叉极化增益大 15 dB 以上,且两种状态的最大波束分别指向 垂直倾角  $\theta = 32^{\circ}$ 和  $\theta = 50^{\circ}$ 。



**Figure 9.** Gain of the antenna states  $1 \sim 4$  at the pitch angle  $\theta = 50^{\circ}$ 图 9. 天线状态  $1 \sim 4$  在俯仰角  $\theta = 50^{\circ}$ 时的增益

图 9 为天线状态 1~4 在垂直倾斜角度  $\theta$  = 50°平面的增益辐射方向图,工作频率为 340 GHz。图中验

证了天线的波束转向功能。状态 1~4 最大增益波束指向分别为 φ=60°、150°、240°、330°。最大增益为 7 dB, 半功率波束宽度大于 80°, 极化方式为右旋圆极化。



**Figure 10.** Gain of antenna states 5~8 at the pitch angle  $\theta = 32^{\circ}$ 图 10. 天线状态 5~8 在俯仰角  $\theta = 32^{\circ}$ 时的增益

图 10 描绘了天线状态 5~8 在 340 GHz, 在垂直倾斜角度 θ=32°平面的增益辐射方向图。与状态 1~4 相同,状态 5~8 可以实现在 θ = 32°分辨率为 90°的波束扫描,最大增益波束指向分别为 φ = 60°、150°、 240°、330°。主瓣最大增益为 5.1 dB,半功率波束宽度大于 60°,极化方式为线极化。比较相对的两个螺 旋天线共同工作的状态 5~8,由一个螺旋天线单独工作的状态 1~4 的增益方向图显示了更高的前后比, 远旁瓣增益更低,体现出了更高的主瓣增益特性。

综上所述,文章实现了一种太赫兹波段的多模式宽角可重构天线,可以在两个垂直倾角平面(*θ*=32°, *θ*=50°)宽角波束扫描,其与目前公开的太赫兹方向图可重构天线对比如表 3 所示。

文献	工作模式	极化方式	工作频率			
[12]	2 个	线极化	1 THz~2 THz			
[13]	6 个	线极化	1.21 THz			
[14]	4 个	圆极化	340 GHz~350 GHz			
本文	8个	圆极化、线极化	340 GHz			

Table	3. Terahertz pattern reconfigurable antenna comparisor	ı
表 3.	太赫兹方向图可重构天线对比	

### 4. 结论

文章介绍了一种基于射频微机电系统(RF-MEMS)开关的太赫兹波段方向图可重构天线的设计和仿真结果。所设计天线的目标是增加天线方向图的可重构状态,并扩大波束的覆盖角度。天线结合了四个对

数螺旋天线单元和一个 RF-MEMS 开关组,通过开关组配置改变天线电流走向实现方向图重构。天线工 作频率范围为 335 GHz~388 GHz,工作带宽约 15%,能够实现八个方向的波束转向,可以在垂直倾角为 50°和 32°的两个平面进行 90°分辨率的波束扫描。该天线可应用于中心频率为 340 GHz 的太赫兹通信系 统的射频前端,适应多种部署情况和波束扫描需求,提高太赫兹通信系统的性能。

# 参考文献

- He, Y., Chen, Y., Zhang, L., Wong, S. and Chen, Z.N. (2020) An Overview of Terahertz Antennas. *China Communications*, 17, 124-165. <u>https://doi.org/10.23919/j.cc.2020.07.011</u>
- [2] 王安国, 王鹏, 刘楠, 等. 基于分形概念的方向图可重构蝶形天线设计[J]. 电波科学学报, 2010(3): 603-607.
- [3] 张乃柏, 王子莱, 黄建明, 等. 一种太赫兹波段方向图可重构天线[P]. 中国专利, CN115207619B. 2023-04-28.
- [4] Zhou, H., Pal, A., Mehta, A., Mirshekar-Syahkal, D. and Nakano, H. (2018) A Four-Arm Circularly Polarized High-Gain High-Tilt Beam Curl Antenna for Beam Steering Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 17, 1034-1038. <u>https://doi.org/10.1109/lawp.2018.2830121</u>
- [5] Wu, Y., Qu, M., Jiao, L., et al. (2016) Graphene-Based Yagi-Uda Antenna with Reconfigurable Radiation Patterns. AIP Advances, 6, Article ID: 065308.
- [6] Zhao, S., Wang, Z. and Dong, Y. (2022) A Planar Pattern-Reconfigurable Antenna with Stable Radiation Performance. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 21, 784-788. <u>https://doi.org/10.1109/lawp.2022.3146599</u>
- [7] Wang, Z., Liu, S. and Dong, Y. (2022) Compact Wideband Pattern Reconfigurable Antennas Inspired by End-Fire Structure for 5G Vehicular Communication. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 71, 4655-4664. https://doi.org/10.1109/tvt.2022.3152354
- [8] Liu, Q., Geng, Z., Zhao, R., Li, S., Yao, Z. and Zong, W. (2022) A Wideband Planar Pattern Reconfigurable Antenna for IEEE 802.11ac WLAN Applications. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 32, e23323. <u>https://doi.org/10.1002/mmce.23323</u>
- [9] Yuan, W., Huang, J., Zhang, X., Cui, K., Wu, W. and Yuan, N. (2023) Wideband Pattern-Reconfigurable Antenna with Switchable Monopole and Vivaldi Modes. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 22, 199-203. https://doi.org/10.1109/lawp.2022.3207199
- [10] Li, X., Tao, T., Zhu, B., Lei, J., Gao, Y. and Yang, D. (2022) A Pattern Reconfigurable Antenna Applied for Automobile 5G Communication. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 32, e23383. <u>https://doi.org/10.1002/mmce.23383</u>
- [11] Ullah, S., Elfergani, I., Ahmad, I., Din, I.U., Ullah, S., Rehman Khan, W.U., et al. (2022) A Compact Frequency and Radiation Reconfigurable Antenna for 5G and Multi-Standard Sub-6 GHz Wireless Applications. Wireless Communications and Mobile Computing, 2022, 1-12. <u>https://doi.org/10.1155/2022/4658082</u>
- [12] Zhang, X., Ruan, C., Dai, J. and Haq, T.U. (2018) Frequency and Radiation Pattern Reconfigurable Graphene Square Spiral Antenna at Terahertz Band. 2018 IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), Auckland, 5-8 August 2018, 1-2. <u>https://doi.org/10.1109/apcap.2018.8538185</u>
- [13] Luo, Y., Zeng, Q., Yan, X., Wu, Y., Lu, Q., Zheng, C., et al. (2019) Graphene-Based Multi-Beam Reconfigurable THZ Antennas. IEEE Access, 7, 30802-30808. <u>https://doi.org/10.1109/access.2019.2903135</u>
- [14] Yang, G., Zhang, N., Song, R., Cui, G., Liu, N. and Liu, J. (2022) Terahertz Windmill-Shaped Circularly Polarized Pattern Reconfigurable Antenna with MEMS Switches. 2022 IEEE 9th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications (MAPE), Chengdu, 26-29 August 2022, 1-5. https://doi.org/10.1109/mape53743.2022.9935165
- [15] Feng, Y. and Barker, N.S. (2017) High Performance 500 750 GHz RF MEMS Switch. 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), Honololu, 4-9 June 2017, 1095-1097. <u>https://doi.org/10.1109/mwsym.2017.8058786</u>
- [16] 王安国, 张佳杰, 王鹏. 可重构天线的研究现状与发展趋势[J]. 电波科学学报, 2008, 23(5): 997-1002.
- Kaiser, J. (1960) The Archimedean Two-Wire Spiral Antenna. *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, 8, 312-323. <u>https://doi.org/10.1109/tap.1960.1144840</u>
- [18] Zhou, H., Pal, A., Mehta, A., Nakano, H., Modigliana, A., Arampatzis, T., et al. (2018) Reconfigurable Phased Array Antenna Consisting of High-Gain High-Tilt Circularly Polarized Four-Arm Curl Elements for Near Horizon Scanning Satellite Applications. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 17, 2324-2328. https://doi.org/10.1109/lawp.2018.2873898