

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.240234.

无线光通信技术

方婷,段晓峰,黄永清,等. 应用于光子辅助波束转向芯片的漏波天线阵列[J]. 光通信研究,2026(4):251-256.

Fang T, Duan X F, Huang Y Q, et al. Leaky-Wave Antenna Arrays Applied to A Photon-Assisted Beam Steering Chips[J]. Study on Optical Communications,2026(4):251-256.

应用于光子辅助波束转向芯片的漏波天线阵列

方婷,段晓峰,黄永清,刘凯

(北京邮电大学 信息光子学与光通信国家重点实验室,北京 100876)

摘要:【目的】未来第六代移动通信技术(6G)无线通信系统的目标是使峰值数据速率高达太比特每秒,并将延迟降低到亚毫秒级。然而太赫兹(THz)通信自由空间路径损耗大,绕射和衍射能力弱,覆盖范围相对受限。为了克服相对较高的THz自由空间路径损耗以支持用户移动性和为多个用户服务,THz波束转向技术必不可少。【方法】文章设计了一种在磷化铟衬底上,单片集成波束形成网络(BFN)的3个微带型周期性漏波天线阵列,目的是应用于光子辅助二维THz波束转向芯片。【结果】文章设计的漏波天线单元采用镜像非对称结构,抑制了开放阻带效应。单个漏波天线由20个单元结构级联而成,其在230~330 GHz工作频率范围内具有-55~50°的连续波束扫描能力。单片集成2×3相干辐射周期性结构BFN的3个漏波天线阵列的芯片波束仰角总扫描范围为105°,当延迟差为1.79 ps时,方位角总扫描范围为58°。【结论】将3个微带型周期性漏波天线阵列与单层2×3相干辐射周期性结构波束集成形成网络单片芯片,芯片具有二维波束转向能力,适用于光子辅助二维THz波束转向应用。

关键词:太赫兹;漏波天线;波束形成网络;波束转向

中图分类号:TN822 **文献标志码:**A

Leaky-Wave Antenna Arrays Applied to A Photon-Assisted Beam Steering Chips

FANG Ting, DUAN Xiaofeng, HUANG Yongqing, LIU Kai

(State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communication, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: 【Objective】The goal of the future 6th Generation Mobile Communication Technology (6G) wireless communication system is to achieve a peak data rate of up to terabits per second and reduce the delay to sub-millisecond level. However, the free space path loss of Terahertz (THz) communication is large, the diffraction and diffraction capabilities are weak, and the coverage is relatively limited. In order to deal with the large space path loss to support user mobility and serve multiple users, THz beam steering technology is essential. 【Methods】In this paper, three microstrip periodic leaky-wave antenna arrays with monolithic integrated Beamforming Network (BFN) on indium phosphide substrate are designed. The purpose is to utilize these designs in photon-assisted two-dimensional terahertz beam steering chips. 【Results】The designed leaky-wave antenna units employ a mirror-asymmetric structure to suppress the open stopband effect. A single leaky-wave antenna is cascaded by 20 unit structures. It has a continuous beam scanning capability of -55~50° in the operating frequency range of 230~330 GHz. For the chip integrating three leaky-wave antenna arrays with a 2×3 coherently radiating periodic structures BFN, the total beam elevation scanning range reaches 105°, while the total azimuth scanning range attains 58° at a delay difference of 1.79 ps. 【Conclusion】The chip integrates three microstrip periodic leaky-wave antenna arrays with a single-layer 2×3 coherent radiation periodic structures beamforming network, enabling two-dimensional beam steering and making it well-suited for photon-assisted THz beam steering applications.

Key words: THz; leaky-wave antenna; BFN; beam steering

0 引言

随着光芯片的发展愈发成熟,光子辅助太赫兹(Terahertz, THz)技术成为近年来实现第六代移动通信技术(6th Generation Mobile Communication Technology, 6G)超高速THz无线通信的新兴技术路线^[1-3]。为了克服相对较高的THz自由空间路径损耗以支持用户移动性和为多个用户服务,THz波

束转向技术必不可少。光子辅助THz波束转向,主要是使用复杂的光学移相器^[4]或实时延迟馈线^[5]。文献[6]提出了一种仅使用两个调谐元件的光子辅助二维(2-Dimensional, 2D)THz波束转向芯片。

在此研究基础上,本文研究了基于具有波束形成网络(Beamforming Network, BFN)的THz漏波天线(Leaky-Wave Antenna, LWA)阵列,在230~330 GHz工作频率范围内可实现波束的2D转向功

收稿日期:2024-11-19; 修回日期:2024-12-16; 纸质出版日期:2026-08-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62474023)

作者简介:方婷(1999—),女,四川内江人。硕士,主要研究方向为太赫兹天线。

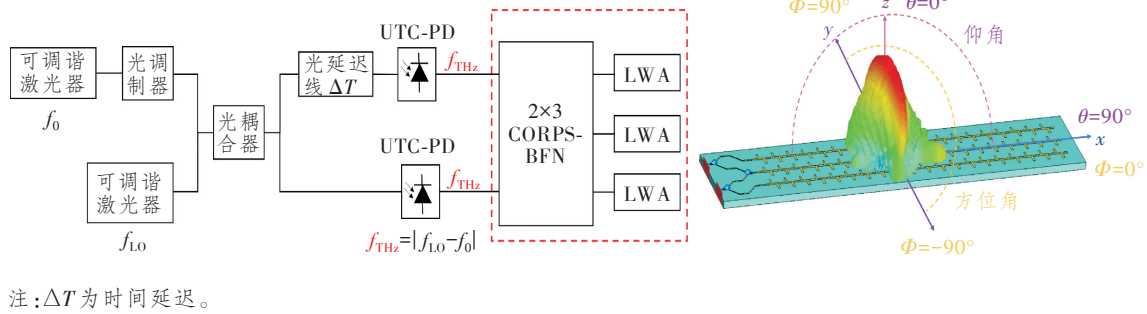
通信作者:段晓峰,教授。E-mail:xfduan@bupt.edu.cn

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

能,提出了一种镜像非对称辐射单元抑制周期性 LWA 开阻带效应结构。同时本文还设计了一个相干辐射周期性结构 (Coherently Radiating Periodic Structures, CORPS)-BFN 结构,在其输出处产生线性递进相移,可将多个 THz 单行载流子光探测器 (Uni-Traveling-Carrier Photodiode, UTC-PD) 集成到 LWA 阵列中,增加发射功率。单个微带型周期性 LWA 的仿真结果表明,在边射频率处消除了开阻带现象。通过调整 230 ~ 330 GHz 的工作频率,波束在仰角上的扫描范围为 105° 。单层 2×3 CORPS-BFN 与 3 个微带型周期性 LWA 阵列进行单片集成,通过改变输入端口的频率,波束在仰角方向扫描范围可达 105° ;当端口延迟差为 1.79 ps 时,波束在总方位角扫描范围可达 58° 。

1 光子辅助 2D THz 波束转向概念

本文基于 CORPS-BFN 将多个 UTC-PD 集



注: ΔT 为时间延迟。

图 1 光子辅助实现 2D THz 波束转向概念

Figure 1 The concept of photonic-assisted 2D THz beam steering

2 光子辅助 2D THz 波束转向芯片的设计与仿真

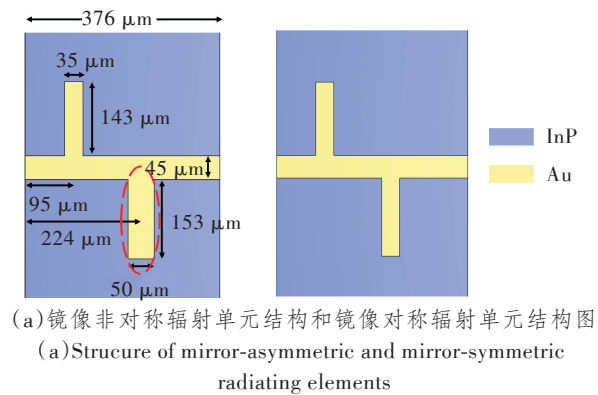
2.1 LWA 的设计

本文提出的微带型周期性 LWA 的单元结构及尺寸如图 2(a)左图所示,其由在微带线两侧添加的 2 个镜像非对称矩形金属构成。对于天线在边射方向上出现的开阻带效应,镜像非对称辐射单元比镜像对称辐射单元(如图 2(a)右图所示)更具有抑制效果。将单元结构沿 y 方向以 p 为周期延拓 20 个单元结构得到微带型周期性 LWA,如图 2(b)所示。将 LWA 制作在 $50 \mu\text{m}$ 的 InP 衬底上,以减少表面波模式的数量,获得更高的辐射效率。InP 衬底的介电常数(ϵ_r)为 12.4,厚度为 $50 \mu\text{m}$,Au 金属层厚度为 $1 \mu\text{m}$ 。

LWA 结构中第 $n=-1$ 次谐波往往是一个快波,满足 $|\beta_{-1}| < k_0$, k_0 为自由空间波数, β_{-1} 为第 $n=-1$ 次

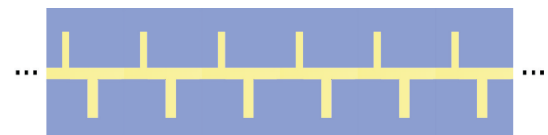
成到 LWA 阵列中,仅使用两个调谐控制元件,一个光延迟线和一个可调谐双波长激光器,实现 2D THz 波束控制。图 1 所示为光子辅助 THz 发射技术原理图。

光子辅助 THz 发射技术通过更高频的两路光波拍频产生 THz 信号^[7]。通过光耦合器,将载波频率为 f_0 的基带光信号和载波频率为 f_{LO} 的本振光耦合在一起。基于光外差拍频机理,通过 UTC-PD 转换成 THz 电信号($f_{THz}=|f_{LO}-f_0|$),再经过 CORPS-BFN 馈送到 LWA 阵列,辐射到自由空间。通过调整光外差系统的拍频来改变 LWA 的工作频率,使得波束方向可在仰角 θ 方向上扫描。同时由于 CORPS-BFN 输出端产生了线性递进相移 $\Delta\varphi$,相邻 LWA 之间具有相位差,从而使得 THz 波束方向可在方位角 Φ 方向上扫描。为了控制相移 $\Delta\varphi$,图 1 中使用了光延迟线。



(a) 镜像非对称辐射单元结构和镜像对称辐射单元结构图

(a) Structure of mirror-asymmetric and mirror-symmetric radiating elements



(b) 微带型周期性 LWA 结构图

(b) Structure of microstrip periodic LWA

图 2 LWA 结构图

Figure 2 LWA structure diagram

谐波相位常数,其可表示为

$$\beta_{-1} = \beta_0 - \frac{2\pi}{p}, \quad (1)$$

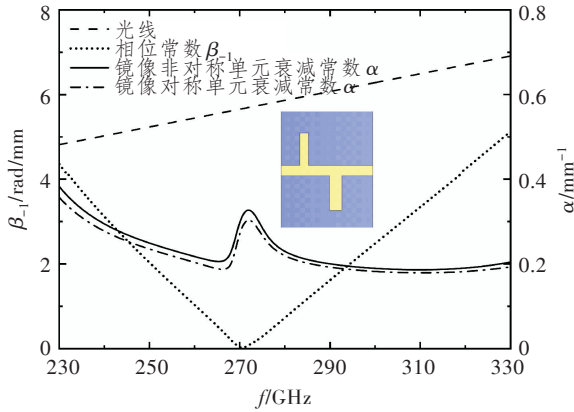
式中: β_0 为相位常数; p 为周期结构的周期长度。

周期性 LWA 一般由第 $n=-1$ 次谐波向外泄漏能量,其波束可以从后向象限扫描到前向象限。LWA 一个单元结构对应一个复传播常数 γ , γ 可表示为

$$\gamma = \alpha + j\beta, \quad (2)$$

式中: α 为衰减常数,表征电磁波传播过程中的衰减强度; j 为虚部单位; β 为相位常数。

单个 LWA 单元结构在 230~330 GHz 工作频率范围内的色散图如图 3 所示。



注: f 为频率。

图 3 镜像非对称辐射 LWA 单元结构色散图

Figure 3 Dispersion diagram of mirror asymmetric radiation LWA unit structure

由图可知,相位常数 β_{-1} 始终小于自由空间传播常数,因此 LWA 能够辐射快波。 $\beta_{-1}=0$ 的频率对应边射频率,0 点左右两侧的频率范围分别表示后向象限和前向象限。镜像非对称辐射单元结构的衰减常数 α 比镜像对称辐射单元结构更高,减轻了开阻带效应。

对周期性 LWA 进行仿真及分析。图 4 所示为微带型周期性 LWA 回波损耗对比图,由图可知,镜像非对称单元组成的微带型周期性 LWA 在工作频率范围内回波损耗均大于 18 dB,这表明,仅有极少部分能量发生反射,且在边射方向上抑制了开阻带现象,工作性能良好。

图 5 所示为微带型周期性 LWA 增益和转向角度图。天线增益均大于 12 dBi,并且在 310 GHz 时峰值增益为 15.5 dBi,具有增益稳定性。在工作频率内,H 面波束转向角度从 230 GHz 时的 -55° 扫至 330 GHz 时的 50° 。波束转向角度由负到正的变化

过程,表明该天线可实现从后向象限到前向象限的连续波束扫描。图 6 所示为微带型周期性 LWA 在 H 平面 230、250、270、290、310 和 330 GHz 的远场辐射极坐标图。对于 100 GHz 的带宽,H 面的波束总扫描范围为 105° 。

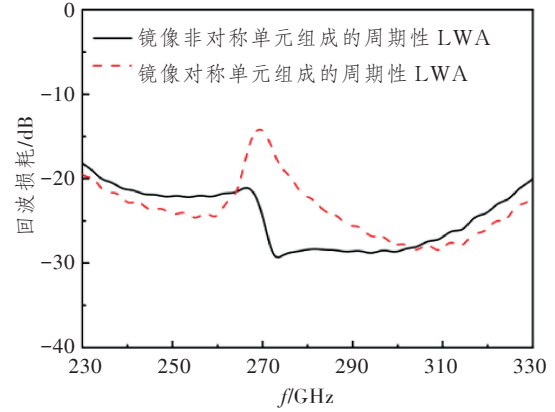


图 4 微带型周期性 LWA 回波损耗对比图

Figure 4 Comparison of return loss of microstrip periodic LWA

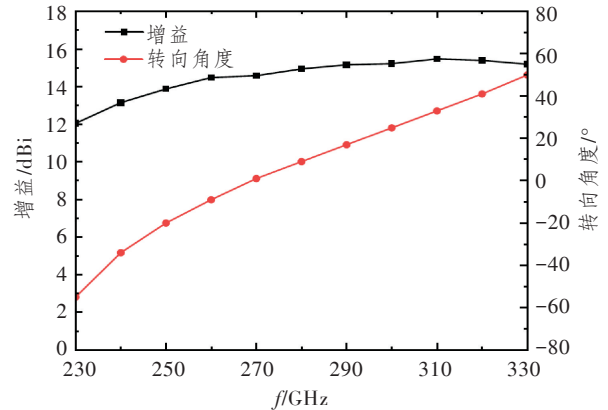


图 5 微带型周期性 LWA 增益和转向角度图

Figure 5 Gain and steering angle of microstrip periodic LWA

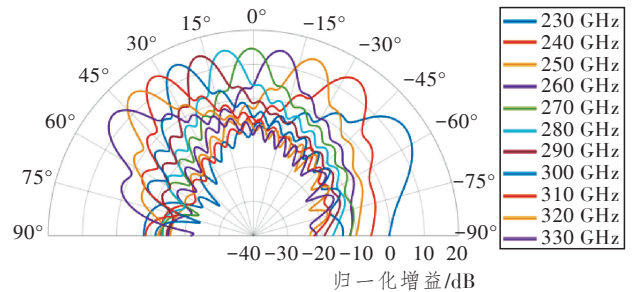
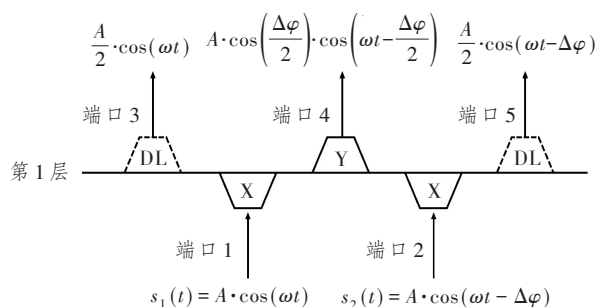


图 6 微带型周期性 LWA 在 H 平面 230、250、270、290、310 和 330 GHz 远场辐射的极坐标图

Figure 6 Polar diagram of far-field radiation of microstrip periodic LWA at 230, 250, 270, 290, 310 and 330 GHz in H-plane

2.2 CORPS-BFN 的设计与仿真

本文采用由两个功率分配节点 X 节点和 1 个合成节点 Y 节点组成的单层 CORPS-BFN, 其具有两个输入端和 3 个输出端, 是实现低成本和有效波束转向的方案^[8]。单层 2×3 CORPS-BFN 结构示

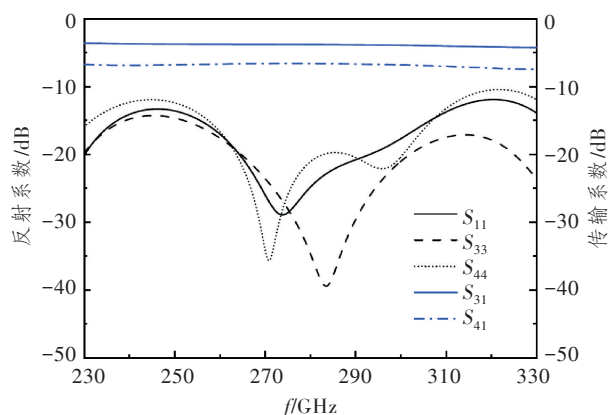


注: DL 为时间延迟线; ω 为角频率; t 为时间; A 为振幅; $s_1(t)$ 为输入信号 1; $s_2(t)$ 为输入信号 2。

图 7 单层 2×3 CORPS-BFN 结构图

Figure 7 The structure of the single-layer 2×3 CORPS-BFN

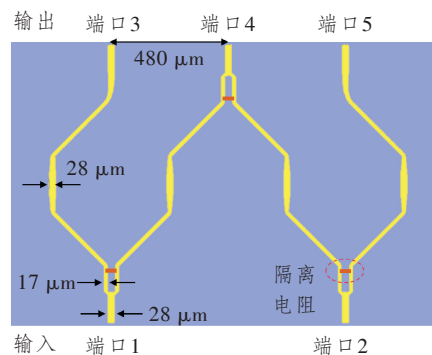
在阻抗匹配方面, CORPS-BFN 的输出端口呈锥形, 以匹配微带型 LWA 的输入阻抗。隔离电阻 R 设计为 100Ω 。如图 8(a) 所示, 各端口的反射系数 S_{11} 、 S_{33} 、 S_{44} 和从输入到输出的传输系数 S_{31} 、 S_{41} , 在整个频段反射系数始终低于 -10 dB, 插入损耗低



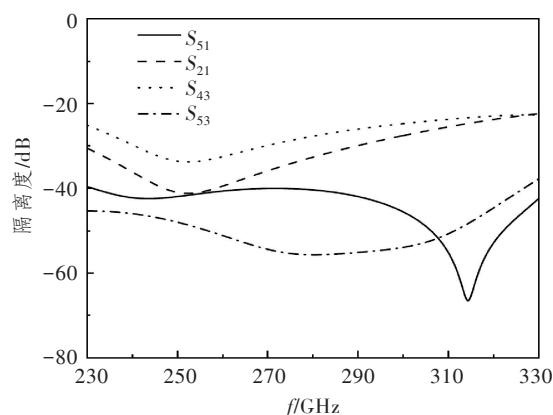
(a) 端口的反射系数 (黑色) 和传输系数 (蓝色)

(a) The reflection coefficient (black) and transmission coefficient (blue)

意图如图 7 所示。该网络基于多层结构的级联威尔金森功率合成器/分频器, 每层由 X 和 Y 组成。若两个输入端口之间相位差为 $\Delta\varphi$, CORPS-BFN 在 3 个输出端口可形成相对相位为 0 、 $\Delta\varphi/2$ 和 $\Delta\varphi$ 的线性递进相位分布。



于 1 dB。由于对称, $S_{11} = S_{22}$, $S_{33} = S_{55}$, $S_{31} = S_{52}$, $S_{41} = S_{42}$ 。各端口之间的隔离系数 S_{51} 、 S_{21} 、 S_{43} 、 S_{53} 如图 8(b) 所示, 由图可知, 隔离度在整个频段保持在 20 dB 以上, 大部分频段保持在 30 dB 以上。由于对称, $S_{51} = S_{32}$, $S_{43} = S_{45}$ 。



(b) 端口之间的隔离系数

(b) Isolation between ports

图 8 单层 2×3 CORPS-BFN 的仿真 S 参数

Figure 8 Simulated S-parameters of the single-layer 2×3 CORPS-BFN

2.3 CORPS-BFN 与 LWA 单片集成的设计与仿真

将单层 2×3 CORPS-BFN 与 3 个微带型周期性 LWA 阵列进行单片集成, 结构如图 9 所示, 仿真得到的散射参数如图 10 所示, 由图可知, 在工作频率范围内, 回波损耗均大于 10 dB, 两个输入端口隔离度优于 20 dB, 说明工作性能良好。

通过改变输入端口的频率并且在每个端口上施加不同的时移, 仿真 CORPS-BFN 与 3 个微带型

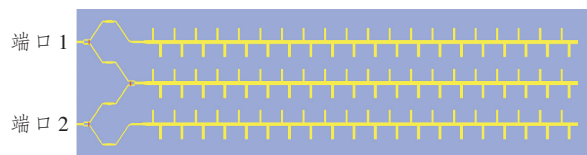


图 9 单层 2×3 CORPS-BFN 与 3 个微带型周期性 LWA 阵列单片集成结构图

Figure 9 Monolithic integrated structure of the single-layer 2×3 CORPS-BFN and three microstrip periodic LWA arrays

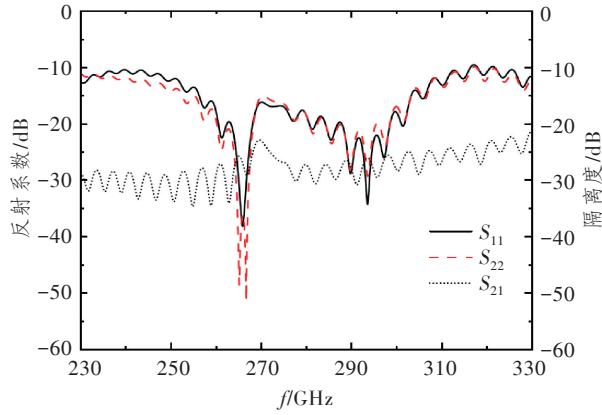


图 10 单层 2×3 CORPS-BFN 与 3 个微带型周期性 LWA 阵列单片集成仿真的散射参数

Figure 10 Simulated S-parameters of monolithic integrated simulation of the single-layer 2×3 CORPS-BFN and three microstrip periodic LWA arrays

周期性 LWA 阵列单片集成的 2D 波束转向能力。 $(f, \Delta\varphi)$ 波束轮廓图如图 11 所示, $\Delta\varphi$ 对应输入端口之间的相位差。当 $\Delta\varphi = 0$ 时, 改变工作频率, 当从 230 变化到 330 GHz 时, 波束在仰角 θ 方向上转向, 对应转向角度从 -55° 变化到 50° 。当端口 $\Delta\varphi = \pm\pi/3$, 此时旁瓣抑制为 0, 波束在方位角 Φ 方向上转向, 对应最大转向角度从 -8° 变化到 10° , 最大扫描范围为 18° 。

图 12 所示为相位差 $\Delta\varphi = 0$ 时, 波束仰角 θ 方向随频率变化的关系图, 以及 $f=270$ GHz 时, 波束方位角 Φ 方向随 $\Delta\varphi$ 变化的关系图。当 $\Delta\varphi=0$, 波束仰角 θ 方向随频率变化从 -55° 扫描到 50° 。当 $\Delta\varphi = \pm\pi/3$, Φ 方向从 -8° 扫描到 10° ; 当 $\Delta\varphi = \pm 2\pi/3$, Φ 方向从 -17° 扫描到 20° ; 当 $\Delta\varphi = \pm\pi$ 时, Φ 方向从 -28° 扫描到 30° 。说明本文设计的 2×3 CORPS-BFN

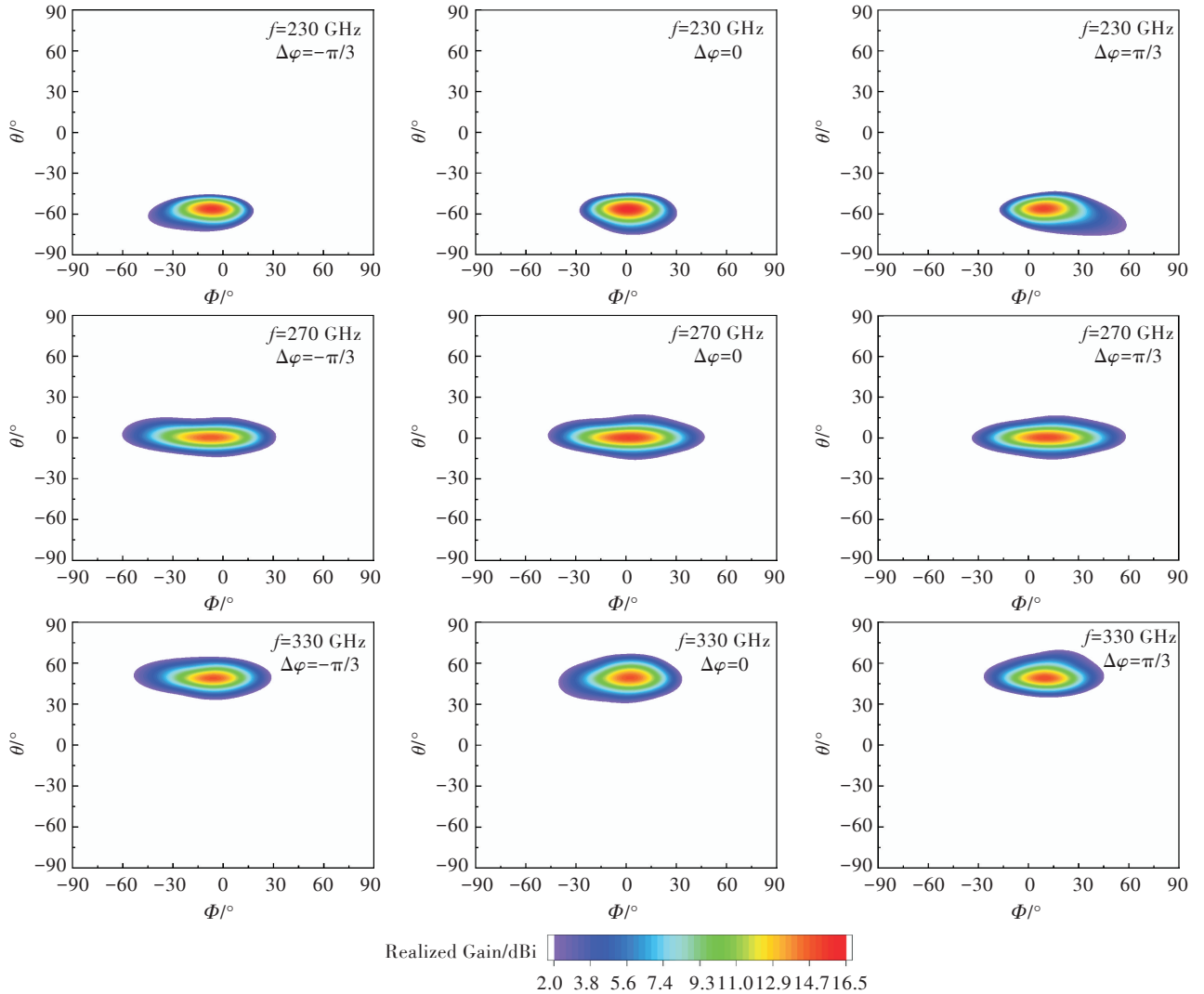


图 11 CORPS-BFN 与 3 个微带型周期性 LWA 阵列单片集成在 230、270 和 330 频率下分别在为 $-\pi/3$ 、0 和 $\pi/3$ 相位差下的 E 面波束轮廓图

Figure 11 E-plane beam profiles at frequencies of 230, 270 and 330 with phase differences of $-\pi/3$, 0 and $\pi/3$, respectively

与 3 个微带型周期性 LWA 阵列单片集成具有 2D 波束转向能力。

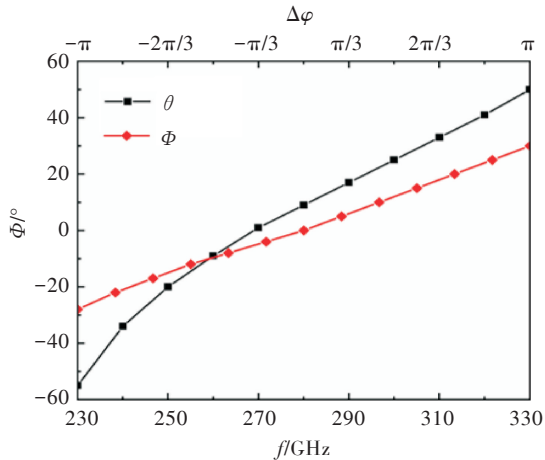


图 12 波束在仰角 θ 方向上与频率 f 的关系图和波束在方位角 Φ 方向上与相位差 $\Delta\varphi$ 的关系图

Figure 12 The relationship between the beam and the frequency f in the elevation direction θ and the relationship between the beam and the phase difference $\Delta\varphi$ in the azimuth direction Φ

表 1 所示为本文所设计 LWA 与目前 2D THz 波束控制相关文献的对比。经过对比可知,本文所提 LWA 在工作带宽、辐射增益和波束扫描范围方面均具有优势。

表 1 近期已发表的 THz 波束指向方法对比

Table 1 Comparison of published THz beam-steering methods

参考文献	方式	频率/GHz	天线阵列	扫描范围 (仰角/ 方位角)/°	最大增益
[6]	光子辅助	230~330	LWA	93/69	15.00 dBi
[9]	液晶	115	反射阵	20/20	16.55 dBi
[10]	金属波导	220~330	波导阵列	50/45	17.00 dBi
[11]	BiCMOS, 130 nm	318~370	2×2 相控阵	128/53	-6.8 dBm
本文	光子辅助	230~330	LWA	105/58	15.5.00 dBi

注:BiCMOS为双极型-互补金属氧化物半导体。

3 结束语

本文研究了 3 个微带型周期性 LWA 阵列与单层 2×3 CORPS-BFN 单片集成实现 2D 波束转向的功能。LWA 的单元采用镜像非对称结构来抑制开放阻带效应,使 LWA 能够在 H 面从后向象限到前向象限连续扫描,在工作频率范围内扫描范围为 105° 。当 CORPS-BFN 结构两个输入端口相位差为

1.79 ps 时,在 E 面实现最大扫描范围为 58° 。本文所提设计易于与光子 THz 源单片集成,为光子辅助 THz 集成发射机芯片实现 2D 波束转向提供了思路。

参考文献:

- [1] Koenig S, Lopez-Diaz D, Antes J, et al. Wireless Sub-THz Communication System with High Data Rate[J]. Nature Photonics, 2013, 7(12): 977-981.
- [2] Fice M, Shams H, Yang Z, et al. Photonic Generation and Distribution of Coherent Multiband THz Wireless Signals[C]//2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). Paris, France: IEEE, 2017: 7928250.
- [3] Nagatsuma T, Horiguchi S, Minamikata Y, et al. Terahertz Wireless Communications based on Photonics Technologies [J]. Optics Express, 2013, 21 (20) : 23736-23747.
- [4] Che M, Matsuo Y, Kanaya H, et al. Optoelectronic THz - Wave Beam Steering by Arrayed Photomixers with Integrated Antennas[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(16): 979-982.
- [5] Che M, Matsuo Y, Kondo K, et al. Arrayed Uni-Traveling-Carrier Photodiodes for Pulsed THz Wave Beam Steering [C]//2021 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP). Pisa, Italy: IEEE, 2021: 9639421.
- [6] Haddad T, Biurrun-Quel C, Lu P, et al. Photonic-Assisted 2-D Terahertz Beam Steering Enabled by a LWA Array Monolithically Integrated with a BFN[J]. Optics Express, 2022, 30(21): 38596-38612.
- [7] Zhu M, Zhang J, Hua B, et al. Ultra-Wideband Fiber-THz -Fiber Seamless Integration Communication System Toward 6G: Architecture, Key Techniques, and Testbed Implementation[J]. Science China Information Sciences, 2022, 66(1): 113301.
- [8] Biurrun-Quel C, Haddad T, Sievert B, et al. Design and Characterization of Terahertz CORPS Beam Forming Networks[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2023, 44(5): 430-457.
- [9] Yang J, Wang P, Sun S, et al. A Novel Electronically Controlled Two-Dimensional Terahertz Beam-Scanning Reflectarray Antenna based on Liquid Crystals[J]. Frontiers in Physics, 2020, 8: 576045.
- [10] Camblor R, Ver Hoeye S, Fernández M, et al. Full 2-D Submillimeter-Wave Frequency Scanning Array[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(9): 4486-4494.