2024年6月

Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2024)06-0599-07

太赫兹超材料相控阵天线波束宽度调控方法

张 恒,王宏强,罗成高*,梁传英

(国防科技大学 电子科学学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要:太赫兹超材料相控阵由于其强大的波束操纵能力在探测与通信一体化系统中具有重要的应用价值。为了提升系统的通信和探测性能,需要太赫兹超材料相控阵能够实现宽波束和窄波束的灵活切换。提出了一种基于反相位间隔(反相)编码的太赫兹超材料相控阵天线波束宽度调控方法。通过天线3dB波束宽度表达式和目标波束宽度逆推阵列规模,保持其相位编码不变并对该阵列规模外的其余阵元进行反相编码,旨在实现相位相反相消。仿真结果表明,所提方法可以准确地调控太赫兹超材料相控阵天线的波束宽度,实现宽波束和窄波束的灵活切换。

关键词: 太赫兹超材料; 波束宽度; 探测与通信一体化; 反相编码; 相控阵天线 中图分类号: TN957.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA2024074

Beamwidth control method of terahertz metamaterial phased array antenna

ZHANG Heng, WANG Hongqiang, LUO Chenggao*, LIANG Chuanying

(College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

Abstract : Terahertz metamaterial phased array antenna has significant application value in integrated detection and communication systems due to its strong beam manipulation capabilities. In order to enhance the communication and detection performance of the system, it is necessary for terahertz metamaterial phased array antenna to achieve flexible switching between wide beams and narrow beams. Therefore, a beamwidth control method of terahertz metamaterial phased array antenna based on inverse phase interval(inverse phase) coding is proposed in this paper. The array size is reversed by the antenna 3dB beamwidth expression and the target beamwidth, the phase encoding is kept unchanged while the remaining elements outside the array size are inversely encoded, aiming to achieve phase cancellation by phase inversion. The simulation results demonstrate that the proposed method accurately controls the beamwidth of terahertz metamaterial phased array antenna, allowing for flexible switching between wide beams and narrow beams.

Keywords: terahertz metamaterial; beamwidth; integrated detection and communication; inverse phase coding; phased array antenna

随着通信技术和雷达技术的发展,太赫兹通信系统和太赫兹雷达系统具有越来越多的相似性。并且,由于频谱资源日益拥挤,太赫兹探测与通信一体化已经成为了研究热点之一^[1-5]。然而,现有太赫兹探测与通信一体 化系统通常采用大规模多输入多输出(Multi-Input Multi-output, MIMO)天线进行波束赋形,因而面临着高成本、 高功耗和高系统复杂度的问题。太赫兹超材料相控阵作为一种新兴技术,为解决这一问题提供了新的途径。

太赫兹超材料相控阵天线通常由1bit可编程超材料组成,通过电控、光控或者温控的方式改变其单元结构的编码状态,可实现对入射电磁波的幅度、相位、极化等调控,因而其具有低成本、低功耗、易部署和高自由度等优点^[6-9]。太赫兹超材料相控阵天线和探测与通信一体化技术的结合,可大大降低系统成本和功耗,使其满足万物互联、智慧交通、高集成作战平台等应用场景的需求。需要指出的是,探测与通信一体化系统处于探测模式和通信模式均需要太赫兹超材料相控阵天线具备宽、窄波束扫描切换能力。这是因为在探测任务中,宽波

收稿日期: 2024-01-26; 修回日期: 2024-04-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61921001; 61971427; 62035014; 62105356; 62201591);国家重点研发计划资助项目(2022YFB3902400; 2018YFB2202500)

^{*}通信作者: 罗成高 email:luochenggao@nudt.edu.cn

束具有较大的覆盖范围,能够同时探测到较多的目标或环境信息,可用于广域的目标搜索和初步定位,减少探测时间。而窄波束则具有较小的覆盖范围,可以提供更精确的目标定位信息。在通信任务中,宽波束可以提供较大的信道容量,适用于大量数据的传输,并且由于较大的覆盖范围,可快速定位到用户,减少通信建链时间。而窄波束则可以提供更好的信号聚焦和抗干扰性能。因此,有必要研究太赫兹超材料相控阵天线在宽、窄波束快速切换方面的技术。目前对太赫兹超材料相控阵天线波束宽度控制进行了研究,但其均没有实现对太赫兹超材料相控阵天线波束宽度的准确控制^[10]。

本文提出一种基于反相编码的太赫兹超材料相控阵天线波束宽度调控方法。首先计算得到波束指向至预设 角度时太赫兹超材料相控阵天线的相位分布。然后根据天线波束宽度表达式和用于调控的目标波束宽度,获得 满足目标波束宽度的阵列规模。最后保持其反射单元的相位不变,对其余的反射单元实施反相编码,从而准确 地获得预期波束宽度,实现宽、窄波束的快速切换。仿真结果验证了所提方法的有效性。

1 单波束调控原理

太赫兹超材料相控阵天线通常由馈源天线照射的平 面反射阵组成,其典型模型如图1所示。其中,平面反 射阵包含了多个具有0和1(即相位为0°和180°)2种状态 的单元结构,通过对每个单元结构的状态进行切换, 可实现对反射波束的调控。

为了使波束指向至任意角度,需要对太赫兹超材料 相控阵天线进行相位补偿,包括在传播过程中馈源入 射造成的相位差和反射波束偏转造成的相位差。假设 太赫兹超材料相控阵天线具有 N×N个单元结构,则若 要使反射波方向偏转至(θ_i,φ_i),则位于第 m 行第 n 列的反 射单元需要的相位为^[11]:

$$\phi_{m,n} = k \left(R_{m,n} - \sin \theta_i (x_m \cos \varphi_i + y_n \sin \varphi_i) \right) \tag{1}$$

式中: $\phi_{m,n}$ 为第*m*行第*n*列的反射单元的相位;*k*为自由空间传播矢量;*x_m和y_n*分别为阵元沿*x*和*y*方向上的坐标;*R_{m,n}*为馈源至第(x_m,y_n)个反射单元的距离,可表示为:



Fig.1 Schematic diagram for beam control of phased array antenna based on terahertz metamaterial 图 1 太赫兹超材料相控阵天线波束调控原理图

$$R_{m,n} = \sqrt{(x_{\rm f} - x_m)^2 + (y_{\rm f} - y_n)^2 + z_{\rm f}^2}$$
(2)

式中: x_f为馈源在 x 轴的位置; y_f为馈源在 y 轴上的位置; z_f为馈源距离太赫兹超材料相控阵天线的高度。对计算 得到的相位进行 1 bit 编码即可获得太赫兹超材料相控阵天线波束调控至某一角度所需的相位分布。

2 波束宽度调控方法

根据上述计算的相位分布,太赫兹超材料相控阵天线的阵因子可表示为:

$$Q_{\rm AF}(\theta,\varphi) = \sum_{m=1}^{N} \sum_{n=1}^{N} I_{m,n} e^{j\left(-k \cdot R_{m,n} + \phi_{m,n} + k \cdot \sin \theta(x_m \cos \varphi + y_n \sin \varphi)\right)}$$
(3)

式中: θ和φ分别表示俯仰角和方位角; Im,为幅度。所形成波束的3 dB宽度可由式(4)表示:

$$\theta_{\rm bW} \approx 0.886 \frac{\lambda}{D\cos\theta_i} (\rm rad\,) \approx 51 \frac{\lambda}{D\cos\theta_i} (^{\circ})$$
 (4)

式中: $D=N\times N$ 为超材料相控阵的口径; λ 为入射波的波长。由式(4)可知,根据所需要的波束宽度可以逆推阵列规模,并可基于相位相反相消原理实现对太赫兹超材料相控阵天线波束宽度的准确控制。假设需要的波束宽度 为 $\theta_1(\theta_1 > \theta_{bW})$,则需要的阵列规模为 $n \times n(n < N)$,n可由式(5)得:

$$n \approx 51 \frac{\lambda}{\theta_1 \times P \times \cos \theta_i} \tag{5}$$

根据干涉原理,当相位相反(0°和180°)的电磁波叠加时会发生相消干涉,导致电磁波的强度减弱甚至消失。

因此,利用相位相反相消原则,对于所求得的*n×n*个天线阵元,保证其偏转到某一角度时补偿的相位不变,对周围剩余的阵元进行0°和180°间隔编码,旨在实现相位抵消,即可获得在固定波束指向下的目标波束宽度。值得指出的是,需要根据馈源的位置合理选取反相编码的位置,以尽量保证辐射方向图的增益。比如,馈源为正馈方式时,需要选取中间的*n×n*个阵元用于波束偏转。此外,还可以对由多个单元结构组成的超单元进行反相编码的方式,实现波束宽度的准确调控。这种编码模式在分子阵划分的情况下将显得尤为重要,这里不再赘述。

3 仿真结果与分析

为了说明所提方法的有效性,以大规模太赫兹超材料相控阵为例进行了仿真实验,其参数如表1所示。由于 大多数太赫兹超材料相控阵的馈源方式为正馈,因而只需给出馈源高度即可。仿真中,首先验证了波束指向0° 时,所提方法对波束宽度的调控能力。图2给出了未进行波束宽度调控时的天线编码模式和方向图,可以看出满 阵状态下的3 dB 波束宽度为0.74°。当波束宽度设置为1°时,仿真的结果如图3所示。不难看出,在反相编码后 天线的波束宽度为1.04°,与期望的1°波束宽度基本一致。图4为波束宽度设置为2°时的天线编码模式图和方向 图,可以看出随着反相编码的阵元个数增加,准确地实现了2°的波束宽度。







Fig.3 Antenna coding mode diagram and radiation pattern when the beam pointing at 0° and the beamwidth being set to 1° 图 3 当波束指向 0°且波束宽度设置为 1°时,天线编码模式图和辐射方向图



Fig.4 Antenna coding mode diagram and radiation pattern when the beam pointing at 0° and the beamwidth being set to 2° 图4 当波束指向 0°且波束宽度设置为 2°时,天线编码模式图和辐射方向图

众所周知,当波束指向角度增加时,波束宽度会有所增加。因此,进一步分析了波束指向±20°时,所提方法 对波束宽度准确调控的能力。图5给出了波束指向20°且满阵时的编码模式与方向图,可以看出此时的波束宽度 为0.79°。当波束宽度分别设置为1°和2°时,所对应的编码模式和方向图如图6和图7所示。很显然,仿真结果 与预期结果几乎一致,这说明了所提方法可以实现对太赫兹超材料相控阵天线波束宽度的准确控制。



Fig.5 Antenna coding mode diagram and radiation pattern when the beam pointing at 20° and in the full array state 图5 当波束指向20°且满阵状态时,天线编码模式图和辐射方向图



Fig.6 Antenna coding mode diagram and radiation pattern diagram when the beam pointing at 20° and the beamwidth being set to 1° 图 6 当波束指向 20°且波束宽度设置为 1°时,天线编码模式图和辐射方向图



Fig.7 Antenna coding mode diagram and radiation pattern diagram when the beam pointing at 20° and the beamwidth being set to 2° 图7 当波束指向 20°且波束宽度设置为 2°时,天线编码模式图和辐射方向图

图8显示了当波束指向角度为-20°时,未进行波束宽度调控时的天线编码模式与辐射方向图。可以看出,此时的天线波 束宽度为0.78°。当波束宽度设置为1°时,天线的编码模式发生改变,同时仿真获得的天线波束宽度为1.06°,如图9所示。 图10表明当波束宽度设置为2°时,使用所提方法计算得到的波束宽度为1.99°。总之,当波束指向任意角度时,均可通过所 提方法使天线波束宽度达到预期目标波束宽度,从而实现宽波束和窄波束之间的快速切换。







Fig.9 Antenna coding mode diagram and radiation pattern diagram when the beam pointing at -20° and the beamwidth being set to 1° 图9 当波束指向-20°且波束宽度设置为1°时,天线编码模式图和辐射方向图



Fig.10 Antenna coding mode diagram and radiation pattern diagram when the beam is pointing at -20° and the beamwidth is set to 2° 图 10 当波束指向-20°且波束宽度设置为 2°时,天线编码模式图和辐射方向图

4 结论

本文提出了一种基于反相编码的太赫兹超材料相控阵天线波束宽度调控方法。通过逆推目标波束宽度所需 的阵列规模,保持其相位分布不变而将其余单元进行反相编码,可准确地控制天线的波束宽度,进而实现宽、 窄波束的快速切换。仿真结果表明,当波束指向0°和±20°时,所提方法均能保证天线实际的波束宽度与设置的 目标波束宽度几乎一致。但当设置的波束宽度较大时,旁瓣水平较高。未来的工作中,需要针对1bit太赫兹超 材料相控阵的特点,考虑将旁瓣抑制融入到波束宽度调控方法中,旨在减小干扰,从而使探测与通信一体化系 统实现更好的通信和成像性能。

参考文献:

- [1] LIU Zile, YANG Chuang, PENG Mugen. Integrated sensing and communications in terahertz systems: a theoretical perspective[J]. IEEE Network, 2023(99):1. doi:10.1109/MNET.2023.3321543
- [2] CHEN Wenrong, LI Lingxiang, CHEN Zhi, et al. Enhancing THz/mmWave network beam alignment with integratd seensing and communication[J]. IEEE Communications Letters, 2022,26(7):1698-1702. doi:10.1109/LCOMM.2022.3171291.
- [3] WU Yongzhi, LEMIC F, HAN Chong, et al. Sensing integrated DFT-spread OFDM waveform and deep learning-powered receiver design for terahertz integrated sensing and communication systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2023,71(1):595-610. doi:10.1109/TCOMM.2022.3225920.
- [4] LI Oupeng, HE Jia, ZENG Kun, et al. Integrated sensing and communication in 6G:a prototype of high resolution THz sensing on portable device[C]//2021 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit(EuCNC/6G Summit). Porto, Portugal: IEEE, 2021:544-549. doi:10.1109/EuCNC/6GSummit51104. 2021.9482537.
- [5] CHANG Bo, TANG Wei, YAN Xiaoyu, et al. Integrated scheduling of sensing, communication, and control for mmWave/THz communications in cellular connected UAV networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022,40(7):2103– 2113. doi:10.1109/JSAC.2022.3157366.
- [6] FU Xiaojian, YANG Fei, LIU Chenxi, et al. Terahertz beam steering technologies: from phased arrays to Field-Programmable metasurfaces[J]. Advanced Optical Materials, 2020,8(3):1900628. doi:10.1002/adom.201900628.
- [7] WANG Yue, CUI Dajian, WANG Yu, et al. All-solid-state terahertz phased array based on graphene metasurface for ultra-wideangle beam steering[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022,40(12):3814-3822. doi:10.1109/JLT.2022.3150170.
- [8] 刘峻峰,刘硕,傅晓建,等. 太赫兹信息超材料与超表面[J]. 雷达学报, 2018,7(1):46-55. (LIU Junfeng,LIU Shuo,FU Xiaojian,et al. Terahertz information metamaterials and metasurfaces[J]. Journal of Radars, 2018,7(1):46-55.) doi:10.12000/JR17100.
- [9] 葛宏义,季晓迪,蒋玉英,等. 太赫兹超材料智能化设计的研究进展[J]. 电子学报, 2023,51(10):2664-2679. (GE Hongyi,JI Xiaodi,JIANG Yuying,et al. Research progress of terahertz smart metamaterials[J]. Acta Electronica Sinica, 2023,51(10):2664-2679.) doi:10.12263/DZXB.20220923.