

新型太赫兹波束分离器的设计

张 岩¹, 李 春¹, 卞博锐¹, 张 文², 蒋 玲^{1*}

(1. 南京林业大学 信息科学技术学院, 江苏南京 210037;
2. 中国科学院紫金山天文台 毫米波亚毫米波实验室, 江苏南京 210034)

摘 要: 近年来,随着射电望远镜外差式阵列接收机的发展,基于相位光栅技术的波束分离器在亚毫米波长范围内得到了重要的应用,它能够单个本地振荡器信号经过分束同步传送到超导 SIS/HEB 混频器阵列接收机中。由于太赫兹频段相位光栅的特征尺寸在亚微米级,其加工精度直接影响器件性能,给微加工技术带来巨大挑战。基于此,笔者所在课题组结合相位编码超材料技术设计了一种新型的太赫兹四波束分离器,仅需利用单层超材料编码单元便可实现宽带电磁波束的分离,波束转换效率高,结构简单且易于加工,同时反射波束的方向可灵活调节。为了与实际测试系统相匹配,着重研究了不同入射角度下的波束分离,并得到了最佳的斜入射角度范围(小于 30°),相对工作带宽可达 52%,反射的四个波束功率相差不超过 10%,这为太赫兹频段射电望远镜超导混频器阵列接收机的本振信号功率分配提供了新的解决方案,也有利于其他新型太赫兹功能器件的设计和发展。

关键词: 相位编码; 超材料; 太赫兹波束分离器; 阵列接收机

中图分类号: TN214 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20190290

Design of new terahertz beam splitter

Zhang Yan¹, Li Chun¹, Bian Borui¹, Zhang Wen², Jiang Ling^{1*}

(1. College of Information Science and Technology, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;
2. Millimeter Wave and Submillimeter Wave Laboratory of Purple Mountain Observatory,
Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210034, China)

Abstract: In recent years, with the development of heterodyne array receivers of radio frequency (RF) telescope, beam splitters based on phase grating technology have gained important applications in the sub-millimeter wavelength range. It is capable of transmitting a single local oscillator signal to the superconducting SIS/HEB mixer receiver array by splitting beam synchronization. Due to the characteristic size of the terahertz phase grating at sub-micron level, its machining precision directly affects the performance of the device, which brings great challenges to the micro-machining technology. Based on this, a new terahertz four beam splitter combined with phase coding metamaterials was designed. Only one single-layer metamaterial coding unit can be used to realize the separation of broadband electromagnetic beam and high beam conversion efficiency. The structure of THz beam splitter is simple and easy to process, while the direction of the reflected beam can be flexibly adjusted. In order to match the actual test system, we focused on beam separation at different angles of incidence and obtain the best range of oblique incidence angles (less than 30°). The relative bandwidth is 52%, and the reflected four

收稿日期:2020-02-05; 修订日期:2020-03-30

基金项目:国家自然科学基金(31200541);江苏省自然科学基金(BK20161526)

作者简介:张岩(1993-),女,硕士生,主要从事太赫兹功能器件方面的研究。Email:18362981195@163.com

通讯作者:蒋玲(1979-),女,教授,硕士生导师,博士,主要从事太赫兹科学与技术、微弱信号探测等方面的研究。

Email:jiangling@njfu.edu.cn

beam powers differ by no more than 10%. This provides a new solution for the local oscillator signal power distribution of terahertz superconducting mixer array receivers of RF telescope, and also facilitates the design and development of other new terahertz functional devices.

Key words: phase coding; metamaterial; terahertz beam splitter; array receiver

0 引言

外差接收机由混频器和本地振荡器(本振)组成,由于其光谱分辨率高($\nu/\Delta\nu > 10^6$),灵敏度接近量子极限,在太赫兹频段范围内对天文观测和大气遥感具有重要意义。目前,随着多波束外差阵列接收机像素的增加,其映射速度相应地提高,在单天线望远镜天文观测中发挥着至关重要的作用(如 SuperCam、upGreat、GUSTO^[1-3])。大幅面外差阵列接收机的主要挑战之一是难以实现宽频带、高效率的本振功率分配系统。在接近亚毫米波长范围的情况下,由于金属波导结构的微加工困难增加,相位光栅作为阵列接收机本地振荡器的波束多路复用器,能将入射光束分成均匀分布的多光束,用于提供混频器阵列的本振信号。在过去的几年里,相位光栅已经取得了巨大的进展。最常用的是 Dammann 光栅^[4],一种简单而通用的二元相位光栅,由周期性的等深度凹槽组成。随之出现的多级阶梯式相位光栅^[5]提供了更大的灵活性,但加工工艺较复杂,成本较高。最近兴起的傅里叶相位光栅是基于傅里叶级数展开理论设计的平滑定义的表面结构,用来操纵反射太赫兹波的相位,使得在远场的检测平面上产生多个光束^[6]。虽然使用相位光栅能将本地振荡器功率有效地分配到混频器阵列上,但随着工作频率的升高,缩小的光栅二维微结构尺寸将直接导致器件的加工难度显著增加,且衍射波束的性能与精度密不可分^[7]。因此需要找到一种转换效率高、宽带、易调控、结构简单易加工的本振信号分配技术。

近年来,超材料对电磁波的调控能力,受到广泛关注,因其展现出许多新奇的、自然界物质无法实现的电磁特性,尤其在调控相位、振幅^[8]、偏振^[9]等方面显示出优越性,这一思路也促进了相关电磁器件的研制,比如雷达散射截面缩减^[10]、隐身衣^[11]、高分辨率的成像透镜^[12]等。为了减少三维超材料的厚度及构造复杂性,单层平面结构的超表面(Metasurfaces)广泛地用于调控电磁波^[13-14],此外可调超表面实现对相位的动态调控也成为研究热点^[15-16]。

编码超材料的概念是由东南大学崔铁军教授等人^[15]于 2014 年首次提出。相对于传统的模拟超材料,编码超材料以一种数字编码的方式来简化单元的设计,即物理的世界用数字去表征,能够更加高效地调控电磁波。其核心思想在于:通过设计“0”单元和“1”单元的编码序列来灵活地调控电磁波,用不同的编码序列来表征每个单元结构,并与优化算法相结合实现了微波频段的自由调控^[17]。该结构对电磁波调控的能力取决于所赋予的编码序列,极大简化了设计难度,同时能实现调控方式的多样化。

数字相位编码超材料具有波束调控频带宽、调控方式灵活、加工工艺简单等特点,其在微波及光波段已有成熟的理论及技术手段,但在太赫兹频段由于材料特性及加工工艺的限制,应用较少。基于编码超材料的相位调节机制,能够有效地实现 THz 波束的灵活调控^[18],如分束^[19]、移相及极化旋转^[20],这为太赫兹频段射电望远镜超导混频器阵列接收机的本振信号功率分配提供了新的思路。此外,提高外差接收机的工作频带对现代天体物理学有着广泛的影响,不仅可以同时获得更多的分子线,而且可以提供前所未有的宽带连续成像能力。根据南极冰穹 A 在太赫兹频段的大气透过率测试结果,在 0.75~15 THz 频段内存在多个大气观测窗口,其中 0.78~0.95 THz 和 1.25~1.4 THz 两个频段分别是观测 CI 和 H₂D⁺分子谱线的大气窗口^[21]。因此,全面了解相位编码超材料波束分离器的频率响应对于发展太赫兹频段宽带多波束接收机至关重要。

文中设计了 1×4 和 2×2 两种类型的 THz 波束分离器,基于金属结构的反射式编码超表面,实现四波束的分裂,工作频率范围在 0.85~1.45 THz,可以同时覆盖 0.78~0.95 THz 和 1.25~1.4 THz 两个天文观测窗口。其中,2×2 波束分离器的频率可调范围达 52%,四个波束信号功率相差不超过 10%,实现宽带 THz 波束的调控。此外,文中还仿真了不同入射角度下编码超材料对波束分离的效果来确定最佳入射角度(小于 30°),其角度响应对实现宽带覆盖也至关重要。

1 1bit 编码超表面的设计

1.1 调控电磁波的原理

电磁编码超表面是一种通过数字编码来设计并调控远场方向图的编码超表面,其单元结构由二进制数值“0”和“1”来描述(1bit情况),分别代表0°和180°反射相位^[22]。超表面对电磁波的调控原理不再是空间相位上的累积,而是电场以及磁场在单元两侧产生的相位以及幅度的突变特性,来调控电磁波在空间中的相位以及幅度分布^[23]。通过对“0”和“1”两个数字单元在二维平面上进行编码,在入射电磁波作用下,产生符合设计要求的远场方向图。

编码超材料调控电磁波的原理可以用传统的相控阵天线理论来解释^[15]:对于一般的方形超表面,如图1所示。包含N×N个大小相等边长为D的栅格,每个栅格D是由相同的“0”单元或“1”单元构成的子阵列。“0”单元和“1”单元的分布可以是任意设计的。第(m,n)单元的散射相位设为φ(m,n),其值可取0°或180°。上述的相位并非绝对相位,其值大小并不影响编码超表面的功能和性能,两个数字态所对应的基本单元在工作频率下相位差约为180°。

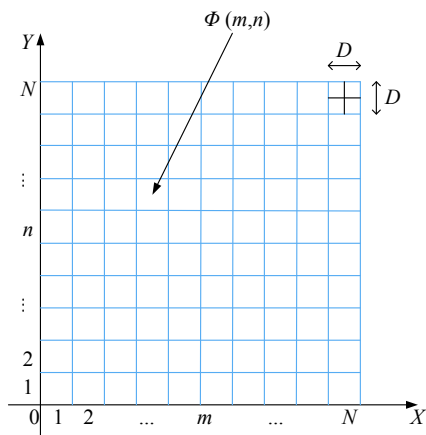


图 1 编码超表面的示意图

Fig.1 Schematic diagram of coding metasurfaces

在垂直平面波的照射下,编码超表面散射的远场函数可由公式(1)表示:

$$f(\theta, \varphi) = f_e(\theta, \varphi) \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \exp\{-i\{\varphi(m, n) + kD \sin\theta[(m - \frac{1}{2})\cos\varphi + (n - \frac{1}{2})\sin\varphi]\}\} \quad (1)$$

式中:θ和φ为俯仰角和方位角;f_e(θ,φ)为单个栅格远场的辐射函数,方向图函数可由公式(2)表示为:

$$\text{Dir}(\theta, \varphi) = \frac{4\pi|f(\theta, \varphi)|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} |f(\theta, \varphi)|^2 \sin\theta d\theta d\varphi} \quad (2)$$

因为“0”和“1”编码单元相位为0°或180°,两单元的散射特性相消,f_e(θ,φ)的辐射特性基本为0。从公式(1)和(2)看出,控制电磁编码超材料远场散射特性主要通过编码栅格单元的不同序列方式来实现^[24-25]。

1.2 基本单元结构

图2展示的是一种基于聚酰亚胺薄膜的人工单元。聚酰亚胺薄膜为柔性材料,易于弯曲和共形,从而增加了编码超表面在实际应用的灵活性。文中把含有圆环的结构作为“1”单元,不含圆环的结构作为“0”单元,如图2(a)和(b)所示。“0”单元整个结构由两层组成,从下到上,依次为金属背板-聚酰亚胺介质,“1”单元整个结构由三层组成,从下到上,分别为金属背板-聚酰亚胺介质-金属圆环。

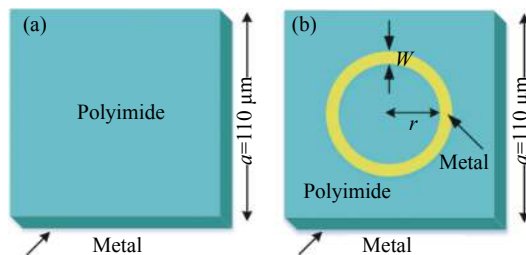


图 2 编码超表面的基本单元结构。(a)“0”单元结构;(b)“1”单元结构
Fig.2 Basic unit structure for coding metasurfaces. (a) "0" unit structure; (b) "1" unit structure

金属背板为0.2 μm厚的金,保证结构在透射率为0的同时具有高反射率。介质部分为40 μm厚的聚酰亚胺薄膜。金属圆环为金,厚度为0.2 μm,宽度w=5 μm,内半径r=31.5 μm。单元周期a=110 μm,“0”单元和“1”单元的反射相位及其相位差随频率的变化曲线如图3所示。

由图3可知,在0.85~1.45 THz频带范围内,“0”单元和“1”单元的相位差接近180°,反射相位差浮动值为±20°,相对工作带宽可由公式(3)计算得到:

$$ffoc = \frac{2(f_H - f_L)}{(f_H + f_L)} = 52\% \quad (3)$$

式中:f_H和f_L分别表示上限和下限频率。

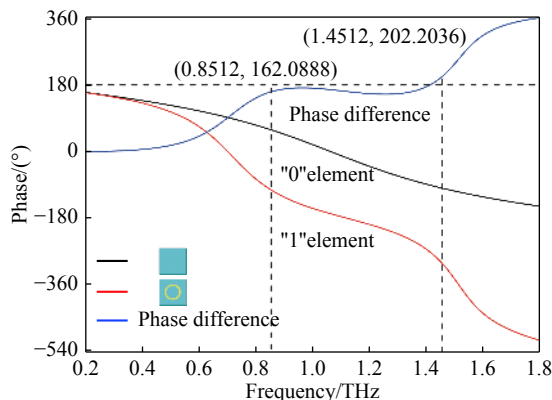


图 3 “0”单元和“1”单元的反射相位及其相位差

Fig.3 Reflection phase and phase difference of "0" element and "1" element

研究表明,当相位差处于 $160^{\circ}\sim 200^{\circ}$ 范围内时,编码超表面依旧可表现出较好的功能和性能,基于聚酰亚胺薄膜的人工单元满足设计需求。

1.3 超级子单元的选定

文中所选编码超表面的尺寸为 $10\lambda\times 10\lambda$, 相邻两条边的编码位数均为 10, 因此编码超表面被划分成 10×10 个栅格, 每个栅格的大小为 $\lambda\times\lambda$, 由一个编码位占据。每个栅格是由相同的“0”单元和“1”单元构成的子阵列。由单元反射相位图可知,以 1.15 THz 为中心,栅格尺寸 $D=\lambda=c/f\approx 260\ \mu\text{m}$, 单元结构周期 $a=110\ \mu\text{m}$, $D/a\approx 2$, 则一个栅格包含 2×2 个“0”单元或“1”单元的子阵列,这种由“0”单元和“1”单元组成的子阵列又叫做超级子单元。如图 4(a) 和 (b) 所示。

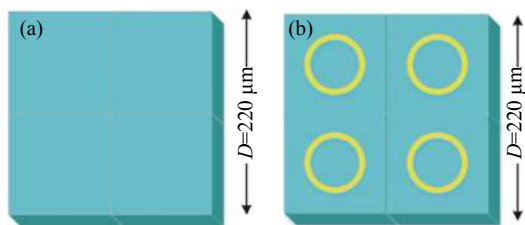


图 4 超级子单元 2×2 排布示意图。(a)“0”超级子单元; (b)“1”超级子单元

Fig.4 Schematic diagram of super subunit 2×2 arrangement. (a) "0" super subunit; (b) "1" super subunit

编码超表面中,编码单元的相位不仅与自身结构有关,同时受到单元之间电磁耦合的影响。当其相邻编码单元具有不同的结构尺寸时,反射相位将偏离设计值,导致其性能发生不可预测的恶化;另一方面超

级子单元的引入可以有效地增加编码序列的物理周期长度,使散射波处于可见角度范围内 ($\theta<90^{\circ}$)^[22]。

2 THz 波束分离器的设计

设计了两种分束方式 (1×4 和 2×2) 的波束分离器,以探究不同维度的分束对波束性能的影响。

2.1 1×4 波束分离器

为了研究不同的编码序列对 THz 波束数目分离的特性,数值模拟研究了多组编码序列的远场方向图。利用公式 (2) 可计算出任意编码序列下超表面的散射方向图,即空间散射波瓣图,最终可通过设计不同的编码序列实现对电磁波的控制^[14-15, 20]。经研究发现,编码序列的组合不是唯一的,可由编码位数及目标反射波束确定,且波束的夹角随着编码而变化^[24-25]。根据阵列匹配需求,选用的四波束编码序列为 0001000111(x 方向结构相同,沿着 y 方向进行编码),如图 5(a) 所示。在 3D 仿真软件 CST Microwave Studio 中建模,得到其远场方向图,如图 5(b) 所示,四个波束波瓣光滑,且在同一个维度上,可以达到和相位光栅均等分束的功能,此时观测频点为 1 THz。

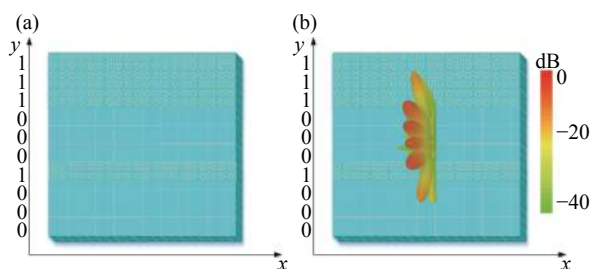


图 5 1×4 波束编码超表面。(a) 阵面排布; (b) 远场方向图

Fig.5 1×4 beam coding metasurfaces. (a) Array arrangement; (b) Far-field pattern

图 6 为 1×4 波束分离器在 1 THz 的功率谱图,分离后的四个主瓣 (A、B、C、D) 波束功率基本一致,功率值最大相差为 1 dB,约为总功率的 10%。仿真结果表明,在 0.9~1.1 THz 频段,四个波束功率相差均不超过 10%,而在低频段 0.85~0.9 THz 和高频段 1.1~1.45 THz,四波束分离效果较差,达不到理想的功率差不超过 10% 的预期值。同时,在 0.85~1.45 THz 整个频段内,分离后的波束旁瓣都较强,需进一步优化降低其功率,以减少信号的损失。

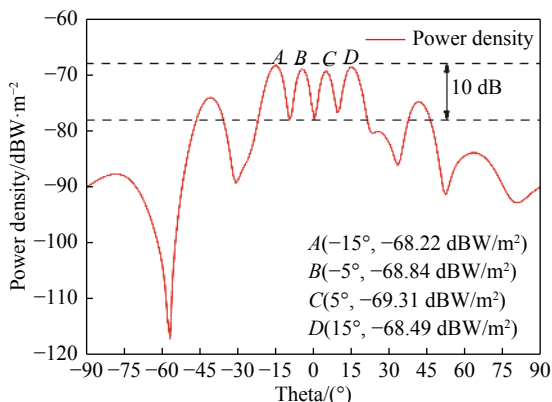


图 6 1×4 波束功率谱图, A, B, C, D 为四波束最高点

Fig.6 1×4 beam power spectrum, A, B, C, D are the highest point of the four beams

2.2 2×2 波束分离器

考虑到实际测试阵列匹配的需求,进一步优化四波束的性能,在完成 1×4 分束的基础上,通过维度的改变,设计了 2×2 波束分离器。与 1×4 波束分离器不同,2×2 分束器产生的四个反射波束两两共面,此时需要考虑二维编码(对 x 和 y 方向同时编码)。

研究表明,通过对编码超材料中“0”、“1”单元设计有序的编码排列,便可实现所需 THz 波束的分离,如图 7 所示。当编码序列沿 x 或 y 方向的一个方向进行编码 00000011111,可实现入射 THz 波的二波束分离,如图 7(b) 所示,当沿着 x 和 y 方向同时编码 00000011111,就可以实现入射 THz 波 2×2 波束的分裂,如图 7(d) 所示。此时,选取中心频率 1.15 THz 为观测频点。

图 8 为对应频点的功率谱图,分离后的四个主瓣波束功率值最大相差 0.68 dB,在 0.85-1.45 THz 频段范围内,功率差值均不超过 10%。从旁瓣来看,2×2 分束的设计也要优于 1×4 分束,旁瓣抑制强,能量集中在主瓣。因为有序编码排列设计的超表面实质上是反射波打散,使其均匀分布,在优化过程中随着分束数目增多,能量分布越均匀,导致旁瓣幅度的增加。相比于 1×4 分束的设计,2×2 分束在同一个极化方向上是 1×2 的分束,因此 2×2 分束的旁瓣要小于 1×4 分束,得到的四波束两两共面,能量更集中,工作频带更宽,信号损失较小,且更均匀地分布在四个波束上。

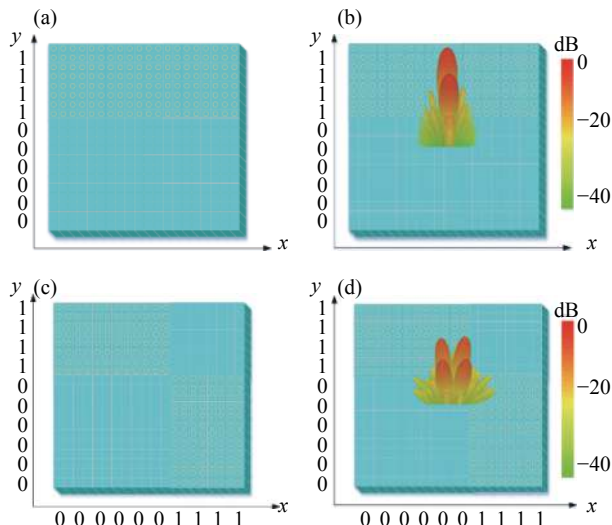


图 7 2×2 波束编码超表面。(a) 一维阵面排布; (b) 一维编码远场方向图; (c) 二维阵面排布; (d) 二维编码远场方向图

Fig.7 2×2 beam coding metasurfaces. (a) One-dimensional array arrangement; (b) One-dimensional coding far-field pattern; (c) Two-dimensional array arrangement; (d) Two-dimensional coding far-field pattern

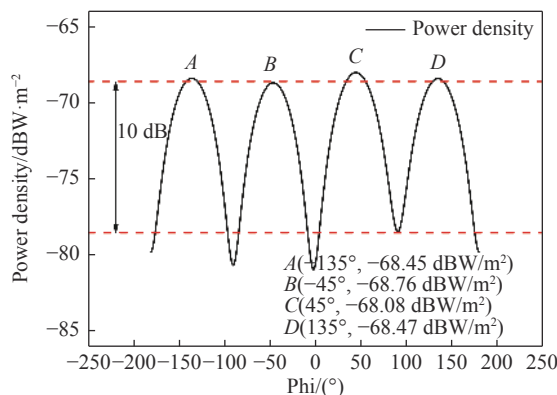


图 8 2×2 波束功率谱图, A, B, C, D 为四波束最高点

Fig.8 2×2 beam power spectrum, A, B, C, D are the highest point of the four beams

3 斜入射下 THz 波束分离器的研究

实际测试中,太赫兹波以斜入射方式打到分束器表面,入射角度的大小直接影响波束分离的性能,研究其内在影响机制对分束器的设计具有重要意义。

仿真了不同入射角度下,编码超表面“0”单元和“1”单元的反射相位及其反射相位差,并与垂直入射(0° 入射)作对比,如图 9 所示。

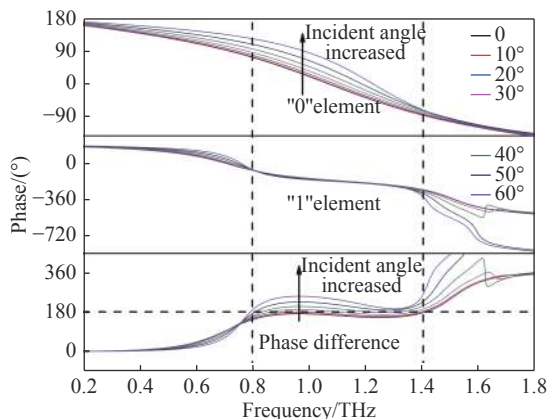


图 9 不同入射角度下“0”单元和“1”单元反射相位及其相位差
Fig.9 Reflection phase and phase difference of "0" element and "1" element under different incident angles

结果表明,对于“0”单元,在 0.2~1.8 THz 频带内,随着入射角度的增加,反射相位逐渐增加。对于“1”单元,当入射角度增加到 30°以上时,反射相位在 1.4~1.8 THz 出现了严重的下降突变,导致其性能急剧恶化。

由电磁波调控编码超表面的原理可知,对于 1 bit 的超材料单元,使“0”单元和“1”单元在一个宽频带内实现 180°反射相位差是关键。从图 9 的仿真结果可以看出,当入射角度超过 30°时,随着入射角度的进一步增大,在 0.8~1.4 THz 频带内“0”单元和“1”单元之间的反射相位差明显偏离 180°,器件的工作带宽受到影响,性能失真严重。

基于以上子单元的反射相位,仿真了不同入射角度 10°、20°、30°、40°下,编码超表面波束分离的远场图,如图 10 所示。由于研究目的为了得到最佳斜入射角度,入射角度为变量,所以观测远场方向图频率点均设置为中心频率 1.1 THz。从图中很明显地发现,在入射角 30°以内,1×4 和 2×2 编码超表面均实现了较好的波束分离。当入射角度达到 40°时,如图 10(d) 和 (h) 所示,器件的分束性能受到明显影响,四波束不再均分且波束分离效果较差,结果与图 9 的相位仿真相统一,由此得到测试系统最佳的斜入射角度范围(小于 30°)。

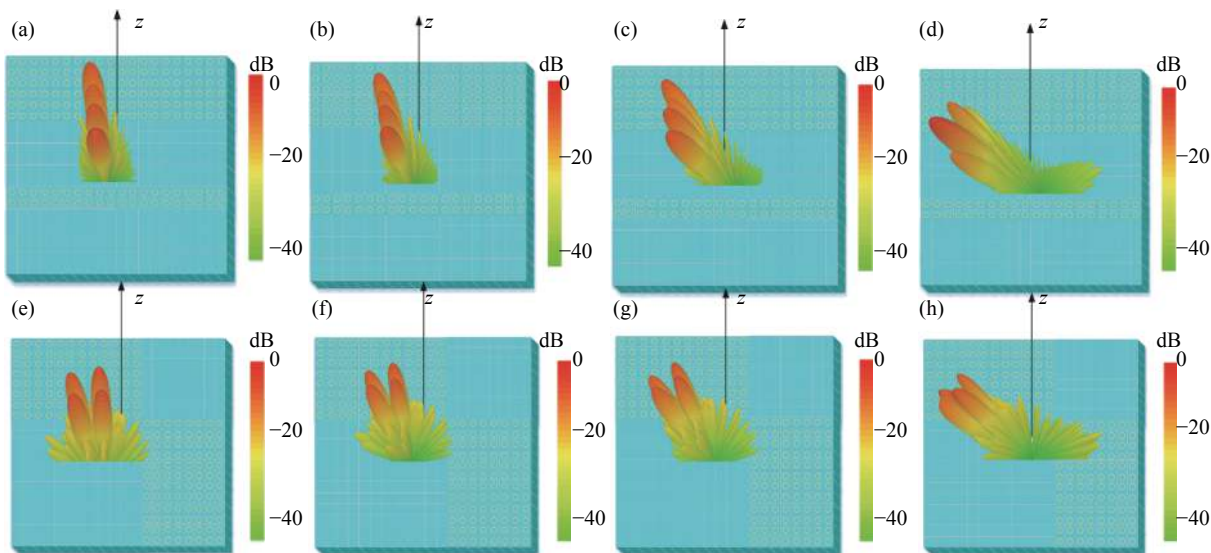


图 10 1×4 波束分离的远场图: (a) 10°入射,(b) 20°入射,(c) 30°入射,(d) 40°入射; 2×2 波束分离的远场图: (e) 10°入射, (f) 20°入射, (g) 30°入射, (h) 40°入射

Fig.10 Far field pattern of 1×4 beam separation: (a) 10° incidence, (b) 20° incidence, (c) 30° incidence, (d) 40° incidence; Far field pattern of 2×2 beam separation: (e) 10° incidence, (f) 20° incidence, (g) 30° incidence, (h) 40° incidence

4 结论

文中基于编码超材料技术设计了一个太赫兹频段的四波束分离器,深入研究了波束调控的物理机制。仿真结果表明,对于垂直入射或者以一定角度入

射的平面波,在设定的编码超表面上,可以实现四波束在一维和二维方向的分束,在入射角度小于 30°的情况下,基于二维分束机制的波束分离器,可实现工作频率相对带宽 52%,反射的四个波束功率值相小于 10%的良好结果。

基于相位编码超材料技术的太赫兹波束分离器有望解决现有分束器在 THz 高频段存在特性变差, 损耗增大, 难以制作等瓶颈问题, 为太赫兹波段射电望远镜的混频器阵列接收机本振分配技术提供了新的思路和研究方法, 具有重要的科学意义和实用价值。

参考文献:

- [1] Risacher C, Guesten R, Stutzki J, et al. The upGREAT 1.9 THz multi-pixel high resolution spectrometer for the SOFIA observatory [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2016, 595: A34.
- [2] Kloosterman J L, Hayton D J, Ren Y, et al. Hot electron bolometer heterodyne receiver with a 4.7-THz quantum cascade laser as a local oscillator [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(1): 11123.
- [3] Groppi C, Walker C, Kulesa C, et al. Testing and integration of SuperCam, a 64-pixel array receiver for the 350 GHz atmospheric window[C]//Proc of SPIE, 2010,7741:1-11.
- [4] Dammann H, Klotz E. Coherent optical generation and inspection of two-dimensional periodic structures [J]. *Optica Acta International Journal of Optics*, 1977, 24(4): 505-515.
- [5] Walker S J, Jahns J. Array generation with multilevel phase gratings [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1990, 7(8): 1509-1513.
- [6] Graf U U, Heyminck S. Fourier gratings as submillimeter beam splitters [J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2001, 49(4): 542-546.
- [7] Mirzaei B, Silva J R G, Luo Y C, et al. Efficiency of multi-beam Fourier phase gratings at 1.4 THz [J]. *Optics Express*, 2017, 25(6): 6581.
- [8] Zhang Xueqian, Zhang Huifang, Tian Zhen, et al. Simultaneous control of terahertz amplitude and phase with dielectric metamaterials [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0425004. (in Chinese)
- [9] Liu Yan, Fan Fei, Bai Jinjun, et al. Polarization-independent nonamer terahertz metamaterial [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(12): 1221002. (in Chinese)
- [10] Liang L, Wei M, Yan X, et al. Broadband and wide-angle RCS reduction using a 2-bit coding ultrathin metasurface at terahertz frequencies [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(39252): 1-9.
- [11] Ma H F, Cui T J. Three-dimensional broadband ground-plane cloak made of metamaterials [J]. *Nature Communications*, 2010, 1: 21.
- [12] Jiang W X, Qiu C, Han T C, et al. Broadband all-dielectric magnifying lens for far-field high-resolution imaging [J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(48): 6963-6968.
- [13] Ma S, Hao J, Qiu M, et al. Tailor the functionalities of metasurfaces based on a complete phase diagram [J]. *Physical Review Letters*, 2015, 115(23): 235503.
- [14] Gao L, Cheng Q, Yang J, et al. Broadband diffusion of terahertz waves by multi-bit coding metasurfaces [J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(9): e324.
- [15] Cui T J, Qi M Q, Wan X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials [J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(10): e218.
- [16] Liu L, Zhang X, Kenney M, et al. Broadband metasurfaces with simultaneous control of phase and amplitude [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(29): 5031-5036.
- [17] Zhang Lei, Liu Shuo, Cui Tiejun. Theory and application of coding metamaterials [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 1-12. (in Chinese)
张磊, 刘硕, 崔铁军. 电磁编码超材料的理论与应用[J]. *中国光学*, 2017, 10(1): 1-12.
- [18] Liang L, Qi M, Yang J, et al. Anomalous terahertz reflection and scattering by flexible and conformal coding metamaterials [J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(10): 1374-1380.
- [19] Liu S, Cui T J, Zhang L, et al. Convolution operations on coding metasurface to reach flexible and continuous controls of terahertz beams [J]. *Adv Sci (Weinh)*, 2016, 3(10): 1600156.
- [20] Liu S, Cui T J, Xu Q, et al. Anisotropic coding metamaterials and their powerful manipulation of differently polarized terahertz waves [J]. *Light: Science & Applications*, 2016, 5(5): e16076.
- [21] Shi S, Paine S, Yao Q, et al. Terahertz and far-infrared windows opened at dome A in antarctica [J]. *Nature Astronomy*, 2016, 1: 1.
- [22] Liu Shuo. Coding metasurfaces based on digital representation and its application[D]. Nanjing: Southeast University, 2017. (in Chinese)
- [23] Liu Junfeng, Liu Shuo, Fu Xiaojian, et al. Terahertz information metamaterials and metasurfaces [J]. *Journal of Radars Sinica*, 2018, 7(1): 46-55. (in Chinese)
- [24] Qi Meiqing. Modulation and application of electromagnetic waves by metamaterial lens and metasurfaces[D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese)
- [25] Yan Xin, Liang Lanju, Zhang Zhang, et al. Multi-functional dynamic modulation of terahertz beam based on graphene coding metamaterials [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(11): 224-234. (in Chinese)