2025年4月

文章编号: 2095-4980(2025)04-0376-09

基于双频段幅相双调控超表面的阵列波束赋形

王玲,王翔,丁军*

(华东师范大学 物理与电子科学学院, 上海 200241)

摘 要:提出一种双频段幅相双调控超表面,实现在2个预设频点上任意形状的波束赋形。 即将2个不同尺寸的谐振器组合在超表面单元中,使其能够在2个频点处独立进行幅度和相位的控制。在线极化激励下,幅度调控通过旋转谐振器实现;相位调控则通过改变谐振器的开口大小实现。利用结合泰勒综合法和遗传算法的改进型阵列综合算法,获得非常符合目标形状的远场方向图,且由此得到的相位范围较小,有利于实现高效率阵列波束赋形。最后设计了一个在6.25 GHz 和15 GHz处可分别产生平顶波束和余割平方波束的超表面阵列。全波仿真结果表明,所设计的超表面阵列产生的波束和目标波束吻合很好,且旁瓣水平较低。本文提供了利用双频段超表面实现远场阵列波束赋形的新途径。

DOI: 10.11805/TKYDA2023334

Array beamforming based on dual-band complex-amplitude metasurface

WANG Ling, WANG Xiang, DING Jun*

(School of Physics and Electronic Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: A dual-band amplitude and phase dual-regulation metasurface is proposed to achieve arbitrary beamforming shapes at two preset frequencies. By combining two resonators of different sizes in the metasurface unit, independent amplitude and phase control can be realized at the two frequency points. Under linear polarization excitation, amplitude regulation is achieved by rotating the resonators, while phase regulation is realized by changing the size of the resonator openings. An improved array synthesis algorithm, combining Taylor synthesis and genetic algorithm, is employed to obtain far-field patterns that closely match the desired shapes. The resulting phase range is relatively small, which is conducive to achieving high-efficiency array beamforming. A metasurface array that can generate a flattop beam at 6.25 GHz and a cosecant-squared beam at 15 GHz is designed. The full-wave simulation results show that the beams generated by the designed metasurface array match the target beams very well, with low sidelobe levels. This work provides a new approach to far-field array beamforming using dual-band metasurfaces.

Keywords: dual-band; complex-amplitude; metasurface; beamforming

在卫星通信、传感和成像系统等众多应用中,都需要天线阵列的远场方向图符合特定的目标形状^[14]。平顶 波束因在期望的覆盖范围内可提供一致的信号强度^[5],且在较宽的角度范围内具有均匀增益和较低波纹的特性而 备受青睐。自适应相控阵天线可通过控制阵列中每个天线单元的幅度和相位实现平顶波束^[6],但这种方法馈电网 络复杂;余割平方波束在余割平方区域内增益逐渐减小,因此常用于监视雷达系统中,确保在恒定高度接近的 目标能够在一定功率下被检测到^[7]。虽然余割平方波束可通过构造大型反射面实现^[8],但微波频率的反射面体积 大,重量重。因此,有必要探究更简单有效的波束赋形方法。

基于超表面的波束赋形是一个新兴研究领域,作为由二维周期性亚波长结构组成的人工材料,超表面提供 了引导和控制电磁波的独特潜力,可实现全新的、期望的功能^[9],因此超表面引起了研究人员的广泛关注。超表

收稿日期: 2023-10-27; 修回日期: 2023-12-06 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62171186) *通信作者: 丁 军 email:jding@ee.ecnu.edu.cn 面可通过改变单元的结构控制幅度和相位^[10-12],消除对复杂馈电网络的需求,降低整个天线系统的重量和复杂 性。通过精确控制阵列中每个阵元的幅度和相位,可得到目标的形状波束^[13]。在波束赋形超表面设计领域,目 前研究主要集中于单频段波束赋形^[14-15]。由于超表面的色散特性,在2个频点同时实现不同形状的波束赋形的工 作鲜有报道。在超表面单元的设计中,虽然双频段单元已被提出,但这些研究主要侧重于相位控制^[16],能够同 时实现幅度和相位独立调控的双频段超表面单元的研究屈指可数。

本文提出一种双频段幅相双调控超表面单元,通过旋转超表面单元中的2个谐振器,能够在保持相位稳定的 情况下,独立地调控2个频点的透射幅度的连续变化,而谐振器的开口角度则决定了透射相位的变化;其次,采 用结合泰勒综合法和遗传算法的改进型阵列综合算法,确定阵列最佳的幅度和相位分布,所得的相位分布范围 较小,有利于实现高效率阵列波束赋形;最后,作为示例,设计了一款超表面实现不同形状的波束。全波仿真结 果显示,这一超表面阵列在2个预设频点(6.25 GHz和15 GHz)处分别产生了平顶波束和余割平方波束。

1 改进型阵列综合算法理论

图1为双频段波束赋形超表面的功能示意图。该波束赋形超表面由2层介质和3层金属层构成,其中顶层和 底层为相互正交的金属光栅,用于提高极化转换效率;中间的金属层是由超表面单元组成的功能层,用于实现 波束赋形。在+z方向x极化波入射的情况下,该超表面可在6.25 GHz和15 GHz两个频段独立形成不同形状的y 极化波束,分别为平顶波束和余割平方波束。



Fig.1 Function schematic of dual-band beamforming metasurface 图1 双频段波束赋形超表面功能示意图

为得到目标波束,采用改进型阵列综合算法对阵列进行综合。这一方法将传统基于阵元方向图合成的波束 赋形方法转变为基于一组低旁瓣波束的线性加权叠加波束合成机制^[17]。这些低旁瓣波束通过泰勒综合法获取。 在综合平顶波束时,波束权值通过对目标波束进行采样获得^[18];而在综合余割平方波束时,波束权值的求解则 需运用遗传算法。

1.1 阵列综合原理

均匀直线阵列的结构如图2(a)所示。对于该阵列的波束合成,阵列方向图的表达式[18]为:

$$f(\theta,\theta_0) = \sum_{m=1}^{2M} e^{jkd(m-M-0.5)\sin\theta} a_m e^{j(m-M-0.5)\Delta\beta}$$
(1)

式中: θ_0 为阵列的波束指向角;2M为偶数阵列的阵元数目;k为波常数;d为阵元间距; a_m 为阵元m的激励幅度; $\Delta\beta$ 为相邻阵元激励的相位差^[17],其表达式为:

$$\Delta\beta = -kd\sin\theta_0 \tag{2}$$

1.2 改进型阵列综合算法

第一步,确定所需的抽样总数。采用泰勒综合法综合线阵的幅度分布,可得到期望的低旁瓣^[19];然后计算

(3)

出阵列的半功率波瓣宽度(BW)_h,根据式(3)初步确定抽样总数N。在此基础上小范围调整就可使合成的方向图更加接近目标。



Fig.2 Simulated results of the improved array synthesis algorithm Fig.2 改进型阵列综合算法的仿真结果

第二步,确定抽样点角度和权重系数。为形成式(4)所示 6.25 GHz 的-30°~30°之间的目标平顶波束,采用两种方法(分别对 θ_0 和Δβ等间隔采样)对目标波束进行采样,进而确定每个波束的权重系数。对 θ_0 等间隔采样时,根据式(5)计算出抽样间隔Δθ后就可确定抽样点角度;对Δβ等间隔采样时,首先需利用式(2)计算出Δβ的范围,然后计算出Δβ的间隔,进而确定每一个Δβ的值,再根据式(2)转换成抽样点角度。

$$T_{1}(\theta) = \begin{cases} 1, & -30^{\circ} \le \theta \le 30^{\circ} \\ 0, & \ddagger \psi \end{cases}$$
(4)

王 玲等:基于双频段幅相双调控超表面的阵列波束赋形

$$\Delta \theta = \frac{BW}{N-1} \tag{5}$$

为形成式(6)所示15 GHz的0°~40°之间的目标余割平方波束,使用Δβ等间隔采样(方法1)和遗传算法(方法2) 确定每个波束的权重系数。在遗传算法中,采用适应度函数(式(7))计算适应度。由于每个波束都是由泰勒综合 法得来,波束的旁瓣已受到控制,因此,遗传算法只需控制主瓣的波纹,适应度函数只需计算主瓣的误差即可, 大大加快了算法的迭代速度。

$$F_{t} = \frac{1}{\sum_{\theta} |G(\theta) - T(\theta)| + 1}$$
(7)

式中:T(θ)为目标方向图;G(θ)为合成方向图。

第三步,叠加抽样波束。根据阵列综合原理控制波束指向确定的各个抽样点角度;然后使用确定的权重系数将这些波束进行加权叠加。假设有N束扫描波束,其指向角度为(θ_1 , θ_2 ,…, θ_N),则赋形波束可认为是这些波束的加权叠加,权重系数为(b_1 , b_2 ,…, b_N)。波束叠加公式如式(8)所示,合成方向图如式(9)所示。

$$F(\theta) = b_1 f(\theta, \theta_1) + b_2 f(\theta, \theta_2) + \dots + b_N f(\theta, \theta_N)$$
(8)

$$G(\theta) = 20 \lg \left[\left| F(\theta) \right| / \max \left(\left| F(\theta) \right| \right) \right]$$
(9)

对 θ_0 和 $\Delta\beta$ 等间隔采样之后,叠加得到的平顶波束效果对比如图2(b)所示。从图2(b)可见,相比对 θ_0 等间隔采 样,对 $\Delta\beta$ 等间隔采样得到的结果与目标方向图更吻合;利用方法1和方法2确定权重系数后,叠加得到的余割 平方波束效果对比如图2(d)所示,从图2(d)可见,使用方法2得到的结果更符合目标方向图。

第四步,计算激励。将对点源阵按阵元叠加和对波束叠加的公式进行比对,推导得到的为实现目标波束阵列中每个单元所需的激励,见式(10)。将激励表示为超表面单元所需的幅度和相位响应,然后再对幅度和相位进行离散化,最终得到的平顶波束和余割平方波束所需阵列的28个单元的幅度相位分布分别见图2(c)和图2(e)。从图2(c)可以看出,平顶波束所需的相位只需1bit,且幅度相位呈对称分布;而图2(e)余割平方波束所需的相位只需要±30°的范围,且幅度呈对称分布,相位呈反对称分布。由此种改进算法得到的激励所需的相位范围较小,有利于超表面单元的高效率设计。

$$I_m = a_m \sum_{n=1}^{N} b_n e^{-jkd(m-M-0.5)\sin\theta_n}$$
(10)

2 双频段幅相双调控超表面单元设计

对本文提出的超表面单元在C波段和Ku波段的性能进行研究。工作频率取为f₁=6.25 GHz和f₂=15 GHz,这2 个频点的选择相对较远,有助于避免二者之间的相互影响;超表面单元的周期*p*=7 mm,小于半波长。根据天线 阵列理论,这样的设计目标确保了超表面单元的有效性。图3(a)为该单元的三维示意图,该单元由2层介质板和 上下两层相互垂直的金属光栅以及中间金属层组成。其中,两层介质板的材料均为Taconic RF-60A,介电常数 为6.15,损耗角正切为0.002 8,厚度为*h*=2.3 mm;金属材料为铜,电导率为5.96×10⁷ S/m,厚度为0.035 mm;金 属光栅的宽度为0.5 mm,占空比为50%。中间金属层由C型开口谐振器和C型开口环状缝隙谐振器组成,且外 部和内部的结构使用中间的铜环隔离,以降低2个谐振器之间的串扰,如图3(b)所示。外部C型开口谐振器(内 部C型开口环状缝隙谐振器)的半径、宽度和开口角度分别表示为*r*₁(*r*₂)、*w*₁(*w*₂)和*θ*₁(*θ*₂),而它们相对于*x*轴正半 轴的旋转角度为*φ*₁(*φ*₂)。

该结构中,顶层和底层的光栅之间的法布里-珀罗谐振效应能够实现高极化转换效率。当x极化入射波沿+z 方向透过该超表面时,其极化方向相对入射波极化方向会旋转90°,然后y极化透射波将通过顶层沿x轴排布的 光栅传输;如果以y极化波入射,大部分入射波会被底层沿y轴排布的光栅反射,未能穿过超表面做进一步的传 播。中间金属层作为功能层负责实现极化转换,其中的2个谐振器用于实现2个频段的幅度和相位的独立调控。 通过优化谐振器和铜环的位置和间距,可实现在2个频点上的独立工作。

为研究该超表面单元的特性,使用CST Microwave Studio进行全波仿真。仿真中, x和y方向采用unit cell边

(11)

界条件, *z*方向采用 open(add space)边界条件。为简化设计过程,单元的部分结构参数固定为(单位: mm): r_1 = 2.9, r_2 =1.3, r_3 =3.4, r_4 =2.5, r_5 =1.7, w_1 =0.2, w_2 =0.2, w_3 =0.2; 2个谐振器的开口角度固定为: θ_1 =5°, θ_2 =25°。透射系数与谐振器的旋转角度之间的关系^[20]表示为:



(a) three-dimensional view (b) top view of the middle patterned metallic layer Fig.3 The three-dimensional view of the proposed meta-atom and the top view of the middle patterned metallic layer 图 3 单元的三维立体图和中间金属层的结构图

通过控制 2 个谐振器的旋转角度,该超表面可在 2 个频点实现覆盖 0~1 之间的透射幅度,180°的相位变化。 图 4 为沿+z 方向 x 极化波入射下,当 $\varphi_1(\varphi_2)$ 变化时,超表面透射 y 极化分量的幅度和相位变化。从图 4 可见, f_1 = 6.25 GHz(f_2 =15 GHz)处的透射波的幅度响应由外部 C 型开口谐振器(内部 C 型开口环状缝隙谐振器)的旋转角度 φ_1 (φ_2)调控。具体而言,当旋转 $\varphi_1(\varphi_2)$ 时,6.25 GHz(15 GHz)获得 0~1 之间的连续幅度调控,且当旋转角度为 $\varphi_1(\varphi_2)$ 和 $-\varphi_1(-\varphi_2)$ 时,单元的幅度响应基本一致;当旋转角度从[-45°,0]变化到[0,45°]时,单元的透射相位呈现180°的 跳变,且当旋转角度的符号不变时,相位能稳定在同一数值。此外,还可以看出,当旋转 $\varphi_1(\varphi_2)$ 时, $f_2(f_1)$ 处的相 位和幅度基本不变,表明单元在2个频点是独立工作的。因此,本文所提出的超表面单元可在2个频段上实现独 立的幅度和相位控制(即幅相双调控),并具有较高的传输效率,传输系数最高为0.94(6.25 GHz)和0.96(15 GHz)。



通过改变C型开口环状缝隙谐振器的开口角度,该超表面可在15 GHz处获得±30°之间的7级相位调制。将 φ₁和φ₂的值均固定为45°,C型开口环状缝隙谐振器的开口角度优化为θ₂=[11°,22°,30°,38°,46°,54°,61°]。这 7个单元在14~16 GHz范围内的透射相位如图5 所示,可以看出,在15 GHz处透射相位两两相差10°,因此可以 实现±30°之间的7级相位响应。6.25 GHz和15 GHz处的幅度响应如图6 所示,可以看出,改变C型开口环状缝隙 谐振器的开口角度基本不影响2个频点处的幅度。虽然15 GHz的幅度有轻微下降的趋势,但仍保持在0.8 以上, 保证了这7个单元的高效率。因此,调整C型开口谐振器的结构能够有效控制6.25 GHz处的透射幅度,并可得到 180°的相位跳变,满足生成平顶波束的条件;调整C型开口环状缝隙谐振器的结构可有效控制15 GHz处的透射 幅度,并可得到±30°之间的7级相位,满足生成余割平方波束的条件。



3 双频段波束赋形超表面设计

Ŧ

为了验证所提出的双频段超表面单元的性能,设计并成功实现了一款双频段波束赋形超表面。该超表面在 6.25 GHz 处能够实现-30°~30°之间的平顶波束,在15 GHz 处能够实现 0°~40°之间的余割平方波束,且这2个频点 处的波束旁瓣都低于-20 dB。



 Fig.7 Rotation angles of the C-shape ring resonators for meta-atoms in the linear array(θ₁=5°)
 图 7 阵列中单元的C型开口谐振器的旋转角度(θ₁=5°)





图 2(c)和图 2(e)为 28 个单元在 6.25 GHz 和 15 GHz 离散化之后的幅度和相位,相应的单元结构参数(φ_1 、 φ_2 和 θ_2)可在图 4 和图 5 中查到。平顶波束所需的相位只有 2 个值,即 0°和 180°。当 C 型开口谐振器的旋转角度符号改变时,可得到 180°的相位变化且不会引起幅度变化;其大小改变时,可调幅且不会引起相位的变化。因此,只

需改变 φ_1 就能得到平顶波束所需的相位和幅度。超表面阵列中每个单元的C型开口谐振器旋转角度如图7所示。此外,余割平方波束所需的相位包括±30°之间的7个值,间隔为10°。当C型开口环状缝隙谐振器的开口角度改变时,可得到所需的相位值且基本不影响幅度;幅度的改变则通过旋转C型开口环状缝隙谐振器实现。因此需要改变 θ_2 和 φ_2 才能得到余割平方波束所需的相位和幅度。超表面阵列中每个单元的C型开口环状缝隙谐振器的开口角度和旋转角度如图8所示。

根据图7、图8建立最终的超表面结构模型,其中间金属层的局部单元分布如图9所示。使用CST Microwave Studio 对此超表面阵列进行仿真验证,激励为沿z轴正方向



Fig.9 Local unit distributions of the middle patterned metallic layer of metasurface
图9 超表面阵列中间金属层局部单元分布

入射的x极化平面波,阵列仿真采用自动网格剖分。从图10(a)可以看出,本文方法综合的方向图在6.25 GHz处、 [-30°,30°]范围内平均波动为0.43 dB,而全波仿真的主瓣平均波动为0.70 dB,它们的峰值旁瓣电平分别为 -26.61 dB和-19.87 dB。类似地,从图10(b)可观察到,本文方法综合的方向图在15 GHz处、[0°,40°]范围内平均 波动为0.77 dB,全波仿真的主瓣平均波动为0.79 dB,它们的峰值旁瓣电平分别为-26.65 dB和-20.77 dB。综合 与全波仿真的差异在于方向图计算公式并未考虑仿真中存在的单元之间相互耦合和全波仿真中边界散射问题。 总体而言,全波仿真与综合的结果基本一致,且与目标吻合较好。由于实现了优化的幅度和相位分布,当以极 坐标的形式表示时,在xoz平面上,6.25 GHz处的透射波会形成一个扇形的远场图案,如图10(c)所示;而15 GHz 波束呈现出余割平方函数的形状,其极坐标图的形状接近三角形,如图10(d)所示。



Fig.10 Comparison between the the full-wave simulated and synthesized results 图 10 6.25 GHz平顶波束和15 GHz余割平方波束及其极坐标图的综合结果与全波仿真结果对比

2个频点处全波仿真的结果显示,主瓣平均波动都小于1 dB,旁瓣电平的峰值也接近-20 dB。尽管 6.25 GHz 处的旁瓣电平略高于-20 dB,但仅超出 0.13 dB,这些误差均在可接受的范围内。表1为本文工作与一些先前报 道的相关工作的比较。与其他工作相比,本文所设计的超表面阵列具备在2个频点同时实现平顶波束和余割平方 波束的能力,且主瓣波动较小,旁瓣电平较低。

	表1	与其他	文献	对比	
Table1	Com	parisons	with	other	work

reference	structure	center frequency/GHz	beamwidth/(°)	desired shape	average fluctuation/dB	sidelobe level/dB	number of elements
[21]	antenna array	S band	60	cosecant	≈1.22	-12.09	7
[22]	metasurface	11.10	60	flat-top	0.56	-14.00	24
[23]	antenna array	2.45	≈50	cosecant	0.56	-20.00	13
[24]	antenna array	3.00	≈13	cosecant-squared	≈0.35	-20.05	29
[25]	antenna array	10.00	≈35	cosecant-squared	<1.00	-20.00	16
[26]	conformal array	5.00	50	flat-top	0.50	-22.00	16
[27]	antenna array	2.45	20	cosecant-squared	≈0.15	-21.61	48
[28]	antenna array	1.00	≈20	flat-top	<1.00	-20.00	12
[29]	metasurface	10.00/11.80	36/34	flat-top	1.00/1.00	-10.00/-11.00	15×15
this work	metasurface	6.25/15.00	60/40	flat-top/cosecant-squared	0.70/0.79	-19.87/-20.77	28

4 结论

本文提出了一种基于双频段幅相双调控超表面的波束赋形方法,设计了一个双频段幅相双调控超表面单元。

该单元在选定的工作频点 6.25 GHz 和 15 GHz 分别实现了高达 0.94 和 0.96 的转换效率。单元的幅度和相位响应分 别由谐振器的旋转角度和开口角度独立控制,使双频段超表面可实现任意波束赋形。采用结合泰勒综合法和遗 传算法的改进型阵列综合算法进行数值优化,获得超表面阵列所需的幅度和相位分布,确保方向图能较好地满 足预期要求。优化得到的相位范围较小,有利于超表面的高效率设计。为演示功能,设计了一个用于形成平顶 波束和余割平方波束的双频段波束赋形超表面阵列。全波仿真结果显示,在 6.25 GHz 处产生了[-30°, 30°]范围内 的平顶波束,在 15 GHz 处观察到[0°,40°]范围内的余割平方波束。全波仿真与综合结果基本一致,且与预期目标 相符。本文的研究为使用双频段超表面生成任意波束形状提供了一种通用的新方法。

参考文献:

- WANG Chenghui, CHEN Yikai, YANG Shiwen. Dual-band dual-polarized antenna array with flat-top and sharp cutoff radiation patterns for 2G/3G/LTE cellular bands[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(11): 5907-5917. DOI: 10.1109/TAP.2018.2866596.
- [2] WANG Min,XU Shenheng,HU Nan,et al. Design and measurement of a Ku-band pattern-reconfigurable array antenna using 16 O-slot patch elements with p-i-n diodes[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020,19(12):2373-2377. DOI: 10.1109/LAWP.2020.3033355.
- [3] ABO EL-HASSAN M,AWADALLA K H,HUSSEIN K F. Shaped-beam circularly polarized antenna array of linear elements for satellite and SAR applications[J]. Wireless Personal Communications, 2020, 110(2): 605-619. DOI: 10.1007/s11277-019-06745-9.
- [4] 马炳,俞笔奇,张涛,等. 星载 Ka 频段波束赋形波纹喇叭天线设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(2):294-297. (MA Bing, YU Biqi, ZHANG Tao, et al. Design of a Ka band corrugated horn with shaped-beam for satellite communications[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(2):294-297.) DOI:10.11805/TKYDA201802.0294.
- [5] SINGH A K, ABEGAONKAR M P, KOUL S K. Wide angle beam steerable high gain flat top beam antenna using graded index metasurface lens[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019,67(10):6334-6343. DOI:10.1109/TAP.2019. 2923075.
- [6] MONAVAR F M,SHAMSINEJAD S,MIRZAVAND R,et al. Beam-steering SIW leaky-wave subarray with flat-topped footprint for 5G applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(3): 1108-1120. DOI: 10.1109/TAP. 2017. 2662208.
- [7] HENDERSON K Q,GHALICHECHIAN N. Triangular and rectangular lattices for cosecant-squared-shaped beam reflectarrays[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021,20(10):2058–2062. DOI:10.1109/LAWP.2021.3103152.
- [8] DASTRANJ A, ABIRI H, MALLAHZADEH A. Design of a broadband cosecant squared pattern reflector antenna using IWO algorithm[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013,61(7):3895-3900. DOI:10.1109/TAP.2013.2254439.
- [9] GRADY N K, HEYES J E, CHOWDHURY D R, et al. Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction[J]. Science, 2013,340(6138):1304-1307.
- [10] XIE Rensheng, GU Zhen, ZHANG Dajun, et al. High-efficiency full-space complex-amplitude metasurfaces enabled by a Bispectral single-substrate-layer meta-atom[J]. Advanced Optical Materials, 2022,10(5):2102084.
- [11] XU Hexiu, HU Guangwei, HAN Lei, et al. Chirality-assisted high-efficiency metasurfaces with independent control of phase, amplitude, and polarization[J]. Advanced Optical Materials, 2019,7(4):1801479. DOI:10.1002/adom.201801479.
- [12] ZHANG P F, GONG S X, MITTRA R. Beam-shaping technique based on generalized laws of refraction and reflection[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017,66(2):771-779. DOI:10.1109/TAP.2017.2778042.
- [13] SHI Li, DENG Yunkai, SUN Huifeng, et al. An improved real-coded genetic algorithm for the beam forming of spaceborne SAR[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012,60(6):3034–3040. DOI:10.1109/TAP.2012.2194642.
- [14] VINOD KUMAR P,GHOSH B. Design of circularly polarized flat-top pattern with phase gradient metasurface[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2022,32(5):e23113. DOI:10.1002/mmce.23113.
- [15] YIN Siyu, LI Jialin, YE Qicheng, et al. Low-profile metasurface lens antenna with flat-top radiation pattern[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2023(170):154819. DOI:10.1016/j.aeue.2023.154819.
- [16] TANG Ziyi, LI Ling, ZHANG Haochen, et al. Multifunctional Janus metasurfaces achieving arbitrary wavefront manipulation at dual frequency[J]. Materials & Design, 2022(223):111264. DOI:10.1016/j.matdes.2022.111264.
- [17] 郑占旗,阎跃鹏,张立军,等. 增加副瓣抑制机制的阵列天线波束赋形遗传算法研究[J]. 电子与信息学报, 2017,39(3):690-696. (ZHENG Zhanqi, YAN Yuepeng, ZHANG Lijun, et al. Research on genetic algorithm of antenna arrays beam shaping with side lobe suppression[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017,39(3):690-696.) DOI:10.11999/JEIT160466.
- [18] LI J Y,QI Y X,ZHOU S G. Shaped beam synthesis based on superposition principle and Taylor method[J]. IEEE Transactions on

Antennas and Propagation, 2017,65(11):6157-6160. DOI:10.1109/TAP.2017.2754468.

- [19] KUMARI U V R,RAJU G S N,PRASAD G M V. Generation of low sidelobe beams using Taylor's method and genetic algorithm[C]//
 2016 International Conference on ElectroMagnetic Interference & Compatibility(INCEMIC). Bengaluru, India: IEEE, 2016: 1–5. DOI:10.1109/INCEMIC.2016.7921466.
- [20] GUO Wenlong, CHEN Ke, WANG Guangming, et al. Airy beam generation: approaching ideal efficiency and ultra wideband with reflective and transmissive metasurfaces[J]. Advanced Optical Materials, 2020,8(21):2000860. DOI:10.1002/adom.202000860.
- [21] KUNDUKULAM S O, BEENAMOLE K S. Design of a linear array antenna for shaped beam using genetic algorithm[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2008,18(5):410-416. DOI:10.1002/mmce.20299.
- [22] LI Ximing,XI Xiang,CHEN Jian, et al. Stereo meta-atom enabled phase-amplitude gradient metasurface for circularly polarized waves[J]. Advanced Optical Materials, 2022,10(13):2200326. DOI:10.1002/adom.202200326.
- [23] BATTAGLIA G M, BELLIZZI G G, MORABITO A F, et al. A general effective approach to the synthesis of shaped beams for arbitrary fixed-geometry arrays[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2019,33(18):2404-2422. DOI:10.1080/ 09205071.2019.1683472.
- [24] LIU Y H, LI M, HAUPT R L, et al. Synthesizing shaped power patterns for linear and planar antenna arrays including mutual coupling by refined joint rotation/phase optimization[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(6): 4648– 4657. DOI:10.1109/TAP.2020.2975277.
- [25] FEI Yan, PENG Yang, FENG Yang, et al. Synthesis of pattern reconfigurable sparse arrays with multiple measurement vectors FOCUSS method[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017,65(2):602-611. DOI:10.1109/TAP.2016.2640182.
- [26] LIU Yanhui, BAI Jingjing, XU Kaida, et al. Linearly polarized shaped power pattern synthesis with sidelobe and crosspolarization control by using semidefinite relaxation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(6): 3207-3212. DOI:10.1109/TAP.2018.2816782.
- [27] LIU Yanhui, BAI Jingjing, ZHENG Jinxiang, et al. Efficient shaped pattern synthesis for time modulated antenna arrays including mutual coupling by differential evolution integrated with FFT via least-square active element pattern expansion[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020,69(7):4223-4228. DOI:10.1109/TAP.2020.3045513.
- [28] LIU Yanhui, HUANG Xin, XU Kaida, et al. Pattern synthesis of unequally spaced linear arrays including mutual coupling using iterative FFT via virtual active element pattern expansion[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(8): 3950-3958. DOI:10.1109/TAP.2017.2708081.
- [29] KUMAR P V, GHOSH B. Synthesis of a dual-band flat-top pattern using polarization dependent metasurface[J]. Progress in Electromagnetics Research Letters, 2021(100):81-89. DOI:10.2528/PIERL21070404.

作者简介:

王 玲(1996-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方 向为超表面、波束赋形.email:lingwang2023@163.com.

王 翔(1999-),男,在读硕士研究生,主要研究方向为超表面、波束赋形.

丁 军(1982-),男,教授,博士生导师,主要研究 方向为超材料/超表面、天线与射频电子器件等.