

一种“风车”形单元平面反射阵列天线的设计

马 宇, 张 浩, 刘 婷, 章海锋

(南京邮电大学电子与光学工程学院、微电子学院, 江苏 南京 210023)

[摘要] 为了改善反射阵列单元相位特性曲线的线性度, 扩大相位补偿的覆盖范围, 采用了一种新型的反射阵列单元, 即在传统的反射阵列单元上方加上一层介质匹配层. 仿真结果表明, 相比传统的设计方式, 新型反射阵列单元的相位特性曲线线性度得到明显改善, 相位补偿实现了 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的完全覆盖. 本文中固态等离子体 (GaAs) 代替金属工作, 利用固态等离子体的可重构特性设计了一款具有动态波束扫描的平面反射阵列天线, 反射主波束的方向分别达到了预期设计的 15° 、 20° 和 25° , 并且每个天线的副瓣和主瓣都相差了至少 10 dB 以上. 通过动态调节固态等离子体的激励状态, 即改变反射阵列单元的谐振结构, 可以实现空间波束扫描.

[关键词] 反射阵列天线, 相位补偿, 固态等离子体, 可调谐, 匹配层

[中图分类号] O441.4 [文献标志码] A [文章编号] 1001-4616(2019)02-0081-06

A Design of Windmill-Shaped Element Reflectarray Antenna

Ma Yu, Zhang Hao, Liu Ting, Zhang Haifeng

(College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: In order to improve the linearity of the phase shift curve of the reflective array unit and extend the coverage of the phase compensation, a new type of reflective array unit is adopted, i.e., a layer of dielectric matching layer is added over the conventional reflective array unit. The simulation results show that compared with the traditional design method, the linearity of the phase shift curve of the new type of reflective array unit is significantly improved, and the phase compensation achieves a completely coverage of $0^\circ \sim 360^\circ$. We use the solid plasma to replace the metal, which is realized by GaAs. Therefore, a reflectarray antennas with dynamic beam scanning were designed based on the the reconfigurable properties of solid plasma. The directions of the reflected main beams can concentrate on 15° , 20° , and 25° , respectively, which are expected, and each antenna's side lobe and main lobe are at least 10dB different. By dynamically adjusting the excitation state of the solid plasma, i.e., changing the excitation state of the resonance unit, space beam scanning can be achieved.

Key words: reflectarray antenna, phase compensation, solid plasma, tunable, matching layer

平面反射阵列天线^[1-5]结合了抛物面天线与微带天线的特点, 将传统的抛物面天线的反射面换成了平面阵列, 所以称为平面反射阵列天线, 也称 Flaps 天线 (Flat Parabolic Surface Antenna). 平面反射阵列天线相比于传统的抛物面天线^[6-7]和相阵天线^[8]有很多优点, 如无复杂的馈电和功分网络, 增益^[9]较大, 可以进行共形设计, 剖面低、质量轻、加工简单成本低. 平面反射阵列天线由许多反射阵列单元构成周期阵列, 在馈源喇叭^[10]的照射下, 通过调节阵面上每个反射阵列单元的反射相位^[11], 使反射波束^[12-14]在特定的方向上实现同相叠加, 形成高增益^[15]的波束.

平面反射阵列天线依靠反射阵列单元来进行相位修正, 目前在国内外用于调节反射相位的单元形式主要有尺寸型^[16]、旋转型和枝节型^[17-18]三种. 尺寸型单元通过改变贴片单元电尺寸的大小来实现相位修正; 旋转型反射阵列单元主要是应用于圆极化天线^[19-20]的设计, 调整每个反射阵列单元的旋转角度, 从而来补偿^[21-23]每个单元对中心单元反射波束的相移量; 枝节型的反射阵列天线, 是通过改变反射阵列单元

收稿日期: 2018-07-05.

基金项目: 南京邮电大学引进人才科研启动基金 (高水平师资) 项目 (NY217131).

通讯联系人: 章海锋, 博士, 教授, 研究方向: 电磁超材料、反射阵列天线. E-mail: hanlor@163.com

末端加载的传输线的枝节长度来修正每个单元的相移量。

尺寸型结构的设计制作方便简单,仿真分析相比较于其他两种也较为简便,主要是依靠反射阵列单元来调节反射相位,所以相移曲线的线性度和相位补偿的覆盖范围是影响平面反射阵列天线设计成功的关键因素。但是传统的单层反射阵列单元的相移曲线范围窄且曲线的线性度低,对于这类问题,传统的方式是通过改变反射阵列单元的结构参数^[24]使相移曲线满足设计要求,但需要大量仿真计算,Encinar^[25]等人曾提出采用叠层的方式弥补上述缺点,但是增加了成本和制作的难度,并且设计工序的增加也难免会引入人为误差。

为了解决以上问题,本文提出一种新型的反射阵列单元,通过在反射阵列单元的上方加玻璃介质匹配层的方式,增加了单元的厚度,使相移曲线的线性度改善,但是因为玻璃的介电常数较介质基板的介电常数大,所以在增加单元厚度的同时其相移曲线的覆盖范围没有缩小反而扩大。本文的目的在于通过巧妙地设计,可以使按照传统方法设计的不满足要求的反射阵列单元,能够改变成相移曲线线性度良好,相位补偿的范围完全覆盖 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 的反射阵列单元,为单元的设计提供了一种更为普适性的方法。在构成天线阵列单元的材料上,采用的是固态等离子体而非金属,利用固态等离子体可调谐特性就能设计出具有空间波束扫描功能的平面反射阵列天线。对基于固态等离子体天线的研究全世界还处于起步阶段,国内暂时还未有课题小组成功加工实现基于固态等离子体的平面反射阵列天线,所以本文的工作暂时不以实验为主要目的,不过相关的实验正在着手进行。

1 单元结构的设计与分析

图 1 为本文设计的风车形单元平面反射阵列天线的阵列单元结构示意图,图 1(a)为立体图,图 1(b)为正视图,图 1(c)为侧视图。由图 1(a)可知,反射阵列单元的结构分为 4 层,最上层为玻璃介质匹配层,第二层为形似风车的固态等离子体层,第三层为介质基板,最底层为金属铜背板,坐标的设定如图 1(a)中所示。最上层玻璃介质是长、宽都为 12 mm、高为 0.5 mm 的长方体,其介电常数为 5.5。介质基板是长和宽为 12 mm、高为 3 mm 的长方体,材料为 FR4_epoxy,介电常数为 4.4,损耗角正切的值为 0.02。固态离子体层和背板的厚度都为 0.1 mm,且背板是边长为 12 mm 的正方形。本文选择用 GaAs 来实现固态等离子体,

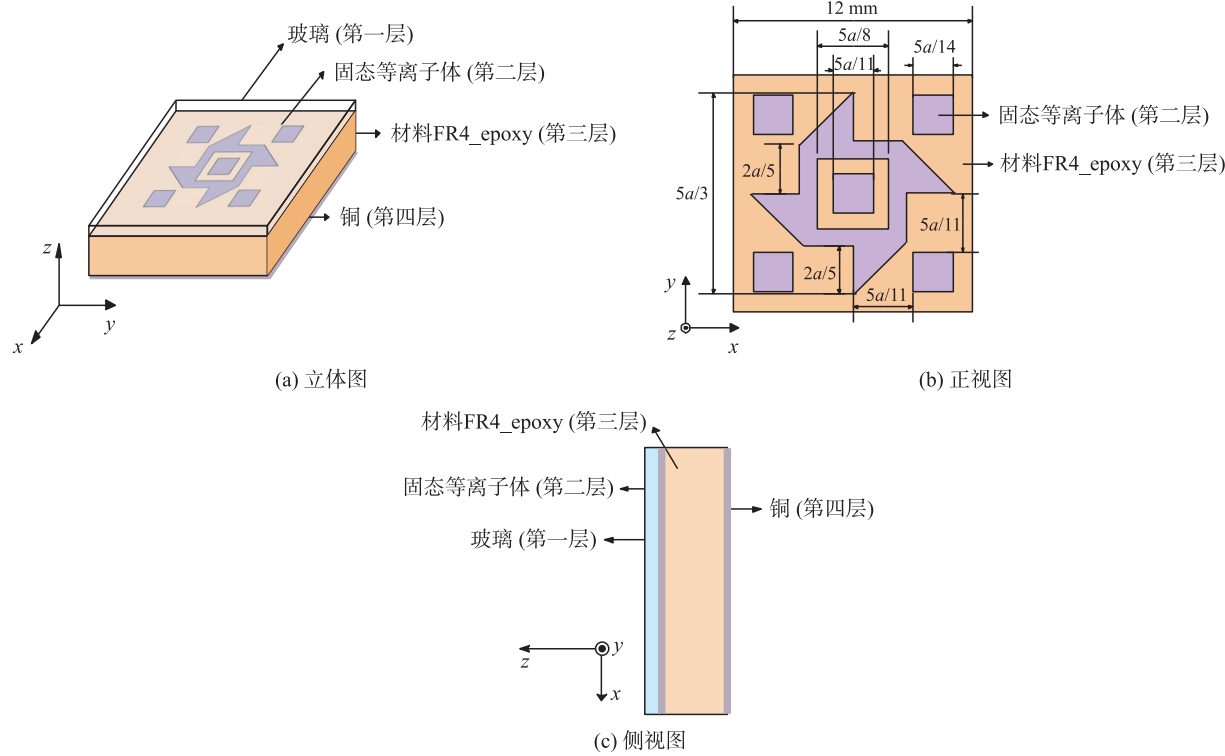


图 1 平面反射阵列天线阵列单元的结构示意图

Fig. 1 Structure schematic of the element for the proposed reflectarray antenna

其介电常数可由 Drude 模型描述:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + iv)}, \quad (1)$$

式中, ε_{∞} 是高频介电常数, v 是碰撞频率, 等离子体频率 $\omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{m_e \varepsilon_0}}$, 其中 n_e 是载流子浓度, e 是电子电荷, m_e 是自由载流子的有效质量, ω 是入射波角频率. 通过调节等离子体的激励区域, 即可改变等离子体阵列单元的尺寸大小^[26]. 为了便于设计, 假设固态等离子体的初始参数为: $\varepsilon_{\infty} = 12.8$, $\omega_p = 2.9 \times 10^{14}$ rad/s, $\nu = 1.65 \times 10^{13}$ /s. 文中所有计算的结果都是通过商业电磁仿真计算软件 HFSS V.13 得到.

从图 1(b) 中可以看出, 固态等离子体贴片包括置于中央的中心正方形结构及其外围的风车形结构, 其中风车形结构包括方形框及 4 个直角三角形结构按顺时针方向旋转 90° 连接组成, 直角三角形的一直角边与方形框的外沿重合, 另一直角边与正方形结构的中心线重合; 沿贴片单元的 4 个边角对称设有 4 个尺寸相同的正方形结构, 各正方形结构关于贴片单元的中心对称分布, 其中 a 的大小为 7 mm. 中心正方形结构的边长为 $5a/11$, 风车形结构由菱形与 5 个正方形相减而得, 菱形的外接圆半径为 $5a/6$, 中间减去的正方形的边长是 $5a/8$, 四周减去的正方形的边长是 $2a/5$, 其起始坐标分别为 $(0, 5a/6)$ 、 $(5a/6, 0)$ 、 $(-5a/6, 0)$ 、 $(0, -5a/6)$, 贴片单元 4 个边角上的正方形结构的边长为 $5a/14$, 其起始坐标分别为 $(5a/11, 5a/11)$ 、 $(5a/11, -5a/11)$ 、 $(-5a/11, -5a/11)$ 、 $(-5a/11, 5a/11)$.

2 结果分析与讨论

图 2 给出了当入射电磁波的频率为 11.6 GHz, 改变尺寸变量 a 时反射阵列单元的相移曲线, 其中, 黑色空心圆“ A ”代表传统方式即未加玻璃介质做出的反射阵列单元的相移曲线, 当 a 从 2 mm 增到 7 mm 时, 相位补偿的覆盖范围为 $-259^\circ \sim 0^\circ$, 最大调相范围是 259° , 显然不符合平面反射阵列天线的设计要求. 黑色实心圆“ B ”代表加玻璃介质后的反射阵列单元的相移曲线, 同理当 a 从 2 mm 增到 7 mm 时, 相位补偿的覆盖范围为 $-465^\circ \sim -76.9^\circ$, 最大调相范围是 388.1° , 实现了 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的完全覆盖. 图中红色实线和虚线分别代表加玻璃和未加玻璃两种反射阵列单元的相移曲线的线性拟合曲线, 由图可知加玻璃介质后反射阵列单元相移曲线的线性度明显得到改善.

为了保证每个位置的反射阵列单元的反射波束都能够指向设定的主波束上, 需要根据相位补偿的公式计算出每个位置下的反射阵列单元需要补偿的相位, 即得到每个位置坐标下反射阵列单元的尺寸大小, 其公式为

$$\Phi_i = K_i [d_i - \sin \theta_i (x_i \cos \varphi_i + y_i \sin \varphi_i)]. \quad (2)$$

Φ_i 为反射阵列单元需要补偿的相位值, K_i 为真空中电磁波的波矢, d_i 为反射阵列单元到馈源的距离, x_i 和 y_i 为反射阵列单元相对于馈源中心的相对坐标值, θ_i 为反射波束与 $+z$ 轴的夹角, φ_i 为反射波束方位角.

图 3(a)、图 3(b)、图 3(c) 分别给出了根据式 (2) 反射主波束分别指向 15° 、 20° 和 25° 时, 576 个反射阵列单元的尺寸分布图, 其中 x 轴与 y 轴用来表示反射阵列单元的位置 (无量纲), 右边的颜色刻度为变量 a 的值, 单位是 mm. 其中馈源喇叭工作在 X 波段, 位于反射阵列其中一边中心正上方距阵列表面 291.5 mm 处, 倾斜角度为 10° . 通过动态地改变等离子体的激励区域就可以改变每个反射阵列单元中 a 的大小, 从而实现空间中反射电磁波的主波束在不同角度下的汇聚.

根据本文提出的基于“风车”形的反射阵列单元, 设计了工作在 11.6 GHz 下, 反射主波束方向分别指向 15° 、 20° 和 25° 的平面反射阵列天线 (通过动态调控固态等离子体的激励区域实现). 其中馈源喇叭的位置同上文所述.

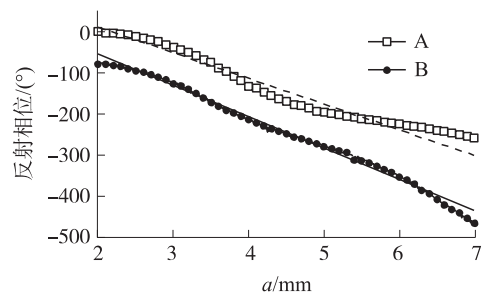


图 2 平面反射阵列天线阵列单元的相位特性曲线
Fig. 2 The phase curve of the elements for the proposed reflectarray antenna

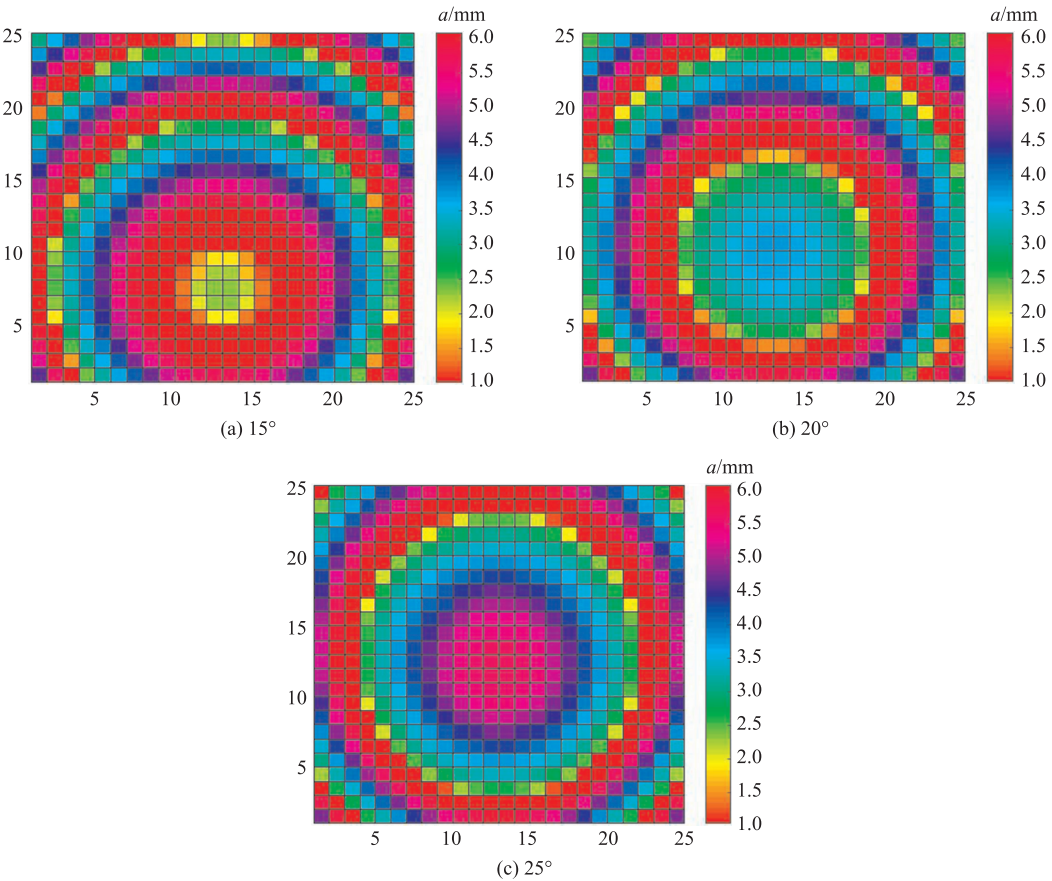


图 3 平面反射阵列天线阵列单元在不同入射角度的尺寸分布图

Fig. 3 Size distributions of elements for the proposed reflectarray antenna at different incident angles

图 4(a)、图 4(b) 和图 4(c) 分别给出了 $\theta=15^\circ$ 、 20° 和 25° 时, 反射电磁波波束的辐射方向图. 由图 4 可知, 天线都工作在预期设定的反射主波束上, 且当反射波束指向 15° 、 20° 时天线的增益分别为 17 dBi、15 dBi, 当反射波束指向 25° 时天线的增益为 12 dBi.

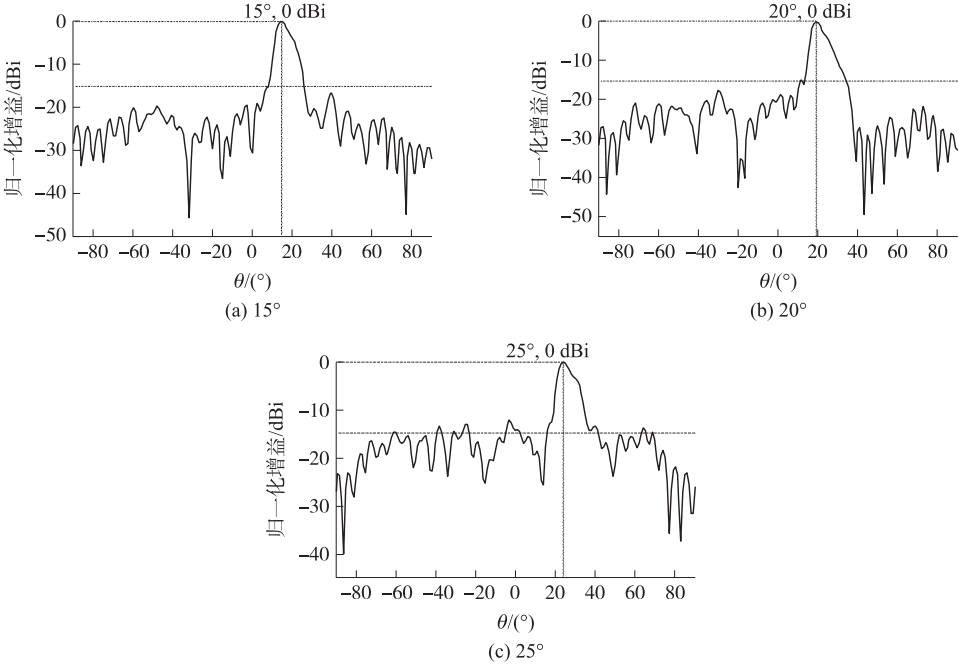


图 4 平面反射阵列单元在不同角度下的 H 面辐射方向图

Fig. 4 The radiation patterns of the reflectarray antenna at the different angles

图 5 为所设计的阵列天线在不同的反射主波束下的 3D 辐射方向图,结果表明本文设计的平面反射阵列天线的波束指向性好,且能量集中. 通过调节固态等离子体的激励区域,可以动态地在辐射角度上进行切换,即实现波束的空间扫描.

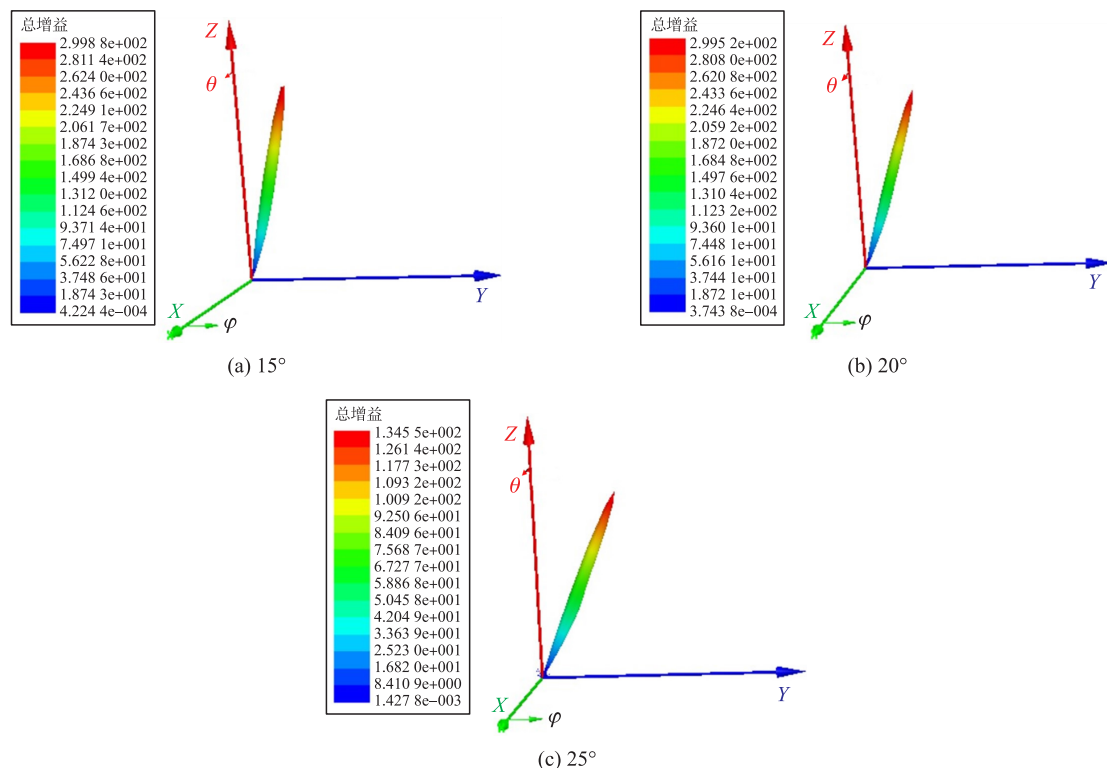


图 5 平面反射阵列单元在不同角度下的 3D 辐射方向图

Fig. 5 The 3D radiation patterns of the reflectarray antenna at the different angles

3 结论

本文设计了一种新型反射阵列单元,通过加玻璃介质匹配层的方式,增加了单元的厚度改善了相移曲线的线性度,又因为玻璃较大的介电常数使得相位补偿的覆盖范围扩大,且最终的仿真结果表明,由此设计出的平面反射阵列天线工作性能良好. 用固态等离子体代替金属来构建平面反射单元,通过动态地改变固态等离子体阵列单元的激励区域来实现该平面反射阵列天线的空间动态波束扫描. 相比于其它传统的设计反射阵列单元的方法,本文提出的方法较容易实现,而且在较低造价下优化了相移特性曲线,对于反射阵列单元的设计而言是一种广泛适应性的方法.

[参考文献]

- [1] 邓作,李浩,姜利辉,等. 宽带 W 波段 Flaps 天线仿真与设计[J]. 强激光与粒子束,2014,26(6):53-56.
- [2] 李亚峰,谢拥军,杨锐,等. 交叉振子平面反射阵列天线的分析[J]. 现代电子技术,2009,32(13):24-26.
- [3] 王云秀,王秉中,李华,等. 平面反射阵列天线的研究进展[J]. 系统工程与电子技术,2008(2):388-392.
- [4] CHAHARMIR M R,SHAKER J,CUHACI M, et al. Broadband reflectarray antenna with double cross loops[J]. Electronics letters,2006,42(2):65-66.
- [5] HASANI H,PEIXEIRO C. Dual-band, dual-polarized microstrip reflectarray antenna in Ku band[J]. Journal of pediatric psychology,2012,27(5):409-416.
- [6] SCHOEN D T,COENEN T,FJ G D A, et al. The planar parabolic optical antenna[J]. Nano letters,2013,13(1):188-193.
- [7] RUDGE A W,ADATIA N A. New class of primary-feed antennas for use with offset parabolic-reflector antennas[J]. Electronics letters,1975,11(24):597-599.
- [8] MAILLOUX R J. Phased array antenna handbook[J]. Systems engineering & electronics,2011,28(12):1816-1818.

- [9] 耿莉,谢亚楠,原媛. 基于石墨烯的太赫兹方向图可重构天线[J]. 激光与光电子学进展,2017,54(3):213-222.
- [10] 刘玉佳,辛杰萍,万玲玉,等. 宽视场高增益亚波长结构集光天线的优化设计[J]. 激光技术,2017,41(1):34-39.
- [11] 李瑶,莫伟成,杨振刚,等. 利用超表面天线阵列产生太赫兹涡旋光束[J]. 激光技术,2017,41(5):644-648.
- [12] QI M Q, TANG W X, MA H F, et al. Suppressing side-lobe radiations of horn antenna by loading metamaterial lens[J]. Scientific reports,2015,5(5):9113(1-6).
- [13] 朱亚鹏,张正平,刘桥. 提高微带天线增益的宽带低损左手结构设计[J]. 激光与光电子学进展,2018,55(3):395-400.
- [14] ZHU H L, LIU X H, CHEUNG S W, et al. Frequency-reconfigurable antenna using metasurface[J]. IEEE transactions on antennas and propagation,2014,62(1):80-85.
- [15] 武学英,崔健永,郑伟,等. 星载激光雷达高灵敏信号探测的关键技术研究[J]. 激光技术,2017,41(6):881-885.
- [16] KAWAKAMI Y, KUSE R, HORI T, et al. Decoupling of dipole antenna array on patch type meta-surface with parasitic cells[C]// European Conference on Antennas and Propagation. Paris:IEEE,2017:2603-2606.
- [17] KRANENBURG R A, LONG S A. Microstrip transmission line excitation of dielectric resonator antennas[J]. Electronics letters,1988,24(18):1156-1157.
- [18] ELEFThERIADES G V, ANTONIADES M A, QURESHI F. Antenna applications of negative-refractive-index transmission-line structures[J]. Iet microwaves antennas & propagation,2007,1(1):12-22.
- [19] 项阳,钱祖平,施伟,等. 一种基于负折射电路的宽带圆极化微带天线[J]. 电子学报,2009,37(12):2668-2671.
- [20] HEIDARI A A, HEYRANI M, NAKHKASH M. A Dual-band circularly polarized stub loaded microstrip patch antenna for GPS applications[J]. Progress in electromagnetics research,2009,92(92):195-208.
- [21] HUANG J, POGORZELSKI R J. A Ka-band microstrip reflectarray with elements having variable rotation angles[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation,1998,46(5):650-656.
- [22] JAVOR R D, WU X D, CHANG K. Design and performance of a microstrip reflectarray antenna[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation,1995,43(9):932-939.
- [23] POZAR D M, METZLER T A. Analysis of a reflectarray antenna using microstrip patches of variable size[J]. Electronics letters,1993,29(8):657-658.
- [24] 陈虎,郑雪飞,李小秋. 一种微带反射阵列天线单元特性研究[J]. 微波学报,2010,26(S1):145-148.
- [25] ENCINAR J A. Design of two-layer printed reflectarrays using patches of variable size[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation,2001,49(10):1403-1410.
- [26] 余志洋. 固态等离子体重构天线设计与实现[D]. 南京:南京航空航天大学,2016.

[责任编辑:顾晓天]