

文章编号: 2095-4980(2021)02-0275-06

一种波瓣等化的多波束龙伯透镜天线

袁大力, 张冰, 黄卡玛

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 基于3D打印技术设计、制造了一种具有波瓣等化特性的工作在X波段的多波束龙伯透镜天线。透镜所需梯度变化的相对介电常数通过改变透镜每个单元的介质填充率得到。运用一组双模圆锥喇叭天线作为馈源, 从而产生具有波瓣等化特性的多个波束。实验证明, 该天线能够在三维空间产生多个波束, 在水平和俯仰方向覆盖 $\pm 20^\circ$ 的范围, 各波束辐射特性几乎相同。天线的最高增益为22 dBi, 3 dB波束宽度为 8° , 具有高增益和良好的聚焦特性。由于该天线制造简单、快速且成本低, 凭借其良好的工作特性, 在雷达、探测、传感等领域有着良好的应用前景。

关键词: 3D打印; 多波束天线; 梯度折射率; 龙伯透镜; 波瓣等化

中图分类号: TN821

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020371

A multi-beam Luneburg lens antenna with lobe equalization

YUAN Dali, ZHANG Bing, HUANG Kama

(School of Electronic and Information, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

Abstract: A multi-beam Luneburg lens antenna with lobe equalization and operating in the X-band is designed and fabricated by 3D printing technology. The required gradient relative dielectric constant is implemented by changing the dielectric filling rate of each unit of the lens. A set of dual-mode conical horn antennas is used as the feed to generate multiple beams with lobe equalization characteristics. Experiments show that the antenna can generate multiple beams in three-dimensional space, covering the range of $\pm 20^\circ$ in altitude and azimuth, and the characteristics of each beam stay identical. The maximum gain of the antenna is 24 dBi. The 3 dB beam width is 8° . It has high gain and good focusing characteristics. Because of the antenna's simple structure, short turn-around fabrication time and low fabrication cost, together with its good operational characteristics, it has good application prospects in the field of radar, detection, and sensing.

Keywords: 3D printing; multi-beam antenna; gradient index; Luneburg lens; lobe equalization

近年来, 随着第五代移动通信系统(5G)的发展, 5G 已经成为学术界的一大热点。多输入多输出(Multi Input Multi Output, MIMO)技术是 5G 通信的关键技术之一, 而能够产生大量波束的天线又是 MIMO 技术实现的关键。同时多波束天线也因能实现高增益, 覆盖范围广, 能根据需要调整波束形状等特点, 广泛应用于卫星通信系统^[1]。多波束天线有多种类型, 其中多波束透镜天线, 具有制造方便, 效率高, 成本低, 覆盖范围广且馈电网络简单的优点^[2]。龙伯透镜具有高增益、低副瓣和宽带特性^[3]、形成多波束的能力, 且不同方向的波束辐射特性大致相同, 波束间差异小, 非常适合于制作多波束天线。理想的龙伯透镜需要随半径连续变化的折射率, 而在现实生活中不存在具有这种特性的材料。近年来, 使用离散的折射率变化制造龙伯透镜的方法已经有很多。B Fuchs 利用多层球壳的方式制作龙伯透镜, 并讨论了球壳数量对天线性能的影响^[4]。但这种方式的复杂性和成本都较高, 且球壳间的空气也会对天线的性能造成影响。S Rondineau 等提出堆叠周期性打孔的介质板来制造龙伯透镜, 但此方法设计加工困难, 透镜的整体效率最高只有 30%^[5]。H F Ma 等将龙伯透镜划分为小晶胞, 在晶胞上钻孔后再组合成龙伯透镜^[6]。这种加工方式也极为复杂。近年来 3D 打印技术兴起, 3D 打印是一种增材制造工艺, 其加工精确度能够达到亚毫米级别, 对于加工结构复杂、尺寸精细的物件有着巨大的优势。随着技术日趋成熟, 其在微波组

收稿日期: 2020-08-05; 修回日期: 2020-10-05

作者简介: 袁大力(1995-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为天线。email:805786834@qq.com

件制造方面的应用也日渐广泛。利用 3D 打印制造波导、喇叭天线、反射面天线^[7-9]等都已有成熟的例子。3D 打印也已经能实现多波束透镜天线的加工,如 B Zhang 在文献[10]中,利用 3D 打印制作出用于水文雷达的二维多波束天线。Y Li 在文献[11]中制造出一种水平面的多波束龙伯透镜天线。但这 2 种设计都只实现了在平面上产生多波束,而没有实现在三维空间产生多波束。现有的龙伯透镜天线,多以波导^[4-6]或者喇叭天线^[12]作为馈源。喇叭天线因具有结构简单,方向图易于控制,增益较高的特点而被广泛应用。又由于龙伯透镜是一个球对称的透镜,为了充分利用透镜这一特点,本文采用一种双模圆锥喇叭天线作为馈源,以得到在 E 面和 H 面等化的波束。本文设计并制作了一种工作在 X 波段的多波束龙伯透镜天线。透镜的直径为 240 mm。通过将龙伯透镜划分为等大小的立方体晶胞,每个晶胞所需要的相对介电常数根据其到透镜球心的距离而定,从而得到梯度变化的相对介电常数。在每个晶胞中通过控制光敏树脂在空气中的填充率来得到所需的介电常数。每个晶胞中的光敏树脂被制作成球体或者立方体,以得到更好的对称性。晶胞之间的树脂块通过同种材料的圆柱形杆状支撑进行连接固定。采用双模圆锥喇叭作为馈源,在立体空间中得到波瓣等化的多个波束。透镜和馈源均采用 3D 打印加工制造。设计的天线在 10 GHz 处的半功率波束宽度为 8° ,天线增益为 22 dBi,测量结果和仿真结果吻合。

1 设计与分析

1.1 龙伯透镜的原理

理想的龙伯透镜具有球对称性,球内的相对介电常数沿球体半径连续变化且呈对称性分布。透镜内部的相对介电常数以及折射率与半径的关系如下:

$$\varepsilon_r = 2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2, \quad r \leq R \quad (1)$$

$$n = \sqrt{\varepsilon_r} \quad (2)$$

式中: r 为当前位置到龙伯透镜中心的距离; R 为透镜的半径; ε_r 为当前位置的相对介电常数; n 为当前位置的折射率,在透镜的中心($r=0$)处折射率为 $n=1.414$,在透镜表面处,折射率为 $n=1$ 。这样特殊的结构有如下的特性: a) 透镜表面上的每一个点,都是透镜的焦点,改变馈源的位置,天线的增益几乎不发生变化; b) 会将入射平面波(平行光线)聚焦到与入射方向平行的直径所对应的透镜另一个表面的点上; c) 相反,将透镜表面上的点源发出的球面波前,在通过透镜之后准直为一簇平面波前。

1.2 透镜的设计

自然界中并不存在满足连续变化相对介电常数的材料,使用梯度变化的相对介电常数是一种有效的方式。在已有的研究中,利用 3D 打印技术实现的梯度相对介电常数是通过某种已知相对介电常数的材料和空气混合实现的^[11-13]。混合材料的相对介电常数通过控制材料在空气中的填充率 ρ 来进行控制^[13]:

$$\varepsilon = \varepsilon_p \cdot \rho + \varepsilon_0 \cdot (1 - \rho) \quad (3)$$

式中: ε 为混合材料的相对介电常数; ε_p 为填充物的相对介电常数; ε_0 为空气的相对介电常数。

本文将龙伯透镜分解为大小相等的立方体晶胞,每个晶胞根据其体心到球心的距离不同,由所需填充率填充体积不同的填充物。球心处的相对介电常数最大,为 2,故填充材料的相对介电常数 ε_p 需要满足 $\varepsilon_p \geq 2$ 。本文选用了一种液态光敏树脂作为填充材料,经立体光固化成型技术(Stereo Lithography Apparatus, SLA)固化成型后,测量出该材料的相对介电常数在 X 波段大约为 2.74。根据式(1)可以计算出填充物在单个晶胞中的填充率。

为使龙伯透镜拥有良好的对称性,填充物的形状以球体为主。但同等体积下,球体的直径大于立方体边长,当 $\rho = \pi/6$ 时,球体直径等于立方体边长。当 $\varepsilon_p = 2.74$ 时,球体中心的晶胞填充率大约为 $0.57 \geq \pi/6$,若填充物选用球形,其尺寸超过了晶胞。故在距离透镜中心一定范围内,填充物形状选择正方体,其余的填充物采用球体。

所设计的龙伯透镜直径为 240 mm,晶胞大小为 10 mm×10 mm×10 mm。填充物位于晶胞中心。晶胞之间利用半径为 0.8 mm 的圆柱形杆状支撑连接,因圆柱形支撑的尺寸与晶胞的尺寸相比足够小,故对龙伯透镜整体性能影响不大。球体的主视图见图 1,部分计算出的填充率,距球心距离以及相对介电常数的关系见表 1。

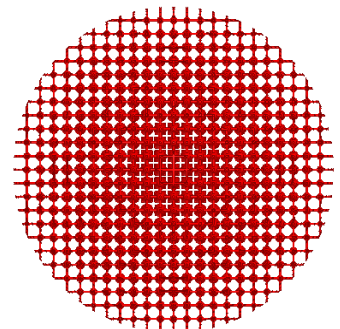


Fig.1 Luneburg lens' front view
图 1 龙伯透镜主视图

1.3 馈源的设计

理想的龙伯透镜是一种完全球对称的结构，为利用这一特点，希望馈源具有波瓣等化的特性。传统的单模喇叭不具备该特性。通过引入附加高阶模的方式，可以得到具有该特性的喇叭。波纹喇叭和双模圆锥喇叭都是通过这种方式得到波瓣等化的方向图。与波纹喇叭相比，双模圆锥喇叭结构更加简单，且张口处没有波纹壁的厚度，可以实现更小的间距组阵^[14]。双模圆锥喇叭中，引入的附加高阶模是 TM_{11} 模，它与主模 TE_{11} 模抵消能产生具有良好轴对称性的方向图，并且具有副瓣电平低的优点，从而使得方向图具有轴对称性和低交叉极化的特点。

本文设计的是一种工作在 X 波段的变张角双模喇叭天线，见图 2。该天线由 BJ100 标准波导(h)、过渡段(l)、半径为 b 的圆波导(h_1)、过渡圆锥(h_2)以及半径为 a 的圆波导(h_3)五部分组成。第三段圆波导需要保持单模传输的条件。第五段圆波导要满足 TM_{11} 模传播， TE_{12} 模截止。故半径应该分别满足以下条件：

$$1.84 < kb < 3.83 \tag{4}$$

$$3.83 < ka < 5.33 \tag{5}$$

式中 k 为波数， $k = 2\pi/\lambda$ 。

设计的双模圆锥喇叭天线，通过计算和商业软件 HFSS 的优化，最终参数为： $a=10.65$ mm, $b=19.65$ mm, $h_1=38.1$ mm, $h_2=15.6$ mm, $h_3=41.1$ mm, $l=23$ mm, $h=7.5$ mm, $t_1=2$ mm, $t_2=5$ mm。

本文采用 5 个喇叭作为馈源，水平方向和俯仰方向的喇叭之间的夹角均为 20° ，喇叭口径面到透镜的距离为 10 mm。最终设计出的多波束龙伯透镜天线经组装后见图 3。

2 天线的加工

采用中瑞科技的商业产品(iSLA550- 660)，利用 SLA 技术，加工了设计的龙伯透镜。图 4 展示出整个透镜结构的图片。整个透镜打印的时间为 10.5 h，后处理时间未超过 1 h。双模圆锥喇叭的光敏树脂模型也利用 SLA 技术加工，并利用喷涂金属涂层的方式对其进行金属化处理，如图 5 所示。该方法的可行性在文献[15]已经验证。

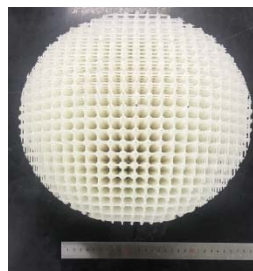


Fig.4 Luneburg lens
图 4 龙伯透镜

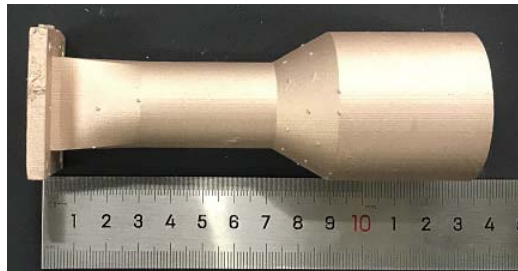


Fig.5 Horn antenna after metallization
图 5 金属化处理后的喇叭天线

表 1 距离、填充率与相对介电常数之间的关系
Table1 Relationship among distance, filling rate and relative dielectric constant

| r/mm | ρ | ϵ_r |
|---------------|--------|--------------|
| 0 | 0.574 | 2.000 |
| 20 | 0.558 | 1.972 |
| 40 | 0.510 | 1.889 |
| 60 | 0.430 | 1.750 |
| 80 | 0.319 | 1.556 |
| 100 | 0.175 | 1.306 |
| 120 | 0 | 1.000 |

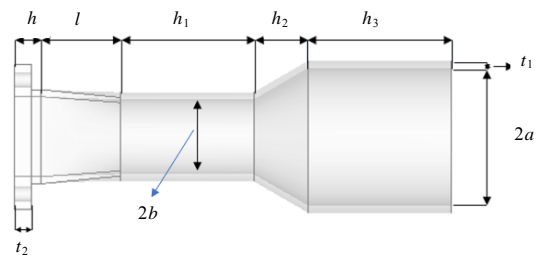


Fig.2 Dual-mode conical horn antenna
图 2 双模圆锥喇叭天线

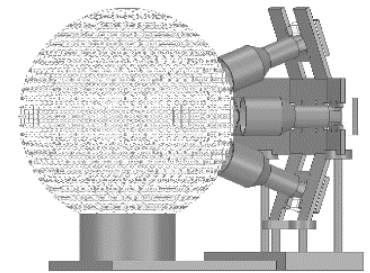


Fig.3 Multi-beam Luneburg lens antenna
图 3 多波束龙伯透镜天线

3 仿真与测试

3.1 龙伯透镜性能的验证

为了验证设计的龙伯透镜的聚焦特性，使用商业软件 CST 对其进行了仿真实验。利用平面波照射透镜，平面波经过透镜后，波束汇集到透镜表面上一点，在频率为 9 GHz,10 GHz,11 GHz 时的电场图见图 6。仿真结果证明，所设计的龙伯透镜具有良好的聚焦特性。

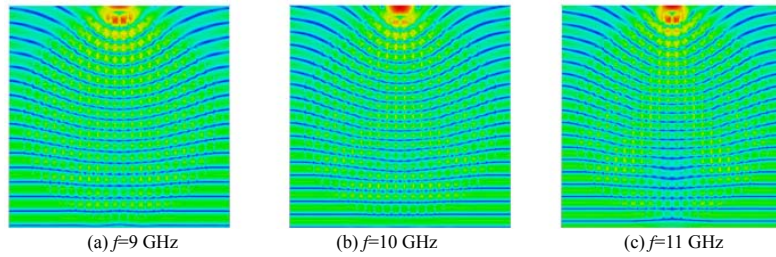


Fig.6 Electric field distribution of plane wave passing through Luneburg lens
图 6 平面波穿过龙伯透镜的电场图

3.2 馈源的仿真与测试

对双模圆锥喇叭天线进行了仿真实验和实测，见图 7。图 8 展示了该天线仿真和实测的回波损耗，在频率为 9~11 GHz 的回波损耗特性良好， $|S_{11}|$ 均在 -10 dB 以下。仿真和实测的数据在频率为 9~11 GHz 基本吻合。



Fig.7 Measurement setup of dual-mode conical horn antenna
图 7 双模圆锥喇叭天线测量

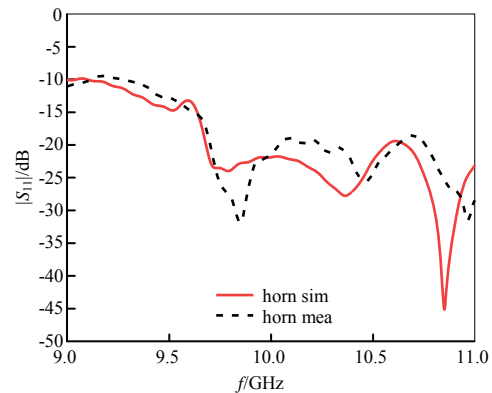


Fig.8 S-parameter of dual-mode conical horn
图 8 双模圆锥喇叭的 S 参数

图 9(a)~图 9(c)分别展示了 9 GHz,10 GHz,11 GHz 时，双模喇叭天线的归一化方向图。图 9(b)中在 10 GHz 时，仿真的 E 面和 H 面方向图在 $\pm 30^\circ$ 范围内等化良好，3 dB 波束宽度分别为 52.3° 和 51° ，增益为 11.4 dBi；测量的 E 面和 H 面方向图在 $\pm 30^\circ$ 范围内等化良好，3 dB 波束宽度分别为 42.5° 和 49° ，增益为 11.1 dBi。9 GHz 和 11 GHz 时具有相似的特性。在工作频段内，3 个频点交叉极化电平平均低于主瓣电平 14.72 dB。测量值与仿真值基本吻合，设计的双模圆锥喇叭具有良好的波瓣等化特性、较低的交叉极化水平。

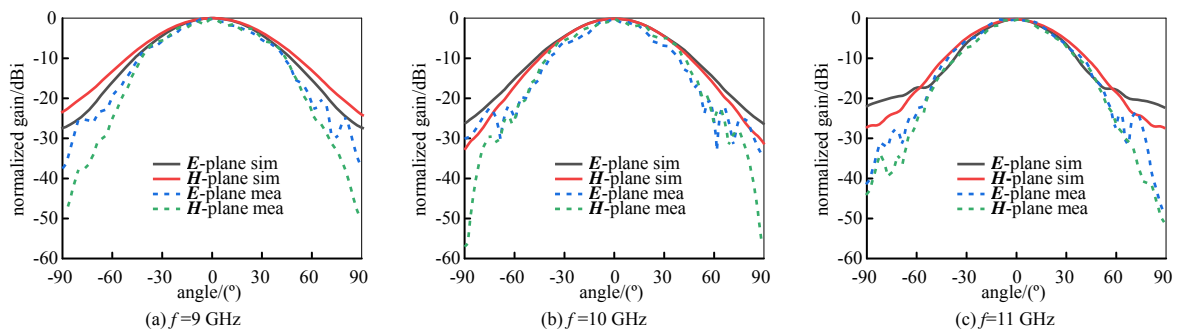


Fig.9 Directional pattern of dual-mode conical horn antenna
图 9 双模圆锥喇叭天线的方向图

3.3 多波束龙伯透镜天线的仿真与测试

对设计的多波束龙伯透镜天线进行了仿真与测试，测试的环境见图 10，图 11 展示了对应的端口设置。由于龙伯透镜的对称特性，只需对 1,2,4 号端口进行仿真和测试，下列图示中根据对称性仅展示 10 GHz 时部分端口的仿真和实测数据。经仿真与实测，在 9~11 GHz，仿真与实测的回波损耗特性基本吻合， $|S_{11}|$ 均在 -10 dB 以下。图 12 展示了 10 GHz 时，天线测试和仿真的方向图，测试与仿真结果较为吻合，9 GHz 和 11 GHz 时具有近似的结果。由图可知，1,2,3 端口产生的波束在 15° 范围内均等化良好，3 dB 波束宽度约为 8° ；1,4,5 端口产生的波束在 15° 范围内均等化良好，3 dB 波束宽度也约为 8° 。天线增益的仿真与实测数据基本吻合，在 9 GHz,10 GHz,

11 GHz 时仿真值分别为 21.4 dBi, 22 dBi, 20.2 dBi, 实测为 20.8 dBi, 22.4 dBi, 20 dBi。在工作频段内, 交叉极化电平平均低于主瓣电平 19.5 dB。表 2 中将本文提出的天线与已有的龙伯透镜天线进行了比较, 表中 f_0 为中心频率。

设计龙伯透镜能较好地地将馈源的波束聚集, 使得馈源的增益提高约 10 dB, 3 dB 波束宽度仅为馈源的 1/5 左右。该天线能在三维空间内形成多个高增益的波瓣等化的波束, 覆盖水平和垂直平面内 $\pm 20^\circ$ 的范围, 有较低的交叉极化水平。使用 3D 打印技术方便地对复杂的天线结构进行加工, 且缩短了加工时间, 节约了成本。

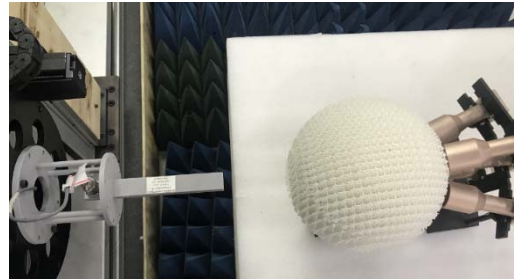


Fig.10 Measurement setup of the Luneberg lens antenna
图 10 龙伯透镜天线的测量

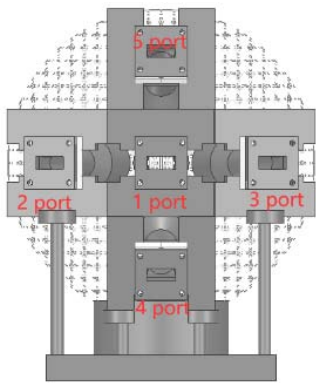
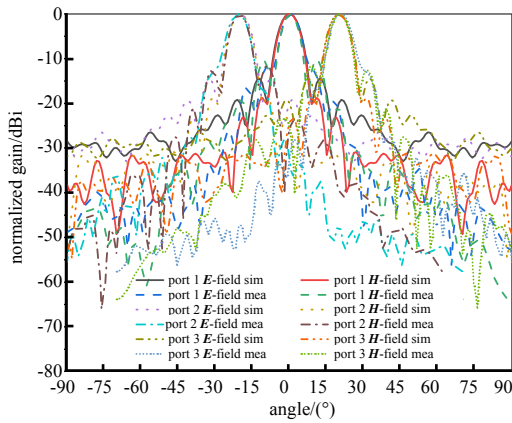


Fig.11 Ports of the feeding dual-mode horn array
图 11 双模喇叭馈源的端口设置

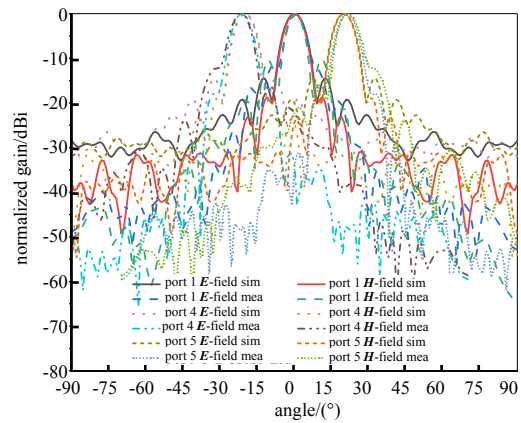
表 2 与已有龙伯透镜天线的对比

Table 2 Comparison with reported Luneberg lens antennas

| Ref. | lens type | scan range | lobe equalization | f_0 /GHz |
|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|------------|
| [5] | perforated slices | two-dimensional | NO | 33.00 |
| [11] | 3D-printed | two-dimensional | NO | 33.00 |
| [16] | 3D-printed | two-dimensional | NO | 26.75 |
| [17] | 3D-printed | three-dimensional | NO | 7.90 |
| this work | 3D-printed | three-dimensional | YES | 10.00 |



(a) $f=10$ GHz, azimuth plane



(b) $f=10$ GHz, altitude plane

Fig.12 Co-polarized radiation patterns of the Luneberg lens antenna

图 12 龙伯透镜天线主极化辐射方向图

4 结论

本文设计并利用 3D 打印技术制作了一种工作于 X 波段的具有波瓣等化特性的多波束龙伯透镜天线。透镜的直径为 240 mm, 使用改变填充率的方式以得到随透镜半径变化的梯度折射率。用一种双模圆锥喇叭作为馈源使得天线能得到良好的 E 面和 H 面波瓣等化的方向图。实验与仿真结果基本吻合。测量结果表明, 该天线能产生在三维空间波瓣等化的五个波束, 在水平面和垂直面均有 $\pm 20^\circ$ 的空间覆盖范围, 并具有高增益与好的聚焦特性。与单个馈源喇叭相比, 增益提高了约 10 dB, 3 dB 波束宽度约为馈源的五分之一左右, 交叉极化水平较低。通过 3D 打印技术, 极大地减小了该天线的制造难度, 减少了成本以及天线制造的时间。该天线在通信、雷达和传感等领域有较好的应用前景, 且覆盖面较单馈和二维多波束透镜天线有较大的提升。

参考文献:

- [1] 周乐柱,李斗,郭文嘉. 卫星通信多波束天线综述[J]. 电子学报, 2001,29(6):824–828. (ZHOU Lezhu,LI Dou,GUO Wen jia. Review of multiple-beam antennas for satellite communications[J]. Acta Electronica Sinica, 2001,29(6):824–828.)
- [2] 黄明. 多波束透镜天线理论与应用技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2014. (HUANG Ming. Study on theoretical analysis and technical application of multi-beam lens antennas[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2014.)
- [3] 牛德鹏,羊锦仁,张光甫,等. 基于光学变换的平面龙伯透镜天线[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(3):390–395. (NIU Depeng,YANG Jinren,ZHANG Guangfu,et al. Planar Luneburg lens antenna based on transform optics[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(3):390–395.)
- [4] FUCHS B,COQ L L,LAFOND O,et al. Design optimization of multishell Luneburg lenses[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007,55(2):283–289.
- [5] RONDINEAU S,HIMDI M,SORIEUX J. A sliced spherical Luneburg lens[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2003(2):163–166.
- [6] MA H F,CAI B G,ZHANG T. X,et al. Three-dimensional gradient-index materials and their applications in microwave lens antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013,61(5):2561–2569.
- [7] ZHANG S,VARDAXOGLU Y,WHITTOW W,et al. 3D-printed flat lens for microwave applications[C]// 2015 Loughborough Antennas & Propagation Conference(LAPC). Loughborough,England:IEEE, 2015:1–3.
- [8] OTTER W J,RIDLER N M,YASUKOCHI H,et al. 3D printed 1.1 THz waveguides[J]. Electronics Letters, 2017,53(7):471–473.
- [9] ZHU X,ZHANG B. A low-cost stereolithography printed X-band antenna with metallic-plated surface[C]// 2019 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology(ICMMT). Guangzhou,China:IEEE, 2019:1–3.
- [10] ZHANG B,ZIRATH H. 3D printed iris bandpass filters for millimetre-wave applications[J]. Electronics Letters, 2015, 51(22):1791–1793.
- [11] LI Y,GE L,CHEN M,et al. Multibeam 3D-printed Luneburg lens fed by magnetoelectric dipole antennas for millimeter-wave MIMO applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019,67(5):2923–2933.
- [12] IGNATENKO M,SIMAKAUSKAS B,NOTAROS M,et al. A phase center-stabilized K/Ka/V-band linearly polarized horn for Luneburg lenses[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017,16(1):2726–2729.
- [13] LIANG M,NG W,CHANG K,et al. An X-band Luneburg lens antenna fabricated by rapid prototyping technology[C]// 2011 IEEE MTT-S International Microwave Symposium,Baltimore. MD:[s.n.], 2011:1–4.
- [14] 李保明,王玉峰. 一种高增益多波束反射面天线设计[J]. 通信对抗, 2010(4):51–54. (LI Baoming,WANG Yufeng. A design of high gain multiple-beam reflector antenna[J]. Communication Countermeasures, 2010(4):51–54.)
- [15] YUAN D,ZHANG B. An experimental study of dielectric 3D printed cylindrical cavity[C]// 2019 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference(CSQRWC). Taiyuan,China:[s.n.], 2019:1–3.
- [16] WANG C,WU J,GUO Y. A 3D-printed wideband circularly polarized parallel-plate Luneburg lens antenna[C]// IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020,68(6):4944–4949.
- [17] ZHAO C,YANG S,LIU K,et al. A circularly polarized Luneberg lens antenna for half-space beam coverage[C]// 2019 IEEE 2nd International Conference on Electronics Technology(ICET). Chengdu,China:[s.n.], 2019:427–430.