

文章编号: 2095-4980(2018)03-0490-04

一种新型金属透镜天线设计

董俊峰, 陈 星*

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 为了获得具有高增益特性的天线, 对传统透镜天线工作原理进行了分析。因为透镜天线板间电场模式与波导中电场模式类似, 以此为依据通过改变金属透镜的金属平板间距和板脊高度, 设计了一种新型金属透镜天线, 迥异于传统金属透镜天线的凹形曲面结构。该天线金属透镜由多片长方形侧面加脊金属板组成, 能够很好地调节口径面的相位分布, 以此实现口径面同相分布, 从而获得高增益性能。

关键词: 金属透镜天线; 电场模式; 球面波; 高增益

中图分类号: TN820.1

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201803.0490

Design of a new metal lens antenna

DONG Junfeng, CHEN Xing*

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

Abstract: Analyzing the working principle of traditional lens antenna can know the electric mode between metal plates is similar to that of waveguide. A new metal lens antenna is designed through changing the distance between metal plates and changing the heights of ridge. It is different from traditional metal lens antenna with concave surface structure. This metal lens antenna is composed of a plurality of rectangular metal plates with ridge on the side. This new lens antenna can adjust the aperture to make the phase distribution consistent, and therefore it can obtain high gain characteristic.

Keywords: metal lens antenna; electric mode; spherical; high gain

金属透镜天线的概念于 20 世纪 40 年代提出^[1], 之后许多学者对此做了进一步研究^[2-3], Kraus 对金属透镜天线的应用研究至关重要^[4], 其论证了金属透镜天线相比于一般反射面天线具有更好的鲁棒性。由于其优异的性能和良好的鲁棒性, 金属透镜天线被广泛应用, 尤其在高功率聚焦天线和高增益透镜天线中应用广泛^[5-7]。本文尝试通过分析透镜天线工作时的场模式, 并以透镜天线场模式为依据设计了一种新型透镜结构天线, 能够达到与传统透镜天线接近的增益提高效果。

1 金属透镜天线简介

传统的金属透镜天线设计基本理念类似于光学分析的方法。金属透镜天线一般是由等间隔金属栅网或者金属片组成, 通过调节结构折射率和曲率半径来构造透镜结构, 使金属透镜对电磁场能够实现类似光学聚焦的效果, 通过金属透镜结构将球面波前或者柱面波前调节为平面波前, 有效地提高馈源天线的增益^[2]。其示意图如图 1 所示。

$$n = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}$$
$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$$

式中: a 为板间距; n 为折射率; R_1, R_2 为曲面半径; f 为焦距。

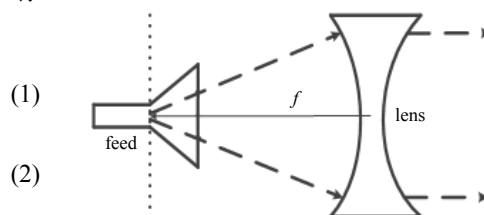


Fig.1 Schematic diagram of metal lens antenna
图 1 金属透镜天线示意图

收稿日期: 2017-10-24; 修回日期: 2017-12-04

*通信作者: 陈 星 email:83860865@qq.com

金属透镜天线一般情况下都等效为折射率小于 1 的介质，其相速度大于光速，电磁场在透镜结构中被加速，金属透镜越靠近边缘越厚，受到的加速路径就越长，使得球面波前被调节为平面波前。介质透镜天线一般等效为折射率大于 1 的介质，有利于降低天线的剖面高度^[8]。

2 金属透镜天线工作原理分析

传统金属透镜天线一般是由等间隔金属栅网或者金属片组成，并且只有当电场平行于金属栅网或者金属片时，透镜结构才起作用，为了分析金属板的作用，采用软件仿真平面波通过两平行金属板情况。

当电场垂直于金属板时，电场满足垂直于金属表面的条件，此时传播为 TEM 模，相波长不变；当电场平行于金属板时，电场为了满足垂直于金属表面的要求，会在板间呈半波分布，此时电磁波传播边界条件与矩形波导中 TE₁₀ 模一致^[9]，为了验证板间是否是以 TE₁₀ 模传播，对比不同金属板间距时板间相波长和 TE₁₀ 模计算得出的相波长，TE₁₀ 模相波长公式如下，其中 a 为板间距。

$$\lambda_a = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}} \quad (3)$$

从图 2 可以看出金属板间仿真得到的相波长和 TE₁₀ 模公式计算得出的值很吻合。

另外一个重要的透镜天线工作特性是将球面波前或柱面波前调节为平面波前，以此来提高馈源天线的增益。在传统的透镜天线设计中，透镜结构的曲率半径对于透镜天线的性能至关重要。透镜天线具有良好性能的前提是馈源天线近场具有良好的球面波前或柱面波前，当馈源天线的相位中心和透镜结构的焦点重合时，就能获得良好的平面波前。

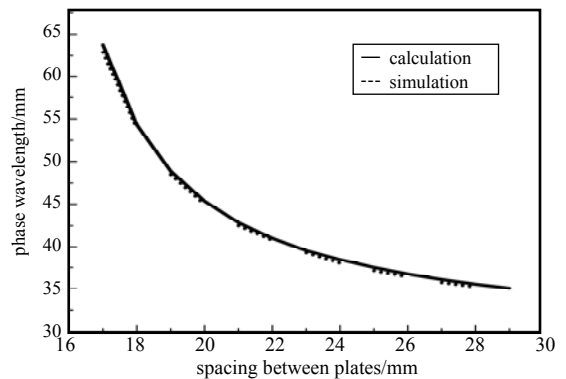


Fig.2 Phase wavelength contrast
图 2 相波长对比

3 新型金属透镜天线设计与仿真

3.1 新型透镜天线设计过程

基于上面的板间场分布符合 TE₁₀ 模，馈源场为近似球面波，传统金属透镜天线在相波长一致时，通过改变路径长短实现相位调节；那么在路径一致的情况下，改变相波长应该也能实现相位的调节，在这里假设板间场辐射皆为正 z 方向。该天线的基本结构如图 3 所示。

馈源天线为 10 GHz, 15.8 dBi 的标准喇叭天线，假设喇叭天线相位中心和透镜结构的距离为 l_z ，透镜结构厚度为 l ，某点和结构中心 x, y 方向距离分别为 l_x, l_y 。

选择喇叭天线做馈源是因为喇叭天线近场具有良好的球面波前特性，为了验证该特性只对喇叭天线进行仿真，将喇叭天线正前方透镜近馈源面应处位置的横向 ($l_y=0$) 相位分布导出，与标准球面波前求得的相位 (以 $l_x=0$ 处为相位零点) 进行对比，若某点距相位中心距离为 d ，相位差可由下式确定：

$$\Delta\phi = \frac{d - l_z}{\lambda_0} \times 2\pi \quad (4)$$

当 l_z 取 290 mm 时，吻合良好，如图 4 所示。该新型透镜设计主要包括两个方面，在横向上，通过改变板间距的大小，实现横向上相位与结构中心相位一致，假设中心处板间距为 a ， λ_0 可由式 (3) 得出，那么在透镜厚度为 l 时，为了弥补相位差， l_x 处的板间距 $a(l_x)$ 应满足下式：

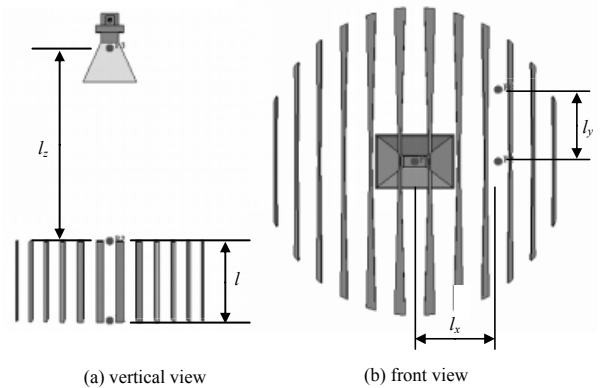


Fig.3 Structure of new lens antenna
图 3 新型透镜示意图

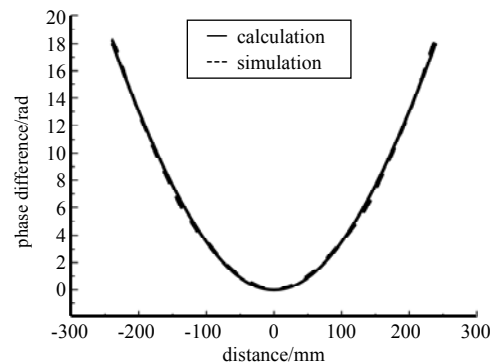


Fig.4 Contrast of phase difference
图 4 相位差对比

$$\frac{l}{\lambda_a} \times 2\pi - \frac{l}{\lambda_{a(l_x)}} \times 2\pi = \frac{\sqrt{l_z^2 + l_x^2} - l_z}{\lambda_0} \times 2\pi \tag{5}$$

由此可以确定板间距的大小，并且越向边缘板间距越小，板间距大小应当在 $(1/2)\lambda$ 到 λ 之间，以满足板间 TE10 模传输。

在纵向上通过加脊，使不同 l_y 处板间距不同，实现纵向上的相位调节，同样板间距可以由计算得出，假设某两板中心处板间距为 a ，那么不同 l_y 处板间距 $a(l_x)$ 应满足下式，此时脊的形状满足双曲线形式：

$$\frac{l}{\lambda_a} \times 2\pi - \frac{l}{\lambda_{a(l_y)}} \times 2\pi = \frac{\sqrt{l_z^2 + l_x^2 + l_y^2} - \sqrt{l_z^2 + l_x^2}}{\lambda_0} \times 2\pi \tag{6}$$

3.2 两种透镜天线设计仿真结果对比

为了和传统金属透镜天线做对比，将已有传统金属透镜天线结构主要参数表征出来，板厚为 2 mm，馈源为标准 10 GHz、增益 15.8 dBi 喇叭天线，天线近馈源面距离喇叭天线 240 mm，板宽 120 mm，其金属结构半径为 152 mm，板间距为 21 mm，前后曲面半径 220 mm；新型透镜设计时为了保持一致，板厚取 2 mm，馈源为标准 10 GHz、增益 15.8 dBi 喇叭天线，天线近馈源面距离喇叭天线 240 mm，板宽 120 mm，结构半径为 152 mm，由于板间模式满足 TE10 模，板间距离越大，波阻抗越大，反射越大，所以板间距离应当尽可能大，但是板间距离变大，相位一致性也会变差，最终板间距从中间向两边经计算得出为 28 mm, 27.03 mm, 24.85 mm, 22.56 mm, 20.62 mm 和 19.07 mm，脊高通过计算得出其计算值，并通过仿真对其进行一定修正，实际值为计算值与修正系数乘积，修正系数从中间向两边分别为 0.85, 0.85, 0.8, 0.7, 0.8, 0.8。两天线结构如图 5 所示。

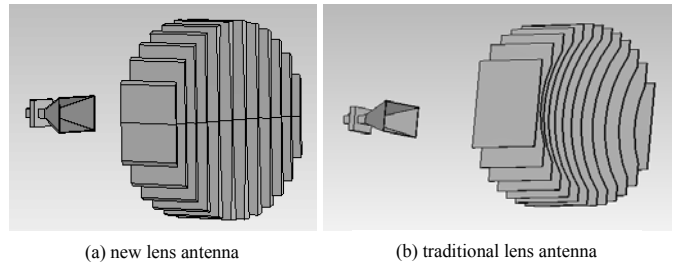


Fig.5 Contrast of antenna models
图 5 天线模型对比

表 1 为相同口径面和相同馈源天线时，两种天线增益对比。

表 1 伪随机序列排列组合熵

Table1 Permutation entropy of pseudo-random sequence

antenna type	directivity/dB	directivity/mag	aperture efficiency/%
traditional lens antenna	27.38	547	54.025
new lens antenna	27.32	539	53.235

该新型结构天线能够达到和金属透镜天线同等的增益提高效果，能够实现良好的平面波前，电场分布如图 6 和图 7 所示。

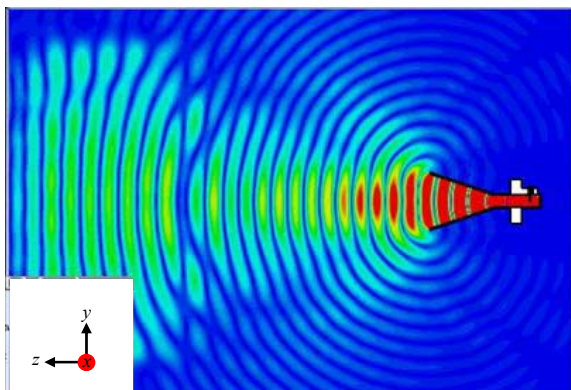


Fig.6 Schematic diagram of electric field distribution
图 6 电场分布示意图

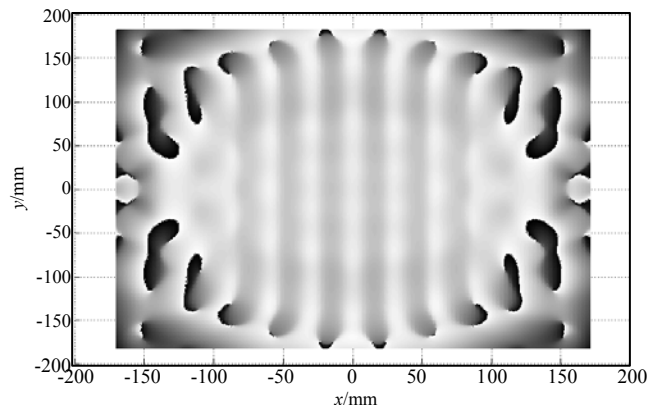


Fig.7 Phase distribution of aperture surface
图 7 口径面相位分布

4 结论

本文通过分析金属透镜天线的工作原理，以金属板间场的 TE10 模传播特性和馈源近场相位分布为依据，通过改变板间距调节相速，能够有效地提高增益。传统透镜天线在设计时只考虑折射率和曲率半径，对于馈源

的近场球面波前或柱面波前有很高的要求，如果近场不满足这些特性，传统透镜性能会受到限制，该新型设计方法是在整个口径面上对透镜结构进行调节，具有更广的适应范围。不过在设计之中仍有许多不足，在设计中假设板间场辐射方向皆为正 z 方向，显然边缘处场辐射方向会偏离正 z ，而采用曲面设计不利于加工，对于天线的实际应用有一定影响。这些仍然需要许多后续工作进行跟进，才能获得更好的性能和良好的实用性。

参考文献：

- [1] KOCK W E. Metal-lens antennas[J]. Proceedings of the IRE, 1946,34(1):828-836.
- [2] KRAUS J D. Antennas[M]. 2nd ed. New York,USA:McGraw Hill, 1998:661-683.
- [3] BLAKE L V, LONG M W. Antennas: fundamentals, design, measurement[M]. 3rd ed. Raleigh,NC,USA:SciTech Publishing Inc, 2009:264-266.
- [4] KRAUS J D. Antennas for all applications[M]. 3rd ed. New York,USA:McGraw Hill, 2002:626.
- [5] LAWRENCE J, CHRISTODOULOU C G. A high-power microwave zoom antenna with metal-plate lenses[C]// IEEE International Symposium on Antennas and Propagation. Memphis, Tennessee, USA:IEEE, 2014:1652.
- [6] LAWRENCE J E, CHRISTODOULOU C G, TAHA M R. A high-power microwave zoom antenna with metal-plate lenses[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015,63(8):3380-3389.
- [7] 何飞,陈星. 高增益金属透镜天线设计[J]. 无线电工程, 2017,47(6):61-64. (HE Fei, CHEN Xing. Design of a high-gain metal lens antenna[J]. Radio Engineering, 2017,47(6):61-64.)
- [8] 张立东,戴作杏. 基于介质透镜的太赫兹引信天线技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(1):31-34. (ZHANG Lidong, DAI Zuoxing. Terahertz fuze antenna technique based on dielectric lens[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(1):31-34.)
- [9] 何雅兰,何金龙,刘平安. 低损耗太赫兹镀膜金属波导研究[J]. 红外与激光工程, 2013,42(6):1533-1536. (HE Yalan, HE Jinlong, LIU Ping'an. Investigation on low-loss metallic terahertz waveguide with coating[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013,42(6):1533-1536.)

作者简介：



董俊峰(1993-), 男, 安徽省亳州市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为天线设计及优化算法研究. email:983461248@qq.com.

陈星(1970-), 男, 四川省巴中市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为天线、微波成像、全局优化、电磁场数值方法和并行计算领域.