

# 毫米波新月形柱面透镜天线设计

马岱, 高丽, 朱全银  
(淮阴工学院, 江苏省淮安市 223001)

**摘要:**设计了一个毫米波均匀介质新月形柱面透镜天线。考虑到透镜天线设计中遇到的计算过程复杂、工作量大的问题,提出采用射线追踪法分析毫米波透镜天线,通过 MATLAB 编程仿真得到满意的效果。该结果与其他仿真结果基本吻合,但是具有省时而节省计算机存储空间等优点,可作为毫米波透镜天线设计的优选方案。

**关键词:**透镜天线;射线追踪法;MATLAB;毫米波

**中图分类号:**TN821.5

## 0 引言

毫米波介质透镜天线是一种强方向性的口径天线,具有扫描角度宽、便于波束成形、易于产生多波束、结构紧凑、价格便宜和便于大量生产等优点,在卫星通信、飞行器盲着陆导航系统、汽车防撞雷达等系统具有当前和今后潜在的用途。透镜天线属于电大尺寸天线,计算过程复杂、工作量十分巨大。常用的仿真软件在设计时受到了计算机内存容量和计算时间等的限制。本文采用射线追踪法,使用 MATLAB 编程设计具有省时而节省计算机存储空间等优点,并且仿真的结果与其他仿真结果基本吻合。

## 1 透镜天线远区辐射场的分析

以图1所示的新月形柱面透镜天线结构为例进行分析。

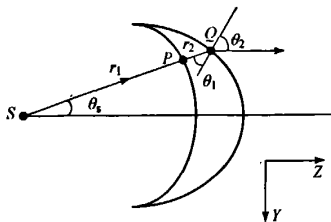


图1 新月形柱面透镜天线的剖面图

新月形柱面透镜的内表面为圆柱面,外表面为椭圆柱面,属于单折射面透镜,其折射发生在外表面上,在内表面上则是垂直入射。透镜天线系统的焦点位于点S,D和f分别为新月形柱面透镜的直径和焦距。其几何外形表达式由如下公式决定(直角坐标下)。

外表面(椭圆柱面):

$$\frac{z^2}{b^2} + \frac{y^2}{a^2} = 1 \quad (1)$$

内表面(圆柱面):

$$(z+c)^2 + y^2 = f^2 \quad (2)$$

式中:

$$a = \frac{\sqrt{n^2 - 1}}{n} b$$

$$b = \frac{n^2 f - n \sqrt{f^2 - \frac{D^2}{4}}}{n^2 - 1}$$

$$c = \frac{1}{n} b$$

新月形柱面透镜的  $f/D$  值对透镜天线影响很大,透镜的  $f/D$  值越小,则透镜的厚度越厚。实际应用中因过小的  $f/D$  值将导致透镜太厚而无法使用,并且无法获得馈源天线的良好照射。通常,取透镜的外表面面积等于其椭圆内表面面积一半时的  $f/D$  值为极限值。这样可以推出限制条件为:

$$\frac{f}{D} \geq \frac{n}{2\sqrt{n^2 - 1}} \quad (3)$$

本文采用的透镜材料 Rexolite ( $\epsilon_r = 2.54$ ),由式(3)计算的最小  $f/D$  值为 0.642。馈源天线当点源放置在透镜L的焦点S上, $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 分别为入射角和折射角。本文采用通用柱面波模式的辐射分布计算透镜天线远场的方向图。令电场辐射分布如下:

$$E_i = \hat{x} \cos^n \theta_i \cos\left(\frac{\pi}{h} z\right) \frac{e^{-jk\rho}}{\sqrt{\rho}} \quad (4)$$

Q点处的电场为:

$$E_s = \hat{x} \cos^n \theta_s \cos\left(\frac{\pi}{h} z\right) \frac{e^{-jk_1 r_1}}{\sqrt{r_1}} T_{VP} e^{-jk_2 r_2} F_D T_{VQ} \quad (5)$$

式中:  $r_1$  和  $r_2$  分别为  $S$  点到  $P$  点和  $P$  点到  $Q$  点的距离;  $k_1$  和  $k_2$  分别为在填充了空气和透镜介质的平行金属板中的传播常数,垂直极化时激励的是 TMO 波,故  $K_1 = K_0$ ,  $K_2 = nK_0$ ;  $T_{VP}$  和  $T_{VQ}$  分别为  $P$  点和  $Q$  点处的垂直极化波传输系数;  $F_D = \sqrt{r_1/(r_1 + r_2)}$ 。

由于内表面是圆柱面,故射线在经过内表面后仍为柱面波,所以由  $P$  点到  $Q$  点:

$$T_{VP} = \frac{2n}{n+1} \quad (6)$$

则等效电流密度和磁流密度分别为:

$$\eta J_s = r_n' \eta H \quad (7)$$

$$M_s = -r_n' E \quad (8)$$

式中:  $r_n'$  是透镜表面的法向量。

远场的横向电场为:

$$\begin{cases} E_\theta = -\frac{jke^{-jkr}}{4\pi\pi}(L_\theta + \eta N_\theta) \\ E_\phi = +\frac{jke^{-jkr}}{4\pi\pi}(L_\phi - \eta N_\phi) \end{cases} \quad (9)$$

式中:

$$N = \iint_S J e^{jkr' \cos \Psi} ds' \quad (10)$$

$$L = \iint_S M e^{jkr' \cos \Psi} ds' \quad (11)$$

$S$  为透镜的外表面;  $r'$  为透镜中心到等效电流或等效磁流的距离;  $r$  为透镜中心到远场点的距离;  $\Psi$  为  $r'$  和  $r$  之间的夹角。

将式(7)、式(8)、式(10)、式(11)代入式(9),即可计算透镜天线的远场。以上就是射线追踪法的全过程,它可以延伸到计算各种透镜天线的远场。

## 2 新月形柱面透镜特性描述

本文采用的策略是根据系统的辐射效率来优化  $f/D$ 。透镜天线口径的直径  $D = 10$  cm,系统效率为:

$$\eta_{\text{sys}} = \frac{D_{\text{sys}}}{D_{\text{max}}} \quad (12)$$

式中:  $D_{\text{sys}}$  为天线方向系数;  $D_{\text{max}} = \pi^2 D^2 / \lambda_0^2 = 4\pi A / \lambda_0^2$  为物理口径(圆形)面积等于  $A$  的天线所能达到的最大方向系数,  $\lambda_0$  为自由空间的波长。

$\eta_{\text{sys}}$  可按下式分解:

$$\eta_{\text{sys}} = \eta_s \eta_u \eta_t \quad (13)$$

式中:  $\eta_s$  为溢出效率,即

$$\eta_s = \frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{rad}}} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} \quad (14)$$

$\eta_u$  为传输效率,即

$$\eta_u = \frac{P_{\text{tr}}}{P_{\text{in}}} = \frac{\iint_S \frac{1}{2} \text{Re}(E_u H_u^*) \hat{n} dS}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} \quad (15)$$

$\eta_t$  为收缩效率。即:

$$\eta_t = \frac{\frac{4\pi U_{\text{max}}}{P_{\text{tr}}}}{\left(\frac{\pi D}{\lambda_0}\right)^2} = \frac{4\pi U_{\text{max}} \left(\frac{\pi D}{\lambda_0}\right)^{-2}}{\iint_S \frac{1}{2} \text{Re}(E_u H_u^*) \hat{n} dS} \quad (16)$$

## 3 新月形柱面透镜特性分析

基于以上方法,用 MATLAB 编程分析透镜天线远场方向图和效率等参数。图2描述了频率为 30 GHz 的 Roxilite ( $\epsilon_r = 2.54$ ) 新月形柱面透镜天线系统在 4 种不同波束宽度的馈源天线照射情况下,系统效率随  $f/D$  值(焦距与透镜直径比值)变化的情况。

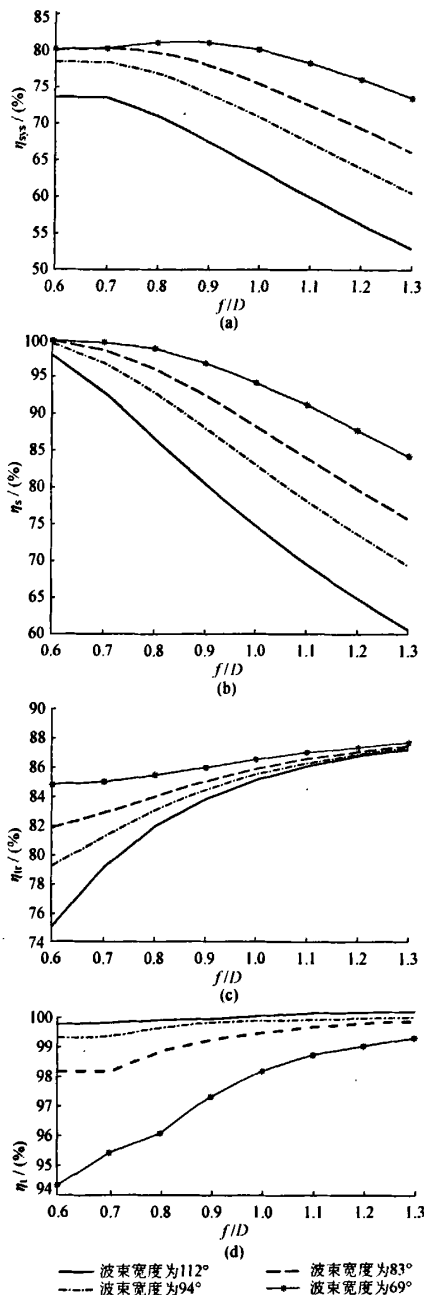
从图2可看出新月形柱面透镜天线效率变化的一般规律:当  $f/D$  值从 0.6 增大到 1.3 过程中传输效率  $\eta_u$  的变化不大,这说明反射、折射所引起的损耗很小,因此透镜表面不需加防反射涂层;溢出效率  $\eta_s$  的变化与  $f/D$  的大小及波束宽度值有很大的关系,当波束宽度一定时,  $\eta_s$  随着  $f/D$  的增大而迅速降低,这是因为随着  $f/D$  值的增大,透镜离馈源天线越来越远,所能照射到透镜上的能量越少;  $f/D$  值一定时,波束宽度越窄,  $\eta_s$  越大,这是因为波束宽度越窄,所能照射到透镜上的能量越多,所以  $\eta_s$  大;收缩效率  $\eta_t$  达到 94% 以上,且变化不大,这是因为天线口径场的分布均匀,从而产生高的  $\eta_t$ 。总的系统效率  $\eta_{\text{sys}}$  是以上 3 种效率的合成,随着馈源天线波束宽度的减小,  $\eta_{\text{sys}}$  逐渐增大。一个最佳的  $\eta_{\text{sys}}$  (0.67 ~ 0.81) 在  $f/D$  值为 0.6 ~ 0.9 区域内获得。

当馈源天线  $H$  面内波束宽度为  $69^\circ$ ,  $D = 10$  cm,  $f/D$  值为 0.7、0.8、0.9 时(平行板间距 180 mil,符合 TMO 模单模传输的条件),由射线追踪法编程计算出的透镜天线  $H$  面的方向图如图3所示。

从图3中可以读出  $f/D = 0.7$ 、0.8、0.9 时,  $H$  面 -10 dB 波束宽度约为  $10^\circ$ ,主瓣宽度基本一致。根据文献[1]的理论,一个会聚透镜天线系统在远场产生最深的零点对应着最均匀的孔径相位。图中  $f/D = 0.7$  时有最深的零点,即此时对应最均匀的孔径相位。相应的系统效率为 80.22%,略低于  $f/D = 0.9$  时的系统效率 81.08%。-10 dB 波束宽度约为  $10^\circ$ ,综合以上分析,这里选择  $f/D = 0.7$ 。

## 4 新月形柱面透镜天线的仿真

综合以上透镜天线特性的分析,本文选定了一个

图2 新月形柱面透镜天线效率随 $f/D$ 值变化的情况

优化的柱面透镜天线系统的尺寸和材料参数,该透镜天线的尺寸和配置参数如下:馈源天线作为点源放在焦点 $S$ 上,在 $H$ 面内波束宽度为 $69^\circ$ ;使用新月形柱面透镜,透镜材料为 Rexolite,介电常数 $\epsilon_r = 2.54$ , $f/D = 0.7$ , $D = 10$  cm;平行金属板间距为 180 mil,其宽度与透镜宽度相同也为 10 cm;极化方式为垂直极化。图4为该参数条件下透镜天线系统远场方向图。

从图4可以很明显地看出透镜天线系统在其口径上形成了扇形波束, $E$ 面波束宽度很大,近似为全方向

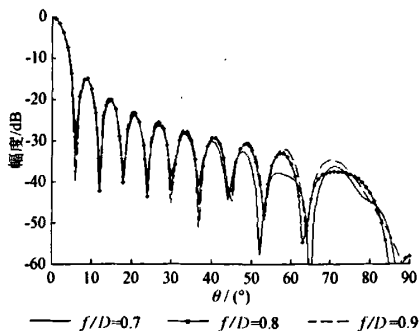
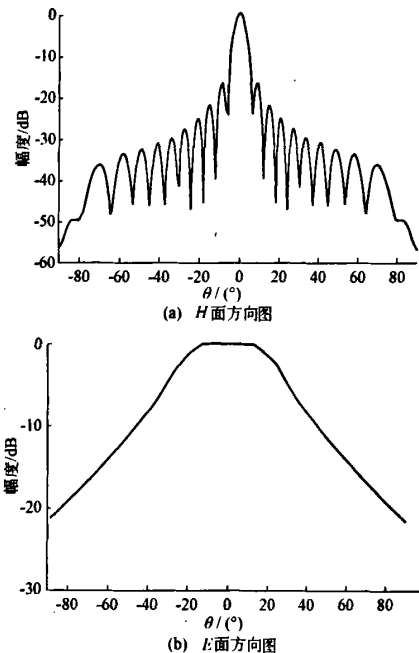


图3 新月形柱面透镜天线远场方向图

图4 双曲柱面透镜天线系统的远场方向图( $f/D=0.7$ )

性, $H$ 面波束宽度很窄,近似为笔形波束,第一副瓣电平低于主瓣电平 17 dB 左右。

## 5 结束语

本文使用 MATLAB 编程的射线追踪法分析毫米波介质透镜天线,首先采用射线光学理论分析从馈源到透镜外表面的场分布,然后采用物理光学的口径积分法进行远场方向图分析。基于此方法,在参数改变时,对天线的远场图及效率进行分析,最后给出一个优化的透镜天线系统仿真。此方法具有实用价值,可用于其他透镜天线系统、反射面天线等的分析与设计。

(下转第 24 页)

dB 左右的增益,从而可以满足不同视频质量的需要,提高了组网的灵活性和终端的移动性能。

### 参 考 文 献

- [1] ETSI TS 102 428. (2005-06) Digital audio broadcasting (DAB); DMB video service; User application specification [S]. 2005.
- [2] ETSI TR 102 377. V1. 2. 1. Digital video broadcasting (DVB); DVB-H implementation guidelines[S]. 2005.
- [3] CHARI M R, LING Fuyun, MANTRAVADI A, et al. FLO physical layer: An overview[J]. IEEE Trans on Broadcast-

ing, 2007, 53(1, Part 2):145-160.

- [4] ENGELS V, ROHLING H. Multi-resolution 64-DAPSK modulation in a hierarchical COFDM transmission system[J]. IEEE Trans on Broadcasting, 1998, 44(1): 139-149.
- [5] MAY T, ROHLING H, ENGELS V. Performance analysis of viterbi decoding for 64-DAPSK and 64-QAM modulated OFDM signals[J]. IEEE Trans on Communications, 1998, 46(2): 182-190.

张 荣(1982-),男,硕士研究生,主要研究方向为移动多媒体广播和视频编码。

## The Application of Hierarchical Modulation Technology Based on DAB System

ZHANG Rong, YUAN Jun

(School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** One hierarchical modulation method based on the DAB system is presented to protect streams according to their priorities, which can be used in scalable video coding. In physical layer, the implementation of hierarchical modulation can improve not only the spectral efficiency but also the terminal mobility and the flexibility of building network. Based on the DAB physical layer structure, simulation is done at different order's differential modulation and different modulation level. Different hierarchical layer's SNR simulation result at the BER is given, and the result shows that the high priority stream has nearly 15dB gain compared with the low priority stream.

**Keywords:** digital multimedia broadcasting; DAB; hierarchical modulation

(上接第 8 页)

### 参 考 文 献

- [1] SCHOENLINN B, WU Xidong. Wide-scan spherical-lens antennas for automotive radars[J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Technology, 2002, 50(9): 2166-2175.
- [2] 施伟, 龚铮权. 用矢量球面波理论和互易原理分析伦伯透

镜天线[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(1): 103-107.

- [3] 李先进, 龚铮权, 卢春兰. 分层伦伯透镜天线的辐射性能计算[J]. 微波学报, 2004, 20(4): 11-15.

马 岱(1977-),男,硕士,主要研究方向为射频和微波通信天线的研究与设计。

## Design of Millimeter-wave Meniscus Cylindrical Lens Antenna

MA Dai, GAO Li, ZHU Quanyin

(Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 223001, China)

**Abstract:** A millimeter-wave meniscus lens antenna is designed in this paper. Considering the complexity of calculation processing and larger workload, this paper analyzes the meniscus lens antenna through ray tracing method. The calculation result based on MATLAB agrees very well with the other simulation result, but the ray tracing techniques can save more time and memory. Therefore, it is a better scheme for designing lens antenna.

**Keywords:** lens antenna; ray tracing method; MATLAB; millimeter-wave

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>