

# 加载匹配层的波导介质新月透镜天线

杨楠 赵怀成 吴锡东 周金芳

(浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027)

xwu@zju.edu.cn

**摘要** 本文阐述了一种加载匹配层的介质新月透镜天线并装载在标准矩形波导内。该透镜天线可用于准光功率合成系统中，它的一个典型系统可以由以下部分组成：十路并行的输入波导、一个加载匹配层的新月薄透镜、一个E面扇形喇叭和一个输出波导。适当选择新月透镜的焦径比( $f/D$ )可以得到较高的合成效率。同时，适当厚度的匹配层也可以进一步增加合成效率。作为验证，本文使用CST的微波工作室设计并优化了一个十路功率合成器，其中心频率设在30GHz。优化的结果是透镜的焦径比为2.4，匹配层厚度为1.78mm。该结构的80%合成效率的带宽为28.5GHz~40GHz，共11.5GHz，具有宽带宽、高效率的特点。

**关键词** 焦径比( $f/D$ )，匹配层，新月透镜天线，准光功率合成

## Waveguide-Based Dielectric Meniscus Lens Antenna Loaded with Matching Layer

Yang Nan, Zhao Huicheng, Wu Xidong, Zhou Jinfang

(Department of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

**Abstract:** This paper presents a dielectric meniscus lens antenna loaded with a matching layer, which is integrated in standard rectangular waveguide. This lens antenna is usually used for quasi-optical power combining and one of its typical systems is composed of ten side-by-side input waveguides, a meniscus thin lens with a matching layer, an E-plane sectoral horn, and an output waveguide. The choice of the focal length to diameter ratio ( $f/D$ ) number of the meniscus thin lens plays a significant role in achieving high combining efficiency and a matching layer also helps to improve the efficiency. For verification, a ten-way power combiner with center frequency of 30GHz is designed and optimized by using CST Microwave Studio, where the  $f/D$  number is finally chosen to be 2.4 and the thickness of the matching layer is 1.78mm, exhibiting a broad 80%-efficiency bandwidth of 11.5GHz (28.5GHz- 40GHz).

**Keywords:** Focal length to diameter ratio ( $f/D$ ) number; Matching layer; Meniscus lens antenna; Quasi-optical power combining

## 1 引言

近年，准光功率合成技术正在得到越来越多的研究，因为它能达到较高的功率，较大的合成效率，同时具有简单的结构和良好的扩展性能。近年基于矩形波导的准光功率合成有基于波导新月透镜<sup>[1]</sup>和基于波导介质

双曲透镜<sup>[2]</sup>的准光功率合成。波导介质双曲透镜<sup>[2]</sup>的方案中由于其介质较厚，导致较高的介质损耗。为了克服这个问题，减小介质损耗，本文提出了另一种用来实现毫米波准光功率合成的方案。该方案基于标准矩形波导WR-28，采用介质新月透镜天线和E面喇叭配合实现功率分配或合成。使用CST

---

基金项目：国家自然科学基金项目(60871010)

作者简介：杨楠，男，硕士研究生，主要研究领域为毫米波空间功率合成和微波毫米波平面集成电路；赵怀成，男，博士研究生，主要研究领域为毫米波空间功率合成和缝隙天线波及透镜等；吴锡东，男，副研究员，主要研究领域为毫米波理论与技术、透镜天线技术、天线阵列技术、毫米波功率合成技术、微波平面集成电路等；周金芳，女，副教授，主要研究领域为毫米波功率合成技术、射频集成电路、天线理论与技术等。

的微波工作室仿真发现，加载一层合适厚度的匹配层对合成效率将有不少的改善。仿真结果表明该系统具有宽带宽、高效率的特点。

## 2 结构和原理

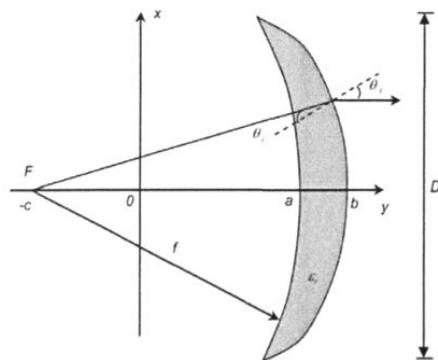


图 1 新月透镜的二维结构

图 1 是一个典型新月薄透镜的图解，其中透镜的焦点位于  $F$  点， $n$ 、 $D$  和  $f$  分别是介质的折射率、透镜的直径和焦距。新月透镜的内表面为圆柱面，外表面为椭圆柱面，电磁波在内表面上垂直入射，在外表面上才发生折射，属于单折射面透镜。新月透镜外形的几何表达式由以下公式决定：

$$\text{内表面: } x^2 + (y + c)^2 = f^2 \quad (1)$$

$$\text{外表面: } x^2 / a^2 + y^2 / b^2 = 1 \quad (2)$$

其中：

$$b = \frac{n^2 f - n \sqrt{f^2 - D^2 / 4}}{n^2 - 1} \quad (3)$$

$$a = \frac{\sqrt{n^2 - 1}}{n} b \quad (4)$$

$$c = b / n \quad (5)$$

图 2 给出的是本文提出的基于波导介质新月透镜天线的功率合成器。如图所示，该功率合成器由十路并行的输入波导、一个加载匹配层的新月薄透镜、一个 E 面扇形喇叭和一个输出波导组成。本设计中所采用的

波导均为标准矩形波导 WR-28，其窄边长为  $B = 3.556\text{mm}$ 。图 2 中的参数  $t$  和  $tm$  分别是新月透镜和匹配层的厚度， $d_1$  和  $d_2$  分别是功率合成部分和 E 面喇叭的长度，可由下式表达：

$$d_1 = f + t - \frac{B}{D} \sqrt{f^2 - (\frac{D}{2})^2} \quad (6)$$

$$d_2 = \frac{D - B}{D} \sqrt{f^2 - (\frac{D}{2})^2} \quad (7)$$

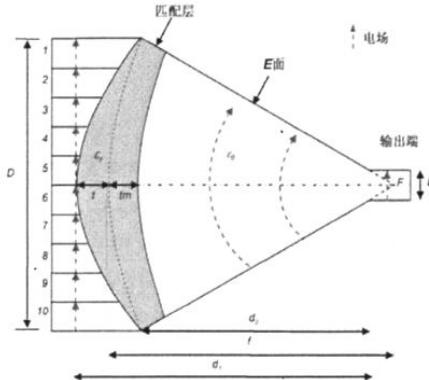


图 2 基于新月透镜的十路功率合成系统

新月薄透镜为了能与 E 面喇叭良好配合达到效率最优，需要将新月透镜的焦点  $F$  点放置在 E 面喇叭波导壁延长线的交点上，如图 2 中虚线所示。在新月透镜与 E 面喇叭配合良好的情况下，新月透镜能将输入的十路等幅同相的平面波信号转化成柱面波前，然后会聚进入 E 面喇叭并最终由输出波导输出。匹配层是 E 面喇叭中与新月透镜相接处填充部分介质所得，它的采用是为了在工作频点得到更好的匹配和更高的合成效率，这个可以由优化匹配层的厚度来实现。

整个功率合成系统的最重要的设计指标就是合成效率，其定义是当十路输入信号等幅同相馈入时输出功率与总的输入功率之比，公式定义如下：

$$\eta = P_{\text{out}} / \sum P_i = P_{\text{out}} / 10P_1 \times 100\%$$

### 3 结果

表 1 仿真数据汇总表

f/D	f(mil)	t(mil)	d <sub>1</sub> (mil)	d <sub>2</sub> (mil)	$\eta_0$	t <sub>m</sub> (mil)	$\eta_m$	BW(80%)
1.365	1910.6	154.5	1887.3	1600	90.2%	0	90.2%	2.10GHz
1.626	2277.0	121.4	2181.7	1950	80.9%	20	89.4%	8.41GHz
1.816	2542.7	105.7	2403.9	2200	84.7%	40	87.1%	3.51GHz
2.0	2800.0	94.1	2623.0	2440	79.2%	40	87.8%	10.22GHz
2.2	3080.0	84.2	2864.3	2700	73.5%	50	83.8%	11.54GHz
2.433	3406.2	75.2	3148.0	3000	77.8%	70	91.7%	11.56GHz
2.589	3624.6	70.2	3339.1	3200	69.1%	70	87.6%	12.02GHz
2.822	3950.8	63.9	3625.8	3500	75.0%	80	91.0%	12.28GHz

作为验证，我们设计了一个 Ka 波段的十路准光功率合成系统，工作频点为 30GHz，其中新月透镜采用 Rexolite 介质 ( $\epsilon_r = 2.54$ ) 填充。因为是十路输入，并且十路波导均为 WR-28，所以新月透镜的直径固定为  $D = 10B = 35.56\text{mm}$ ，在此条件下，调节焦径比  $f/D$  实质上就是改变焦距  $f$  的大小。使用 CST 软件仿真并优化匹配层的厚度  $t_m$ ，所有数据汇总如表 1 所示。表 1 中的  $\eta_0$  和  $\eta_m$  分别代表未添加匹配层时工作频点的合成效率和添加匹配层后的合成效率。

由表 1 的结果我们可以画出如图 3 所示的折线图，由这两张图我们可以归纳出以下两点结论：

- 1) 匹配层可以大大改善工作频点的合成效率；
- 2) 随着焦径比  $f/D$  的增加，80% 合成效率带宽先是迅速变大，后趋于稳定。当  $f/D > 2.4$  时，此带宽几乎不变。

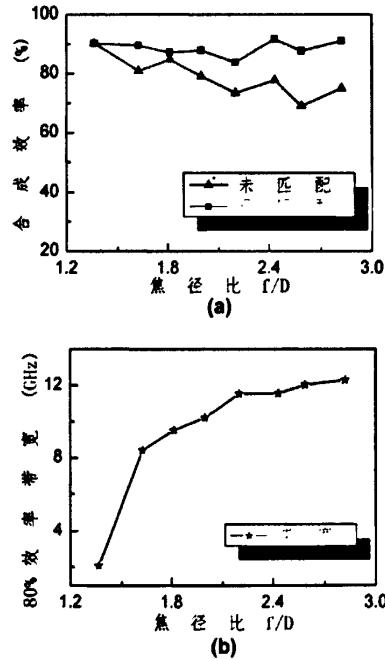


图 3 (a) 是否含有匹配层对合成效率的影响  
(b) 80%合成功率带宽与焦径比的关系

因为较大的焦径比即意味着较大的尺寸，而较小的焦径比带宽又窄，所以综合考虑选择  $f/D = 2.4$  的结果，此最优结果在表 1 中用实线框标出。此时的合成效率如图 4 所示：

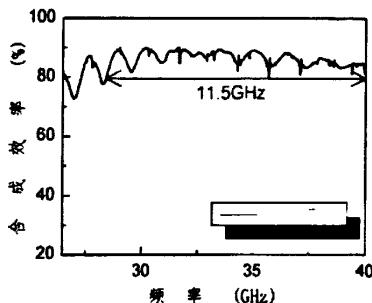


图 4 本文设计的十路功率合成系统的合成效率  
( $f/D = 2.4$ ,  $t_m = 1.78\text{mm}$ )

## 参考文献

- 1 Wu, X. D., Zhao, H. C., Miao, C., Wu, W., "Design on waveguide thin lens quasi-optical power combining," in Asia Pacific Microwave Conference, Singapore, December 2009, 2577-2579.
- 2 Wu, X. D., Zhao, H. C., Wu, W., "Quasi-Optical Power Combining Using Waveguide-Based Hyperbolic Lens," in Antennas and Propagation Society International Symposium, San Diego, America, July 2008, 1-4.

## 4 结论

本文阐述了一种加载匹配层的介质新月透镜天线,所有部分均装载在标准矩形波导内。该透镜天线可用于准光功率合成系统中。影响该系统的两个重要参数是焦径比

$f/D$ 和匹配层的厚度  $t_m$ :  $f/D$ 影响的是合成效率的带宽,而  $t_m$ 影响的是工作频点合成效率的大小。该结构优化方便,易于集成,且十分便于拓展到更高频率或者更多路输入的情况,有很大的研究价值。

## 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，一直致力于专注于微波、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>