

用于毫米波焦面成像阵的介质加载波导阵元分析*

陈昊 窦文斌

(东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏, 南京, 210096)

摘要 分析了有望用于毫米波成像焦面阵的介质加载波导阵元. 采用时域有限差分法(FDTD)计算输入特性, 优化了输入基本匹配时的结构尺寸参数. 计算该结构参数下的阵元与成像透镜衍射场 Airy 斑的耦合效率并与其他阵元做了比较.

关键词 毫米波焦面阵成像, Airy 斑, 阵元, 介质加载波导.

ANALYSIS OF WAVEGUIDE LOADED WITH DIELECTRIC USED AS MILLIMETER WAVE FOCAL IMAGING ARRAY ELEMENTS*

CHEN Hao DOU Wen -Bin

(State Key Lab of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract Waveguide loaded with dielectric, which is used as focal-plane array element in millimeter wave imaging, was analyzed. Input properties of the element were analyzed and optimized for matching between feed waveguide and radiation element by finite difference time domain (FDTD) method. The coupling efficiency of radiation waveguide and the Airy' pattern from imaging lens was calculated, and compared with that of other array elements.

Key words millimeter wave focal imaging, Airy pattern, array element, waveguide loaded with dielectric.

引言

毫米波焦面阵成像是实时获得目标特征信息的一个重要方法,在许多方面有重要的应用需求. 作为焦面阵成像系统的接收单元,阵元是整个成像系统中重要的部分,其性能的好坏以及成本的高低直接影响到整个成像系统的性能和成本. 文献报道的焦面阵有贴于扩展半球介质透镜背面的集成天线阵和喇叭阵^[1]. 集成天线阵用于直接检波方案较方便,喇叭阵用于外差检测方案较方便. 喇叭阵的阵元有波纹喇叭和其它喇叭结构,波纹喇叭与成像透镜焦区场的耦合效率高,但波纹喇叭加工困难、造价昂贵. 本文分析介质块加载方形波导构成的介质加载波导阵元,希望得到与焦区衍射场有较高耦合效率的结果.

1 阵元模型

介质加载波导阵元的基本结构是在波导口增加

一个介质加载波导节,波导节尺寸比连接波导略大,介质块和波导壁之间留下一定的缝隙,具体结构如图1所示. 当电磁波从输入波导由左向右外传播时,由于波导节和口径处的不连续性,会在输入波导中产生反射波. 通过调节介质的介电常数和尺寸,可以匹配波导与外部空间^[2],同时介质片还可以控制波导阵元口径的场分布,以提高其和焦区衍射场的耦合效率^[1].

2 研究方法

采用时域有限差分法(FDTD)^[3,4]分析波导的输入特性. 在波导口径外距口径一定距离的上下左右及前方需安置吸收边界条件以模拟无穷大空间. 计算在三维空间进行. 采用傅立叶变换可得到频域结果. 在得到输入波导反射损耗的同时也可以得到波导阵元的口径场分布,从而可以计算口径场与成像透镜焦区衍射斑即 Airy 斑的耦合效率. 需要不断调整介质加载波导的尺寸以便在所需的频率上实现

* 国家自然科学基金(批准号 69971009)资助项目
稿件收到日期 2002 - 08 - 24, 修改稿收到日期 2002 - 12 - 17

* The project supported by the National Nature Science Foundation of China(No. 69971009)
Received 2002 - 08 - 24, revised 2002 - 12 - 17

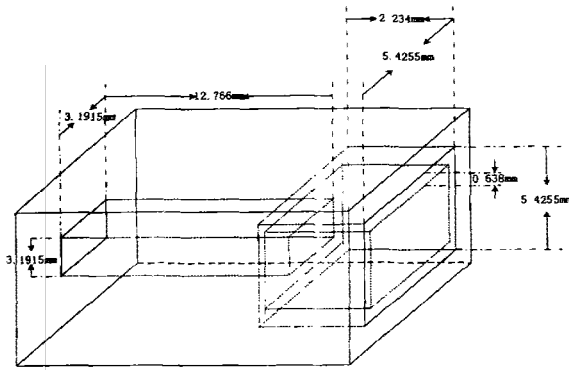


图1 介质加载波导阵元三维结构图
Fig.1 Three dimensional configuration of the waveguide loaded with dielectric

波导阵元与自由空间的匹配,这涉及大量的计算.

3 数值计算结果

经过大量计算与优化,得到了输入匹配时的结构参数(如图1所示).反射损耗计算结果(如图2所示),在93G~99GHz之间,反射损耗<-20dB;在94GHz处,反射损耗为-24dB.算出的波导阵元的口径场分布如图3所示.根据下面公式可以计算喇叭与焦区衍射场的耦合效率:

$$\eta = \frac{\left| \int_s E_w \cdot E_f^* ds \right|^2}{\int_s |E_w|^2 ds \int_s |E_f|^2 ds} \quad (1)$$

(E_w 为喇叭口径场, E_f 为爱里斑的场,*号表示复共轭)

取衍射场为爱里斑分布,即有

$$E = E_0 \frac{2J_1(x)}{x} \quad x = (2\pi/\lambda)\alpha \sin\theta \quad (2)$$

(其中 α 是透镜半径, θ 为绕射角.)

设成像透镜给出的 Airy 斑的半径约为 5.4255mm.相干成像取样间隔最大大约为一个波长,一个取样点

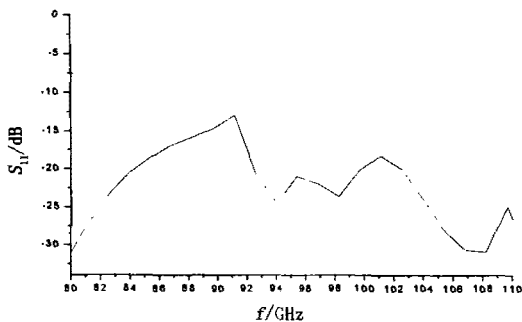


图2 介质加载波导阵元反射损耗计算结果
Fig.2 Calculation results of return loss of the waveguide loaded with dielectric

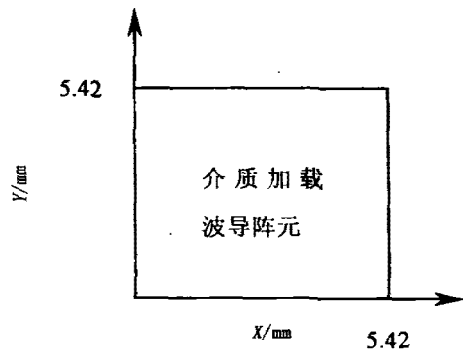
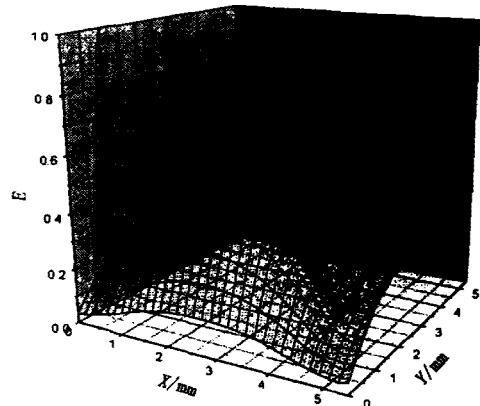


图3 单个介质加载波导阵元的场分布图和平面俯视图
Fig.3 Aperture field distribution of single waveguide loaded with dielectric and the aperture diagram

表1 不同喇叭阵元与 Airy 斑的耦合效率
Table 1 Coupling efficiency between Airy pattern and different horn array elements

耦合效率	介质加载波导	圆波纹喇叭	矩形波纹喇叭
η	0.4556	0.3734	0.3966

放置1个喇叭,则1个爱里斑将覆盖4个喇叭(取样点).

4个介质加载波导阵元组合在一起的场分布图(忽略互耦情况)如图4所示.

对波纹喇叭也可类似处理. Airy 斑和介质加载波导、矩形波纹喇叭、圆波纹喇叭的尺寸关系如图5所示.

根据式(1)算出的各种阵元与 Airy 斑的耦合效率如表1所示.计算中均设 Airy 斑直径为10.851 mm.介质加载波导尺寸为 5.4255mm,矩形波纹喇叭尺寸为 5.4255mm,圆波纹喇叭直径为5.4255 mm.

这里做了喇叭之间导体壁为无穷薄、喇叭之间无互耦的假设.介质加载波导阵元的耦合效率好于

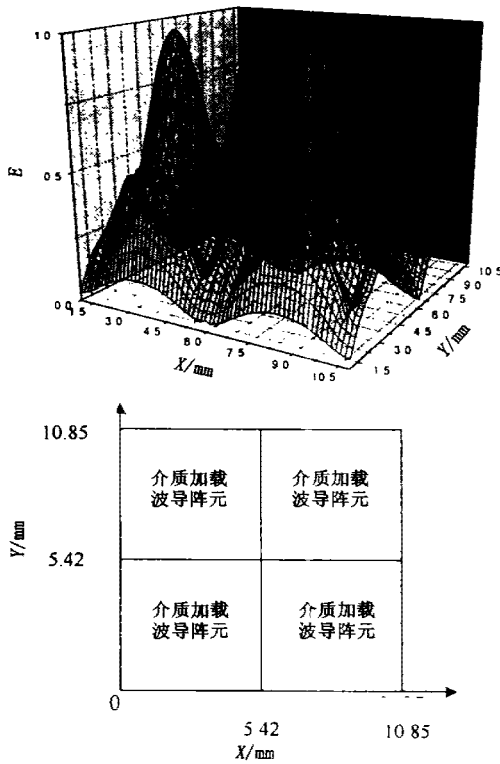


图4 4个介质加载波导阵元组合的场分布图(忽略互耦情况)和平面俯视图
 Fig.4 The aperture field distribution of four waveguide loaded with dielectric and aperture plane diagram (mutual coupling is omitted)

波纹喇叭的原因初步分析是:在积分时选取了矩形积分区域,而圆波纹喇叭部分区域场值为0.另外介质加载焦面阵元的介质块与波导壁之间的缝隙中也存在场,它们对爱里斑与口径场的耦合也有贡献.波纹喇叭在相应的地方场值很小或接近0,所以介质加载波导阵元与 Airy 斑的耦合效率要高一些.目前尚未作阵元之间互耦分析,所以缝隙场的负作用尚不清楚.

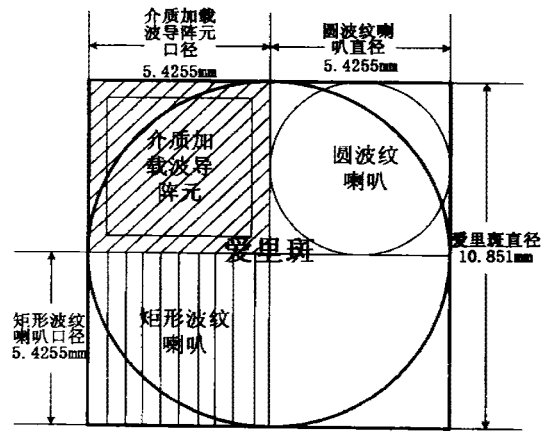


图5 Airy 斑与各种阵元的尺寸关系图
 Fig.5 Airy' pattern and different array elements

4 结论

介质加载波导阵元有望成为毫米波成像焦面阵元,它与 Airy 斑的耦合效率高,加工制作比波纹喇叭简单,因此成本降低很多.但尚需要进一步分析阵元的互耦特性.

REFERENCES

- [1] DOU Wen-Bin. *Millimeter Wave Quasi-Optical Theory and Techniques*. Beijing: Electronics Industry Press (窦文斌.毫米波准光理论与技术.北京:电子工业出版社),2000
- [2] Davidovitz M. An approach to analysis of waveguide arrays with shaped dielectric inserts and protrusions. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2001, 49(2): 355—361
- [3] WANG Chang-Qin, ZHU Xi-Li. *FDTD Method in Electromagnetic Field Computation*. Beijing: Beijing University Press (王长清,祝西里.电磁场计算中的时域有限差分法.北京:北京大学出版社), 1994
- [4] GAO Ben-Qing. *FDTD Method*. Beijing: National Defence Industry Press(高本庆.时域有限差分法 FDTD Method.北京:国防工业出版社), 1995