

毫米波焦面阵成像视场扩大分析

邓小丹¹, 潘君骅², 窦文斌¹

(1. 东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏南京 210096; 2. 中国科学院国家天文台南京天文仪器中心, 江苏南京 210042)

摘 要: 本文研究平面波倾斜入射在小 F 数毫米波焦面阵成像系统上衍射斑像差减小即视场扩大问题. 采用射线追迹方法计算不同透镜剖面成像系统焦面上的点列图, 对商用介质材料透镜通过优化剖面形状来减小像差从而获得视场扩大的效果. 采用结合射线追迹和衍射积分的矢量孔径法计算了透镜焦面上的衍射场分布, 与实验结果做了比较, 两者吻合.

关键词: 毫米波; 焦面阵; 成像; 视场扩大

中图分类号: O44; O43

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2003) 12A-2012-03

Analysis of Extending the Field-of-View of Focal-Plane Imaging System at Millimeter-Wavelengths

DENG Xiao-dan¹, PAN Jun-hua², DOU Wen-bin¹

(1. State Key Lab of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

2. Nanjing Institute of Astror-Optical Technology, Academy of Sciences of China, Nanjing, Jiangsu 210042, China)

Abstract: Expanding of Field-of-view for small F -number millimeter wave focal plane imaging is analyzed in this paper. Ray tracing method is used to calculate the spot pattern for different lens section plane, and then lens section plane of available dielectric material is optimized to reduce aberrations, so as to expand the field-of view. Vector aperture field method, which combines ray tracing and diffraction integral, is used to compute the diffraction field distribution in the focal plane of the imaging lens. Good agreement between calculation results and experiments has been found.

Key words: millimeter wave; focal plane array; imaging; extending field-of-view

1 引言

毫米波成像是毫米波技术领域 90 年代以来的一个研究热点, 尤其是可以实时成像的焦面阵成像更是受到重视^[1]. 为使毫米波焦面阵成像系统尺寸紧凑, 一般选择小 F 数 (焦距与透镜直径之比) 系统. 与常规光学的大 F 数系统不同, 小 F 数系统的焦区衍射场呈现出矢量特性, 而且像差比大 F 数系统严重. 要使成像系统能有效地工作, 系统须在较大的视场范围使像差尽可能地小. 我们在文[2, 3]中分析过有关成像透镜的焦区衍射场分布问题. 本文采用非球面透镜替代球面透镜或双曲面透镜以求获得视场扩大的效果. 首先采用射线追迹法计算透镜焦面上的点列图, 通过优化透镜剖面形状获得像差减小视场扩大的结果, 然后再用衍射积分法进一步计算出焦面上的衍射场分布. 为验证计算的正确性, 对衍射场分布做了实验验证, 两者吻合.

2 点列图分析

对不同入射角 采用射线追迹我们作了双凸球面透镜

和平凸双曲面透镜的点列图. 点列图坐标单位为米. 如图 1 (球面镜点列图), 图 2 (双曲面镜点列图) 示. 它们的 F 数都为 1, 透镜材料折射率 = 1.449, 透镜直径 = 120mm. 由图可以看出, 通过这两种透镜的波到达焦平面时都没有达到很好的汇聚效果, 球面透镜有明显的球差, 双曲面透镜有明显的彗差. 为解决问题, 需要改变透镜参数.

为实现减小像差扩大视场的目的, 我们考虑采用非球面透镜, 几何关系见图 3. 透镜前表面用二次曲面方程给出为:

$$z = \frac{x^2 + y^2}{R_1 + \sqrt{R_1^2 - (1 + e^2)(x^2 + y^2)}} \quad (1)$$

后表面用球面方程给出为:

$$z = -\sqrt{R_2^2 - (x^2 + y^2)} + R_2 + D \quad (2)$$

式中 R_1 为二次曲面顶点的曲率半径, $e^2 = 1 + \frac{R_1^2}{R_2^2}$, e 为曲线的离心率 ($e^2 > 1$ 为双曲面, $e^2 = 1$ 为抛物面, $0 < e^2 < 1$ 为椭圆面, $e^2 = 0$ 为球), D 为透镜顶点处的厚度. R_2 是球半径. 在实际设计时做了椭圆面, 双曲面, 抛物面等二次曲面的情况. 这些二次曲面的形状仅取决于 e 的范围, 这里就不一一列出了.

采用射线追迹可对上述透镜计算点列图, 以此为根据, 可

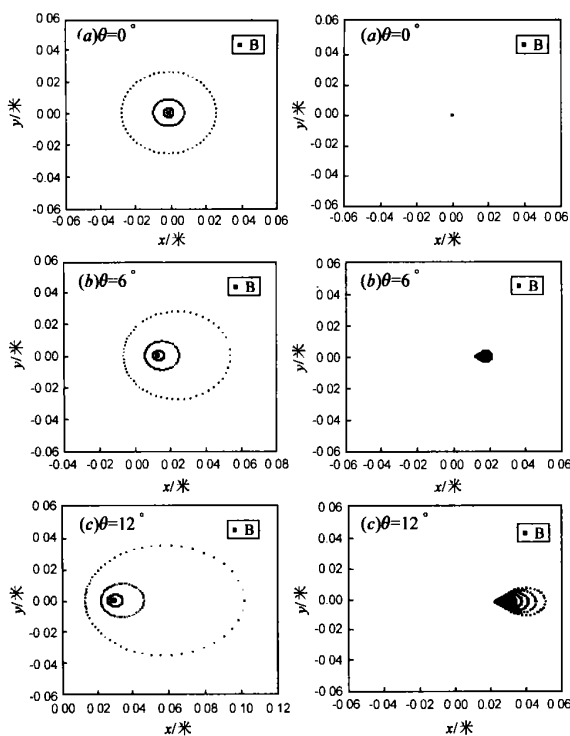


图 1 球面镜点列图

图 2 双曲面透镜点列图

选择比较透镜剖面优化设计透镜. 在计算机上做了大量工作调整透镜参数, 观察焦平面上的射线的聚焦情况. 考虑到透镜的可实现性, 计算仅对商用介质材料进行, 这里考虑了 Teflon 和

石英材料. 目标是在入射倾角尽可能大的同时点列尽可能集中在透镜焦面上的很小区域. 选择成像透镜系统是小 F 数的, 一般为 1, 以便系统尺寸不要过大. 图 4 是最后选出的折射率为 1.944 的材料 (石英) 的点列图, 其参数为: $R_1 = 153.9784\text{mm}$, $R_2 = 715.6293\text{mm}$, $e = -0.4264484$, $D = 45\text{mm}$, 透镜直径 200mm . 图 4 与图 1、图 2 比较就可以看出优化后的透镜在焦平面的散斑明显缩小了, 由于透镜参数的改变, 焦斑位置也有变化.

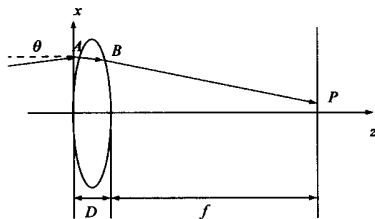


图 3 成像透镜几何关系

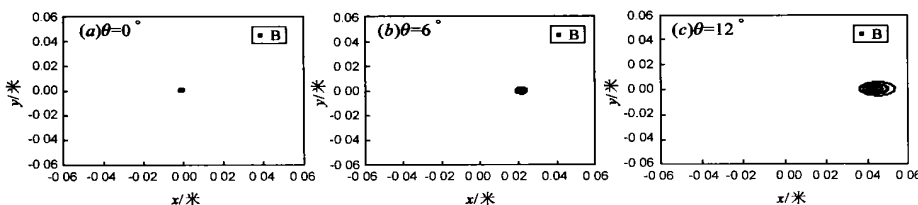


图 4 非球面透镜点列图

由图看出, 入射倾角到 12 度都具有良好的聚焦效果, 但折射率为 1.944 的石英材料加工方面有一定难度, 作者试图找出折射率为 1.449 的且满足要求的单透镜系统, 但在折射率降为 1.7 时已经满足不了系统小 F 数及大角度入射聚焦效果的要求, 在折射率为 1.449 时焦平面散斑很大, 图像模糊. 于是我们考虑用双透镜系统来弥补这个不足. 双透镜系统如图 5 所示, 对双透镜与多透镜组合用前面所述方法同样可以画出点列图.

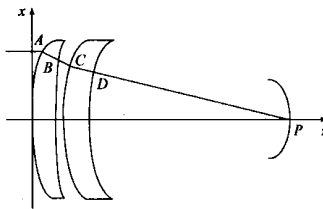


图 5 双透镜结构示意图

双透镜系统的优化远比单透镜系统复杂, 因为可调整的参数有 9 个, 即每个曲面的离心率, 曲面顶点的曲率半径和两透镜间的距离, 经过大量计算, 得到聚焦较好的透镜结构参数如下: $e_1 = -0.417$, $e_2 = 0.35$, $R_1 = 108\text{mm}$, $R_2 = 297\text{mm}$, $R_3 = 140\text{mm}$, $R_4 = 120\text{mm}$, $D_1 = 45\text{mm}$, $D_2 = 0.08 D_1$, $D_3 = D_1$, $F = 210.5\text{mm}$, 透镜直径 $= 200\text{mm}$.

双透镜点列图如图 6 所示. 与双曲面透镜点列图比较可见, 图 6 的结果实际上是一个折中, 入射倾角大时慧差小了, 但入射角为 0 度是散斑大了一些. 在折射率小的情况下, 采取加一个透镜的办法来得到大角度下散斑较小的焦区场分布, 但缺点是会增加装置的尺寸和重量.

3 焦区衍射场分布计算

前面采用射线追迹得出几种透镜的点列图, 射线追迹法计算速度快, 基于此法来优化透镜效率高. 但这个处理没有考虑衍射效应, 场强大小及相位的变化, 毫米波焦面阵由天线单元组成, 还需要知道衍射场分布才能估计衍射场与天线的耦合以及设计焦面阵的封装. 因此还须计算透镜焦区的衍射场分布. 这里采用结合射线追迹和衍射积分的矢量孔径场方法计算焦面衍射场. 由 Stratton-Chu 公式出发

$$E(p) = \int_{S_A} \left\{ -j \mu_0 G [\hat{n} \times H(p)] + [\hat{n} \times E(p)] \times \nabla G + [\hat{n} \times E(p)] \nabla G \right\} dS_A \quad (3)$$

$$\text{Green 函数: } G = \frac{\exp(-jkR)}{4R} \quad (4)$$

积分中 E 与 H 均为透镜出瞳 S_A 面上的场, 该场可通过入射场与透镜的相位传递函数得到, 详见文献 [4, 5]. 数值计算用 MATHCAD 完成. 计算结果显示, 在入射倾角达到 14 度时衍射斑的像差都很小. 限于篇幅, 计算结果不再给出.

4 实验验证

对于单透镜中球面透镜的焦区衍射场分布, 我们做了实验, 并将实验结果和计算结果做了比较. 实验中信号源是频率为 94GHz 的毫米波, 透镜直径 120mm, 焦平面用波纹喇叭接收, 波纹喇叭输出端

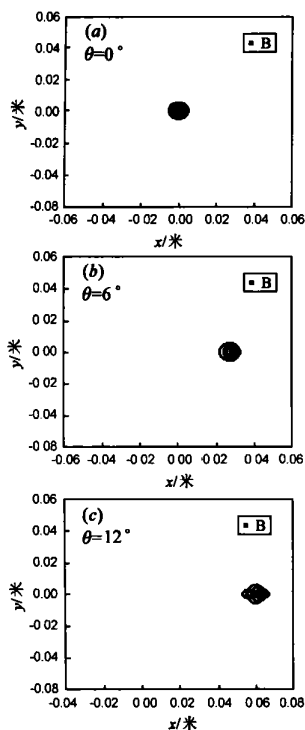


图 6 双透镜点列图

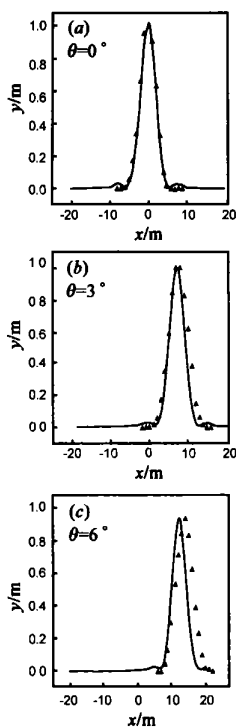


图 7 计算结果与实验结果比较。实验数据:—计算数据

连接功率计。图 7 是焦面 x 轴上归一化功率的实验数据和理论数据比较。可见计算与实验结果吻合。

5 结论

扩大小 F 数成像系统的视场是毫米波焦面阵成像系统须解决的重要问题。本文采用射线追迹方法计算不同剖面形状成像透镜的点列图,并基于此通过优化透镜剖面形状来扩大透镜的成像视场,获得成功。入射倾角从 7 度扩大到 14 度。采用结合射线追迹和衍射积分的矢量孔径场法计算了透镜焦区的衍射场分布并与实验结果比较,两者吻合。

参考文献:

- [1] Smith R M, Appleby R. Passive Millimeter-Wave Imaging Technology IV[M]. Orlando, USA: Proc of SPIE, 2001 (4373).
- [2] 奚文斌, 孙忠良. 用于毫米波焦面阵成像的小 F 数透镜焦区矢量衍射场分析[J]. 红外与毫米波学报, 2002, 21(2): 109 - 113.
- [3] MEI Z, DOU W. Performances of hyperbolic and spherical lens imaging systems at millimeter wavelengths[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2002, 16(8): 1077 - 1093.
- [4] WANG A, PRATA Jr A. Lenslet analysis by rigorous vector diffraction theory[J]. J Opt Soc Am, 1995, 12(5): 1161 - 1169.
- [5] 邓小丹. 毫米波焦面阵成像扩大视场的研究[D]. 南京: 东南大学无线电系, 2002.

作者简介:

邓小丹 女, 1976 年生于南京, 1994 - 1998 就读于扬州大学, 获电子工程学士学位, 1999 - 2002 就读于南京东南大学, 获电磁场与微波技术硕士学位, 2002 至今, 系统工程师, 工作于明基电通信息技术股份有限公司第一研发中心。

潘君骅 男, 1930 年生于江苏, 中国科学院南京天文仪器研究中心研究员, 苏州大学光学技术学院教授, 博士生导师, 研究领域包括: 非球面反射镜系统设计, 非球面表面检测与制作等, 研究成果曾获多项国家和科学院奖励。



奚文斌 男, 1954 年生于云南, 1987 年于电子科大获博士学位, 东南大学无线电系教授, 博士生导师, 毫米波国家重点实验室副主任。从事微波毫米波理论与技术的研究、教学和培养研究生的工作, 研究领域包括毫米波铁氧体器件、毫米波准光技术、毫米波焦面阵成像、毫米波集成电路、天线与散射、毫米波二元光学技术等, 在国内外期刊发表学术论文 70 多篇, 出版专著 2 本, 研究成果曾获多项省部级科技进步奖。