

文章编号: 2095-4980(2014)02-0176-04

被动太赫兹成像二维扫描技术

谢 巍, 侯丽伟, 潘 鸣

(中国电子科技集团公司 第 50 研究所, 上海 200331)

摘 要: 太赫兹成像受探测器像元数少和无法进行大规模面阵集成的限制, 大视场成像不可避免地要用到二维扫描。 45° 镜具有尺寸小, 稳定性好, 幅宽大等特点, 可以用来实现被动太赫兹二维扫描成像。详细分析了 45° 镜扫描成像的工作原理和扫描方式, 提出了绕 Z 轴摆动实现水平扫描, 绕 Y 轴摆动实现垂直步进的扫描方案, 计算了扫描轨迹, 边沿视场成像畸变约 3.2%, 并通过成像实验对扫描方案进行了验证, 得到了大视场下的被动太赫兹二维扫描图像。

关键词: 被动太赫兹成像; 二维扫描; 45° 镜; 畸变

中图分类号: TN29; O439

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201402.0176

2-D scanning technology in passive terahertz imaging

XIE Wei, HOU Li-wei, PAN Ming

(The 50th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shanghai 200331, China)

Abstract: It is inevitable to use 2-D scanning in wide-Field of View(FOV) terahertz imaging due to the restriction of terahertz detector(lack of pixels and hardly integrated to large-scale plane array). The 45° mirror could be used in passive terahertz 2-D scanning imaging for its advantages in dimension, stability and scanning Field of View. The principle of 2-D scanning imaging using 45° mirror is analyzed in detail. A new method with horizontal scanning by rotating around axis Z and vertical stepping by rotating around axis Y is proposed. The scanning trace is calculated, the margin FOV distortion is about 3.2%. The method is validated by the imaging experiment and image is acquired in wide-Field of View.

Key words: passive terahertz imaging; 2-D scanning; 45° mirror; distortion

太赫兹成像被认为是一种极具潜力的公共安防检测技术, 机场、商店、火车站等人流密集型场合的应用需求巨大。虽然主动太赫兹探测能满足安检和隐匿物探测等要求, 但基于公众对辐射的认知及隐私、伦理方面的诉求, 不需要辐射源的被动太赫兹成像更易于被公众接受^[1-3]。公共安防检测对被动太赫兹成像在帧频、视场范围、站开(Stand off)探测距离等指标上提出了要求, 但是目前太赫兹探测器的阵列规模还远远不能满足高帧频、大视场成像的需求。为了在不降低成像分辨率的条件下, 同时满足高帧频和大视场成像的要求, 通常采用精密二维机械扫描。目前常用的机械扫描方式有: 旋转的 45° 平面反射镜扫描、旋转(摆动)的单(双)面镜扫描、天线系统整体伺服扫描等^[4-5]。由于 45° 旋转扫描反射镜具有尺寸小、稳定性好、幅宽大等特点, 目前在航天遥感领域应用很广。本文针对被动太赫兹成像扩大成像视场的应用需求, 提出了一种基于 45° 旋转扫描反射镜的二维扫描方案, 详细分析了扫描成像的原理和工作方式, 计算了扫描轨迹, 对实际被动太赫兹成像应用具有指导意义。

1 理论分析

太赫兹扫描反射镜同样遵从平面镜的反射定律。如图 1 所示, 以单位矢量 N 表示镜面法线矢量, A 和 A' 分别代表入射光线和反射光线。由图中的矢量关系求得^[6-7]:

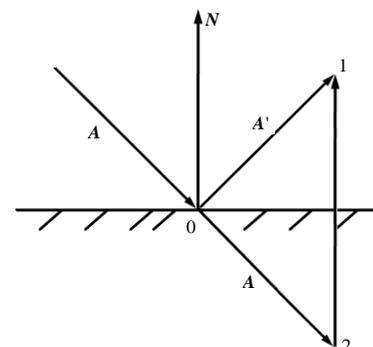


Fig.1 Sketch map of mirror reflection vector
图 1 镜面反射矢量图

收稿日期: 2013-11-19; 修回日期: 2013-12-18

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)资助项目

$$A' = A - 2(A \cdot N)N \quad (1)$$

在坐标系 XYZ 中, 令 $A = (A_x, A_y, A_z)$, $A' = (A'_x, A'_y, A'_z)$, $N = (N_x, N_y, N_z)$, 则式(1)可表示为:

$$A' = R \cdot A \quad (2)$$

式中 R 代表反射作用矩阵,

$$R = \begin{bmatrix} 1 - 2N_x^2 & -2N_xN_y & -2N_xN_z \\ -2N_xN_y & 1 - 2N_y^2 & -2N_yN_z \\ -2N_xN_z & -2N_yN_z & 1 - 2N_z^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

矢量 A 绕单位矢量 $P(P_x, P_y, P_z)$ 转动一角度 θ 成为 A' , 则有:

$$A' = S_{p,\theta} \cdot A \quad (4)$$

式中 $S_{p,\theta}$ 代表转动作用矩阵。

$$S_{p,\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta + 2P_x^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} & -P_z \sin \theta + 2P_xP_y \sin^2 \frac{\theta}{2} & P_y \sin \theta + 2P_xP_z \sin^2 \frac{\theta}{2} \\ P_z \sin \theta + 2P_xP_y \sin^2 \frac{\theta}{2} & \cos \theta + 2P_y^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} & -P_x \sin \theta + 2P_yP_z \sin^2 \frac{\theta}{2} \\ -P_y \sin \theta + 2P_xP_z \sin^2 \frac{\theta}{2} & P_x \sin \theta + 2P_yP_z \sin^2 \frac{\theta}{2} & \cos \theta + 2P_z^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

如图 2 所示建立坐标系 XYZ , 扫描镜为椭圆平面反射镜, 长轴在 XOY 平面内, 短轴与 Z 轴重合, 镜面法线 N 与 X 轴正向夹角为 135° 。

45° 旋转扫描镜通过绕 Z 轴来回摆动实现水平方向扫描, 绕 Y 轴来回摆动实现垂直方向步进, 从而达到对扫描视场的覆盖。根据光路可逆原理, 为研究方便, 定义沿后光路光轴方向的光线为入射光线, A 为沿后光路光轴方向的单位矢量, A' 是 A 经镜面反射的像矢量。根据反射镜的物象共轭原理及转动定理, A' 与 A 之间的关系表示为^[6]:

$$A' = G_{o'o} \cdot R_{45^\circ} \cdot G_{o'o}^{-1} A \quad (6)$$

式中 R_{45° 代表反射作用矩阵, 45° 扫描镜单位法线矢量 N 为:

$$N \left(-\frac{\sqrt{2}}{2}, -\frac{\sqrt{2}}{2}, 0 \right), \text{ 由此得:}$$

$$R_{45^\circ} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$G_{o'o}$ 为扫描镜绕 Z 轴摆动的转动矩阵 $S_{Z,\alpha}$ 与绕 Y 轴摆动的转动矩阵 $S_{Y,\beta}$ 的乘积。基于系统实现的考虑, 将 Z 轴设为动轴, Y 轴设为定轴, 由此得:

$$G_{o'o} = S_{Y,\beta} \cdot S_{Z,\alpha} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & -\sin \alpha \cos \beta & \sin \beta \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ -\cos \alpha \sin \beta & \sin \alpha \cos \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (8)$$

如图 3 所示, 通过研究沿光轴物矢量 $A(A=j)$ 的像矢量 $A'(A'_x, A'_y, A'_z)$ 在平行于 YOZ 平面的 $Y'O'Z'$ 平面内的运动轨迹来计算扫描镜为实现扫描视场 a, b 所应摆动的角度 α, β (a 为水平方向半视场角, b 为垂直方向半视场角)。经推导得:

$$\tan a = \frac{A'_y}{A'_x} = \frac{\tan 2\alpha}{\cos \beta} \quad (9)$$

$$\tan b = \frac{A'_z}{A'_x} = -\tan \beta \quad (10)$$

2 计算结果

以水平、垂直各 $\pm 0.25 \text{ rad}$ (换算成角度为 $\pm 14.3^\circ$) 的扫描视场为例, 经计算, 扫描镜摆角及实际扫描视场参数见表 1。二维扫描轨迹见图 4。由计算结果可知, 垂直方向扫描不存在畸变的问题, 水平方向扫描存在最大约 3.2% 的畸变, 畸变的校正可以在扫描成像以后, 通过算法对图像进行软件校正实现; 另一方面, 也可以在水平扫描时,

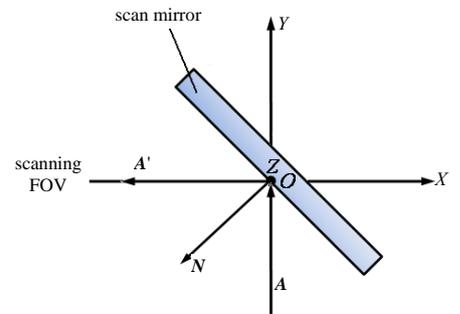


Fig.2 Principle of 2-D scanning with 45° mirror
图 2 45° 镜二维扫描原理图

改变扫描镜的摆角，使得每一行扫描的实际视场与设计视场一致，不过这样对二维扫描机构的控制及探测器采样提出了更高的要求。目前常用的畸变校正方法还是软件校正，对于被动太赫兹成像，边沿视场 3%的畸变量可以忽略，对系统成像质量影响不大，所以一般不做校正。

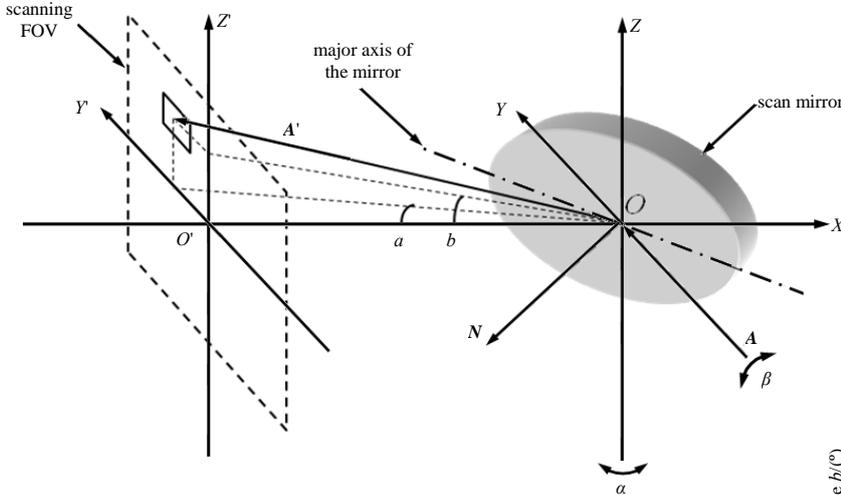


Fig.3 Sketch map of Scanning FOV
图 3 扫描视场示意图

表 1 扫描视场计算结果

Table1 Calculated results of scanning FOV

| | horizontal(rotating around axis Z)/(°) | vertical(rotating around axis Y)/(°) |
|----------------------------|--|--------------------------------------|
| designed FOV | ±14.3 | ±14.3° |
| actual FOV | MAX: ±14.76°; MIN: ±14.3° | ±14.3° |
| swing angle of scan mirror | ±7.16° | ±14.3° |

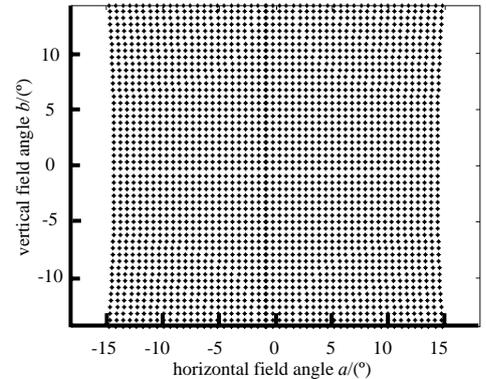


Fig.4 Sketch map of calculated scan trace
图 4 计算得出的扫描轨迹示意图

3 实验结果

以垂直排列的四元线列被动太赫兹探测器，对 2 m 成像距离下、1 m × 1 m 成像范围进行二维扫描成像为例，扫描视场水平、垂直各 ±0.25 rad(换算成角度为 ±14.3°)。扫描行程见图 5，图 5 为光电编码器实时记录的扫描镜绕 Z 轴和 Y 轴摆动的摆角，系统在水平方向为连续扫描，垂直方向步进，去程起点为扫描视场的右上角，终点为左下角，一次扫描行程完成扫描视场的全覆盖；回程扫描方向与去程正好相反，起点为左下角，终点为右上角，一去程和回程的扫描周期可以形成 2 帧完整图像。系统对人扫描成像见图 6，垂直方向步进距离 4 cm，帧周期 < 30 s，由图像可知，系统扫描视场符合设计预期，扫描成像不存在明显畸变。

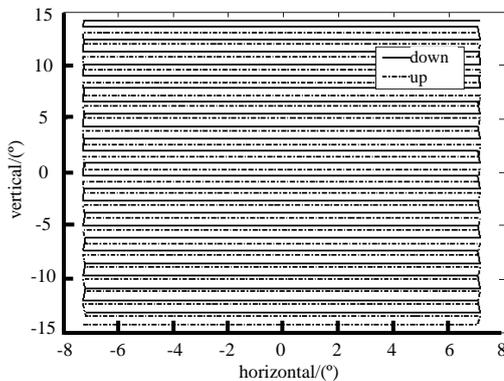


Fig.5 Actual scanning FOV
图 5 实际扫描视场轨迹图



Fig.6 Passive terahertz 2-D scanning imaging
图 6 被动太赫兹二维扫描成像图

4 结论

本文针对被动太赫兹大视场成像的应用需求,对45°镜扫描成像的工作原理、扫描方式进行了详细分析,计算了扫描轨迹,并通过成像实验对扫描方案进行了验证,得到了大视场下的被动太赫兹二维扫描图像,实验表明采用45°镜进行被动太赫兹二维扫描成像不存在明显畸变,具有一定的实际应用价值。

参考文献:

- [1] 许景周,张希成. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京:北京大学出版社,2007. (XU Jing-zhou,ZHANG Xi-cheng. Terahertz Science and Application[M]. Beijing:Peking University Press, 2007.)
- [2] Lee Yun-Shik. Principles of Terahertz Science and Technology[M]. New York:Springer Science+Business Media, 2009.
- [3] May T,Zieger G,Anders S,et al. Passive stand-off Terahertz imaging with 1 Hertz frame rate[C]// Proceedings of SPIE,Terahertz for Military and Security Applications VI,69490C, 2008. <http://dx.doi.org/10.1117/12.777952>.
- [4] 张幼文. 红外光学工程[M]. 上海:上海科学技术出版社,1982. (ZHANG You-wen. Infrared Optical Engineering[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1982.)
- [5] 惠彬,裴云天. 二维扫描镜轴系非正交分析[J]. 光学仪器, 2004,26(6):38-41. (HUI Bin,PEI Yun-tian. Analysis of the shaft unorthogonality of the scanning mirror[J]. Optical Instruments, 2004,26(6):38-41.)
- [6] 连铜淑. 反射棱镜共轭理论[M]. 北京:北京理工大学出版社,1988. (LIAN Tong-shu. Conjugate Theory of Reflecting Prism[M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press, 1988.)
- [7] 刘银年. 45°镜多元探测器并扫成像特性和扫描轨迹分析[J]. 光学精密工程, 2002,10(1):110-115. (LIU Yin-nian. Analysis of the imaging characteristics and scanning traces of the 45° rotating scanning mirror[J]. Optics and Precision Engineering, 2002,10(1):110-115.)

作者简介:



谢 巍(1984-),男,长沙市人,博士,主要研究方向为太赫兹成像探测、像质评价.email: xawit@163.com.

侯丽伟(1984-),女,福建省南安市人,博士,主要研究方向为太赫兹成像探测、图像处理等。

潘 鸣(1958-),男,河南省新乡市人,博士,研究员,主要研究方向为太赫兹应用总体技术、光电遥感技术等。