

文章编号: 1001-9014(2007)06-0461-04

基于交流辐射计的被动毫米波成像研究

张光锋, 李兴国, 娄国伟

(南京理工大学 毫米波光波近感技术研究所, 江苏 南京 210094)

摘要: 不同于传统的直流辐射计成像, 在国内首次将结构简单的交流辐射计用于毫米波被动成像. 在讨论交流辐射计的特殊结构与能量频谱基础上, 分析了交流辐射计成像解读与补偿机制, 针对不同的应用背景如安全检查进行了大量的室外室内成像实验. 3mm 波段交流辐射计成像的结果表明: 交流辐射计成像具有自己的特色, 可获得类似直流成像的效果, 并且易于集成实现焦平面阵列成像.

关键词: 交流辐射计; 灵敏度; 被动成像; 天线温度对比度; 安全检查

中图分类号: TP75 **文献标识码:** A

RESEARCH ON PASSIVE MMW IMAGING BASED ON AN ALTERNATING CURRENT RADIOMETER

ZHANG Guang-Feng, LI Xing-Guo, LOU Guo-Wei

(Institute of Near-Sensing Technology with MMW and Optical Wave of Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Unlike the traditional direct current millimeter-wave radiometric imaging, an alternating current radiometer was first presented for the passive millimeter-wave imaging with simple and integrated structure in China. On basis of discussing the special structure and energy spectrum, the energy compensation mechanism and image description of an alternating current radiometric imaging were also analyzed. Lots of indoor and outdoor experiments were carried out for the different application such as safety inspection. The imaging results of 3mm band alternating current radiometer show that the alternating current radiometric image possesses its own characteristic different from the direct current radiometer. The alternating current radiometer is easy to realize passive millimeter-wave multi-channels focal plane imaging.

Key words: alternating current radiometer; sensitivity; passive imaging; antenna temperature contrast; safety inspection

引言

毫米波被动成像在军事、安检、反恐和环境监控等领域具有广泛的应用前景^[1]. 不同于传统的狄克直流辐射计成像, 交流成像辐射计通过选通低放隔去机内的直流分量, 利用交流分量来获得目标的信息. 它避开了机内的直流噪声, 省去了匹配负载和毫米波开关及复杂的同步检波电路, 具有更简单的电路结构, 并具有更短的积分时间, 以及更低的成本和测试系统^[2]. 3mm 波段交流辐射计用于被动成像在国内尚属首次, 在国外也鲜见于报道. 与先前的研究相比^[3], 交流辐射计成像具有自己的特色和易于实现大规模的焦平面阵列成像^[4].

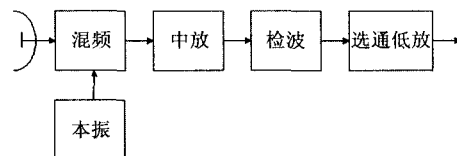


图 1 毫米波交流成像辐射计
Fig. 1 MMW alternating current imaging radiometer

1 交流辐射计

检波后的输出信号中含有直流分量和交流分量^[5]

$$V(t) = V_{DC} + V_{AC}(t) \quad (1)$$

如图 1 所示, 交流辐射计通过选频器后进行低

收稿日期: 2006-12-01, 修回日期: 2007-05-09

基金项目: 中国博士后科学基金(2005038579)资助项目

作者简介: 张光锋(1975-), 男, 河北石家庄人, 博士后, 主要从事毫米波目标特性及主被动成像研究.

Received date: 2006-12-01, revised date: 2007-05-09

频放大. 利用选频电路确定频率上限 f_H 和下限 f_L 后进行低频放大. 由于机内噪声和增益波动时统计独立的, 因此交流辐射计的灵敏度为

$$\Delta T_{\min} = (T_s + T_m) \left[\frac{1}{B\tau} + \left(\frac{\Delta G}{G} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

交流辐射计的积分时间通常为 $1 \sim 5\text{ms}$, 所以当

$$\frac{\Delta G}{G} < 10^{-4} \text{ 时, } \left(\frac{\Delta G}{G} \right) \ll \frac{1}{B\tau} \text{ 因此等式(2)可以改写为}$$

$$\Delta T_{\min} = (T_s + T_m) / \sqrt{B\tau} \quad (3)$$

这里 T_s, T_m 是天线和噪声温度, B, τ 是接收机带宽和积分时间.

2 交流辐射计成像基础理论

2.1 成像参数

根据奈奎斯特采样定理, 为了将天线接收到的信息完全恢复出来, 具有所示天线方向图的辐射成像系统的采样速率应分别满足

$$f_s \geq \frac{2}{\theta_{3dB}} \quad (4)$$

其中半功率波束宽度表示为

$$\theta_{3dB} = k \frac{\lambda}{D} \quad (5)$$

式中 D 为天线的口径, 采样间隔

$$\theta_s \leq \frac{1}{2} \theta_{3dB} \quad (6)$$

即一个波束内采样点数必须大于 2 个, 才能将波束内亮温分布信号特征完全采集到.

毫米波辐射计的空间分辨率可以表示为

$$\Delta l = k \frac{\lambda}{D} H \quad (7)$$

其中, H 为辐射计对目标的距离.

每秒内波束扫过的分辨单元数定义为辐射计采集数据的数据率, 则有

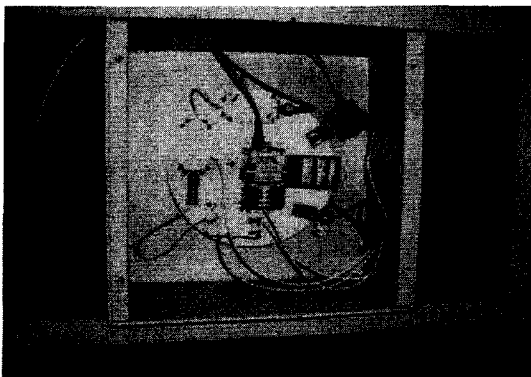


图2 3mm 波段成像交流辐射计
Fig.2 3mm band imaging AC radiometer hardware

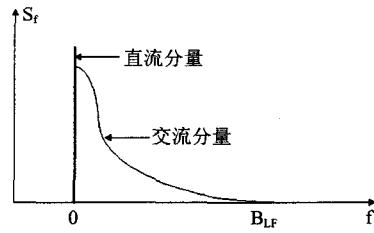


图3 检波后的直流和交流分量
Fig.3 AC and DC component after detection

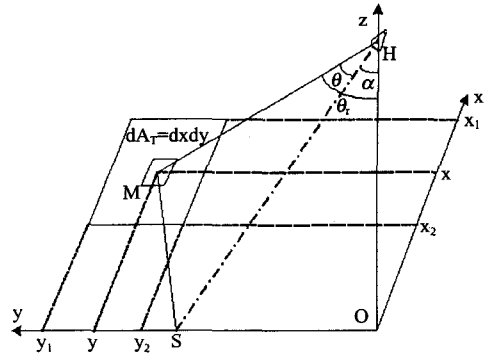


图4 面目标在辐射测量中的几何关系
Fig.4 Geometrical relation of plane target radiation measure

$$N = \frac{1}{\tau} \quad (8)$$

由式(3), 可得

$$N = B \left(\frac{\Delta T_{\min}}{(T_s + T_m)} \right)^2 \quad (9)$$

2.2 能量谱分析

对于一般天文、遥感辐射计来说, 检波输出为一固定直流电压, 根据电压高低来测试环境及目标的温度. 对于交流扫描辐射计检测目标时, 检波输出通常为一种钟形脉冲. 由图3可见, 低通滤波器的频带下限越接近直流, 所获得的能量越多. 对于圆锥扫描成像, 低通滤波器频带上限为^[6]

$$f_H = b\Omega H \text{tg}\alpha \sqrt{2\pi \ln 2} \quad (10)$$

由上式可知, 频谱上限频率与波形系数 b 、高度 H 、扫描角速度 Ω 及倾斜角 α 均有关. 低通滤波器的等效积分时间(对 RC 滤波器)为

$$\tau = \frac{1}{2f_H} = \frac{1}{2b\Omega H \text{tg}\alpha \sqrt{2\pi \ln 2}} \quad (11)$$

设计低通滤波器时, 应根据天线温度波形的计算, 对温度波形进行波形逼近, 用某一函数表示检波输出波形, 再根据频谱分析, 求出低通滤波器的频谱分布及频率上限和下限.

2.3 交流辐射计成像基础

如图4所示, 设地面背景上有一块平面目标, 面

积为 A_T , 天线观测角为 α , 高度为 H , 天线的中心线为 HS , 被测目标 A_T 不在天线波束中心, 目标上任何一个元面积 dA_T 与天线的连线为 HM , 且与天线波束中心的夹角为 θ . 假定天线旁瓣可忽略, 并设天线的主波束立体角为 Ω_M , 目标对天线的立体角为 Ω_T , 则目标天线温度 T_{A1} 为^[7]

$$\begin{aligned} T_{A1}(\alpha) &= \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega_T} T_{APT}(\theta, \phi) G(\theta, \phi) d\Omega \\ &\approx \frac{1}{\Omega_T} \int_{\Omega_M} T_{APT}(\theta, \phi) G(\theta, \phi) d\Omega \\ &= \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega_T} T_{APB}(\theta, \phi) G(\theta, \phi) d\Omega \\ &\quad + \frac{1}{\Omega_T} \int_{\Omega_M - \Omega_T} T_{APB}(\theta, \phi) G(\theta, \phi) d\Omega, \quad (12) \end{aligned}$$

其中, $T_{APT}(\theta, \phi)$ $T_{APB}(\theta, \phi)$ 分别为目标与背景的视在温度, $G(\theta, \phi)$ 为天线增益. 如果背景上没有目标 A_T , 则天线温度 T_{A2} 为

$$\begin{aligned} T_{A2}(\alpha) &= \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} T_{APT}(\theta, \phi) G(\theta, \phi) d\Omega \\ &\approx \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega_M} T_{APT}(\theta, \phi) G(\theta, \phi) d\Omega \\ &= \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} T_{APB}(\theta, \phi) G(\theta, \phi) d\Omega \\ &\quad + \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega_M - \Omega_T} T_{APB}(\theta, \phi) G(\theta, \phi) d\Omega, \quad (13) \end{aligned}$$

由式(12)和式(13)得天线温度对比度为

$$\begin{aligned} \Delta T_A(\alpha) &= T_{A1}(\alpha) - T_{A2}(\alpha) \\ &= \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega_T} [T_{APT}(\theta, \phi) - T_{APB}(\theta, \phi)] G(\theta, \phi) d\Omega. \quad (14) \end{aligned}$$

对于旋转对称波束, $G(\theta, \phi) = G(\theta)$, 如果 Ω_T 很小, 通常观测高度 H 很大, H 很小的假设是合理的. 则 $T_{APT}(\theta, \phi) \approx T_{APT}(\theta_T)$, $T_{APB}(\theta, \phi) \approx T_{APB}(\theta_T)$ 均可看作常数, θ_T 为 HM 与地面垂线的夹角, 故有

$$\Delta T_A(\alpha) = \frac{1}{4\pi} [T_{APT}(\theta_T) - T_{APB}(\theta_T)] \int_{\Omega_T} G(\theta, \phi) d\Omega. \quad (15)$$

对不同天线选用不同的 b 值作为 $G(\theta) = G_0 e^{-b\theta^2}$ 的近似表达式, 根据图 4 给出的几何关系, 可得

$$\begin{aligned} \Delta T_A(\alpha) &= \frac{\Delta T_{AP}(\alpha) G_0 H}{4\pi} \\ &\quad \times \int_{x_1}^x \int_{y_1}^y \frac{\exp\left\{-b\left[\arccos\frac{H\cos\alpha + y\sin\alpha}{(H^2 + x^2 + y^2)^{1/2}}\right]^2\right\}}{(H^2 + x^2 + y^2)^{3/2}} dx dy. \quad (16) \end{aligned}$$

对于交流辐射计而言, 天线温度对比度(有能量损失)经天线接收进来之后, 经混频、中放、平方律检波、选通低放后, 将功率转化为电压的形式, 再利用不同的电压门限进行灰度-伪彩色成像.

当交流辐射计观测扫描一理想点辐射源时, 图像信号输出为天线方向图的形状; 当观测扫描小于波束的目标时, 输出信号与天线方向图相比, 宽度展宽^[7]; 当观测水陆分界面等呈阶跃变化的不同目标时, 输出信号呈现类似于天线方向图的变化^[8], 在波束全部进入同一目标后信号电压幅度近似相等(接近零电平, 与直流不同). 根据交流辐射计电压信号所成的二维图像可以反映目标的位置关系, 而且交流辐射图像中可以根据电压极值大小进行能量补偿, 利用确定的边界以探测不同的目标.

3 成像试验与结果分析

针对不同应用背景, 我们分别进行了室外和室内扫描(见文献[3])成像实验. 交流辐射计成像需要综合考虑扫描速度、灵敏度、积分时间与采样间隔的相互关系^[8], 主要成像参数如下: 中心工作频率 92GHz, 垂直极化, 扫描速度 $60^\circ/\text{s}$, 积分时间 5ms, 每点的空间采样间隔 0.19° , 波束宽度 0.5° .

① 金属目标成像

我们选择了水泥砖背景的金属目标进行成像实验. 对于金属目标, 它毫米波段的发射率近似为零, 通常只认为它反射天空及周围地物辐射的温度. 如图 5(a) 为铜板的光学照片, 图 5(b) 为相应的 3mm 波段的交流辐射计图像, 铜板两端有一定的弧度, 在交流辐射图像中能清晰的反映出来. 但图像的弧度边缘不够平滑, 这与辐射计扫描方式以及辐射计稳

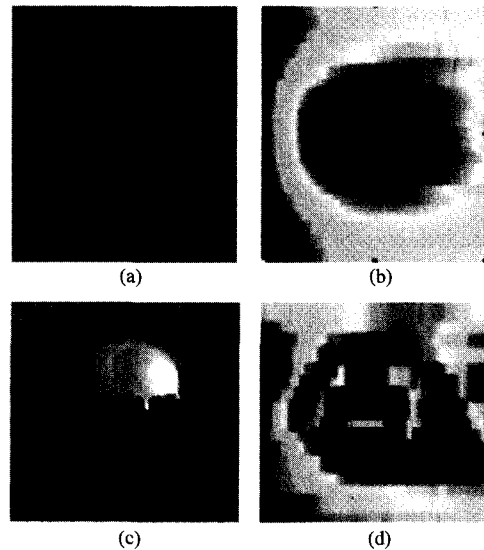


图 5 金属目标成像 (a) 铜板 (b) 铜板的辐射图像 (c) 钢球 (d) 钢球的辐射图像

Fig. 5 Imaging of metal targets (a) copperplate (b) radiometric image of copperplate (c) steel ball (d) radiometric image of steel ball

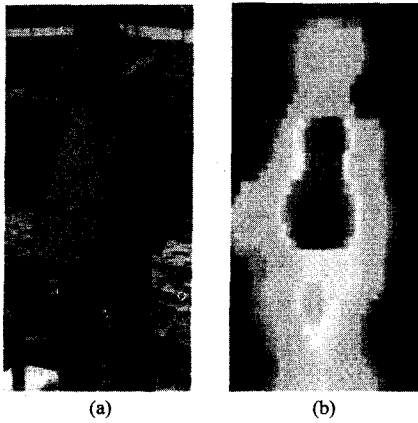


图6 室外实验(a)场景(b)3mm交流辐射图像
Fig.6 Outdoor experiments (a) scene (b)3mm AC radiometric image

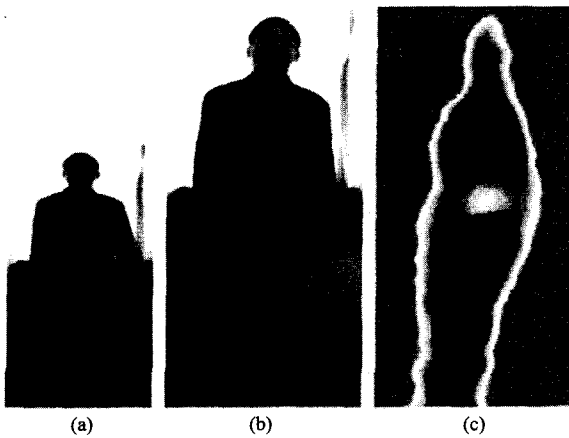


图7 室内实验(a)藏匿铝盘(b)3mm交流辐射图像
Fig.7 Indoor experiments (a) scene (b)3mm AC radiometric image

定性及灵敏度有一定的关系.图5(c)为钢球的光学照片,图5(d)为相应的交流辐射计图像,钢球的辐射图像中的轮廓清晰可辨,但由于积分时间稍长有一些拖尾现象.另外球面上的亮温不同是因为球面反射不同角度的周围地物及天空辐射的缘故.

② 人与金属目标室外实验

在室外成像实验中,图6(a)光学照片中的金属板与人成 30° 的角度,所成的3mm波段交流辐射计图像如图6(b)所示,金属板上部和下部反射天空温度具有显现的特征,由于倾斜角度与反射的缘故,金属板的上部较小,下部较大,具有“近大远小”(上窄下宽)的特征;另外,被测人员的身体形体特征明显,与金属板的温度差别显著,并且与周围景物的温度差别足够区分,成像效果较好.

③ 人与金属目标室内实验

室内成像实验如图7所示,光学场景图7(a)中的被测人员衣服内携带藏匿的金属圆盘,所成的3mm

波段交流辐射计的图像如图7(b)所示,由于人体和背景的发射率不同,再加上毫米波辐射计对衣物具有一定的穿透性能,因此能够检测出能探测出藏于衣物内尺寸较小的金属目标.由此可见交流辐射计具有较高的灵敏度,可满足反恐和安全检查的需要,能取得与国外直立式或外差式成像系统接近的效果.

4 结语

由于我国国内器件和技术的限制,再加上昂贵的价格成本,现阶段难于实现大规模的凝视式毫米波焦平面阵列成像.而研究基于交流辐射计的扫描式焦平面阵列成像,是当前折中价格成本和技术难度后的一种较为理想的选择方案.由于交流辐射计被动成像研究才刚刚开始,还存在许多急需解决的关键问题:(1)交流能量带的确定,由于低放上限决定积分时间,所以必须与采样间隔、扫描速度综合考虑;低频频率下限越接近直流,图像 $1/f$ 噪声越大,但是下限越低图像能量越高,需要折中考虑.(2)图像的解释与处理方法,由于交流辐射计图像具有独特的交流能量谱,需要对图像的解释与处理方法进行深入的研究.

REFERENCES

- [1] Larry Yujiri, Merit Shoucri, Philip Moffa. Passive millimeter-wave imaging[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2003, 39—50.
- [2] LOU Guo-Wei, LI Xing-Guo. Research on the 3mm Band Alternating current radiometer[J]. *Journal of Microwave* (娄国伟, 李兴国. 三毫米波段交流辐射计研究. *微波学报*), 2000, 16(3): 295—298.
- [3] ZHANG Guang-Feng, ZHANG Zu-Yin, GUO Wei. Research on 3mm band radiometric imaging[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张光锋, 张祖荫, 郭伟. 3mm波段辐射成像研究. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(6): 422—426.
- [4] WANG Hua-Li, LI Xing-Guo, PENG Shu-Sheng, et al. Passive millimeter-wave imaging technologies[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王华力, 李兴国, 彭树生, 等. 被动毫米波成像技术. *红外与毫米波学报*), 1997, 16(4): 297—302.
- [5] Ulaby F T, Morre R K, Fung A K. *Microwave Remote Sensing*[M]. New York: Addison-Wesley Publishing Company, 1981, 1.
- [6] LI Xing-Guo. *Millimeter Wave Near Sensing Technique and Application*[M]. Beijing: National Defense Industry Publishing house (李兴国. 毫米波近感技术及应用. 国防科技出版社), 1991.
- [7] LI Jun-Ming, ZHANG Zu-Yin, GUO Wei. Comparison of 3mm and 8 mm waveband passive detection[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (李俊明, 张祖荫, 郭伟. 3mm与8mm波段无源探测特性的比较. *红外与毫米波学报*), 2006, 25(5): 389—392.
- [8] ZHANG Guang-Feng, ZHANG Zu-Yin, GUO Wei. Experimental research on optimal mmw radiometric images[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter waves*, 2003, 24(12): 2173—2180.