

文章编号:1001-9014(2005)06-0422-05

3mm 波段辐射成像研究

张光锋¹, 张祖荫², 郭伟²

(1. 南京理工大学毫米波光波近感技术研究所, 江苏南京 210094;

2. 华中科技大学电子与信息工程系, 湖北武汉 430074)

摘要:在研制3mm Dicke辐射计的基础上,设计出基于PC-MCU主从控制模式的成像系统.针对运动平台成像系统提高灵敏度与空间分辨率的矛盾,采用软积分调节系统的积分时间,给出了软硬积分级联系统的积分公式,并采用了一种复合形态滤波器改善辐射图像分辨率的方法.实验结果表明:3mm辐射图像明显优于8mm辐射图像的空间分辨率,形态学的处理方法可有效地去除图像的噪声,验证了软积分在一定程度上可替代硬积分的功能.3mm Dicke辐射计的指标为中心频率94GHz,灵敏度0.2K,线性度0.999,系统带宽2GHz,卡塞格伦天线3dB波束宽度为0.5°.

关键词:Dicke辐射计;辐射成像;灵敏度;积分时间;形态滤波

中图分类号:TP75 **文献标识码:**A

RESEARCH ON 3mm BAND RADIOMETRIC IMAGING

ZHANG Guang-Feng¹, ZHANG Zu-Yin², GUO Wei²

(1. Institute of MMW and Light Wave Near-sensing Technology,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Deptment of Electronics&Information Engineering,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract:On the basis of developing 3mm Dicke radiometer, a set of 3mm radiometric imaging system controlled by PC-MCU mode was presented. To solve the contradiction of sensitivity and spatial resolution for the motion platform imaging system, the software integrator was designed and the cascade system integration formula was derived. Furthermore a morphological composite filtering was used to improve the imaging resolution. The experimental results show that 3mm radiometric images spatial resolution is superior to 8mm images' and the processed image can wipe off noise effectively. In addition, it is verified that the software integrator can take place of the hard integrator in some degree. The radiometric parameters are given below: the center frequency 94GHz, the sensitivity 0.2K, the linearity 0.999, the system bandwidth 2GHz, the cassegrain antenna 3dB beam width 0.5°.

Key words:Dicke radiometer; radiometric imaging; sensitivity; integration time; morphological filtering

引言

毫米波辐射计具有全天时全天候的工作能力,可以提供红外、光学探测器不能提供的特殊信息,因而在遥感和军事上获得了广泛应用^[1].毫米波辐射成像就是利用毫米波辐射计来探测、接收被测目标、背景的电磁辐射,并把接收到的信号按比例用伪彩色图像直观地显示出来.近年来,随着毫米波器件及计算机技术的飞速发展,毫米波辐射成像技术取得了很大的进展,主要体现在:成像系统的中心工作频率越来越高;已从传统单孔径、机械扫描成像过渡到焦平面与

合成孔径阵列成像^[2];图像处理技术正向超分辨率及借助多源数据增强方向发展;应用范围越来越广.94GHz是毫米波波段的一个大气窗口频率,因而利用此频段的辐射计可以从外空进行有效的全球观测^[3].但是我国的毫米波辐射成像刚刚向3mm波段发展,与国外的先进技术差距较大.研制毫米波辐射成像系统的难点在于研制出高灵敏度低噪声的辐射计;解决提高空间分辨率与灵敏度之间的矛盾^[4],即解决波束驻留时间短的问题;阵列成像中天线阵列设计及信号、数据、图像的处理方法,等等^[5].

本文从毫米波辐射成像原理出发,探讨了3mm

波段辐射成像及提高成像分辨率的方法.

1 毫米波辐射成像原理

1.1 空间分辨率与采样间隔

毫米波辐射计成像的空间分辨率,是指能够分辨彼此相邻很近2个相同辐射体的能力.它提供区分物体的细节,从而确定其形状的能力.对于运动平台的毫米波辐射成像系统,待测地物的空间分布通过天线扫描速率可以变换为待测信号的时间分布,这种空间与时间的互换性,导致了天线功率方向图的空间频率低通滤波效应可以变换为待测信号的时间频率低通滤波效应.从这个角度看,天线的空间低通滤波和辐射计积分器的时间频率滤波对待测信号的高频分量的抑制是等效的.

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,采样速率 f_s 应满足

$$f_s \geq \frac{2D}{\lambda}, \quad (1)$$

式中, D 为天线口面尺寸, λ 为辐射计工作波长.系统的空间采样间隔 θ_s 应为

$$\theta_s = \frac{1}{f_s} \leq \frac{\lambda}{2D}, \quad (2)$$

因为天线3dB波束宽度 $\theta_{3dB} \approx \frac{\lambda}{D}$,所以

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

由式(3)可知,一个波束内采样点数必须大于2个,才能将空间频率 $f \leq D/\lambda$ 的亮温分布的信号特征完全采集到,而从离散数据中恢复的亮温分布的天线最高空间分辨率为1倍天线半功率波束宽度.当空间分辨率为1.1倍天线半功率波束宽度时,采样间隔应为0.4倍的驻留时间.

1.2 毫米波辐射成像系的灵敏度与积分时间

毫米波辐射计的温度分辨率是指检测物体最小温差的能力,能检测的温差越小,意味着温度分辨率越高,它的优劣主要由接收机性能所决定.温度分辨率即是辐射计的灵敏度,可以简写为

$$\Delta T_{\min} = \frac{CT_{\text{SYS}}}{\sqrt{B\tau}}. \quad (4)$$

对于Dicke辐射计 $C=2$, $T_{\text{SYS}}=T_A+T_R$ 为系统噪声温度, T_A 为天线噪声温度, T_R 为接收机系统噪声温度, B 为接收机检波带宽, τ 为积分时间^[6].从式(4)可以看出,辐射计要具有高灵敏度,必须要求接收机具有低噪声温度、大带宽和长积分时间.在这里,减小 T_R 是绝对有利的,而增大带宽和积分时间

则要与其它指标综合考虑.辐射计带宽主要由中放级确定,一般在几十到几百兆赫兹,过大的带宽和低噪声是矛盾的.积分时间的选取也取决于应用的要求,要和灵敏度、扫描速度作适当的配合.如果积分时间太短,会使噪声增加,灵敏度下降,引起目标边缘模糊;如果积分时间太长,虽然灵敏度很高,但如果超过了相邻两点的采样间隔时间,则图像模糊、边缘加宽,产生“拖尾”现象.

2 成像系统

如图1所示,3mm辐射成像系统采用了灵敏度较高的Dicke辐射计,采用了计算机-单片机主从控制模式,选择合适的扫描方式,设计了可以灵活调节积分时间的软积分器.成像系统的结构及各组成部分叙述如下

(1) 辐射计接收机:如图2所示,采用了3mm同步检波Dicke辐射计.主要性能指标为中心工作频率94GHz,狄克开关频率495Hz,系统带宽93~95GHz,前端噪声系数<1.5dB,线性度0.999,混频器单边带损耗<7dB,灵敏度0.2K(1s),积分时间可调,定标方程 $T_A = aV_A + b$,其中 $a = -88.19$ (K/V), $b = 305.26$ (K).

(2) 天线:采用直径为360mm卡赛格伦天线,可以兼容3&8mm辐射计进行成像.3mm卡赛格伦天线的3dB波束宽度为 0.5° ,8mm卡赛格伦天线的

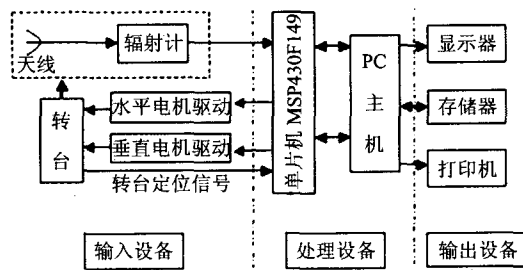


图1 3mm 波段辐射成像系统
Fig.1 3mm band radiometric imaging system

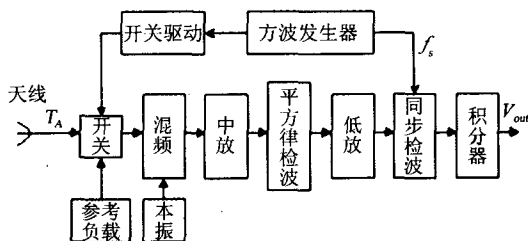


图2 94GHz Dicke 辐射计
Fig.2 94GHz Dicke radiometer

3dB 波束宽度为 1.5°, 系统工作于机械圆锥扫描, 可预设一定角度范围控制转台旋转天线成像。

(3) 扫描驱动设备: 系统采用主从式计算机-单片机进行工作, 其中主机采用 IBM-PC 计算机进行人机交互以及实时成像, 从机采用 TI 公司的新型 16 位 MSP430 单片机进行步进电机的智能控制以及高速数据采集, 主从机之间采用 RS-232 串行通讯端口进行通信。成像时, 先由 PC 机送出命令参数, 再由单片机根据命令发出相应的控制信号通过驱动放大电路进入电机, 分别或者同时控制两台电机的转向与转速, 使得辐射计天线进行自动扫描, 同时辐射计将接收到的信号进行积分后输入到 MSP430 单片机特有的 12 位 A/D 转换器模拟信号输入通道, 进行 12 位的 A/D 转换, 然后由单片机通过串口发送程序送入主机存储并实时显示相应的伪彩色图像。

(4) 扫描方式: 在二维机械扫描过程中, 根据采样方式的不同, 通常可以采用以下五种扫描方式, 水平摆动, 纵向俯仰抬角度, 回程(不)扫描; 纵向摆动, 水平转动角度, 回程(不)扫描; 圆弧摆动, 适用于下视成像。

3 改善成像质量的方法

提高成像系统的灵敏度与空间分辨率是矛盾的; 毫米波辐射成像过程中由于内外噪声等各类随机因素的影响, 图像的分辨率很低。针对上述问题, 我们设计了可灵活调节的软硬积分级联系统, 并采用了一种复合形态滤波的去噪方法。

3.1 软硬积分级联系统

MSP430 单片机内有 12 位 A/D 转换模块, 可以将模拟信号转换成 12 位数据并存入转换存储寄存器, 具有高速、通用、控制方便的特点。单片机中的软件积分时间为 $\tau = N \times \Delta t$; 其中 N 为采样次数, Δt 为每采一次样所需的时间。 Δt 由采样保持时间和转换时间两部分组成

$$\begin{cases} \Delta t_{\text{sample}} = 4 \times SHT_x / f_{\text{ADC12CLK}} \\ \Delta t_{\text{convert}} = 13 / f_{\text{ADC12CLK}} \end{cases} \quad (5)$$

任意低通滤波器的等效理想积分时间可定义为

$$\tau = \frac{G_{LF}(0)}{2 \int_0^\infty G_{LF}(f) df} \quad (6)$$

辐射计末级通常采用 RC 积分电路的单位冲击响应为

$$h_{RC}(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \frac{1}{\tau_{RC}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{RC}}\right), & t \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

$\tau_{RC} = RC$ 为积分电路的积分时间, 功率转移函数为

$$G_{LF}(f) = |H_{RC}(f)|^2 = \frac{1}{1 + (2\pi\tau_{RC})^2 f^2} \quad (8)$$

将式(8)代入式(6)得 RC 积分器积分时间

$$\tau_H = 2\tau_{RC} = 2RC \quad (9)$$

对于采 N 点平均的软件数字积分器, 其输入输出离散时间信号满足

$$y(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(n-k) \quad (10)$$

求 z 变换后

$$H_N(Z) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} Z^{-k} \quad (11)$$

令 $Z = \exp(j2\pi ft_s)$, 则积分器的频率响应函数为

$$H_N(f) = \frac{1}{N} \cdot \frac{1 - \exp(-j2\pi f N t_s)}{1 - \exp(-j2\pi f t_s)} \quad (12)$$

功率传递函数为

$$G_N(f) = |H_N(f)|^2 = \frac{1 \sin^2(\pi f N t_s)}{N \sin^2(\pi f t_s)} \quad (13)$$

在 Nt_s 较小的时候, 式(13)可近似表示为

$$G_N(f) \approx \frac{\sin^2(\pi f \tau_N)}{(\pi f \tau_N)^2} = G_{\text{ideal}}(f) \quad (14)$$

故软积分时间可表示为

$$h_N = \begin{cases} \frac{1}{\tau_N}, & -\frac{\tau_N}{2} \leq t \leq \frac{\tau_N}{2} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (15)$$

由式(7)和式(15)可推出

$$\begin{aligned} h &= h_H \times h_N \\ &= \begin{cases} \frac{1}{\tau_N} \left[\exp\left(\frac{t-0.5\tau_N}{\tau_{RC}}\right) - \exp\left(\frac{t+0.5\tau_N}{\tau_{RC}}\right) \right], & t \geq 0.5\tau_N \\ 0, & t < -0.5\tau_N \\ \frac{1}{\tau_N} \left[\exp\left(\frac{t+0.5\tau_N}{\tau_{RC}}\right) \right], & -0.5\tau_N \leq t < 0.5\tau_N \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

根据帕塞伐能量定理

$$\begin{aligned} \int_0^\infty G_{LF}(f) df &= \frac{1}{2} \int_{-\infty}^\infty h_{LF}^2(t) dt \\ &= \frac{\tau_N \tau_{RC} [1 - \exp(-\tau_N/\tau_{RC})]}{2\tau^2 N} \end{aligned} \quad (17)$$

由式(6)和式(17), 得级联系统等效理想积分时间^[7]

$$\tau = \frac{\tau^2 N}{\tau_N - \tau_{RC} [1 - \exp(-\tau_N/\tau_{RC})]} \quad (18)$$

3.2 复合形态滤波的去噪方法

形态学是基于形状的操作,主要是图像膨胀与腐蚀. 设灰度图像为 F , 结构元素为 B , 则膨胀定义为

$$F \oplus B = \max \{ F(x-k, y-l) + B(k, l) \mid (k, l) \in D(B) \}. \quad (19)$$

腐蚀定义为

$$F \ominus B = \min \{ F(x+k, y+l) - G(k, l) \mid (k, l) \in D(B) \}. \quad (20)$$

任何一种复杂的形态变换都可以由上述两种基本运算通过并操作与补操作来表示. 开运算和闭运算可以表示为

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B, \quad (21)$$

$$A \cdot B = (A \oplus B) \ominus B. \quad (22)$$

开运算和闭运算具有递增、平移不变及等幂等性质,还具有低通及良好的边缘信息保护等特性[8]. 在毫米波辐射成像过程中,由于接收机、采样、环境等内外因素的干扰噪声很大,因此本文采用了一种复合形态滤波的去噪方法^[9]. 在形态滤波过程中,采用由小到大同一形状的结构元素进行开闭(或闭开)处理可以去除几乎全部的噪声,但是为了

保留更多的细节信息本文定义了4种形状,如图3所示. 设 $\{A_{i,j}\}$ 为结构元素的集合. $i=2,3,5$ 为结构元素的尺寸, $j=1,2,3,4$ 为结构元素的形状,采用下图的复合算法,权值 $\{a_1, a_2, a_3, a_4\}$ 是根据每一种形状的结构元素运算以后的图像与原图像的峰值信噪比 $PSNR_k (k=1,2,3,4)$ 的比率确定的.

$$R_{PSNR} = 20 \lg(G_{\max} / E_{MSRE}), \quad (23)$$

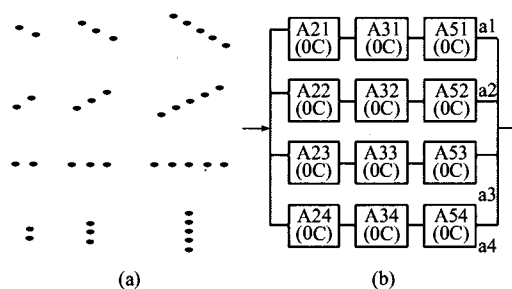


图3 复合形态滤波器
(a)定义的结构元素 (b)复合滤波器
Fig.3 The morphological composite filtering
(a) the defined structure elements (b) the composite filtering

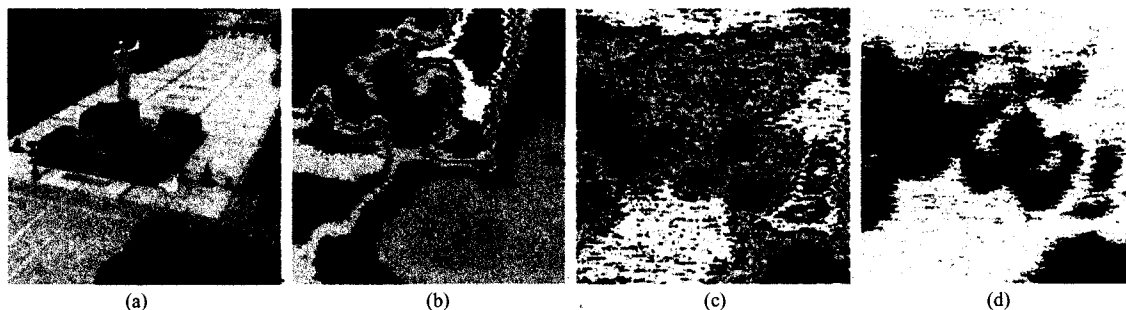


图4 3mm 和8mm 辐射成像实验
(a) 光学图像 (b) 8mm 辐射图像 (c) 3mm 辐射图像 (d) 处理后的3mm 辐射图像

Fig.4 3mm and 8mm imaging experiment

(a) the optical image (b) 8mm radiometric image (c) 3mm radiometric image (d) the processed 3mm radiometric image

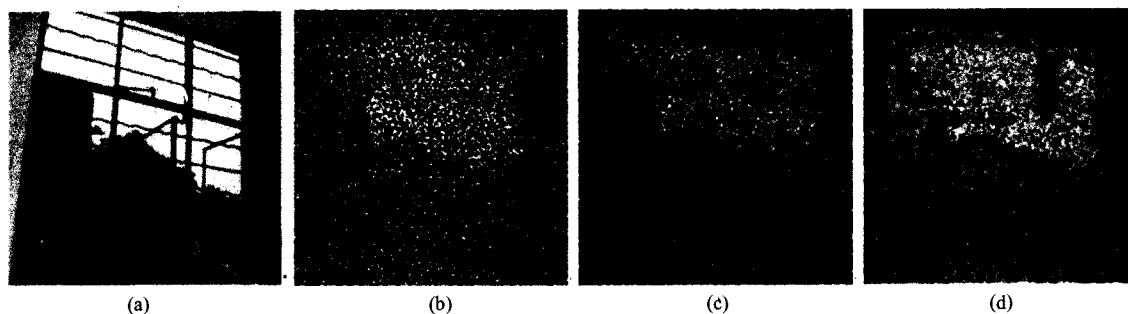


图5 3mm 成像软积分实验
(a)光学图像 (b)硬积分 3ms (c)系统积分 4.4ms (d)系统积分 14ms

Fig.5 3mm software integration experiments

(a) the optical image (b) the hard integration 3ms (c) the system integration 4.4ms (d) the system integration 14ms

$$E_{MSRE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I_A(i,j) - I'_A(i,j)]^2}{M \times N}} \quad (24)$$

4 成像实验与分析

如图4所示,(b)(c)是本文进行的3mm和8mm波段辐射成像实验结果,(a)(d)是作为对比的光学图像与复合形态滤波后的3mm图像,辐射成像主要参数如下:水平极化、扫描速度 $40^\circ/\text{s}$ 、每波束3点采样、3mm和8mm天线的3dB波束宽度分别为 0.5° 和 1.5° 、积分时间22ms,8mm辐射计的中心工作频率为35GHz.由于3mm卡赛格伦天线波束窄得多,因而理论上可以获得更高的空间分辨率;实际成像中,花坛右侧的几盆花的前后区域可以在(c)3mm辐射图像中清楚的反映出来,花坛及广场的细节特征明显,而(b)8mm辐射图像的细节特征不够明显,但图像的轮廓比较清晰噪声较小.图5为3mm波段辐射成像的软积分实验,(a)光学图像,(b)硬积分3ms的图像,(c)和(d)分别为加入软积分的图像,可以看出图像的空间分辨率得到了明显地改善,在满足单片机性能指标要求的情况下软积分可以实现与硬积分一样的积分效果.

5 结语

积分时间是影响毫米波辐射成像质量的重要参数,软积分能方便灵活的调节系统积分时间,可以部分替代硬积分的功能,易于实现运动平台成像系统灵敏度与空间分辨率的优化.本文采用复合形态滤波的方法,以PSNR作为分配权重的比率,可有效地去除噪声,提高毫米波辐射图像的空间分辨率.由于3mm波段辐射计的研制存在许多技术难点,还需要进一步地优化以获取更佳成像效果.

REFERENCES

- [1] ZHANG Guang-Feng, ZHANG Zu-Yin, GUO Wei. Experimental research on optimal millimeter wave radiometric images[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2003, 24(12):2173—2180.
- [2] WANG Hua-Li, LI Xing-Guo, PENG Shu-Sheng, et al. Passive millimeter-wave imaging techniques[J]. *Journal of Infrared and Millimeter 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.
- [3] Kern S, Kaleschke L, Clausi D A. A comparison of two 85-GHz SSM/I ice concentration algorithms with AVHRR and ERS-2 SAR imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(10): 2294—2306.
- [4] ZHONG Zhi-Hua, SHEN Hui, ZHANG Zu-Yin, et al. 3mm band IF-switch radiometer[J]. *Journal of Infrared and Millimeter waves* (钟志华,沈辉,张祖荫,等.3mm波段中频比较辐射计的研究. *红外与毫米波学报*), 2002, 21(4): 302—304.
- [5] Anterrieu E. A resolving matrix approach for synthetic aperture imaging radiometers[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(8): 1649—1656.
- [6] HUANG Quan-Liang, XIAO Zhi-Hui, ZHANG Zu-Yin, et al. Calibration system for MMW radiometer[J]. *Journal of Infrared and Millimeter waves* (黄全亮,肖志辉,张祖荫,等.毫米波辐射计定标系统. *红外与毫米波学报*), 2003, 22(2): 119—122.
- [7] LU Ying. Research on airborne microwave radiometric periodical calibration technology [D]. Ph. D. Dissertation of HUST (吕颖.星载微波辐射计周期定标技术的研究.华中科技大学博士学位论文), 1997.
- [8] WANG Zhi-Gang, WANG Wei, XU Xiao-Ming. Multi-resolution fuzzy edge detection based on pyramid structure[J]. *Journal of Infrared and Millimeter waves* (王志刚,王伟,许晓鸣.基于塔型结构的多分辨率模糊边缘检测. *红外与毫米波学报*), 2002, 21(4):304—309.
- [9] CHEN Hu, ZHOU Chao-Hui, WANG Shou-Zun. Research based on mathematics morphology image chirp method[J]. *Journal of Engineering Graphics* (陈虎,周朝辉,王守尊.基于数学形态学的去噪方法研究. *工程图学学报*), 2004, 2: 116—119.