

## 对微波辐射成像质量影响因素的分析

桂良启, 张祖荫, 郭 伟

(华中科技大学 图像识别与人工智能研究所 图像信息处理与  
智能控制教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:** 简述了微波辐射成像系统的工作原理。由于影响微波辐射成像质量的因素很多, 本文主要从理论上分析了微波辐射成像系统中辐射计的空间分辨率、灵敏度与系统采样时间间隔、天线扫描速度、积分时间的关系, 并进行了相关的实验。实验证明, 它们之间是相互制约、相互影响的, 在选择参数时要根据不同情况综合考虑, 才能得到理想的图像。

**关键词:** 空间分辨率; 灵敏度; 积分时间; 采样间隔

**中图分类号:** TP722.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)04-0432-05

## Analysis on the influence factors of microwave radiometric imaging quality

GUI Liang-qi, ZHANG Zu-yin, GUO Wei

(Key Laboratory of Education Ministry for Image Processing and Intelligent Control, Institute of Image Recognition and Artificial Intelligence, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The principles of the microwave radiometric imaging system are discussed. For there are many factors which influence microwave radiometric imaging quality, the relationships among the radiometer spatial resolution, the radiometer sensitivity, the sampling interval, the antenna scanning speed and the integration time are analyzed. Then some corresponding experiments are made to examine the influence of two main factors: the integration time and the sampling interval. And the result proves that these factors restrict and effect each other. When the parameters of microwave radiometric imaging system are chosen, different situation must be considered. Thus, perfect image can be obtained.

**Key words:** Spatial resolution; Sensitivity; Integration time; Sampling interval

收稿日期: 2003-09-21; 修订日期: 2003-11-15

作者简介: 桂良启(1974-), 男, 安徽安庆人, 博士, 主要从事微波辐射计研制和遥感信息与图像处理方面的研究。

## 0 引言

在微波辐射成像系统中,微波辐射计成像是通过天线主波束扫描待测目标实现的。通过天线的扫描,待测目标的亮温经天线方向图加权后,形成天线温度  $T_A$  输入辐射计接收机。辐射计输出的低频电压信号进入接口电路,进行 A/D 转换。由计算机完成输入信号的采样计算,由定标方程将其转变为目标亮温,再由扫描方位计算出其在地面上对应的波束足迹坐标,最后以伪彩色方式显示在显示器上。计算机通过接口电路同时完成对电机驱动器的控制,进而控制天线转台的转动。常用的微波辐射成像系统的组成框图如图 1 所示<sup>[1]</sup>。

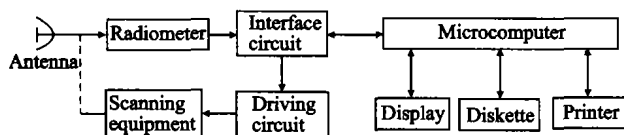


图 1 微波辐射成像系统

Fig. 1 Microwave radiometric imaging system

空间分辨率(或角分辨率)和辐射计灵敏度(或温度分辨率)是估价和比较成像辐射计的两个主要的技术参数。它们与系统的采样间隔、积分时间及天线的扫描速度一起决定了系统成像质量的好坏。只有它们很好地配合,才能获得高质量的辐射图像。

## 1 微波辐射成像系统的空间分辨率与采样间隔

微波辐射成像系统的空间分辨率是指能够分辨彼此相邻的两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。通常把它定义为相应天线半功率波束宽度的瞬时视场。

对于运动平台的微波辐射成像系统,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,使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<sup>[2]</sup>。

首先分析两个理想化的归一化天线功率方向图  $F_a(\theta)$  和  $F_b(\theta)$ , 实际的天线方向图一般在  $F_a(\theta)$  和  $F_b(\theta)$  之间<sup>[3]</sup>。设系统的扫描角速率为  $v, \theta = vt$ , 得  $F_a(\theta)$  和  $F_b(\theta)$  的时间关系函数  $F_a(t)$  和  $F_b(t)$  为:

$$F_a(t) = \left[ \frac{\sin\left(\frac{\pi D}{\lambda} vt\right)}{\frac{\pi D}{\lambda} vt} \right]^2 \quad (1)$$

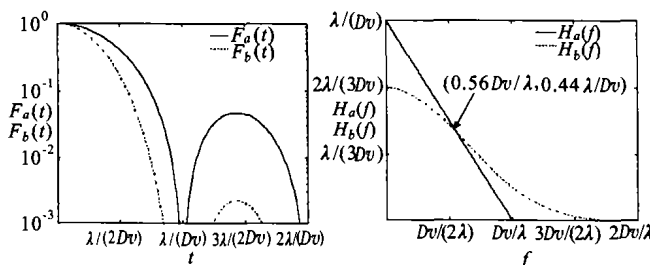
$$F_b(t) = \left[ \frac{\sin\left(\frac{\pi D}{\lambda} vt\right)}{\frac{\pi D}{\lambda} vt} \right]^4 \quad (2)$$

式中  $D$  为天线口面的尺寸;  $\lambda$  为辐射计的工作波长。对公式(1)、(2)进行傅里叶变换,即得天线方向图的频谱函数  $H_a(f)$  和  $H_b(f)$  为:

$$H_a(f) = \begin{cases} \frac{\lambda}{Dv} \left(1 - \frac{\lambda}{Dv} |f|\right) & |f| \leq \frac{Dv}{\lambda} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

$$H_b(f) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda}{Dv}\right)^4 |f|^3 - \left(\frac{\lambda}{Dv}\right)^3 f^2 + \frac{2}{3} \frac{\lambda}{Dv} & |f| \leq \frac{Dv}{\lambda} \\ -\frac{1}{6} \left(\frac{\lambda}{Dv}\right)^4 |f|^3 + \left(\frac{\lambda}{Dv}\right)^3 f^2 - 2 \left(\frac{\lambda}{Dv}\right)^2 |f| + \frac{4}{3} \frac{\lambda}{Dv} & \frac{Dv}{\lambda} \leq |f| \leq \frac{2Dv}{\lambda} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

由图 2(b)可知,具有曲线  $a, b$  所示方向图时域特性的天线的低通截止频率分别为  $Dv/\lambda$  和  $2Dv/\lambda$ 。根据奈奎斯特采样定理,为实现无失真采样,将天线接收到的信息完全恢复出来,具有上述天线方向图的辐射成像系统的采样速率应分别满足:



(a) 归一化功率方向图  $F(\theta)$  (b) 频谱函数  $F(f)$   
 (a) Antenna normalization power direction diagram  $F(\theta)$  (b) Frequency spectral function  $F(f)$

图 2 理想天线归一化功率方向图和频谱函数

Fig. 2 Diagram of ideal antenna normalization power direction and frequency spectral function

$$f_{\text{a}} \geq \frac{2Dv}{\lambda} \quad (5)$$

$$f_{\text{b}} \geq \frac{4Dv}{\lambda} \quad (6)$$

令公式(1)和(2)等于 0.5, 得出各自天线的半功率波束宽度的地面驻留时间为:

$$t_{\text{da}} = 0.9\lambda / (Dv) \quad (7)$$

$$t_{\text{db}} = 0.6\lambda / (Dv) \quad (8)$$

将公式(7)、(8)分别代入公式(5)、(6), 得出系统采样间隔与天线半功率波束宽度地面驻留时间的关系为:

$$t_{\text{sa}} \leq 0.6t_{\text{da}} \quad (9)$$

$$t_{\text{sb}} \leq 0.4t_{\text{db}} \quad (10)$$

所以, 对具有实际天线的微波辐射成像系统, 失真采样的时间间隔应是 0.4~0.6 倍的天线半功率波束地面驻留时间。从采样后输出的离散数据中恢复亮温分布的图像最高空间频率将是微波辐射成像系统的低通截止频率, 所以, 将天线的截止频率用 3 dB 波束宽度度量可知, 从离散采样数据中恢复的亮温分布图像的最高空间分辨率为 0.9~1.1 倍天线半功率波束宽度<sup>[1]</sup>。1994 年, 芬兰的 Kemppinen 对一台机载成像辐射计 AIR-93 的扫描成像过程进行了计算机模拟。通过数值计算, 得出当空间分辨率为 1.1 倍天线半功率波束宽度时, 采样间隔应为 0.4 倍的地面驻留时间<sup>[5]</sup>。

同时, 由于天线半功率波束宽度的地面驻留时间  $t_{\text{d}}$  与天线扫描速度  $v$  的关系为:  $t_{\text{d}} = \beta_{1/2} / v$ 。当天线的扫描速度  $v$  增大时,  $t_{\text{d}}$  会变小。若每波束的采样点数不变, 则系统的采样间隔变短。反之, 系统的采样间隔变长。要保持常用时间间隔不变, 可减少每波束的采用点数, 但这样又会漏掉很多信息, 从而影响图像的空间分辨率。故天线的扫描速度也应根据系统的采样间隔进行选择。

## 2 微波辐射成像系统的灵敏度与积分时间

微波辐射计的灵敏度(或温度分辨率)是指检测物体最小温差的能力, 能检测的温差愈小, 意味着温度分辨率越高, 它的优劣主要由接收机性能决定。可用公式简写为:

$$\Delta T_{\text{min}} = \frac{CT_{\text{sys}}}{\sqrt{B\tau}} \quad (11)$$

式中  $C$  为一个与辐射计型式有关的常数(如 Dicke 辐射计  $C=2$ );  $T_{\text{sys}} = T_{\text{R}} + T_{\text{A}}$ , 为系统的噪声温度,  $T_{\text{A}}$  为天线噪声温度,  $T_{\text{R}}$  为接收机的系统噪声温度;  $B$  为接收机检波带宽;  $\tau$  为积分时间。

由公式(11)可知, 要使系统的灵敏度愈高(即  $\Delta T_{\text{min}}$  愈小), 则要求系统的噪声温度  $T_{\text{sys}}$  愈低、带宽  $B$  愈大、积分时间  $\tau$  愈长愈好。但  $T_{\text{sys}}$  一般不可随意改变; 辐射计带宽主要由中放级确定, 过大的带宽与低噪声又是相互矛盾的, 通常为几十到几百兆赫, 因此只有增加积分时间  $\tau$ 。但是, 积分时间不可无限增大。在微波辐射成像系统中, 系统整体的转移函数是天线方向图与积分器的转移函数的乘积。通常要求输出目标信号的积分时间略小于系统的采样间隔, 以保证每一采样输出信号有充分的积分并跟得上目标场景亮度温度的变化, 不会恶化输出图像的空间分辨率。因此, 采样时间间隔不能太短。另一方面, 由公式(11)可知系统的积分时间愈短, 系统灵敏度愈低。二者是相互矛盾的。例如, 在实际应用中对采样方式的选择可考虑以下两种:

(1) 着眼点放在尽可能无失真地恢复原始亮温分布信号。辐射成像系统在一个天线半功率波束宽度地面驻留时间内至少采样两点<sup>[6]</sup>。

(2) 牺牲一部分目标亮温分布的高频信息, 以换取采样速率、较长的积分时间以及较高的辐射计灵敏度。如美国研制的 SMMR 中选用采样间隔时间等于天线波束下视足迹驻留时间的方式<sup>[7]</sup>。

## 3 实验验证

为了验证以上分析的各因素对微波辐射成像质量的影响以及各影响因素间的配合情况, 进行了如下实验。

实验采用自行研制的 8 mm 双通道机载微波辐射成像系统<sup>[8]</sup>。实验前进行了辐射计对天空和对室温黑体的两点定标, 其中天空温度由经验值确定。所得的双通道图像在显示时, 左边一幅为水平极化, 右边一幅为铅垂极化。

### 3.1 积分时间对图像质量的影响

所测场景为室内,所测对象是前方 1.5 m 处两扇打开的玻璃窗,系统采样范围为 120°。图 3(a)~(d)是天线的采样间隔时间  $t_s$  分别为 10、5、2、1 ms 时获得的图像。在成像过程中,每成像 10 行左右,转动辐射计底座面板上的积分时间旋钮,让其由 5 ms ~1 s 变化,使得每幅图像中积分时间由下至上分别为 5、10、50 ms 和 1 s。

由图 3(a)、(b)可见,  $t_s=10$  ms 和  $t_s=5$  ms 时积分较充分,获得的目标图像清晰;而图像(c)中  $t_s=2$  ms 时,开始出现噪声点,目标分界线模糊,应是积分不充分造成的;图像(d)因采样间隔时间更短,则噪声点杂乱,淹没了一些目标的边界信息。

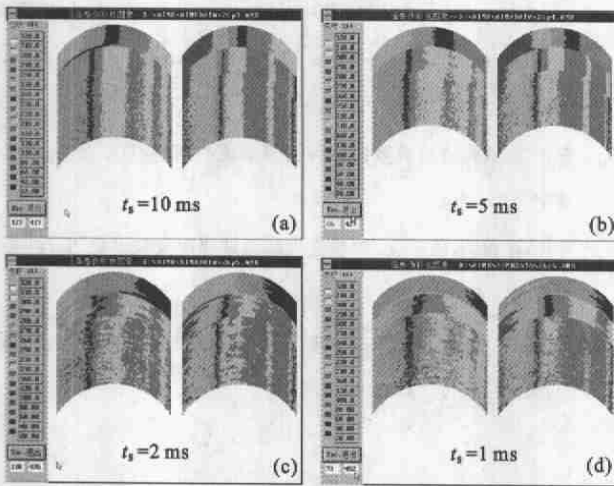


图 3 室内窗户的微波辐射图像

Fig. 3 Microwave radiometric images of indoor windows

图 3 的四幅图像同时反映了积分时间  $\tau$  和采样间隔  $t_s$  的关系:

(1)  $\tau=5$  ms 时,图像在横向扫描方向没有水平

位移,敞开的两扇窗户(棕色表示)之间的界限较清晰,说明信号积分较充分;

(2)  $\tau=10$  ms 时,图像清晰程度与  $\tau=5$  ms 时近似,水平方向与  $\tau=5$  ms 时对齐,没有水平偏移;

(3)  $\tau=50$  ms 时,图 3(a)的采样间隔  $t_s=10$  ms,与  $\tau$  是同一量级,对图像清晰度影响不大,图 3(b)、(c)、(d)的  $t_s/\tau$  的值分别为 0.1、0.04、0.02,采样时信号积分不充分,两扇窗之间浅灰的分界模糊,可看到的几段信号如浅绿、浅蓝、深灰的宽度被拉宽,相当于对图像进行了平滑作用,图像在水平方向滞后;

(4)  $\tau=1$  s 时,信号在横向扫描方向的滞后更加明显,移位约 15°,对图像的平滑作用更强。

因此,通过以上分析可知:积分时间 5 ms 以上信号积分比较充分;积分时间为采样间隔 10 倍以上时图像的横向扫描有水平滞后偏移,因而造成图像和观测场景之间有整体滞后。同时,从图中亦可看出,铅垂极化图像质量好于水平极化的图像质量<sup>[9]</sup>。

### 3.2 采样间隔对图像质量的影响

实验时天线高度为 3 m,被测对象为放置在一块胶合板上的两块铝板。两块铝板间隔  $L$  分别取天线波束足迹的椭圆的短半径  $R$  的 1 倍和 2 倍。 $L=R$  时,间隔的空间周期为一个波束宽度,即 3 dB 波束宽度; $L=2R$  时,间隔的空间周期为 2 个波束宽度。定义  $k_x$  为横向每采样一点前进的波束个数,  $k_y$  为每扫一行纵向前进的波束个数。为避免平台推行的方向歪斜而影响成像质量,成像时让高台静止不动,让人在前方 5 m 处用绳子拖动胶合板以预定速度向前移动。不同  $L$ 、 $k_x$ 、 $k_y$  时所获得的图像如图 4(a)、(b)、(c)所示。

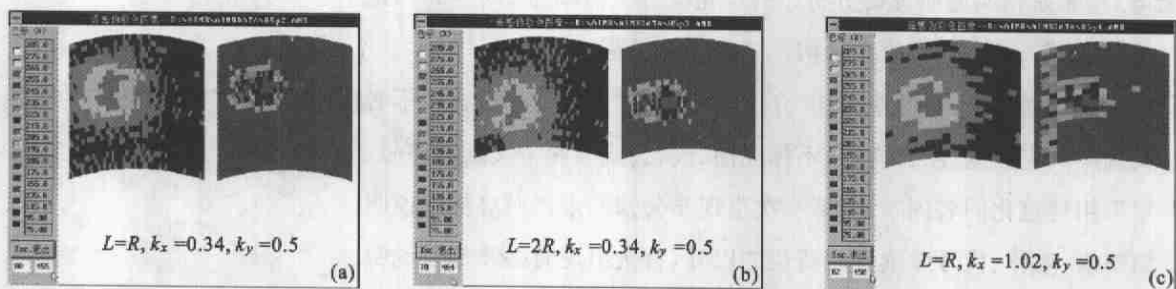


图 4 铝板的微波辐射图像

Fig. 4 Microwave radiometric images of aluminium plate

在图 4(a)、(b)中  $k_x = 0.34$ ,  $k_y = 0.5$ ,  $L$  分别为  $R$  和  $2R$ , 此时可清晰地分辨出铝板 1 和铝板 2。图 4(c)中  $k_x$  取 1.02 时, 两铝板之间的间隔已难以分辨。这就验证了前面的理论分析, 即一个波束内横向、纵向至少采样两点才可保证无失真采样。无失真采样的空间分辨率可达波束足迹半径的长度<sup>[10]</sup>。

#### 4 结 论

在微波辐射成像系统中, 采样的速率、积分时间和系统空间分辨率、灵敏度等因素之间是相互影响、相互制约的。在选择参数时要根据不同情况综合考虑。

#### 参考文献:

- [1] Wei Guo, Fu-tang Li, Zu-ying Zhang. On 8 mm microwave radiation imaging system[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1999, 20(6): 1129-1135.
- [2] Fawwaz T Ulaby, Richard K Moore, Adrian K Fung. Microwave Remote Sensing(1)[M]. New York: Addison-Wesley Publishing Company, 1982.
- [3] Skou N. On the sampling in imaging microwave radiometers [A]. Proc of IGARSS'88[C]. Netherland: ESA Pub, 1988. 17-18.
- [4] 吕颖. 星载微波辐射计周期定标技术的研究[D]. 武汉: 华中理工大学, 1997.
- [5] Kemppinen M U. Airborne imaging radiometer scan simulation [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1995, 33(3): 660-669.
- [6] Farrar M R, Smith E A. Spatial resolution enhancement of terrestrial features deconvolved SSM/I microwave brightness temperatures[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1992, 30(2): 349-355.
- [7] Swanson P N, Riley A L. The seasat scanning multichannel microwave radiometer (SMMR): radiometric calibration algorithm development and performance [J]. IEEE J Oceanic Eng, 1980, OE-5(2): 116-124.
- [8] 陈正文. 双通道机载微波辐射成像系统的研制[D]. 武汉: 华中理工大学, 1998.
- [9] 郭伟, 张祖荫, 陈正文. 双通道机载微波辐射成像系统[J]. 红外与激光工程, 2000, 29(2): 60-64.
- [10] 黄全亮, 张祖荫, 郭伟. 复杂场景微波辐射图像的模拟[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(1): 87-91.

### 《红外与激光工程》中文文摘编写要求

本刊中文文摘按 GB6447-86《文摘编写规则》编写, 编写文摘应注意:

1. 文摘应包含目的、方法、结果和结论四要素。目的是指主题范围; 方法是指所用的原理、工艺、材料、手段、装备等; 结果是指实验研究的分析、评价、建议等。篇幅为 200~300 字。
2. 结构严谨, 表达简明, 语义确切。一般不分段落。
3. 文摘一律用第三人称, 应采用“介绍了…”, “对…进行了研究”, 不必使用“本文”“作者”等作为主语。
4. 文摘应具有独立性、自含性, 不标注图、表、公式和参考文献的序号。
5. 要采用规范化的名词术语, 第一次出现非公知的术语时应标注说明。
6. 缩略语、略称、代号除读者能清楚的以外, 首次出现时必须加以说明。
7. 应采用国家颁布的法定计量单位。
8. 要注意正确使用简化字和标点符号。
9. 中文摘要前加“摘要”作为标识。