

# 地基毫米波辐射图像模拟生成方法的研究

黄全亮 张祖荫 郭伟

(华中科技大学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** 分析了照相机和地基毫米波辐射计的成像机理, 讨论了光学图像的分割和识别方法, 论述了地物表面温度亮温、视温、天线温度和天空温度之间的关系, 并在此基础上提出了一种用可见光图像模拟生成毫米波辐射图像的方法. 该方法用于制作地图匹配制导中的基准地图. 图像模拟的结果表明, 该方法完全可行.

**关键词** 光学图像, 毫米波辐射图像, 图像模拟, 图像处理.

## STUDY ON GRAND-BASED MILLIMETER WAVE RADIOMETRIC IMAGE SIMULATION

HUANG Quan-Liang ZHANG Zu-Yin GUO Wei

(Key Laboratory of State Education Ministry for Image Processing and Intelligent Control,  
HUST, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract** Imaging principles of a camera and a grand-based millimeter wave radiometer were analyzed. Segmentation and recognition methods of optical images were discussed. The temperature and brightness relations between the terrain surface and sky were discussed. The method of computing the antenna temperature of the terrain was given. Therefore a new technique to generate the grand-based millimeter wave radiometric images from visual optic images was presented. The technique was expected to be a useful tool to generate reference images of the matching navigation. Experimental results show that the technique is completely practicable.

**Key Words** optic image, millimeter wave radiometric image, image simulation, image processing.

### 引言

由于具有全天时、全气候的特点, 以及提供可见光、红外不能取得的信息的能力, 因而波辐射计在军事上得到了广泛的应用, 其中一个主要军事应用就是导弹的精确导航和制导. 地形匹配技术被广泛用于各种习行器的导航和制导中, 它利用地形特征进行自主式精确定位, 它的定位功能是通过实时图和基准图的比较来实现的. 为了快速反应, 必须根据所获得的数据尽可能简单地准备基准地图. 而在地图匹配制导技术研究方面, 与国外相比, 由于侦察手段的限制, 我国目前只能采用卫星光学图作参考图源. 如果直接用可见光图像作参考图像<sup>[1]</sup>, 会使两种图像间产生很大的差异, 采用常规的特征提取和匹配技术是非常困难的, 直接的相关匹配达不到定位的目的, 其所要求的巨大计算量也不利于工程化实现. 而另外一种既可能又可行的方法是利用卫星光学图像模拟生成毫米波辐射图像, 再用它作为基准地图

来提供匹配定位. 为了评估生成图像的质量, 要将生成的图像和实测的图像进行比较, 因此我们用照相机和地基毫米波辐射计作为获取同时同地的可见光图像和毫米波辐射图像的手段.

本文提出了一种基于照相机和地基毫米波辐射计成像机理的可见光图像模拟生成毫米波辐射图像的方法.

### 1 光学图像、毫米波辐射图像和景物之间的几何关系

如图 1 所示, 地基微波辐射计通过天线在方位和俯仰的二维扫描来成像,  $\theta_0$  为天线的 3db 波束宽度,  $\alpha$  为天线的俯仰角,  $\phi$  为天线的方位角, 则地面上任意两点  $Q_1(\alpha_1, \phi_1)$  和  $Q_2(\alpha_2, \phi_2)$  与天线中心  $O$  所成的夹角  $\theta$  为

$$\theta = \arccos(\cos\alpha_1 \cos\alpha_2 + \sin\alpha_1 \sin\alpha_2 \cos(\phi_1 - \phi_2)), \quad (1)$$

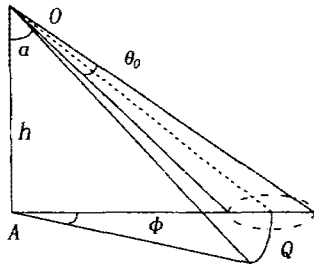


图1 地基毫米波辐射计成像原理  
Fig. 1 Principle of ground-based MMW radiometer imaging

常用的照相机模型是针孔模型,如图2所示.图中O为透镜中心,f为透镜的焦距, $\alpha_0$ 为透镜中心线与地垂线的夹角. $Q'(x,y)$ 为地面点Q在光学图像上的像点,r为 $Q'O$ 的距离, $\theta_1$ 为 $Q'O$ 与ED的夹角,而 $\beta$ 为横向观测角, $\gamma$ 为纵向观测角,它们之间有如下关系

$$\gamma = (x^2 + y^2 + f^2)^{1/2}, \cos\theta_1 = f/r, \quad (2)$$

$$\beta = \arctan(y/f), \gamma = \arctan(x \cos\beta / f), \quad (3)$$

设地面点Q在毫米波辐射图像上的像点为 $Q''(\alpha, \phi)$ ,则有

$$\alpha = \arccos(\cos(\alpha_0 + \beta) \cos\gamma), \quad (4)$$

$$\phi = \arctan(\tan\gamma / \sin(\alpha_0 + \beta)),$$

## 2 光学图像的侵害和识别

一幅自然背景的可见光图像往往包含层次丰富的背景信息,利用图像分割可以将图像分成一些有意义的区域,这些区域代表了不同的地物类别,如植被、草地、水、混凝土、碎石路、黄土、金属、天空等.彩色图像分割方法可分为以下几类:聚类方法、区域分裂、分裂—合并方法和基于物理的方法,而最常用的是聚类方法<sup>[2]</sup>.由于这些地物类别在可见光图像中

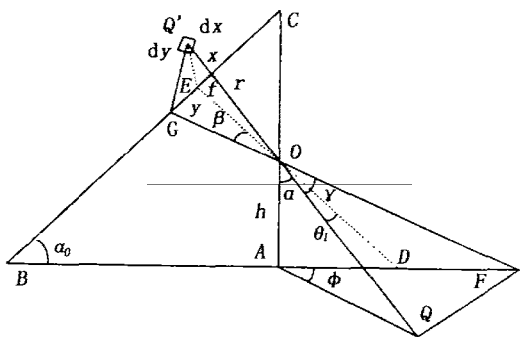


图2 照相机成像原理  
Fig. 2 Principle of camera imaging

具有不同颜色,文中采用了基于颜色特征的聚类分割.另外,由于分割后的区域类别的识别通常不易完全通过计算机自动实现,而对分割后的区域指定地物类别可以使微波辐射图像的模拟生成具有高可靠性和低失真性,加上它不是我们研究的重点,因而文中人工对分割后的区域指定了地物类别.

## 3 地物和天空亮温的计算

华中科技大学微波遥感研究室分别于1982和1994年期间在野外和微波辐射特性测试场内对7种典型地物目标及天空进行了大量的测试,并用如下的二元余弦多项式模型分别建立了这7种典型地物目标亮温 $T_B$ 与测量角度 $\alpha$ 及其表面温度 $T_S$ 关系的经验公式<sup>[3]</sup>

$$T_B(\alpha, T_S) = U(\alpha) \cdot A \cdot V(T_S), \quad (5)$$

其中 $U(\theta) = (1 \cos\alpha \cos^2\alpha \cos^3\alpha \cos^4\alpha)$ ,  $V(T_S) = (1 T_S T_S^2)^T$ ,系数矩阵A是 $5 \times 3$ 的矩阵.利用该二元余弦多项式模型即可计算出地物的亮度 $T_B(\alpha, T_S)$ .

计算晴朗天空的亮温 $T_{DN}$ 需要很多参数,其中一些参数是很难测得的.一些学者提出了简化的计算公式<sup>[4,5]</sup>.这些计算公式对标准大气完全一致,对非标准大气也基本一致.为计算方便,本文采用了文献[5]中的计算公式来计算晴朗天空的亮温 $T_{DN}$ ,具体公式如下

$$T_{DN}(\alpha) = T_m(1 - e^{-\tau \sec\alpha}), \quad (6)$$

式(6)中 $T_m = 1.12T_S - 50$ ,  $\tau = \ln(1 - T_0/T_m)$ ,  $T_0$ 为天顶温度.

## 4 地物视温的计算

地基辐射计的天线与被测目标之间的距离在几米到几十米之间,大气向上辐射的视在温度和大气对辐射的衰减作用均可忽略,故地物的视在 $T_{AP}$ 为<sup>[6]</sup>

$$T_{AP} = T_B + \Gamma T_{DN}, \quad (7)$$

式(7)中 $\Gamma$ 为地物表面的功率反向系数,而地物亮温与其表面物理温度之间有如下关系<sup>[6]</sup>

$$T_B = (1 - \Gamma) T_S, \quad (8)$$

由上两式有

$$T_{AP} = T_B + T_{DN}(1 - T_B/T_S) \quad (9)$$

这样由地物、天空的亮温与地物表面物理温度便可计算出地物的视在温度.而金属由于是良导体,本身不发射辐射,其视在温度就等于天空的亮温.

## 5 天线温度的计算

毫米波辐射计通常采用笔形波束的圆形天线,其主波束效率很高,旁瓣可以忽略,这时天线温度  $T_{AP}(\alpha, \phi)$  为波束范围  $M$  内视到温度  $T_{AP}(\theta, \varphi)$  按天线方向函数  $F_n(\theta, \varphi)$  加权积分的归一化值<sup>[6]</sup>,即

$$T_A(\alpha, \phi) = \frac{\iint_M T_{AP}(\theta, \varphi) F_n(\theta, \varphi) d\Omega}{\iint_M F_n(\theta, \varphi) d\Omega}, \quad (10)$$

假定天线口径场是均匀分布的,因为圆形天线的方向函数  $F_n(\theta, \varphi)$  沿  $\varphi$  对称,则有

$$F_n(\theta, \varphi) = F_n(\theta) = [\sin(\pi D\theta/\lambda)/(\pi D\theta/\lambda)]^2, \quad (11)$$

式(11)中  $D$  为天线口面尺寸,  $\lambda$  为辐射计波长.

如图 2 所示,胶片平面上无限小面元  $dx dy$  相对于  $O$  点所张的立体角为

$$d\Omega = \cos\theta_1/r^2 dx dy, \quad (12)$$

将式(12)代入式(10),并离散化有

$$T_A(\alpha, \phi) = \frac{\sum_N T_{AP}(x, y) F_n(\theta) \frac{\cos\theta_1}{r^2}}{\sum_N F_n(\theta) \frac{\cos\theta_1}{r^2}}, \quad (13)$$

式(13)中  $N$  为波束范围  $M$  在胶片平面上的对应区域,也即所有到天线主瓣轴  $(\alpha, \phi)$  的夹角  $\theta$  小于半个波束宽度  $0.5\theta_0$  的区域.

光学图像的空间分辨率比毫米波辐射图像的空间分辨率高得多,通常在一个毫米波天线的波束范围内对应有近百个光学图像像素,因此将离散化不会引入太大的误差.

## 6 毫米波辐射图像的生成

由于毫米波辐射计成像时,一般每波束采样 4

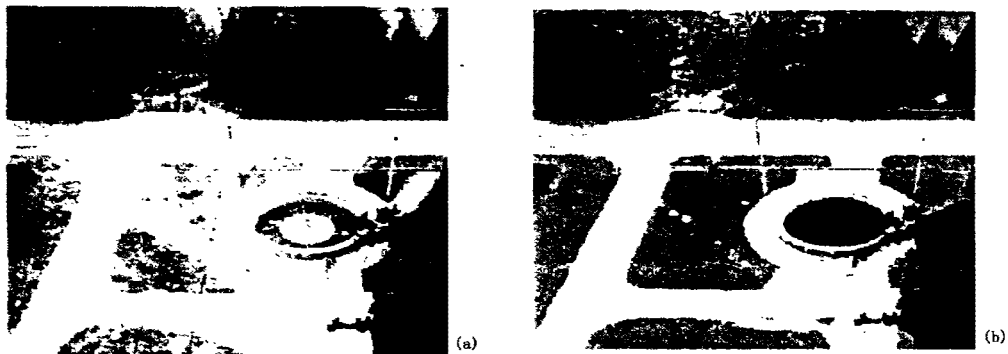


图 3 光学图片 (a) 及其分割后的图像 (b)  
Fig. 3 Optics image (a) and its segmented image (b)

个点,因此在模拟生成毫米波辐射图像时也只需以  $E$  点为中心在  $(\alpha, \phi)$  方向上每隔  $1/4$  个波束宽度计算一点天线温度值.

用可见光图像模拟生成毫米波辐射图像的步骤简述如下:

1. 对光学图像采用基于颜色特征  $I_1, I_2, I_3$  聚类分割,并对分割后的区域人工指定地物类别,并指定其表面温度;

2. 由式(3)和式(4)计算出光学图像上每一个像素  $(x, y)$  的  $(\alpha, \phi)$  值,并由式(5)计算其亮度温度  $T_B$ ,由式(6)计算出天空温度  $T_{DN}(\alpha)$ ,再由式(9)计算其视在温度  $T_{AP}$ ;

3. 用式(13)计算出以  $E$  点为中心在  $(\alpha, \phi)$  方向上每隔  $1/4$  个波束宽度计算一点天线温度值  $T_A(\alpha, \phi)$ ,式(13)中  $\theta$  用式(1)计算,  $\theta_1$  和  $r$  用式(2)计算,  $F_n(\theta)$  由式(11)计算.

## 7 结果与讨论

图 3 分别给出了以水池和水泥路为背景的光学图像及其分割后的图像,图 4 分别是其 8mm 波段水平和垂直极化毫米波辐射图像,图 5 是用文中方法对图 3 中的光学图像生成的 8mm 波段水平和垂直极化毫米波辐射图像.

成像用的 8mm 地基毫米波辐射计的 3db 波束宽度为  $1.5^\circ$ ,采样间隔为每波束 4 个点.成像的天气条件为:大气温度  $20^\circ\text{C}$ ,晴天,地面水蒸汽密度为  $7.5\text{g}/\text{m}^3$ ,大气压  $P_0 = 1013\text{mbar}$ .模拟成像采用了与实测成像相同的天气参数.为简化处理,模拟成像假定了地物温度与大气温度相同.

对比图 3, 4, 5,可以看出水池、水泥路、黄土路、金属桶和金属板在实测的图像和生成的图像上均有相同的表面,而且其形状、位置、大小也基本相同,但

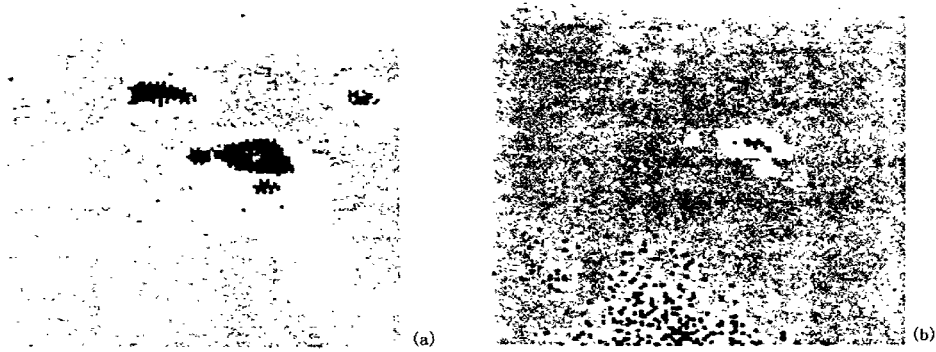


图4 实测的毫米波辐射图像 (a)垂直极化 (b)水平极化  
Fig. 4 Measured millimeter wave radiometric image (a) vertical polarization  
(b) horizontal polarization



图5 生成的毫米波辐射图像 (a)垂直极化 (b)水平极化  
Fig. 5 Generated millimeter wave radiometric image (a) vertical polarization  
(b) horizontal polarization

其边缘在模拟生成的毫米波辐射图像中更清晰,这是因为实测图像中有各种噪声,由于模拟生成毫米波辐射图像的目的是用其做地图匹配制导中的基准地图,这样反而更好.

图像模拟的结果表明,用该方法模拟生成的地基毫米波辐射图像是完全可行的.虽然文中给出的是地基波辐射图像模拟生成的方法,但很容易类推到空载及星载毫米波辐射图像模拟生成的方法.

## REFERENCES

- [1] ZHANG Jun, LIU Jian, CHEN Xue-Guang. Map-Matching Studies in Navigation of Matching Map Feature to SAR Images. *Modern Rad* (张俊,柳健,陈学广. 雷达地图匹配制导中匹配技术研究, *现代雷达*), 1998, 20(5): 44 — 47
- [2] SHI Jun-Sheng, YANG Wei-Ping, Bai Feng-Xiang, *et al.* Color Image segmentation and selection of color features.

*Journal of Yunnan Normal University* (石俊生,杨卫平,白凤翔,等. 彩色图像分割与颜色特征选择, *云南师范大学学报*), 1999, 19(6): 53 — 56

- [3] LI Qing-Xia, ZHANG Zhu-Ying, Guo Wei, *et al.* Experimental models of microwave radiometric characteristics for extended targets. *Journal of Remote Sensing* (李青侠,张祖荫,郭伟,等. 面目标微波辐射特性实验模型. *遥感学报*), 2000, 4(4): 256 — 260
- [4] CHEN Xiang-Dong, ZHANG Zhu-Ying. 8mm Microwave sky radiation temperature. *Journal Huazhong University of Science and Technology* (陈向东,张祖荫. 8毫米微波天空. *华中工学院学报*), 1985, 13(4): 105 — 110
- [5] Peake W H. The microwave radiometer as a remote sensing instrument. *Electro Science Laboratory, Ohio State Univ. Columbus, Tech. Rep.*, 1969, 13(1): 1903 — 1908
- [6] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. *Microwave Remote Sensing*, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1981, 1: 229