

实孔径雷达景象模拟研究*

王新赛 张天序 桑农

(华中理工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研究实验室,湖北,武汉,430074)

摘要 在考虑具有起伏高程地面的条件下,提出一种计算雷达分辨单元模型,根据已给的高程图和高分辨率的合成孔径雷达图像(SAR)模拟生成了实孔径雷达图像。

关键词 实孔径雷达,采样周期,分辨单元,高程图,模型。

SIMULATION OF REAL APERTURE RADAR SCENE

WANG Xin-Sai ZHANG Tian-Xu SANG Nong

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

Abstract By considering the uneven ground condition, the model of computing radar distinguishing unit was presented. On the basis of known SAR & DEM, the real-aperture radar scene was simulated.

Key words real-aperture radar, sample period, resolution unit, DEM, model.

引言

我国地物目标光电传感器共性的稳定特性提取和与它相关的可靠有效的匹配导航技术研究还有很多问题没有真正解决,要研究地物的光电传感器的稳定特性和有效的、可靠的匹配定位算法,就需要大量的参考图和实时图源。由于技术和国力的限制,我们难以获得各种条件和环境下的参考图和实时图,通过模拟手段获得仿真^[1,3,4]的较为接近实际情况的参考图和实时图就显得尤为必要和紧迫。

1 实孔径雷达图像模拟模型

实孔径雷达图像分辨率随雷达高度和成像点到雷达成像中心点的半径不同而不同,而且径向分辨率和方位向分辨率也不一样,同时成像的点数与雷达高度直接相关。考虑上述影响,实孔径雷达图像模拟的关键是分辨单元的计算。

1.1 平地实孔径雷达的分辨单元简化模型

对于实孔径雷达,其分辨单元的大小是随着人

射角的变化而变化的,在雷达波束照射范围内相邻分辨单元的人射角不能认为近似相等,而且成像方式是雷达波束以对地圆锥扫描方式,实现对地面目标的成像,如图 1 所示。雷达天线作旋转采样时,按每 360°均匀作 135 次采样,得到 135 方位。

由于每个分辨单元的大小不同,所以必须根据不同的入射角计算分辨单元大小,按照雷达高度 H ,天线波束 B ,确定每个分辨单元大小为

$$\text{方位} \quad A_a = \frac{H \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{\cos \theta}, \quad (1)$$

$$\text{径向} \quad A_r = \frac{C\tau}{2\sin \theta}. \quad (2)$$

式中 H 为雷达高度, α 为天线方位波束宽度, θ 为入射角, τ 为脉冲宽度, C 为光速。

1.2 起伏高程地面实孔径雷达的分辨单元简化模型

在地面平坦时,实孔径雷达到目标的斜距离随着其波束中心偏离圆锥扫描中心线的角度增大而增大,且扫描的空间位置与时间序列一一对应,即实孔

* 国防预研基金(批准号 97J1.5.9.JW0510)
稿件收到日期 2000-05-18,修改稿收到日期 2000-11-27

* The project supported by the Preliminary Research of National Defense (No. 97J1.5.9 JW0510)
Received 2000-05-18, revised 2000-11-27

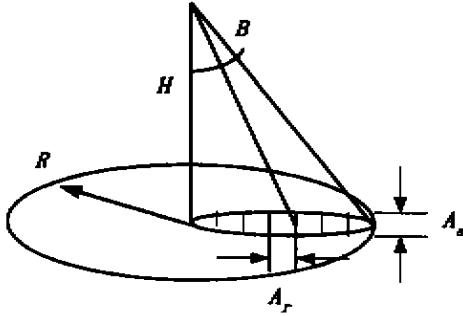


图 1 实孔径雷达工作示意图
Fig. 1 The sketch of principle of real-aperture radar

径雷达图像上没有灰度迭掩现象.当地面的起伏高程较大时,使得不满足雷达到目标的斜距离随着其波束中心偏离圆锥扫描中心线的角度增大而增大的规律,且在径向和方位向都存在倾斜角,有可能使雷达到多个目标的斜距离都相等,出现雷达图像上一点对应空间多个目标的现象,即雷达图像有灰度迭掩情况.如以平地实孔径雷达的分辨单元模型来计算,是不正确的,在地面起伏较大的情况下,与实际情况偏差较大,必须采用新的分辨单元计算模型.在实孔径雷达的较低分辨率下,对发生地面遮挡的情况可以不考虑.另外,为了简化计算模型,假设地面目标均为非光滑平面,地面起伏的曲率对雷达反射波的影响误差较小,在推导计算模型时不予考虑.

1.2.1 雷达到地面目标斜距离的计算

由图 2 可知

$$S = \frac{H - h}{\cos\theta} = \frac{\Delta h}{\cos\theta} \tag{3}$$

式(3)中 $\Delta h = H - h$ 为雷达与地面高程差.由此可知地面的起伏高程直接影响雷达到目标的斜距离的大小,即影响地面目标回波到达雷达接收机的时序,使雷达的图像发生空间迭掩现象.

图 3 为实孔径雷达数据采集示意图.图 3 中粗

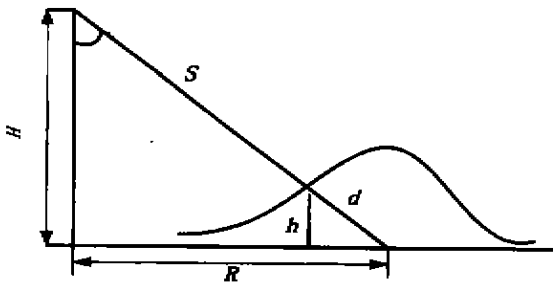


图 2 地面起伏对雷达到目标斜距离的影响
Fig. 2 The influence of uneven ground on the slope distance between the radar and target

线 SL 为扫描中心线,它是一个时间轴;扇型阴影区为雷达发射波束的范围; H 为雷达高度; S_i, S_j 为雷达到地面目标的斜距离; T_s 为采样起始点, T_e 为采样结束点,采样周期 T ;箭头为雷达天线旋转的方向;扫描一周(360°)需要 135 次,即扫描中心线 SL 每次移动 2.67° .

具体计算步骤如下.

(1) 采样点数的计算:雷达发射波束的径向范围为 35° ,采样起始点 $\theta_0 = 0^\circ$,第 k 个采样点的角度递推公式为: $\theta_k = \arccos\left[H/\left(\frac{C \cdot T}{2} + \frac{H}{\cos\theta_{k-1}}\right)\right]$,当 $\theta_k \geq 35^\circ$ 时,采样结束.

(2) 第 k 个采样周期内雷达到目标斜距离的计算:若 T_k 采样点雷达到目标斜距离为 S_k ,则 T_{k+1} 采样点雷达到目标斜距离为

$$S_{k+1} = \frac{C \cdot T}{2} + S_k, \tag{4}$$

每个采样周期内雷达到目标斜距离的变化量为

$$\Delta S = \frac{C \cdot T}{2}, \tag{5}$$

式(5)中 C 为光速, T 为采样周期.

(3) 第 L ($L = 1, 2, \dots, 135$) 个波束内各点到雷达的斜距离计算:对波束内任一点 $M_y(h_y, R_y)$ 到雷达的斜距离为

$$S_y = \sqrt{(H - h_y)^2 + R_y^2}, \tag{6}$$

式(6)中 h_y 是该点的高程, $R_y^2 = (X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2$, (X_i, Y_i) 为该点在高程图上的坐标.

(4) 第 k 个采样周期内等效分辨单元的计算:设 SL 为扫描中心线,且其处于第 L 个波束,则扫描中心线 SL 与 X 轴的夹角为: $\beta = \frac{360}{135} \times L$ ($^\circ$),则扇型波束的方位向的角度范围为: $\alpha = \beta \pm 13^\circ$.有

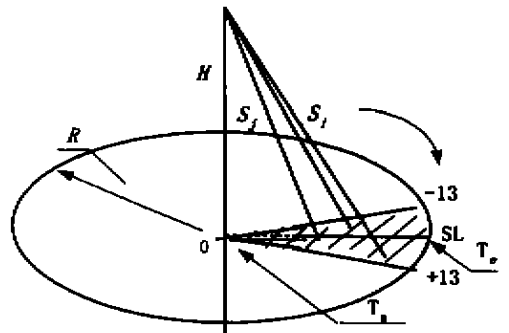


图 3 实孔径雷达数据采集示意图
Fig. 3 The sketch of sampling data of real-aperture radar

$$\begin{aligned} X_i &= R_i \sin \alpha_i + X_0, \\ Y_i &= R_i \cos \alpha_i + Y_0, \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)中 α_i 的取值间隔为 1° , R_i 取值范围为 $0 \sim R$, 间隔为 R/M , M 为采样点数. 根据 (X_i, Y_i) 查出高程图上该点的高程 h_{ij} , 再由式(6)计算出波束内所有点的斜距离 S_{ij} . 得到第 k 个采样周期内等效分辨单元

$$\Delta A_k = \sum_{S_j < S_{ij} < S_{j+1}} (X_i, Y_i) \quad (8)$$

1.3 模拟高程图产生的模型

在地面高程平坦时, 实孔径雷达图像上没有灰度迭掩现象. 当地面高程起伏时, 雷达图像有灰度迭掩情况. 我们选取地面高程起伏满足二维的高斯分布函数^[2], 即

$$f(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-\mu)^2 + (y-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (9)$$

式(9)中 μ 为均值, σ^2 为方差, $f(x, y)$ 为高程. 若 $\mu = 0$, 则有

$$f(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}} \quad (10)$$

图4为模拟地面高程图(归一化灰度图), 模拟条件是雷达高度为2000m. 图5为实际地面高程图(归一化灰度图), 图中愈亮的点表示高程愈高.

1.4 实孔径雷达图像的灰度计算

由雷达成像原理中的雷达方程可知, 若模拟产生实孔径雷达灰度图时需要知道相应的参数, 而有的参数有时无法知道(例如不同地物的散射特性), 这就使得利用上述公式模拟灰度图很困难. 所以本文根据已给的高程图和高分辨率的合成孔径雷达图像(SAR)来模拟实孔径雷达图像. 由实孔径雷达分辨单元确定SAR图上的相应区域, 将该区域内灰度值在方位向加权平均, 径向等加权平均(取加权系数为1).

$$\text{实孔径雷达灰度在第 } k \text{ 个采样点的计算公式为} \\ G_k = \sum_{S_j < S_{ij} < S_{j+1}} C_i \cdot M_i(X_i, Y_i), \quad (11)$$

式(11)中 C_i 为点 (X_i, Y_i) 与扫描中心线所处位置的加权系数、径向加权系数和方位向加权系数; $M_i(X_i, Y_i)$ 为 (X_i, Y_i) 点对应高分辨率SAR图上的灰度值.

通过上述的计算得到模拟的有限元网格灰度图, 由一次样条有限元内差方法^[6]可解决其不均匀性和各向异性问题, 得到较好的连续实孔径模拟图. 设点 $A(x, y)$ 的函数值为 $\phi(x, y)$, 其公式为

$$\begin{aligned} \phi(x, y) &= (1 - \Delta x)(1 - \Delta y)C_{i,j} + \\ &\Delta x(1 - \Delta y)C_{i+1,j} + (1 - \Delta x)\Delta y C_{i,j+1} + \\ &\Delta x\Delta y C_{i+1,j+1}. \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)中 $C_{i,j}, C_{i+1,j}, C_{i,j+1}, C_{i+1,j+1}$ 为网格4个顶点的数值; Δx 和 Δy 是当格网边长为1时, 点A相对于点 $P_{i,j}$ 的坐标增量. 另一种插值方法也可得到满意的结果^[5].

2 实孔径雷达景像图模拟结果

图6(a)为模拟高度为2000m的实孔径雷达景像图时所用的SAR图, (b)为相应高度模拟的实孔径雷达图. 图7(a)为模拟高度8000m的实孔径雷达景像图时所用的SAR图, (b)为相应高度模拟的实孔径雷达景像图. 图8(a)为模拟高度2000m的实孔径雷达景像图时所用的SAR图, (b)为相应高度模拟的实孔径雷达景像图.

图9(a)为模拟高度2000m的实孔径雷达景像图时所用的SAR图, (b)为相应高度模拟的实孔径雷达景像图(用实际高程图进行模拟).

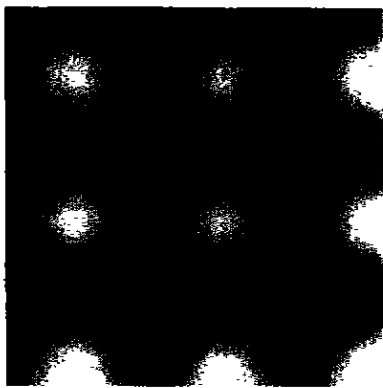


图4 模拟高程图(归一化灰度图)

Fig. 4 Simulating DEM(normalized gray image)



图5 实际高程图(归一化灰度图)

Fig. 5 Actual DEM(normalized gray image)



图6 模拟雷达高度 2000m,地面高程最大起伏为 1m
(a)原 SAR 图 (b)模拟图

Fig. 6 The simulated radar height is equal to 2000m, the maximum height of uneven ground is equal to 1m
(a)original SAR image (b)simulating image

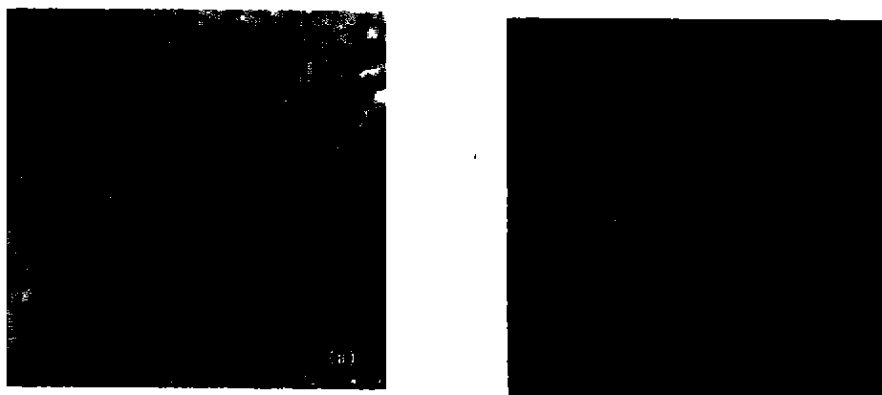


图7 模拟雷达高度 8000m,地面高程最大起伏为 1m
(a)原 SAR 图 (b)模拟图

Fig. 7 The simulated radar height is equal to 8000m, the maximum height of uneven ground is equal to 1m
(a)original SAR image (b)simulating image



图8 模拟雷达高度 2000m,地面高程最大起伏为 48m
(a)原 SAR 图 (b)模拟图

Fig. 8 The simulated radar height is equal to 2000m, the maximum height of uneven ground is equal to 48m
(a)original SAR image (b)simulating image

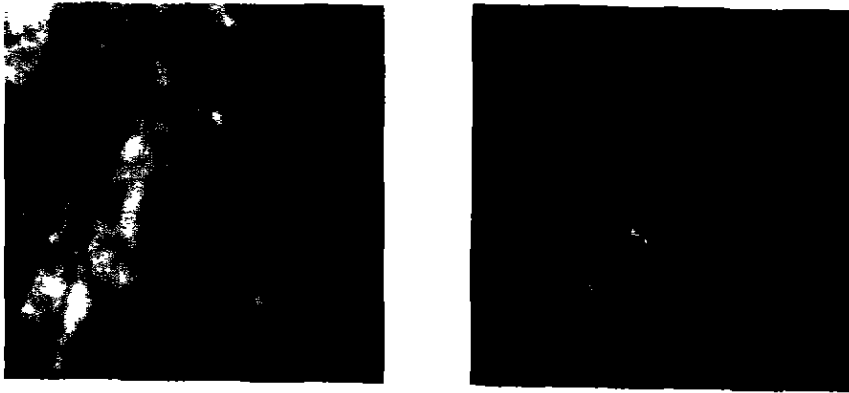


图9 模拟雷达高度 2000m, 实际地面高程的实孔径雷达图

(a)原 SAR 图 (b)模拟图

Fig. 9 Actual DEM real-aperture radar image with simulated radar height equal to 2000m

(a)original SAR image (b)simulating image

3 结语

为了研究地面高程对雷达定位匹配的影响, 本文选取地面的高程服从高斯分布, 且其高斯常数与雷达高度有相对应的关系.

我们进一步的工作包括以下几个方面: (1) 模拟实孔径雷达景像时考虑地表面的法向量方向, 即地面对雷达波的反射角度的影响; (2) 考虑阴影和遮挡的影响, 其计算方法: 阴影和遮掩是雷达图像的主要几何特点, 对阴影的预测是采取对产生阴影的判断方法. 假设地面上两点 X_1 、 X_2 , 其地距分别为 S_1 和 S_2 , 且 $S_1 < S_2$, 此时, 雷达对这两点的投射角为 θ_1 和 θ_2 , 有 $\text{ctg}\theta_1 = (H - h_1)/S_1$, $\text{ctg}\theta_2 = (H - h_2)/S_2$ 产生阴影的判断式为 $\theta_2 < \theta_1$; (3) 模拟的实孔径雷达景像图应与实际得到的实孔径雷达影像图进行比较和改进; (4) 噪声的模拟与影响.

REFERENCES

[1] Zhang zhiyong, Zhang tianxu. Analysis & simulation of

land and rain clutter for PRC_CW radar at X-band. *IEE Proc. F, Radar, Sonar and Navigation*, 1999, **146**(2): 101—106

[2] Oliver C J, Blake A, White R G. Optimum texture analysis of synthetic aperture radar images. *Proc. SPIE*, 1994, **2230**: 389—398

[3] Franceschetti G, Migliaccio M, Riccio D, et al. A synthetic aperture radar(SAR) raw signal simulator. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, **30**(1): 110—123

[4] Tunaley J K E, Buller E H, Wu K H, et al. The simulation of the SAR image of a ship wake. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1991, **29**(1): 149—156

[5] Grimson W E L. A computation theory of visual surface interpolation. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, 1982, **B298**

[6] ZHANG Zu-Xun, ZHANG Jian-Qing. *Digital Photogrammetry*. Wuhan: Wuhan Technical University of Surveying and Mapping Press(张祖勋, 张剑清. 数字摄影测量学. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社), 1996, 51—55