

高分辨率 SAR 图像目标峰值提取及峰值稳定性分析

高 贵 计科峰 匡纲要 李德仁*

(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

*(武汉大学 武汉 430079)

摘 要: SAR 图像自动目标识别的一个主要途径是通过目标峰值序列的匹配进行识别。该文提出了 SAR 图像的通用高斯峰值模型,并根据该模型设计了 SAR 图像目标峰值提取方法,进而利用实测目标数据分析了目标峰值对于目标方位角,雷达俯仰角以及目标结构等目标配置条件变化下的稳定性。结果表明,目标 SAR 图像峰值对于目标的配置条件变化具有一定的“稳定性”,这说明,利用峰值特征进行 SAR 图像目标识别是可行的。

关键词: 合成孔径雷达, 图像, 峰值提取, 通用高斯峰值模型, 目标识别

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)04-0561-05

Target's Peak Extraction from High-Resolution SAR Image and Peak's Stability Analysis

Gao Gui Ji Ke-feng Kuang Gang-yao Li De-ren*

(SESE, NUDT, Changsha 410073, China)

*(Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract Peak sequence matching is a important approach to SAR ATR. A general Gaussian model for peak is given in this paper and the extraction method is designed based on this model. Utilizing actual target database, the variability of target's peaks with target orientation, configuration and depression angle is analyzed. The results show that the peaks of target in SAR image have some stability with target's orientation, configuration and depression variability. So it is feasible to recognize target from SAR image using peak feature.

Key words Synthetic Aperture Radar(SAR), Imagery, Peak extraction, General Gaussian peak model, Target recognition

1 引言

自 20 世纪 70 年代以来, SAR 由于其卓越的空间信息获取能力以及在国防、环境等方面突出的战略意义受到了广泛关注^[1,2]。特别是在军事应用方面, SAR ATR 系统的研制已经成为一个研究热点。为了保证高效快速地进行目标识别,一般需要对原始的数据进行有意义的特征提取。目前,峰值特征被广泛应用于 SAR 图像目标识别^[3-6]。

近年来,在峰值的提取与分析研究中,国内计科峰等人^[4]提出了一种像素级精度的峰值提取算法,该方法搜索图像的每个 3×3 邻域,如果中心像素的值大于邻域内其它像素的值,则认为中心像素为目标的一个峰值,该方法虽然计算速度很快,但其精度不能满足目标识别的要求;斯坦福大学的 Wang 和 Binford^[5]利用二维高斯函数拟合局部的峰值,并利用两种不同的峰值检测算法对峰值进行提取,该方法的精度可以达到子像素级,但该方法中没有考虑峰值的方向,

峰值模型存在的缺陷,因而在对具有一般方向的峰值存在定位不准、误差较大的问题。在峰值应用于目标识别方面的研究中, Bhanu^[6]等人研究了利用峰值序列的 Hausdorff 距离度量从而进行 SAR 图像间的匹配问题; Ettinger 等人^[7]研究了峰值提取的不确定度及峰值序列的最优对应问题等;而且在国外较知名的 SAR ATR 系统如由美国国防部 (DARPA) 和空气动力研究实验室 (AFRL) 共同资助开发的 MSTAR (Moving and Stationary Target Acquisition and Recognition) 项目^[3]等都设计了专门的峰值提取模块。

本文考虑了峰值的位置、幅度、宽度以及方向等参数,提出了对实际 SAR 图像目标峰值描述更加准确地通用高斯峰值模型。并基于这一模型结合 Hess 矩阵设计了峰值检测方法。进而利用实测目标数据详细分析了目标峰值随目标方位角、雷达俯仰角以及目标结构的变化规律,从理论上证明利用峰值特征进行 SAR 图像目标识别在实际中的确是可行的。

2 SAR 图像目标峰值模型

SAR 图像目标峰值表现为 SAR 图像上的局部极大值, 它本质是 SAR 成像过程中, 点散射体响应和 SAR 系统冲击响应函数卷积的结果, 峰值可用 6 个参数表征: 两坐标轴的位置、幅度、两坐标轴上的宽度以及取向。峰值通常可用高斯函数进行建模。如果不考虑峰值的方向, 则理想点散射体幅度图像上的峰值 $I_0(x, y)$ 可表示为下式的各向同性的二维高斯函数:

$$I_0(x, y; \sigma) = H_1 \exp\left\{-\left[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2\right]/2\sigma^2\right\} \quad (1)$$

式(1)中 x, y 表示理想点散射体幅度图像中的坐标, H_1 为常数, 表示峰值的幅度, x_0, y_0 分别表示理想点散射体响应的峰值位置, σ 表示理想点散射体响应的峰值宽度。各向同性的二维高斯函数其横截面形状为一个圆, 如图 1(a)所示。若峰值在 x 轴和 y 轴的宽度不同, 即 $\sigma_x \neq \sigma_y$, 则其横截面形状为一个椭圆, 如图 1(b)所示。考虑一般的情况, 即峰值方向可能是整个坐标平面的任意方向, 假设峰值函数的长轴与 x 轴的夹角为 θ , 结合坐标的旋转关系, 则更一般的理想点散射体的峰值幅度函数为

$$I_\theta(x, y; \sigma_u, \sigma_v; \theta) = H_{\theta 1} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{((x-x_0) \cdot \cos\theta + (y-y_0) \cdot \sin\theta)^2}{\sigma_u^2} + \frac{(-(x-x_0) \cdot \sin\theta + (y-y_0) \cdot \cos\theta)^2}{\sigma_v^2}\right]\right\} \quad (2)$$

或者表示为

$$I_\theta(u, v; \sigma_u, \sigma_v; \theta) = H_{\theta 1} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(u-u_0)^2}{\sigma_u^2} + \frac{(v-v_0)^2}{\sigma_v^2}\right]\right\} \quad (3)$$

实际峰值认为是点散射体响应和 SAR 冲击响应函数卷积的结果, 其中系统冲击响应函数可近似为各向同性的二维高斯函数:

$$H(u, v) = \frac{1}{2\pi\sigma_b^2} \exp\left\{-\frac{(u-u_0)^2 + (v-v_0)^2}{2\sigma_b^2}\right\} \quad (4)$$

所以, SAR 图像上峰值函数为

$$I(u, v; \theta; \sigma_b) = I_\theta(u, v) \otimes H(u, v) = \frac{H_{\theta 1} \sigma_u \sigma_v}{\sqrt{(\sigma_u^2 + \sigma_b^2)(\sigma_v^2 + \sigma_b^2)}} \exp\left\{-\frac{(u-u_0)^2}{2(\sigma_u^2 + \sigma_b^2)} - \frac{(v-v_0)^2}{2(\sigma_v^2 + \sigma_b^2)}\right\} \quad (5)$$

其中 $\otimes$ 表示二维卷积, 上式即为 SAR 图像高斯峰值模型。

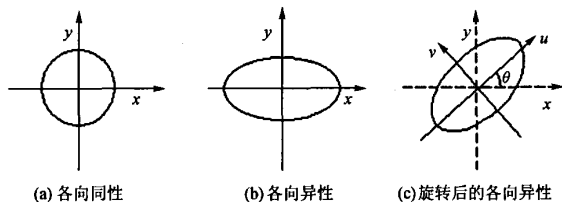


图1 不同的二维高斯函数横截面的形状

因为一般系统冲击响应函数中参数 σ_b 对于整幅图像为常数, 因而式(5)可以进一步表示为

$$I(u, v; \theta; \sigma_b) = H \exp\left\{-\frac{(u-u_0)^2}{2\sigma_{u_0}^2} - \frac{(v-v_0)^2}{2\sigma_{v_0}^2}\right\} \quad (6)$$

$\sigma_{u_0}, \sigma_{v_0}$ 分别为峰值在旋转后的 u 轴和 v 轴的宽度, u_0, v_0 为峰值中心点在图像中的位置, H 为峰值幅度。实际 SAR 系统存在着乘性噪声和系统加性噪声的影响, 但由于 SAR 图像目标区域中每个分辨率单元内, 目标的后向散射占主导作用, 乘性噪声的影响相对较小, 因而为了简化模型, 不考虑乘性噪声的影响。假定 SAR 强度图像的噪声是加性零均值高斯白噪声, 则式(6)可表示为

$$I(u, v) = H \exp\left\{-\frac{(u-u_0)^2}{2\sigma_{u_0}^2} - \frac{(v-v_0)^2}{2\sigma_{v_0}^2}\right\} + N(u, v) \quad (7)$$

$N(u, v)$ 表示加性高斯白噪声, 式(7)即为加入高斯白噪声后的 SAR 峰值模型, 即通用的高斯峰值模型表达式。

3 SAR 图像目标峰值检测方法

3.1 峰值模型简化

式(7)的通用高斯峰值模型中的加性高斯噪声可以通过适当的去噪方法加以滤除, 因此, 为了简化推导, 不考虑加性高斯白噪声的影响, 对(7)式进行泰勒展开:

$$I(u, v) \cong H \left(1 - (u-u_0)/(2\sigma_{u_0}^2) - (v-v_0)/(2\sigma_{v_0}^2)\right) \quad (8)$$

结合坐标旋转的关系, 上式可以表示为如下的二次抛物面方程(二次多项式):

$$I(u, v) = I(x, y) \cong a \cdot x^2 + b \cdot y^2 + c \cdot x \cdot y + d \cdot x + e \cdot y + f \quad (9)$$

即把坐标系 (u, v) 转化为坐标系 (x, y) 进行峰值的检测, 同时式(9)表明式(7)的通用高斯峰值模型可由二次抛物面来近似描述。其中:

$$a = (H/2) \cdot [\sin^2\theta/\sigma_{v_0}^2 - \cos^2\theta/\sigma_{u_0}^2] \quad (10)$$

$$b = -(H/2) \cdot [\sin^2\theta/\sigma_{u_0}^2 + \cos^2\theta/\sigma_{v_0}^2] \quad (11)$$

$$c = H \cdot \sin 2\theta [1/(2\sigma_{v_0}^2) - 1/(2\sigma_{u_0}^2)] \quad (12)$$

$$d=-2a\cdot x_0-c\cdot y_0$$

(13)

$$e=-2b\cdot y_0-c\cdot x_0$$

(14)

$$f=a\cdot x_0+b\cdot y_0+c\cdot x_0\cdot y_0+H$$

(15)

式(10)至式(15)中,共包含6个待求参数,即峰值位置 (x_0,y_0) ,峰值宽度 $(\sigma_{u_0},\sigma_{v_0})$,峰值幅度 H ,峰值方向 θ 。如果能够求得式(9)中的多项式系数 $[a,b,c,d,e,f]$,解式(10)至式(15)的6个方程就可以获得峰值的这6个参数。

3.2 峰值提取步骤

由上所述,峰值在图像上表现为局部极大值,因而峰值提取的过程即为在图像中搜索局部极大值的过程。峰值参数的获取关键是首先获得式(9)的6个未知系数,6个未知系数的获取最少需要图像中的 3×3 邻域,所以峰值提取的主要步骤可以概括为:

- (1) 首先对图像中的每个 3×3 邻域进行式(9)的二次抛物面拟合,求得式(9)中的多项式系数 $[a,b,c,d,e,f]$;
- (2) 判断该 3×3 邻域内是否存在局部极大值;
- (3) 若存在局部极大值,则解式(10)至式(15)的6个方程,求出峰值的6个参数:峰值位置 (x_0,y_0) ,峰值宽度 $(\sigma_{u_0},\sigma_{v_0})$,峰值幅度 H ,峰值方向 θ 。

第(1)步多项式6个系数的求解,采用 3×3 邻域可以得到9个方程,方程的个数大于未知系数的个数,因而可以采用最小二乘的方法解该方程组^[8]。第(2)步可通过求解Hess矩阵判断 3×3 邻域内是否存在局部极大值^[9]。图2是利用式(6)仿真的峰值例子,由图可见:在局部邻域内的所有方向上峰值处的值都是局部最大的,而曲线的曲率在所有方向上都是向下的,且在峰值处的梯度是0,所有方向上的二阶导数都为负。由式(6)构造二阶Hess矩阵:

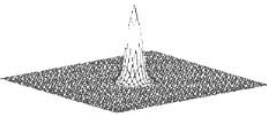


图2 高斯峰值的例子

$$H=\begin{bmatrix}\partial^2 I/\partial x^2 & \partial^2 I/\partial x\partial y \\ \partial^2 I/\partial y\partial x & \partial^2 I/\partial y^2\end{bmatrix}$$

(16)

则峰值函数在任意方向 β 上的二阶导数为

$$I''_{\beta}(x,y)=(\sin\beta\ \cos\beta)\cdot H\cdot\begin{pmatrix}\sin\beta \\ \cos\beta\end{pmatrix}$$

(17)

由 Rayleigh-Ritz 不等式^[9]:

$$\lambda_{\min}\|x\|\leq x'Hx\leq\lambda_{\max}\|x\|$$

(18)

其中 $\lambda_{\min},\lambda_{\max}$ 为Hess矩阵式(16)的两个特征值,也是最小和最大的二阶方向导数值。由式(17)和式(18),Hess矩阵的特征矢量为

$$x=\begin{pmatrix}\sin\beta \\ \cos\beta\end{pmatrix},\quad\|x\|=1$$

(19)

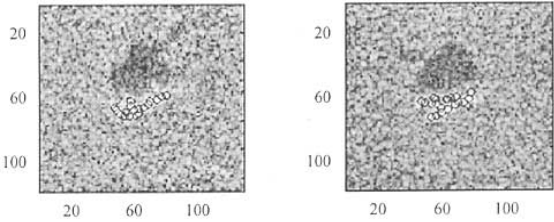
由式(17)至式(19)可得

$$\lambda_{\min}\leq I''_{\beta}(x,y)\leq\lambda_{\max}$$

(20)

即如果特征值 $\lambda_{\min},\lambda_{\max}$ 都小于0,则函数在任意方向 β 上的二阶导数都小于0,那么该邻域内存在峰值。

前面3步的处理是SAR图像峰值提取的一般步骤,而对于具体的SAR图像而言,它一般由3部分构成:目标区,阴影区和背景杂波区,其中对于SARATR感兴趣的是目标区,所以进一步对于图像中感兴趣区域(ROI)的峰值提取的一般步骤可概括为:首先对图像进行分割以获得ROI,然后对获得的ROI进行前面3步的处理。如图3所示为两幅MSTAR SAR实测目标切片图像中目标区的峰值提取结果,其中目标为T72和BMP2。由图3可见本文基于SAR图像的目标峰值提取方法较好地地从SAR图像上提取出了目标的峰值。



(a) T72 峰值提取结果 (b) BMP2 峰值提取结果

图3 MSTAR SAR 目标切片峰值提取结果

4 SAR 成像几何对峰值分布的影响^[10]

SAR图像是地平面(Ground Plane)物体在斜平面(Slant Plane)上的投影。由于该投影关系,从而引起物体之间相对距离的改变,亦即几何畸变。参考图4的SAR成像几何关系,地面物体上的点(1,2,3,4,5)依次投影为斜平面上的点A,B,C,D,E。图4中包括两种几何畸变:距离缩短和层叠(Layover)。距离缩短的例子如图中所示, $d(A,B)<d(1,2)$,即图像上(斜平面上)两点之间的观测距离小于实际的两点之间的距离。层叠的例子如图4中所示 $d(A,D)<d(A,C)$,即在观测图像上D到A比C到A的距离更近,而实际上正好是相反的。

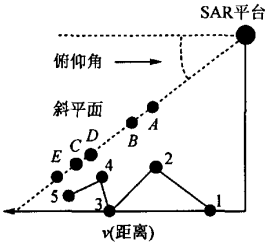


图4 SAR图像几何畸变:距离缩短和层叠的例子

对于实际中的大部分地面目标来说,可以认为它是“平的”,从而不考虑“层叠”效应对目标峰值分布的影响。但是,必须考虑“距离缩短”效应的影响,距离缩短效应可按式(21)进行校正:

$$\text{校正的距离} = \text{未校正的距离} / \cos \phi \quad (21)$$

这里 ϕ 表示图 4 中所示的成像俯仰角。经过“距离缩短”校正后即把目标图像从斜平面坐标系转化为地平面坐标系。虽然,上面的距离校正过程很简单,但是,经过上面的校正能得到更符合实际物体几何的目标峰值分布,从而更准确地反映目标的结构。

5 峰值稳定性分析

理论分析认为: SAR 图像目标峰值随着目标的方位、结构、雷达的俯仰角等目标的配置条件变化很大,因此,一度曾认为用峰值特征进行 SAR 图像目标识别是不可行的。但近年来研究发现,峰值对于目标的方位、结构、雷达俯仰角在一定变化范围内具有一定的不变性。且对于目标识别而言,很多时候是通过峰值的位置匹配进行识别,所以峰值的稳定性通常用峰值位置的稳定性来度量。

根据 Wang^[5]的分析,在目标配置条件发生一定范围内的改变时,目标的散射结构不会发生很大的变化,对应于图像上,相当于峰值在图像域上发生旋转、平移以及对于不同俯仰角斜平面的投影。若首先把获得的目标图像经过式(21)的几何校正,即把目标图像所在的不同俯仰角斜平面坐标系转化为同一地平面坐标系,则可以不考虑投影的影响。假设方位角为 θ_1 的 SAR 目标图像,其峰值位置坐标矢量为 $P_1 = \{P_i = (x_i, y_i), 1 \leq i \leq n\}$, n 为图像的峰值点的数目,对应的方位角为 θ_2 的目标图像的峰值坐标矢量为 $P_2' = \{P_j' = (x_j', y_j'), 1 \leq j \leq n\}$, 方位为 θ_2 的图像旋转 $\theta_1 - \theta_2$ 角度到方位为 θ_1 的图像所在的平面坐标系后的峰值坐标矢量为 $P_2 = \{P_j = (x_j', y_j'), 1 \leq j \leq n\}$, 假设 P_2 在坐标平面平移 (t_x, t_y) 后和 P_1 达到最优匹配,则为了对两方位角下的峰值位置匹配定量地描述,定义匹配度函数:

$$M_{ij}(t) = \begin{cases} 1, & |x_j' - t_x - x_i| \leq l \text{ 和 } |y_j' - t_y - y_i| \leq l, 1 \leq i, j \leq n \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (22)$$

其中 l 为匹配的允许误差,取 $l=1$ 把匹配误差精度控制在一个像素范围内。同时定义 n 个峰值点的位置不变性(稳定性)度量:

$$L_n = \max_i \left\{ \frac{100}{n} \sum_{j=1}^n \min \left(\left(\sum_{i=1}^n M_{ij}(t) \right), 1 \right) \right\} \quad (23)$$

式(23)限定了一个峰值点至多只能与另一个方位下的一个峰值点对应。

利用分辨率为 $0.3\text{m} \times 0.3\text{m}$ 的 MSTAR 实测 T72 坦克目标的所有 SAR 图像数据,计算 $0 \sim 360^\circ$ 范围内,各个角度间隔下的峰值稳定性度量,图 5 给出了 T72 在 15° 仰角下的方位间隔与峰值匹配度的关系,由图可见:目标峰值对目标方位角的变化具有相当的“不变性”(稳定性)。随着方位角变化间隔的增大,目标上“稳定的”峰值的数目不断减小,但即使在方位角变化间隔达到 10° 时,目标上仍有大约 50% 的峰值是“稳定”,因此对于基于 SAR 图像的目标识别来说,假定在某一分辨率下,目标 SAR 图像包括 20~30 个峰值,那么可以预测,为了得到可靠的目标分类、识别性能,选择方位角间隔 $5^\circ \sim 10^\circ$ 的 SAR 图像作为模板,应该是能满足要求的。同样可以分析目标峰值特征对于雷达俯仰角和目标结构变化的稳定性:图 6 给出了 T72 在 $15^\circ \sim 17^\circ$ 仰角变化下在 360° 范围内目标对应方位的峰值匹配度,匹配度的均值为 62.4。图 7 给出了不同型号的 T72 在 15° 仰角下在 360° 范围内,对应方位的峰值匹配度,匹配度的均值为 61.7,最小匹配度为 49.3。

由上面对 SAR 图像目标峰值随方位角、目标结构以及俯仰角变化的分析可知,目标 SAR 图像峰值在一定的方位角、目标结构和仰角变化范围内具有一定的“稳定性”。那么在 SAR ATR 中,我们可以利用该稳定性,通过由两幅 SAR 图像提取的目标峰值特征的匹配达到目标分类、识别的目的。

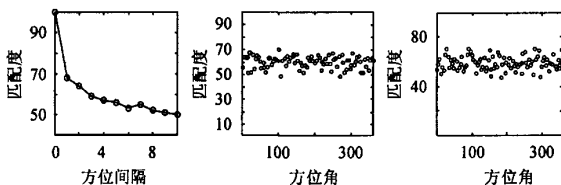


图 5 峰值对于目标方位的稳定性

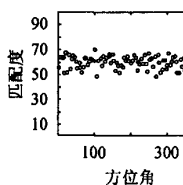


图 6 峰值对于雷达俯仰角变化的稳定

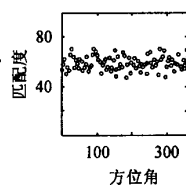


图 7 峰值对于目标性结构变化的稳定性

6 结论

峰值序列匹配是基于 SAR 图像目标识别的一种重要途径,本文在研究了由 SAR 图像提取目标峰值方法,该方法使用 6 个参数对目标的峰值进行描述,提出了通用的高斯峰值模型,该模型对目标峰值进行了更精确的描述,在此基础上,通过对实测 SAR 图像数据的峰值特性分析,验证了目标 SAR 图像峰值在一定的方位和仰角变化以及一定的目标

结构变化范围内具有一定的“稳定性”, 证明了利用峰值特征进行 SAR 图像目标识别的有效性和可行性。

参 考 文 献

- [1] Dudgeon D E, Lacoss R T. An overview of automatic target recognition. *Lincoln Laboratory Journal*, 1993, 6(1): 3 – 10.
- [2] Bhanu B, Dudgeon D E, Zelnio E G, Rodenfeld A, Casasent D, Reed I S. Introduction to the special issue on automatic target detection and recognition. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1997, 6(1): 1 – 6.
- [3] Ross T D, *et al.*. SAR ATR: so what's the problem? An MSTAR perspective. *Proc. SPIE*, 1999, Vol.3721: 662 – 672.
- [4] 计科峰, 匡纲要, 郁文贤. SAR 图像目标峰值提取及稳定性分析. *现代雷达*, 2003, 25(2): 15 – 18.
- [5] Wang By-Her. An automatic target recognition system for SAR imagery. [Doctor's dissertation], Stanford University, 1997.
- [6] Bahnu B, Jones G, *et al.*. Recognition of articulated objects in SAR images. In *Proc of the ARPA Image Understanding Workshop*, Palm Springs, CA, 1996: 1237 – 1250.
- [7] Ettinger G J, Klanderma G A, *et al.*. A probabilistic optimization approach to SAR feature matching. *Proc. SPIE*, 1996, Vol.2757: 318 – 329.
- [8] Reuven Meth. Target characterization and matching in synthetic aperture radar imagery. [Doctor's dissertation], The University of Maryland, College Park, 1998.
- [9] Robert M. Haralick, *et al.*. The topographic primal sketch. *The International Journal of Robotics Research*, 1983, 2(1): 50 – 72.
- [10] Keydel E R, Lee S W, *et al.*. MSTAR extended operating condition: A tutorial. *Proc. SPIE*, 1996, Vol.2757: 228 – 242.
- 高 贵: 男, 1981 年生, 博士生, 研究方向为基于 SAR 图像的自动目标识别、SAR 目标特征分析。
- 计科峰: 男, 1974 年生, 博士, 讲师, 研究方向为 SAR ATR、空间信息处理。
- 匡纲要: 男, 1966 年生, 博士, 教授, 研究方向为雷达信号处理、SAR 图像判读、多光谱图像目标识别、雷达目标特性分析等, 在国内外学术刊物上发表 50 余篇学术论文。
- 李德仁: 男, 1939 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 中国科学院院士, 中国工程院院士, 研究方向为高精度摄影测量定位理论与方法、GPS 空中三角测量、卫星像片解析处理、影像理解及像片自动解译以及地理信息理论等, 发表论 文 110 多篇, 专著教材 5 部。