

高分辨率 SAR 图像 目标属性散射中心特征提取方法

杨进¹⁾ 闫冬梅^{2),3)} 王超²⁾ 张红²⁾

¹⁾(装备指挥技术学院,北京 101416) ²⁾(中国科学院中国遥感卫星地面站,北京 100086)

³⁾(中国科学院自动化研究所,北京 100080)

摘要 目标属性散射中心模型是基于物理光学和几何绕射理论解的散射中心模型,该模型中提供了可供目标识别的属性散射中心特征。为了能从高分辨率 SAR 图像中获得这些特征,讨论了目标属性散射中心模型,研究了从高分辨率 SAR 图像中提取目标属性散射中心特征参数的方法。该方法是一种基于图像域的参数估计方法,它通过图像分割、模型类别选择、参数初值选择和参数优化 4 个步骤,得到单个散射中心的 7 个参数。循环进行上面的步骤,就可以从 SAR 图像中提取出目标所有的散射中心特征。仿真结果验证了该算法的有效性。

关键词 SAR 图像 属性散射中心 特征提取算法

中图分类号: TN957.52 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)01-0035-05

Feature Extraction of Attributed Scattering Centers on High Resolution SAR Imagery

YANG Jin¹⁾, YAN Dong-mei^{2),3)}, WANG Chao²⁾, ZHANG Hong²⁾

¹⁾(The Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 101416) ²⁾(China Remote Sensing Satellite Ground Station, Beijing 100086) ³⁾(Institute of Automation Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract The attributed scattering center model is based on the solutions to both physical optics and the geometric theory of infraction. The model provides the characteristic feature of attributed scattering centers which can be well used in the target recognition. In order to get the feature on high resolution SAR Imagery, the attributed scattering center model is discussed and the method of extracting the feature of attributed scattering centers from a high resolution SAR image is researched in this paper. It is a parameter estimation method based on a SAR imagery. The method includes four steps: image segmentation, the selection of the model type, the estimate of initial value and the parameter optimization. The seven parameters of each scattering center can be obtained through above four steps. After the recurrence procession, the parameters of all the scattering centers in the imagery can be attained. At last, the validity and accuracy of this method can be demonstrated by the results of simulation.

Keywords SAR imagery, attributed scattering centers, feature extraction

1 引言

在高分辨率 SAR 影像中,一些具有简单几何结

构的散射体(如点、边、角等)是复杂目标后向散射的主要贡献部位,这些强散射部位称为散射中心^[1],目标的雷达后向散射可以很好地近似为这些散射中心相应的总和。这些散射中心能够更为简洁

基金项目:国家自然科学基金项目(40601058)

收稿日期:2007-06-22; 改回日期:2007-12-12

第一作者简介:杨进(1984~),男。现为装备指挥技术学院信号与信息处理专业硕士研究生。主要研究领域为图像压缩和 SAR 图像特征提取。E-mail: yangjin1247@sohu.com

地描述目标的物理特性,因而散射中心是高频区 SAR 目标识别的一个重要特征。

属性散射中心模型(attributed scattering center model)是近年来提出的描述目标散射中心的一种比较先进的物理模型,它是基于物理光学和几何绕射理论解的一种散射中心模型,该模型结构较为复杂,模型参数较多,对于真实目标的逼近程度更佳,并能够更准确、更贴切地描述高频区目标的后向散射特性;最为重要的是,该模型中还包含了更丰富的可用于目标分类识别的有效信息。

目标散射中心的特征提取问题本质上是一个参数估计问题。本文基于属性散射中心模型,提出了一种基于图像域的目标属性散射中心特征提取方法。该方法有效地解决了传统基于频率域散射中心参数估计计算量大的问题;另外,该方法在估计属性散射中心参数时引入了初始估计的步骤,然后根据参数初始估计的结果迭代得到参数估计终值,这样估计的结果准确性比频率域的估计方法大大提高。通过仿真实验,验证了该算法的有效性。

2 目标属性散射中心参数模型

Michael 等人基于几何绕射理论(GTD)和物理光学(PO)理论解提出了属性散射中心模型^[1-2]。该模型同时包含了散射中心的场与频率和方位的两种关系,并且用一组描述位置、幅度、形状和方向的参数来说明每个散射中心的特征。但是,该模型不适合于具有波导属性的散射中心的情况。

该模型具体形式如下:

$$E_i(f, \phi; \theta_i) = A_i \left(\frac{jf}{f_c} \right)^{\alpha_i} \cdot \exp \left\{ \frac{-j4\pi f}{c} (x_i \cos \phi + y_i \sin \phi) \right\} \cdot \operatorname{sinc} \left[\frac{2\pi f}{c} L_i \sin(\phi - \phi') \right] \cdot \exp(-2\pi f \gamma_i \sin \phi) \quad (1)$$

式中, θ_i 为估计参数集, $\theta_i = [x_i, y_i, \alpha_i, \gamma_i, \phi', L_i, A_i]$, 表示第 i 个散射中心的参数; f 为雷达反射波的取样频率; f_c 为雷达中心频率; ϕ 为方位角, 其取值范围是 $[-\phi_m/2, \phi_m/2]$, 其中 ϕ_m 表示最大成像观测角; ϕ' 表示分布散射中心在成像时相对于该位置时所对应方位角的偏离程度。 $c = 3 \times 10^8$ m/s; 电波在真空传播速度; x_i, y_i 为散射中心距离向、方位向的位置; A_i 为复幅度; $\alpha_i \in [-1, -0.5, 0, 0.5, 1]$ 表示频率依赖, 当 $\phi' = L_i = 0$ 时, 对应局部散射中心;

γ_i 表示散射中心的方位角依赖性。当 $\gamma_i = 0$ 时, 对应分布散射中心, 它对方位角的依赖由物理长度 L_i 和倾斜角度 ϕ' 表征;

值得说明的是, 该模型是极坐标系下的模型, 成像时需要将极坐标下的数据插值到直角坐标系下。具体的成像算法参见文献[3]。

3 目标属性散射中心参数估计

对于散射中心的参数估计, 已经有了很多方法, 但基本上都是在频率域上进行的。基于频率域的这些方法需要同时估计 SAR 图像中的所有散射点, 计算量十分大。这里, 采用的是基于图像域的散射中心参数估计方法^[3], 该方法能有效减少计算量, 并得到较精确的估计精度。

基于 SAR 图像的目标散射特征中心参数估计问题, 概括来说就是: 给定 SAR 图像 $D(x, y)$, 估计参数集 $\{\theta_i\}$, 使得用该参数集模拟出的 SAR 图像能够最好地拟合 $D(x, y)$ 。

假定, 在 (f_x, f_y) 平面, 测量值 $D(f_x, f_y)$ 是由数据真值 $E(f_x, f_y; \theta_i)$ 与高斯白噪声 $N(f_x, f_y)$ 组成的, 即

$$D(f_x, f_y) = E(f_x, f_y; \theta_i) + N(f_x, f_y) \quad (2)$$

上式是 2 维 $(M \times N)$ 矩阵的表示方法, 为了方便表述, 将其化为 $MN \times 1$ 维矢量, 用小写字母表示如下:

$$d(f_x, f_y) = e(f_x, f_y; \theta_i) + n(f_x, f_y) \quad (3)$$

此时, \mathbf{n} 是一个正态分布的随机向量, $\mathbf{n} \sim N(0, \sigma^2 I)$ 。在经过成像过程后, 在图像域数据之间的关系变为

$$d(x, y) = e(x, y; \theta_i) + n'(x, y) \quad (4)$$

噪声因子 $n'(x, y)$ 是由 $n(f_x, f_y)$ 经过成像过程变换得到的, 它是一个高斯色噪声矢量。 $MN \times 1$ 维图像矢量 $d(x, y)$ 的概率密度函数为

$$f_d = \frac{1}{\pi^{MN} \cdot |\Sigma|} \times \exp \left\{ -[\mathbf{d} - e(x, y; \theta_i)]^H \Sigma^{-1} [\mathbf{d} - e(x, y; \theta_i)] \right\} \quad (5)$$

式中, -1 表示广义逆, H 表示复共轭转置, 可由式(5)得到参数 θ_i 的最大似然估计:

$$\hat{\theta}_{ML} = \arg \min_{\theta} [\mathbf{d} - e(x, y; \theta_i)]^H \Sigma^{-1} [\mathbf{d} - e(x, y; \theta_i)] \quad (6)$$

在高分辨率 SAR 图像中, 目标单个散射中心响应聚集在小的孤立区域内。因此, 可以首先将整个图像分割成若干个 ROI 区域, 每个 ROI 区域对应一个散射

中心的响应,然后依次对每个 ROI 区域用最大似然估计法得到参数 θ_i ,直到所有的 ROI 区域都被处理完。很明显,这种基于图像域的估计方法每次只需处理一个散射中心,因此大大降低了估计问题的复杂性。

具体来说,这种基于图像域的散射中心估计方法主要包括以下 4 个步骤:图像分割、模型类别选择、参数初值选择和参数优化。

3.1 图像分割

首先要对 SAR 图像进行图像分割:分割的目的是为了得到目标单个散射中心响应能量较高的 ROI 区域,然后对该 ROI 区域进行散射中心参数估计。

选取分水岭分割算法^[4-5]对 SAR 图像进行分割。实验结果表明,SAR 图像经过分水岭算法分割,能有效避免单个分布散射中心被分割到多个 ROI 区域中的情况;另外,在成像过程中加窗和散射响应中噪声会引起“波纹”,“波纹”中存在小的峰值,使用分水岭分割算法,可以有效地将这些小的峰值划分到一个区域中,从而使得整个响应被分割到同一个区域中。

3.2 模型类别选择

SAR 图像在经过分割之后,得到一组 ROI 区域,我们认为每一个 ROI 区域中都包含着单个散射中心:局部散射中心或分布散射中心。这里,采用文献[7]~[9]的方法,利用小区段围绕垂直和水平轴的惯量矩来对每个 ROI 区域中的散射中心分类。

3.3 参数初值选择

在确定了模型类别及阶次之后,就要开始对 ROI 区域中的散射中心进行参数估计。由于采用最大似然估计方法,该方法需要迭代运算各个参数,因此需要对各参数的初值进行选择,目的是为了后续参数优化过程能够快速且准确地迭代得到参数终值。

3.3.1 x 和 y 参数的初值选择

对于 x 和 y 参数,可以利用模型类别选择过程得到的区域的质量中心来作为它们的初值。

3.3.2 参数 ϕ'_i 和 L 的初值选择

对局部散射中心而言,参数 ϕ'_i 和 L 等于 0;对于分布散射中心,这两个参数的初值可以根据模型的数学特性来估计,具体估计方法如下:

在分布散射中心的 7 个参数中, $\gamma = 0$,因此,属性散射中心模型可以简化为

$$E_i(f, \phi; \theta_i) = A_i \left(\frac{jf}{f_c} \right)^{\alpha_i} \cdot \exp \left\{ \frac{-j4\pi f}{c} (x_i \cos \phi + y_i \sin \phi) \right\} \cdot \operatorname{sinc} \left[\frac{2\pi f}{c} L_i \sin(\phi - \phi') \right] \quad (7)$$

对该模型取幅度,可以得到:

$$|E_i(f, \phi; \theta_i)| = \left| A_i \left(\frac{jf}{f_c} \right)^{\alpha_i} \cdot \operatorname{sinc} \left[\frac{2\pi f}{c} L_i \sin(\phi - \phi') \right] \right| \quad (8)$$

对于固定频率 f ,式(8)是一个 $|\operatorname{sinc}(\cdot)|$ 函数的形式,当 $\phi = \phi'$ 时,即当 $\phi' = \arctan(f_y/f_x)$ 时,频率域数据取得极大值。

根据 $|\operatorname{sinc}(\cdot)|$ 函数的主瓣宽度可以得到 L 的初值估计。对于 $|\operatorname{sinc}(\cdot)|$ 函数的主瓣,可以用 Taylor 展开式将其近似为二次函数的形式:

$$\operatorname{sinc} \left[\frac{2\pi f}{c} L_i \sin(\phi - \phi') \right] \approx 1 - \frac{1}{6} \left(\frac{2\pi L}{c} \right)^2 \cdot (f \sin(\phi - \phi'))^2 \quad (9)$$

然后用抛物线 $f(v) = 1 + av^2$ 去拟合主瓣,就可由参数 a 解出 L 。

3.3.3 参数 γ 的初值选择

在原始模型中给出的 γ 的数量级很小(10^{-10} 左右),一般情况下,选择参数 γ 的初值为 0。在参数优化过程中要想对 γ 进行精确估计是不太可能的。因此,有必要对原始模型做些改进,使参数 γ 便于迭代估计。令 $\gamma_p = \gamma \cdot 4\pi f_c \cdot \sin(\phi_m/2)$,则原始模型变形为

$$E_i(f, \phi; \theta_i) = A_i \left(\frac{jf}{f_c} \right)^{\alpha_i} \cdot \exp \left\{ \frac{-j4\pi f}{c} (x_i \cos \phi + y_i \sin \phi) \right\} \cdot \operatorname{sinc} \left[\frac{2\pi f}{c} L_i \sin(\phi - \phi') \right] \cdot \exp \left(\frac{-f_y \gamma_p}{2f_c \sin(\phi_m/2)} \right) \quad (10)$$

这样处理的结果使得将估计 γ 的问题转化为估计 γ_p 的问题,而 γ_p 的数量级为 10^{-1} ,因此大大提高了迭代估计的准确度。同样,参数 γ_p 的初值设置为 0。

3.3.4 参数 α 和 A 的初值估计

参数 α 可能取值有 5 个, $\alpha \in [-1, -0.5, 0, 0.5, 1]$,但在高频区, $\alpha < 0$ 的散射响应是很弱的,在实际应用中可以忽略。据此,可认为 α 的取值为 $\{0, 0.5, 1\}$ 。

参数 A 是线性的,所以用线性最小二乘方法来估计 A 。假定模拟图像和测量数据的关系是 $A \cdot \bar{M} + \bar{N} = \bar{D}$ 。

其中, \bar{M} 表示区域上模拟数据的向量, \bar{D} 表示区域上的测量数据, \bar{N} 是噪声向量。 A 的最小二乘估计为

$$\hat{\mathbf{A}} = (\overline{\mathbf{M}^H \mathbf{M}})^{-1} \overline{\mathbf{M}^H \mathbf{D}} \quad (11)$$

在上述其他参数的初值都选择好后,将幅度设定为 1,分别将由于参数 α 的 3 个可能值代入模型中,从模型中产生一幅 SAR 图像。利用该 SAR 图像与原始 SAR 图像 ROI 区域中对应数据的关系,最小二乘得到 \mathbf{A} 。然后分别计算 3 组可能的 α 和 \mathbf{A} 值对应的代价函数,选择最小代价函数对应的 α 和 \mathbf{A} 作为估计的初值。

应该注意的是,虽然对参数 α 和 \mathbf{A} 的初值进行了估计,但是参数 α 和 \mathbf{A} 终值的确定并不依靠迭代完成。迭代过程只迭代其他几个参数。在迭代得到其他参数的终值后,再用估计 α 和 \mathbf{A} 初值的方法来估计其终值。

3.4 参数优化

为了达到更高的参数估计精度,采用最大似然估计方法对已经初始化的参数进行优化,该方法本质上就是迭代运算已经初始化的参数,最终目的是要使得在所估计的 ROI 区域中,原图像的幅值跟用该组参数模拟得到的幅值能最大程度的匹配。具体的估计方法如式(7)所示,利用参数初值选择步骤得到的各参数初值作为初始值代入属性散射中心模型中进行成像,并从所成像中找出与原图像相对应的 ROI 区域,比较利用参数初值成像的 ROI 区域数据与原图像中 ROI 区域数据,若两幅图像 ROI 区域数据差距较大,则在一定范围内对参数初值进行调整,用调整之后的参数再次进行上述的成像及比较操作,直到利用估计参数所成像的 ROI 区域数据与原图像的 ROI 区域数据相接近为止。参数优化过程采用二次三次混合搜寻过程的 BFGS Quasi-Newton 方法迭代实现。

4 仿真实验

以 MSTAR (moving and stationary target acquisition and recognition) 数据的成像参数为依据,选取属性散射中心模型的成像参数如下:

$f_c = 10 \text{ GHz}$, $B = 500 \text{ MHz}$, $\phi_m = 2.86^\circ$, 距离向分辨率为 $R_x = 0.3 \text{ m}$, 方位向分辨率为 $R_y = 0.3 \text{ m}$, 补零前图像大小为 84×84 , 选取的窗函数为 -35 dB 的泰勒窗。按照 MSTAR 成像流程,最终得到一个 128×128 图像。模拟产生如表 1 所示的 4 个散射中心(两个局部散射中心,两个分布散射中心),假定频率域噪声是高斯白噪声,信噪比假定为 -5 dB 。频域信噪比的定义与文献[8]相同。

根据前面介绍的散射中心参数提取方法,对模拟的散射中心进行特征提取,得到如表 2 所示的散射中心参数估计值,然后分别由模拟的和估计得到的散射中心参数值成像,得到两幅 SAR 图像,如图 1 和图 2 所示。

表 1 模拟的散射中心参数取值
Tab. 1 Simulated scattering centers

散射中心	A	x (m)	y (m)	α	γ_p	L (m)	$\phi'(^{\circ})$
l_1	4	-1.5	1.5	1	0	—	—
l_2	3	0	0	0	0.4	—	—
d_1	7	2.8	-2.8	0.5	—	1.2	0.17
d_2	6	3	1.6	1	—	0.85	0.8

表 2 估计得到的散射中心参数值
Tab. 2 Estimated scattering centers

散射中心	A	x (m)	y (m)	α	γ_p	L (m)	$\phi'(^{\circ})$
l_1	3.997 6	-1.575	1.541 4	1	0	—	—
l_2	3.078 5	4.434 * e-005	0.004 891 3	0	0.371 83	—	—
d_1	6.928 3	2.815	-2.790 5	0.5	—	1.166 5	—
d_2	6.458 4	3.043 4	1.568 9	0.5	—	1.004	—

从实验结果可以看出,利用该方法估计得到的 \mathbf{A} , x 和 y 是比较准确的,但是对于 α , γ_p , L , ϕ' 这几个

参数的估计有时可能产生较大误差。研究发现,估计误差主要是出现在参数优化过程中,由于优化过

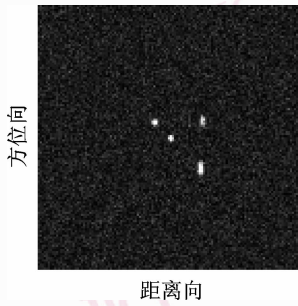


图 1 模拟的 4 个散射中心的含噪 SAR 图像

Fig. 1 Simulated SAR image of four scattering centers

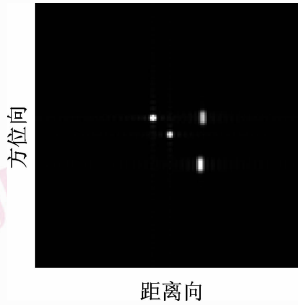


图 2 根据估计得到的参数重建的 SAR 图像

Fig. 2 Reconstructed SAR image with estimated scattering centers

程用到的迭代运算陷入局部最优解引起,通过调整优化函数的参数能改善这情况。

实验结果表明,本文的散射中心特征提取方法是可行的,它对各属性参数的估计还是相当准确的。

5 结 论

本文基于属性散射中心模型,给出了高分辨率 SAR 图像属性散射中心特征参数的提取方法,并用仿真实验证明了该算法的有效性。如果将该算法用于实际 SAR 图像中,需要对该算法中图像分割算法稍做改进,使之能准确地获得散射中心所在的 ROI 区域。目前这方面的工作还正在研究中。

参考文献 (References)

- Potter Lee C, Moses Randolph L. Attributed scattering centers for SAR ATR [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6 (1) : 79-91.
- Michael J. Gerry. Two-Dimensional Inverse Scattering Based on the GTD Model [D]. Columbus, OH, USA: The Ohio State University, 1997.
- Akyildiz Y, Moses R L. A Scattering Center Model for SAR Imagery [A]. In: Proceedings of SPIE SAR Image Analysis, Modeling and Techniques 1999 [C], Florence, Italy, 1999: 3869:76-85.
- Rafael C Gonzalez. Digital Image Processing [M]. Second Edition, Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. [冈萨雷斯. 数字图像处理 [M]. 第二版, 北京: 电子工业出版社, 2003.]
- Koets Michael A, Randolph Moses L. Feature extraction using attributed scattering center models on SAR imagery [A]. In: Proceedings of SPIE Conference on Algorithms for SAR Imagery VI [C], Florida, America, 1999, 3721: 104-115.
- Potter Lee C, Chiang Da-ming, Carriere Rob, et al. A GTD-Based parametric model for radar scattering [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1995, 43 (10) : 1058-1067.
- Liu Yong-jun, Ge De-biao, Zhang Zhong-zhi, et al. The theory of attributed scattering centers [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18 (5) : 559-563. [刘拥军, 葛德彪, 张忠治等. 有属性的散射中心理论及应用 [J]. 电波科学学报, 2003, 18 (5) : 559-563.]
- Ji Ke-feng, Kuang Gang-yao, Su Yi, et al. Research on the extraction method of the scattering center feature from SAR imagery [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2003, 25 (1) : 45-50. [计科峰, 匡纲要, 粟毅等. 基于 SAR 图像的目标散射中心特征提取方法研究 [J]. 国防科技大学学报, 2003, 25 (1) : 45-50.]
- Jiang Wei-dong, Chen Zeng-ping, Zhuang Zhao-wen. A Study of Radar target scattering center extracted and its recognition method in optical region. Systems Engineering and Electronics [J], 2000, 22 (7) : 72-74. [姜卫东, 陈曾平, 庄钊文. 光学区雷达目标散射中心提取及识别方法研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22 (7) : 72-74.]
- Ye Wei, Wu Yan-hong. Estimation of parameters in 2-D model of the target scattering center [J]. Journal of Institute of Command and Technology of Equipment, 2002, 13 (2) : 68-72. [叶伟, 吴彦鸿. 目标二维像散射中心模型中的参数估计 [J]. 装备指挥技术学院学报, 2002, 3 (2) : 68-72.]