

基于合成孔径雷达回波数据的海岸线提取方法*

陆立明¹⁺, 王润生¹, 李武皋²

¹(国防科学技术大学 ATR 重点实验室, 湖南 长沙 410073)

²(江南遥感应用研究所, 上海 200072)

A Method of Coastline Extraction from Synthetic Aperture Radar Raw-Data

LU Li-Ming¹⁺, WANG Run-Sheng¹, LI Wu-Gao²

¹(ATR National Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

²(Jiangnan Institute of Remote Sensing Application, Shanghai 200072, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-731-4573468, E-mail: lm-lu@163.com, <http://www.nudt.edu.cn>

Received 2003-03-07; Accepted 2003-11-11

Lu LM, Wang RS, Li WG. A method of coastline extraction from synthetic aperture radar raw-data. *Journal of Software*, 2004,15(4):531~536.

<http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/531.htm>

Abstract: As a kind of imaging radars, synthetic aperture radar (SAR) improves its resolution by means of moving and emitting pulse repetitiously. The issues about target detection of SAR are often a 'post-process' of the SAR imaging. A method for coastline extraction in the state of non-imaging based on analyzing the typical algorithms of SAR imaging and target detection is presented in this paper. Experimental results indicate the validity of the algorithm for coastline extraction. The algorithms are simple, able to recurrent, and easy for real-time processing and hardware implementation.

Key words: synthetic aperture radar (SAR); coastline extraction; target detection

摘要: 合成孔径雷达(synthetic aperture radar,简称 SAR)通过对地面目标的多次照射来提高方位向上的目标分辨能力,由此使现有的 SAR 目标检测算法通常是一个基于 SAR 图像的“后处理”过程.在分析各种成像算法和现有的一些典型 SAR 目标检测算法的基础上,提出了一种在非成像状态下进行海岸线提取的新方法,把成像处理与目标检测问题有机地结合起来.通过真实星载 SAR 回波数据应用实验,证明了直接利用 SAR 回波对海岸线检测的有效性.

关键词: 合成孔径雷达;海岸线提取;目标检测

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

基于合成孔径雷达(synthetic aperture radar,简称 SAR)数据的目标检测问题是 SAR 数据应用的一项重要内容.SAR 作为一种全天候、全天时、主动式的遥感手段,特别是对于星载 SAR,具有覆盖范围广、相对成本较低

*作者简介: 陆立明(1966—),男,浙江萧山人,博士生,主要研究领域为 SAR 信号处理,图像理解,目标识别研究工作;王润生(1941—),男,教授,博士生导师,主要研究领域为图像分析与理解,模式识别,信息融合;李武皋(1946—),男,研究员,博士生导师,主要研究领域为雷达信号处理,电子对抗.

的优势,被广泛地应用于环境监测、资源调查和军事目的.近些年来,利用 SAR 数据,在目标检测(如舰船)、海岸线提取等方面已经取得了一些成果,但由于 SAR 作为一种成像雷达,不同于传统的脉冲雷达,其复杂的成像机理使得基于 SAR 的目标检测问题通常要在完成成像处理之后来进行,直接基于 SAR 回波数据的目标检测问题仍然具有相当的挑战性.

在充分研究成像机理和 Range-Doppler,Chirp-Scaling 及波数域等几种典型的成像算法的基础上,结合具体的目标特征,我们开展了基于 SAR 回波数据的目标检测方法研究.通过分析成像过程中的数据特征,试图建立高效、续贯、实时性较好的目标发现和监测方法.文献[1]在距离多卜勒域(RDD)上成功地实现了对 3 类目标的分类检测,并利用真实星载 SAR 信号进行地面强散射点的检测和定位.在此基础上,本文提出了一种基于方位向子孔径相关和 RDD 域散射能量特征相结合的海岸线提取方法,通过对 ERS-2 星载 SAR 数据的实验,获得了令人满意的结果.

1 相关算法介绍

在 SAR 目标检测、识别领域,前人已经做了许多卓有成效的研究,形成了许多实用算法,特别是近几年,随着星载 SAR 成像分辨率的提高,SAR 目标识别问题更是 SAR 应用的一个热点.综观这些目标检测方法,按其处理对象的不同,可以分为两类:一类是基于 SAR 图像的目标检测方法^[2-5],另一类则是综合 SAR 的成像机理,基于 SAR 回波数据的目标检测方法^[1,6-9].其中,第 1 类方法,主要依赖于目标自身的后向散射特征和图像的几何、纹理特征.这方面的研究相对比较成熟,其缺陷是使目标的检测问题成为一个“后处理”过程,不能满足对实时性要求较高的应用,并且目标的特征和检测结果也因获取 SAR 图像的所采用的成像算法的不同而有所区别.对于后一类方法,研究工作尚处在探索阶段,近几年,有少数学者做了一些开拓性的工作,提出了一些新的目标检测方法,目前的不足之处是被检测的目标结构相对简单,并对环境有一定的依赖性.本文提出的海岸线检测方法属于后一类方法,为方便读者分析、比较,下面我们先对与本文有关的算法进行简单介绍,在第 2 节中将完整阐述基于 SAR 回波数据的海岸线提取方法.

相干斑(speckle)噪声是 SAR 图像的一个特点,基于 SAR 图像的目标检测方法大多借用光学遥感图像的目标检测思想,并针对这一特点开展研究工作.V.P. Onana 等人^[3]通过对 SAR 图像的纹理分析,提出使用多分辨纹理(TMR)和多分辨几何(GMR)特征检测海岸线,其中 TMR 采用 11×11 窗口计算一阶纹理量 TM,包括均值、方差、能量、熵、对比度和梯度.GMR 采用小波包分解 $\omega_k(i, j)$,再计算能量 $E = \sum_i^{N_i} \sum_j^{N_j} |\omega_k(i, j)|$,综合这两类特征确定海岸线.Giancarlo BO 等人^[4,5]以模糊理论为基础,提出了图像的“ χ -连通性”概念,定义点 i 的 χ -连通性 $C_x^a(i)$ 为

$$C_x^a(i) = 1 - \min_{p(a,i)} \left[\max_{z \in p(a,i)} |\mu(z) - \mu(a)| \right] \quad (1)$$

式中 $\{\mu(i)\}$ 为由 SAR 图像构筑的模糊域, $p(a,i)$ 表示点 a 到 p 的路径, z 是 $p(a,i)$ 上的一个点,算法根据 χ -连通性和灰度共生矩阵(GLCM)的特征(均值、方差、能量和对比度)检测海岸线.

获取地面某一点的完整信息,合成孔径雷达要经历一个较长的周期.以 ERS 为例,天线的波瓣宽度约为 4.3Km(3Db),卫星速度约 6.6Km/s,地面上一个点目标要经历约 0.65s 的脉冲照射,目标信息被弥散在整个雷达孔径中.因此,基于 SAR 回波数据的目标检测方法变得非常复杂,特别是对于非点目标的检测仍然是一个难题.Alain A^[9]提出了一种利用 SAR 回波数据检测海上舰只的方法,假设舰船的尺寸大于两倍的图像分辨率,用舰船在回波中的相位相关性,对同一组回波数据通过偏离真实的多卜勒中心频率构成不同的 SAR 图像,应用 SAR 干涉的思想检测海上舰只.Masato Iehara 等人^[8]则构造了二维互相关函数 $CCF(x,y)$,利用子孔径互相关思想检测海上舰船, $CCF(x,y)$ 被定义为

$$CCF(x, y) = \iint f_1(X, Y) f_2(X + x, Y + y) dX dY \quad (2)$$

其中 $f_1(X, Y)$, $f_2(X, Y)$ 代表两个子孔径图像.根据二维互相关函数的峰值分割,得到待检测的舰船目标. Paulo A^[6]则从目标对多卜勒参数影响的角度提出了一种基于 SAR 回波数据的运动目标检测方法.通过限定目标的运动参数,分析运动目标在回波数据距离压缩后,对方位向多卜勒参数的影响,在距离多卜勒域上检测设定

目标.

2 基于 SAR 回波的海岸线检测方法

2.1 基本原理

对于星载 SAR 数据而言,地面目标回波经距离压缩后,在距离“走廊”上已经获得了聚焦,但在方位向上仍然混迭在一起.为数学表达方便,以下我们采用点目标的回波进行理论分析.

假设雷达发射的是线性调频脉冲信号,在实际系统中,为了降低采样频率,总是要经过混频、正交通道分离并转化为复基带信号下发,此时,点目标回波可以表示为

$$\hat{v}_r(s, t) = \exp\left[-\frac{j4\pi R(s)}{\lambda}\right] \exp\left\{j\pi K\left[t - \frac{2R(s)}{c}\right]^2\right\}, \quad \left|t - \frac{2R(s)}{c}\right| \leq \frac{\tau_p}{2} \quad (3)$$

其对应的频谱是

$$\hat{V}_r(s, f) = |K|^{-1/2} \exp\left[j\frac{\pi}{4} \text{sgn}(K)\right] \exp\left[-\frac{j4\pi R(s)}{\lambda} - \frac{j4\pi R(s)}{c} - j\frac{\pi f^2}{K}\right] \quad (4)$$

其中 $|f| \leq B_R/2$, B_R 为调频带宽; s 为“慢时间”, t 为“快时间”.

距离压缩也即回波通过线性调频信号的匹配滤波器,则对应频谱为

$$\hat{G}(s, f) = \exp\left[-\frac{j4\pi R(s)}{\lambda}\right] \exp\left[-\frac{j4\pi f R(s)}{c}\right], \quad |f| \leq B_R/2 \quad (5)$$

相应的时域响应是

$$\hat{g}(s, t) = B_R \exp\left[-\frac{j4\pi R(s)}{\lambda}\right] \text{sinc}\left\{\pi B_R\left[t - \frac{2R(s)}{c}\right]\right\} \quad (6)$$

令 $t = 2R/c$, 式(4)可表示为

$$\hat{g}(s, R) = B_R \exp\left[-\frac{j4\pi R(s)}{\lambda}\right] \text{sinc}\left\{\frac{2\pi B_R}{c}[R - R(s)]\right\} \quad (7)$$

由式(7)可知,对于点目标而言,在距离多卜勒域上,在距离向可以直接利用信号功率作一维雷达目标检测判决,在方位向上, $\text{sinc}(\cdot)$ 函数实际上就是天线的方位图,如图 1 所示.如果把式(5)用 RDD 图像表示,它是一条斜率依赖于距离陡动的线段.

SAR 信号方位向上的某一频率成分反映了来自某特定方向上的目标的后向散射特性,对方位谱的分组带通滤波可以刻画出目标在不同历程上的子视图像,它们之间存在着相关性,而这种相关性又与地面目标的特性有着密切的关系.对于海洋,包括有巨浪存在的洋面,表面相对均匀,且时变特性明显,不同子视间的相关性较弱.而对于陆地,综合目标的 RCS 相对于 SAR 的几何分辨率要大得多,且时变特性不明显,不同子视间的相关性较大.这一性质为我们检测和定位海岸线提供了直接证据.

另一方面,在 SAR 的成像过程中,多卜勒参数的估计精度会直接影响 SAR 图像的成像质量,传统的杂波锁定和自动聚焦算法就源于 SAR 的方位谱信息.它们的估计精度受地物特征的影响,杂波锁定希望地面相对均匀(如海洋),自动聚焦则期望地物有如角反射器等强散射目标,这一信息为本文检测海岸线提供了又一个技术依据.

结合我们在前期的研究工作中^[1]对不同地物类型在 RDD 域上的分类特性的分析,本文在此基础上进行了能量计算和能量中心检测,作为海岸线检测的特征参量之一,进一步提高了判决的正确性和定位精度,形成如图 2 所示的基于 SAR 回波数据的海岸线检测方法.

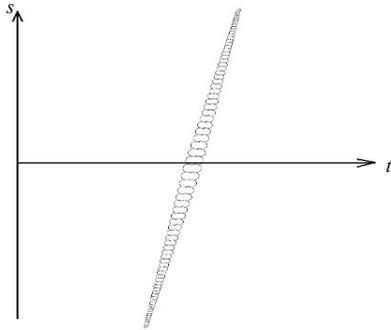


Fig.1 Features of a target in RDD image
图1 点目标在 RDD 图像上的特征

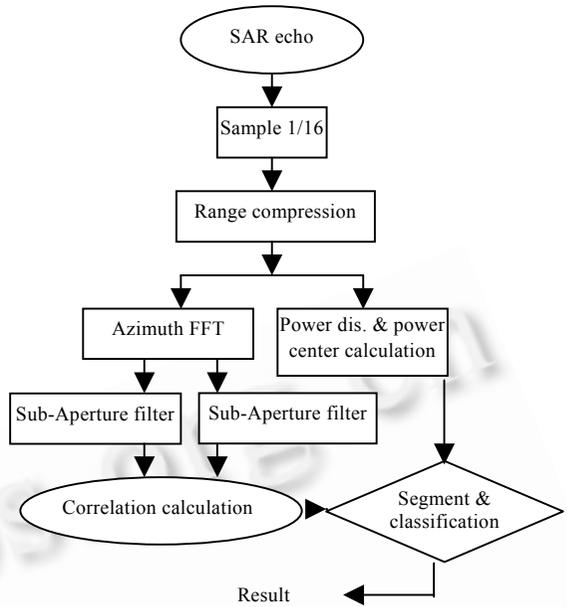


Fig.2 The flow chart of coastline extraction
图2 基于回波的海岸线检测算法框图

2.2 特征提取

针对 SAR 目标的检测问题,本文考虑的源数据对象和检测对象与前一节中介绍的几种典型的 SAR 目标检测算法情况不同,在特征选取方面,我们构造了以下两个全新特征量作为海岸线检测的直接证据.

- 距离-多卜勒方向能与能量中心

对于某一距离门 x ,方向能为

$$p(x) = \int_{-1/2,prf}^{1/2,prf} RDD(x + \Delta x, s) T^*(s) ds \tag{8}$$

其中, $\Delta x = -\lambda(f_{dc0} + xf_{dc1})s / prf$ 为距离徙动量, $T(s)$ 为天线方向图, $RDD(x, s)$ 为距离多卜勒域上的处理结果, s 为“慢时间”.

能量中心可根据方位谱的包络确定.

- 子孔径相关函数特征

$$C(t, \tau) = \int_0^{1/4,prf} L_1(t - \lambda f_{dc} s / 2, s - \tau / 2) L_2^*(t + \lambda f_{dc} s / 2, s + \tau / 2) ds \tag{9}$$

其中, t 为“快时间”, s 为“慢时间”, τ 根据子孔径的划分确定, L_1 和 L_2 分别为两个子视方位谱的滤波结果.

2.3 特性分析

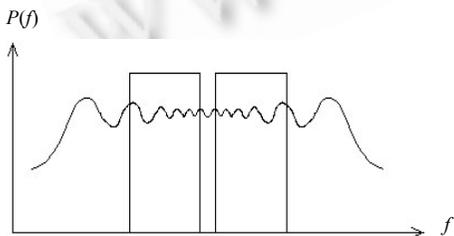


Fig.3 Azimuth spectra and filters
图3 方位谱与滤波窗

在距离多卜勒域上,地面一点目标的响应可以描述为

$$\hat{g}(s, t) = B_R \exp\left[-\frac{j4\pi R(s)}{\lambda}\right] \text{sinc}\left\{\pi B_R \left[t - \frac{2R(s)}{c}\right]\right\} \tag{10}$$

其中 $R(s) = R_c - \frac{\lambda}{2} \left(f_{dc} s + \frac{f_r s^2}{2}\right)$, 如果我们把距离走动

问题引入到相关计算时考虑,那么,它在方位向上的谱可以利用相位驻定原理求得:

$$P(f) = |f_r|^{-1/2} \exp\left[j\pi \left(\frac{1}{4} \text{sgn}(f_r) - \frac{(f - f_{dc})^2}{f_r}\right)\right] \tag{11}$$

本文采用如图 3 所示子孔径滤波窗对方位谱进行滤波,对于不同的地面特性,滤波结果的相关性表现出不

同的曲线,图 4 显示出典型海洋和陆地的相关函数特性.

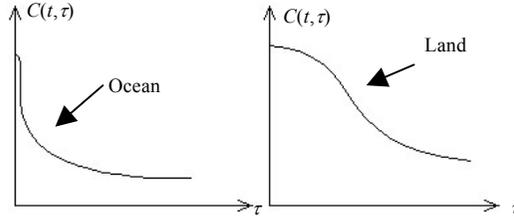


Fig.4 Azimuth spectral correlation
图 4 方位谱子孔径相关函数

3 实验与结果

我们将 ERS-2 数据应用于本文算法,数据参数见表 1.实验中,方位向相关计算窗为 126 点,方位谱窗滤波通带分别为 $[0.2\pi, 0.7\pi]$ 和 $[1.6\pi, 0.1\pi]$,图 5(a)为 RDD 图像,图 5(b)为对应区域回波数据经 Chirp-Scaling 算法处理后的 SAR 图像,由于 ERS 方位向孔径约为 1 000 行,为方便显示,RDD 图像用了 2 倍于 SAR 图像的采样率,实际显示的区域较大.为了便于比较,图 6(a)、图 6(b)分别为经方位压缩后的前视和后视子孔径图像,在海岸线的检测过程中,算法本身并不需要进行方位向的压缩处理,图 6(c)为被检测的海岸线图像.图 7 是应用本文算法对另一区域 ERS 数据进行实验的情况,为节省篇幅,图中仅给出了成像后的 SAR 图像和检测的海岸线图.

就 SAR 的成像算法而言,为了保证 SAR 图像的几何分辨率,必须充分利用完全孔径的回波数据.本文的研究对象是海岸线的检测,使用不完全孔径信息,实验中,我们对回波数据在方位向和距离向分别作 1/4 采样,海岸线得到准确的检测,且大大提高了检测的处理速度.

Table 1 SAR parameters
表 1 星载 SAR 数据参数

Photographic time	Band width (MHz)	Frequency Doppler centre (Hz)	Band	Sample freq. (MHz)	Pulse repeat frequency (Hz)	Frequency Doppler rate (Hz)	Wave length (cm)
1997-3-27	15.55	126.01	C	18.96	1681.25	-2152.01	5.66



Fig.5 RDD image and SAR image with CSA

图 5 RDD 图像和 CS 算法成像后的 SAR 图像

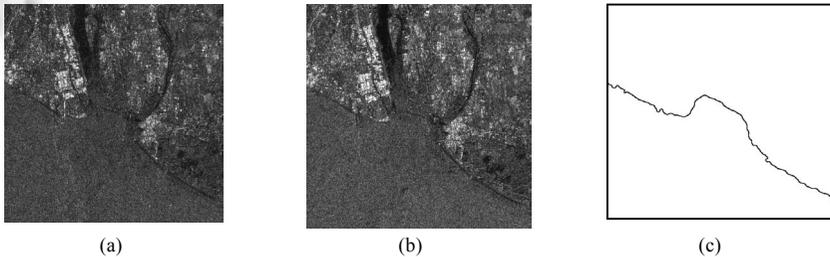


Fig.6 Coastline extract from forward and backward sub-aperture image

图 6 前、后视子孔径成像及检测的海岸线

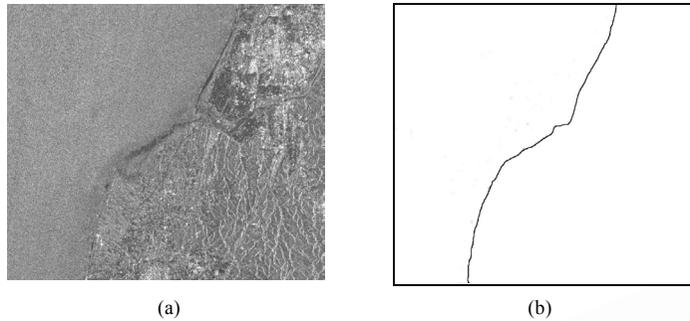


Fig.7 Comparison coastline extracted with SAR image
图7 SAR 图像和海岸线检测结果对照区域之二

4 结 论

本文在研究各类 SAR 成像算法和分析地面目标在成像过程中的数字特征的基础上,综合前期关于目标在 RDD 域上特征的研究成果,提出了一种基于方位向子孔径相关和 RDD 域散射能量特征相结合的海岸线提取方法,通过对真实星载 SAR 数据进行实验,成功地提取了海岸线,算法以 SAR 回波为处理对象,为实时应用提供了有意义的技术方法.当然,海岸线的提取在基于回波的 SAR 目标检测方面只迈出了微小的一步,直接利用 SAR 回波进行复杂目标的检测将作为本文未来研究的技术方向.

References:

- [1] Lu LM, Wang RS, Li WG. A target detection method in range-Doppler domain from SAR Echo data. In: Proc. of the 16th Int'l Conf. on Pattern Recognition (ICPR). 2002,1:91~94.
- [2] Lu LM, Wang RS. SAR regional object detection based on multi-scale features. In: Petrou M, ed. Proc. of the 2nd Pattern Recognition for Remote Sensing Workshop (PRRS). 2002. 90~93.
- [3] Onana VP, Mvogo J, Trebossen H, Rudant JP. Coastline detection in SAR images using texture analysis in textural or geometrical multi-resolution. In: Proc. of the IEEE 2001 Int'l Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS 01). Sydney, 2001.
- [4] Giancarlo B, Silvana D, Raimondo D. Semiautomatic coastline detection in remote sensing images. In: Proc. of the IEEE 2000 Int'l Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS 00). Hawaii, 2000.
- [5] Giancarlo B, Silvana D, Raimondo D. Coastline extraction in remote sensing images by means of textures analysis. In: Proc. of the IEEE 2001 Int'l Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS 01). Sydney, 2001.
- [6] Marques PAC. Efficient detection and ground mapping of selected moving targets using SAR raw-data. In: Proc. of the IEEE 1999 Int'l Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'99). Hamburg, 1999.
- [7] Fienup JR. Detecting moving targets in SAR imagery by focusing. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 2001,37(3): 794~809.
- [8] Iehara M, Ouchik K, Takami I, Morimura K, Kumano S. Detection of ships using cross-correlation of split-look SAR images. In: Proc. of the IEEE 2001 Int'l Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS 01). Sydney, 2001.
- [9] Alain A. Ship detection by SAR interferometry. In: Proc. of the IEEE 1999 Int'l Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'99). Hamburg, 1999.