

# 图像分解和区域保护在 SAR 图像压缩中的应用

张 军 黄英君 代科学 李国辉

(国防科技大学信息系统与管理学院,长沙 410073)

**摘 要** 在机载通信链路带宽有限的条件下,SAR 图像的有损压缩是解决实时性和带宽限制的可行方案。提出了一种基于图像分解的敏感目标区域自动提取与保护的 SAR 图像压缩策略。首先将 SAR 图像分解为结构分量和纹理分量,然后在纹理分量中对包含潜在目标的区域进行检测,生成敏感目标区域掩码,最后对潜在目标区域进行保护性的低损压缩,对背景区域进行高损压缩。实验结果表明,恢复后的图像与标准的 JPEG2000 算法相比在同样的码率条件下具有更好的视觉效果。

**关键词** 图像分解 自动目标识别 图像压缩 全变分

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)01-0003-05

## Decomposing SAR Image and Protecting Target Region for Compression

ZHANG Jun, HUANG Ying-jun, DAI Ke-xue, LI Guo-hui

(Department of System Engineering, School of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

**Abstract** The bandwidth restricts airborne communication, so compression airborne SAR image with loss is a feasible way to enhance the real-time performance and image quantity. This paper proposed a SAR image compression strategy which extracts and protects target regions based on image decomposing technology. Firstly, the SAR image is decomposed into structure component and texture component. Then the target information is detected and classified from the texture component to construct ROI mask. Finally, the ROI mask is used to protect the important target information during compression by allocating more bits to it while reducing bit allocation to the residual. The experimental results indicate that the reconstructed image using the proposed approach has better visual effect than those processed by JPEG2000 arithmetic under the same bit rate.

**Keywords** image decomposing, automatic target recognition, image compression, total-variation

## 1 引 言

近年来,伴随着 SAR 系统获取技术的日臻完善,高速,大容量数据的传输和存储随着各领域图像信息需求的增加而成为 SAR 系统必须考虑的关键问题之一。其中通过数据压缩,在尽可能保持图像质量的情况下,得到尽可能高的压缩比的算法一直

是研究的焦点。SAR 图像像素之间相关性较小,以去像素间相关性为机理的压缩方法不适合用来压缩 SAR 图像,单纯使用传统意义上的以去除图像相关性为目标的压缩技术在对 SAR 图像进行压缩时也很难获得性能上的突破<sup>[1-7]</sup>。目前新的基于图像内容的智能压缩方法获得了广泛的关注, Nasser 提出了一种低比特率压缩机制<sup>[8]</sup>,对 SAR 图像使用 ATR 方法进行目标片与背景图像的分割,对背景图像使

基金项目:“十一五”部委级预研项目(203010203)

收稿日期:2007-07-09;改回日期:2007-11-26

第一作者简介:张军(1975 ~ ),女,副教授。2008 年于国防科技大学获控制科学与工程专业博士学位。主要研究方向为多媒体信息系统,数字图像处理、信号处理等。发表论文 20 余篇。E-mail: aiyao215@hotmail.com

用 PRVQ(predictive residual vector quantization) 预测残差矢量化, 进行高倍率的压缩, 对目标区域使用无损压缩, 使得 SAR 图像的传输能够在 1.5 M 的信道中实时进行。对于数据链带宽仅为 200 KB 左右的应用中, 需要进行更高倍率的压缩才能够满足传输需求。这要求对图像中的目标区域进行更加准确的识别以实现更加有效的比特率分配, 并引入多尺度几何编码 Bandelet 变换来提高对图像中边缘和轮廓等关键特征的编码能力。为此, 本文提出了一种基于纹理分量中敏感特征自动提取与保护的 SAR 图像压缩策略。

## 2 基于图像分解和目标区域保护的 SAR 图像压缩方法

图像分解是图像处理中的一个重要方法, 在近年来出现的图像压缩新机制也有应用<sup>[9]</sup>。基于全变分的图像分解技术能有效分解和保持图像的纹理特征信息, 首先将原始 SAR 图像分解为结构分量和纹理分量, 然后针对纹理分量子图, 利用 Gabor 滤波器实现敏感目标区域的自动分割, 检测出包含潜在人造目标的区域, 最终通过形态学处理生成感兴趣区域掩码用于不同策略的压缩。

### 2.1 纹理分量的全变分分解

图像分解的目的是为了进行敏感特征检测和压缩编码, 为满足敏感特征检测的需求, 分解出来的主要图像分量能够包含足够的图像敏感信息, 如图像的边缘信息、轮廓信息和区域信息, 并能够减少噪声和杂波的干扰, 提高对典型地物目标的识别能力。

设定图像  $f$  为有边界且连续的 Lipschitz 开放集  $\Omega, I \subset L^\infty(\Omega), I$  有边界, 同样  $I \subset L^2(\Omega)$ 。令  $u$  为分解后的大尺度结构分量,  $v$  为分解后的小尺度细节分量, 则:  $f = u + v$ 。令  $u \in L^1(\Omega)$  并且  $\int_{\Omega} |I - u| < \infty$ , 则  $u \in BV(\Omega), BV(\Omega)$  为 Banach 空间。

分解的约束条件是对下式进行求解<sup>[10]</sup>:

$$\min \{ \|s(u)\|_A + \|t(u, f)\|_B \leq \sigma \} \quad (1)$$

其中,  $s(\cdot)$  和  $t(\cdot, \cdot)$  为空间中的函数,  $\|\cdot\|_A$  和  $\|\cdot\|_B$  为范数。通过选择合适的  $\|\cdot\|_A$  和  $s(\cdot)$ , 使得  $\|s(u)\|_A$  对于分解出的  $u$  分量极小而对于噪声分量  $v$  极大。通常将上式等价为

$$\inf F(u) = \int_{\Omega} |\nabla u| + \lambda \int_{\Omega} |I - u| dx dy \quad (2)$$

等式右侧第 1 项为消除噪声和细节后的正则项, 第 2 项为保真项。对于图像, 令  $I \in \mathbf{M}^{N \times N}$ , 则满足  $I_{i,j} = u_{i,j} + v_{i,j}$ 。Yin 提出了一种基于二阶锥规划 (SOCP) 的变分求解方法<sup>[11]</sup>用于图像的分解。定义  $u$  的全变分为

$$TV(u) = \sum_{1 \leq i,j \leq n} \|\partial^+ u_{i,j}\| \quad (3)$$

式中,  $\|\cdot\|$  为欧氏范数,  $\partial^+$  为离散差分算子,

$$\partial^+ u_{i,j} = ((\partial_x^+ u)_{i,j}, (\partial_y^+ u)_{i,j})$$

式中,

$$\begin{cases} (\partial_x^+ u)_{i,j} = u_{i+1,j} - u_{i,j} \\ (\partial_y^+ u)_{i,j} = u_{i,j+1} - u_{i,j} \end{cases} \quad i = 1, \dots, n-1; j = 1, \dots, n \quad (4)$$

对所有像素, 定义一个 3 维二阶锥:  $(t_{i,j}; (\partial_x^+ u)_{i,j}; (\partial_y^+ u)_{i,j}) \in k^3$ , 其中  $k^3$  表示该二阶锥的维数为 3,  $t_{i,j} \leq ((\partial_x^+ u)_{i,j}^2 + (\partial_y^+ u)_{i,j}^2)^{1/2}$ , 对式 (3) 的  $TV(u)$  的求解即等价于在二阶锥的约束条件下求解  $\sum_{i,j} t_{i,j}$ , 其数值计算可以通过内点方法如 SeDuMi<sup>[12]</sup> 或 Mosek 等工具包进行求解。

### 2.2 基于 Gabor 滤波的目标区域检测

Gabor 滤波在纹理分析方面已经得到了广泛应用, 其特点是通过一组不同方向与尺度的滤波器将图像在这些方向与尺度上进行多分辨率分解。本文利用多通道 Gabor 滤波器对分解后的纹理图像进行滤波, 由于 SAR 图像中人造目标等在不同尺度与方向上往往表现出与自然背景有明显差异, 因此通过提取经 Gabor 滤波后的图像纹理特征, 再利用 K 均值聚类算法实现目标区域分割, 可以将人造物体等目标区域从自然背景中分割出来。

Gabor 滤波器的形式为

$$h_e(x, y, f, \theta) = g(x, y) \cos[2\pi f(x \cos \theta + y \sin \theta)] \quad (5)$$

$$h_o(x, y, f, \theta) = g(x, y) \sin[2\pi f(x \cos \theta + y \sin \theta)] \quad (6)$$

其中,  $h_o$  和  $h_e$  分别表示奇、偶 Gabor 滤波器,  $g(x, y) = (2\pi\sigma^2)^{(-1/2)} \exp(-(x^2 + y^2)/2\sigma^2)$ , 使用的 Gabor 变换公式为

$$h(x, y) = g(x, y) \exp[-2\pi j(u_o x + v_o y)] \quad (7)$$

这里  $f, \theta, \sigma$  分别是 Gabor 滤波器的 3 个重要参数: 空间频率、相位以及空间常数。用  $f$  和  $\theta$  来表示  $u$  和  $v, u = f \cos \theta, v = f \sin \theta$ ; 通过  $f$  和  $\theta$  的变化从频率空间出发提取图像特征。在空间频率域需要带宽较窄的滤波器, 以精细区分不同的纹理, 而定位在全空

间域的滤波器则能准确找到纹理的边界,实际可取 $f$ 为4、8、16、32, $\theta$ 为 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$ , $\sigma=4$ 。

由于直接利用滤波器提取的特征进行目标分割的效果并不好,可以对每次变换得到的特征图像进行如下纹理能量变换<sup>[13]</sup>,以体现视觉系统的非线性特征,使滤波器能更清楚地检测出纹理基元:

$$e_k(x, y) = (1/M^2) \sum_{(x, y) \in W} |E(r_k(x, y))| \quad (8)$$

$$E(t) = \tanh(\alpha t) = (1 - e^{-2\alpha t}) / (1 + e^{-2\alpha t}) \quad (9)$$

其中, $r_k(x, y)$ 是经滤波器 $k$ 作用后的特征图像, $e_k(x, y)$ 为其在窗口中的纹理能量, $\alpha$ 是常系数,可取 $\alpha=0.25$ ;  $W$ 是以 $(x, y)$ 为中心的大小为 $M \times M$ 的窗口。其中,窗口大小的选取比较重要,选取的窗口越大,那么得到的纹理特征就越可靠,但是纹理边界也就越模糊,反之,得到的纹理特征就可能不正确,但是纹理边界就越清楚。本文根据目标的先验知识,将窗口大小取为 $11 \times 11$ 。

可以看出 $e_k(x, y)$ 实际上是由多通道纹理分解后的能量响应在空间、频率和方向上的分布。这样对应每一个像素点就形成一个特征向量 $[e_1(x, y), e_2(x, y), \dots, e_n(x, y)]$ ,将这些纹理能量特征利用K均值聚类方法<sup>[14]</sup>就可以实现图像分割,经过实验统计,根据分解层次和纹理方向,K均值聚类的类别个数取20能够获得比较理想的效果。

### 2.3 目标区域的掩码生成

上述步骤得到的感兴趣目标区域是粗糙的,不可避免存在孤立点,但在生成ROI掩码图像时,要求目标像素区域尽可能地光滑和规则,因此需要利用形态学滤波方法来消除孤立点,并实现目标密集区域的联通,消除小的区域。

形态学滤波的基本运算是膨胀、腐蚀和开、闭运算,开操作和闭操作主要是对图像进行平滑处理,开操作可以取出图像中的孤立点和毛刺,闭操作则可以填满一些小洞和将两个邻近的目标连通起来。设 $A$ 为图像集合, $B$ 为结构元素,则

$A$ 被 $B$ 膨胀,记为 $A \oplus B$ ,定义为

$$A \oplus B = \{z | (\hat{B})_z \cap A \neq \emptyset\} \quad (10)$$

$\hat{B}$ 为 $B$ 的反射,定义为 $\hat{B} = \{w | w = -b, b \in B\}$ ,集合 $\hat{B}$ 平移到点 $z = (z_1, z_2)$ 表示为 $(\hat{B})_z$ ,定义为 $(\hat{B})_z = \{c | c = b + z, b \in \hat{B}\}$ 。

$A$ 被 $B$ 腐蚀,记为 $A \ominus B$ ,定义为

$$A \ominus B = \{z | (B)_z \subseteq A\} \quad (11)$$

开、闭运算如下定义:

$A$ 用 $B$ 来开启,记为 $A \circ B$ ,定义为

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (12)$$

$A$ 用 $B$ 来闭合,记为 $A \bullet B$ ,定义为

$$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B \quad (13)$$

使用大小为4的方形结构元素(Square)分别进行了先开后闭合先闭后开操作,通过处理,就生成了一幅表征敏感目标区域特征的二值图像掩码,用于下一步的压缩操作。

### 2.4 SAR 图像的压缩策略

SAR 图像压缩策略如图1所示,针对原始图像,首先使用全变分方法,将图像分解为表征大尺度轮廓特征和区域平滑特征的结构分量以及表征小尺度细节信号的纹理分量,其中噪声信号包含在纹理分量内;其次,针对纹理分量,使用基于Gabor滤波的目标区域分割算法和形态学滤波,对图像的潜在目标区域进行检测,并生成敏感区域掩码;最后应用多尺度几何编码Bandelets<sup>[15]</sup>来对分解后的纹理分量进行编码,Bandelets作为方向性小波,能很好地捕捉图像的边缘信息,因此能较好地保护图像的轮廓信息。在编码中使用敏感特征区域掩码,为敏感区域分配更多的比特位,来保护人眼敏感的包含潜在目标的区域。对分解后的结构分量,采用小波变换和EBCOT编码方法进行压缩,压缩后的两个分量经过复接后形成单一的码流进行传输。

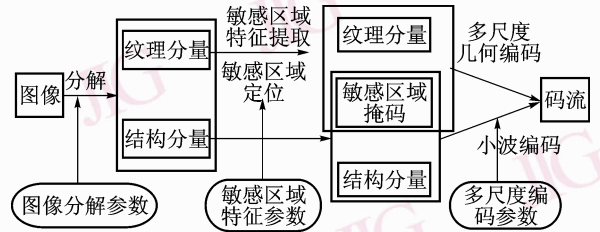


图1 基于图像分解和区域保护的SAR图像压缩流程

Fig. 1 Compression flowchart

## 3 实验结果与分析

对上述方法进行了实际SAR图像测试。图2为原始SAR图像,场景中包含建筑物以及足球场、草地等,其中建筑物为感兴趣的目标。图3为分解后的结构分量,图4为分解后的纹理分量。从图2中可以看出,结构分量主要包含建筑物的形状信息,呈现为均匀的同质区域。而图3的纹理分量则包含了很多细节纹理信息。



图 2 原图

Fig. 2 The original SAR image

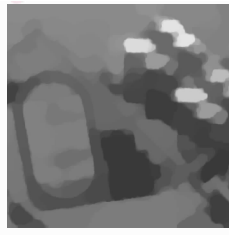


图 3 结构分量子图

Fig. 3 The structure component image



图 4 纹理分量子图

Fig. 4 The texture component image

图 5 和图 6 是利用 Gabor 滤波分别针对图 2 的原图和图 4 的纹理分量子图进行目标检测的效果。从图 6 可以看出,由于纹理分量子图只包含了较纯粹的纹理信息,因此用 Gabor 滤波能取得比图 4 更精准的目标轮廓边缘,目标区域定位更精细,减少了对干扰目标的检出,有利于在尽可能提高压缩率的同时准确保护敏感目标区域。

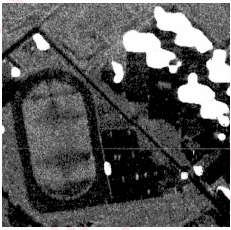


图 5 基于原图的目标区域检测效果图

Fig. 5 Detection result of original SAR image

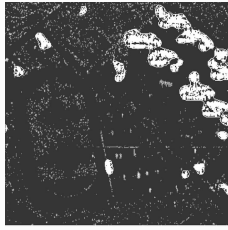


图 6 基于纹理分量子图的目标区域检测效果图

Fig. 6 Detection result of texture component image

对图 6 进行二值化处理,通过形态学和连通合

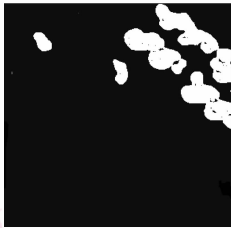


图 7 二值掩码图

Fig. 7 Binary mask image



图 8 本文方法重建图(0.2bpp)

Fig. 8 Reconstructed image of proposed approach



图 9 JPEG2000 算法重建图

Fig. 9 Reconstructed image of JPEG2000

并操作,去除一些不可能是敏感目标的小区域,即生成用于压缩时保护的图像掩码,结果如图 7 所示。其中白色区域表示在编码时要进行重点保护,是 SAR 获得的敏感区域,分配较多的比特位编码,从而在整幅图像高压压缩比情况下传输到地面后,图像判读人员仍能清晰判别这些敏感区域特征。

图 8 为使用本文算法压缩后重建的图像,图 9 为使用 JPEG2000 算法联合感兴趣区域编码进行压缩的效果,码率都是 0.2 bpp。在压缩时,两种算法都采用最大位移法对感兴趣区域进行编码,从图 8 和图 9 可以看出,两种方法对人造目标具有较好的辨别效果,在压缩时较好地保护了建筑物区域。对于背景区域,本文算法相对 JPEG2000 算法在视觉效果上具有明显的改善,这是因为分解后的结构分量在背景区域为大块的同质区域,使用小波方法能取得较好的压缩效果;而纹理分量中背景区域所对应的大部分为细微的“纯”纹理,消除了灰度渐变区域(这是小波分析所难以处理的特性),因此在采用 bandelets 进行编码时压缩效果有明显的改善。

为了更好地说明问题,采用一种新型图像质量评价方法——结构相似度 SSIM (structural SIMilarity)<sup>[16]</sup>来对两种压缩算法进行评价。SSIM 从亮度、对比度和结构 3 个方面综合对比重建图像和原始图像之间的相似度,大量实验结果表明,SSIM

质量评价指标比 PSNR 和 MSE 等传统方法更符合人眼的主观视觉效果。SSIM 定义为

$$SSIM = [l(x, y)]^\alpha \cdot [c(x, y)]^\beta \cdot [s(x, y)]^\gamma \quad (14)$$

式中, $l(x, y)$ 、 $c(x, y)$ 和 $s(x, y)$ 分别指重建图像与

原始图像之间的亮度对比、对比度对比和结构对比。

其中,  $l(x, y)$ 、 $c(x, y)$  和  $s(x, y)$  被定义为

$$\begin{cases} l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1} \\ c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2} \\ s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3} \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $C_1, C_2, C_3$  分别为常数,  $\mu_x, \mu_y$  为亮度均值,  $\sigma_x, \sigma_y$  为信号的标准差。

SSIM 的值介于 0 和 1 之间, 值越大表明重建图像和原始图像越相似, 重建图像的质量越好; 如果 SSIM 为 1, 则说明  $x$  与  $y$  是同一幅图像。不同码率下的 SSIM 指标如表 1 所示。

表 1 不同码率下的 SSIM 指标对比

Tab. 1 SSIM values at different bit-rates

	bit-rate (bpp)				
	0.15	0.30	0.50	0.70	1.00
JPEG2000	0.453	0.578	0.702	0.789	0.856
Bandelets	0.540	0.634	0.734	0.809	0.869
本文算法	0.660	0.741	0.816	0.852	0.889

从表 1 可以看出本文算法在结构相似度 (SSIM) 指标方面优于 JPEG2000 算法和单独使用第二代 Bandelets 算法。

## 4 结 论

对于机载 SAR 图像的应用而言, 图像传输的实时性和人眼可辨识性是影响系统性能的关键指标, 这要求在尽最大可能减少数据量的同时, 要保证图像中关键目标信息的可辨识能力。本文通过图像分解, 在纹理分量中进行目标检测, 使用纹理分量的特性来提取并分割感兴趣区域, 保证了图像重要目标区域的保护。以后的工作将对算法的效率进行优化, 进一步提高算法的实时性, 并对多种机载 SAR 图像从效果、压缩比、速度等方面进行对比实验和定量分析。

## 参考文献 (References)

1 Franceschetti G, Merolla S, Tesauo M. Phase quantized SAR signal processing: Theory and experiments [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 1999, 35(1):201-214.

2 Eddins S, Smith M. A three-source multirate model for image compression [A]. In: Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing [C], Albuquerque, NM, USA, 1990: 2098-2092.

3 Alan C, Kristo M, Austin L, et al. A compression of detected SAR imagery with JPEG2000 [A]. In: Proceedings of SPIE- The International Society for Optical Engineering [C], San Diego, CA, USA, 2000, 4115: 510-520.

4 Zhai J F, Wang Z S. SAR image compression at very low bit-rate [A]. In: Proceedings of 7<sup>th</sup> International Conference on Signal Processing [C], Beijing, China, 2004, 3:2167-2170.

5 Li M T, Guo J B, Zhao J P, et al. Real-time imagery compression method research [A]. In: Proceedings of the SPIE, Earth Observing Systems VIII [C], San Diego, CA, USA, 2003, 5151:531-539.

6 Cirillò R, Poehler L, Ziembra N. Adaptive compression algorithm results for complex Synthetic Aperture Radar data [A]. In: Proceedings of SPIE, Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery X [C], Orlando FL, ETATS-UNIS, 2003, 5095:26-32.

7 Hou X S, Liu G Z, Zou Y Y. SAR image data compression using wavelet packet transform and universal-trellis coded quantization [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, November 2004, 42(11):2632-2642.

8 Nasrabadi Nasser M, Sattler Joseph P, Kwon Heesung, Rizvi Syed A. High compression of SAR imagery for battlefield surveillance [M]. SPIE Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery III, 06/1996, 2757:397-408.

9 Liu H Q, Hou B, Wang S, et al. SAR image compression using bandelets and SPIHT [A]. In: Proceedings of 2006 CIE International Conference on Radar [C], Shanghai, China, 2006:1-4.

10 Yin W, Goldfarb D, Osher S. Total variation based image cartoon-texture decomposition [R]. CORC TR-2005-01, Columbia, USA: Columbia University, 2005.

11 Alizadeh F, Goldfarb D. Second-order cone programming [J]. Math. Program, 2003, 95(1):3-51.

12 Sturm J F. Using SeDuMi 1.02, a MATLAB toolbox for optimization over symmetric cones [J]. Optim Meth Softw, 1999, 11-12(1-4):625-653.

13 Li Long-yan, Hu Fu-qiao. Remote-sensing image multichannel textural analysis based on 2-D Gabor filters [J]. Computer Engineering, 2003, 29(20):127-129. [李龙燕, 胡福乔. 基于 Gabor 小波滤波器的遥感图像多频道纹理分析 [J]. 计算机工程, 2003, 29(20):127-129.]

14 Shao Feng-jing, Yu Zhong-qing. Data Mining-Principle and Algorithm [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2003. [邵峰晶, 于忠清. 数据挖掘—原理与算法 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.]

15 Peyré G, Mallat S. Bandelets Toolbox, Available on Matlab Central [EB/OL], <http://www.mathworks.com/matlabcentral/>, 2005.

16 Wang Z, Alan C B, Hamid R S, et al. Image quality assessment: from error measurement to structural similarity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4):600-613.