

SAR 图像压缩的多尺度自回归滑动平均模型方法

纪 建¹, 田 铮^{1,2,3}, 徐海霞²

(1. 西北工业大学计算机学院, 陕西西安 710072; 2. 西北工业大学应用数学系, 陕西西安 710072;
3. 模式识别国家重点实验室, 中国科学院自动化研究所, 北京 100080)

摘 要: 本文研究在无需 SAR 图像先验知识条件下, 基于多尺度自回归滑动平均 MARMA 模型的 SAR 图像压缩方法. 该方法首先对 SAR 图像建立 MARMA 模型, 依据 MARMA 模型对原始图像进行预测, 然后对预测的残量进行数据压缩. 将此方法用于实际 SAR 图像压缩, 并将基于 MARMA 模型和多尺度自回归 MAR 模型的压缩结果与相应的 JPEG 结果进行比较和分析, 说明基于 MARMA 模型的 SAR 图像压缩方法既能达到较高的压缩比, 又能取得较好的保真度, 是一种很有潜力的压缩方法.

关键词: SAR 图像压缩; 多尺度自回归滑动平均模型; 残差图像

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 12-2111-04

A New Method for Compression of SAR Imagery Based on Multiscale Autoregressive Moving Average (MARMA) Model

Ji Jian¹, Tian Zheng^{1,2,3}, Xu Haixia²

(1. Department of Computer Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi, 710072, China;
2. Department of Applied Mathematics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072, China;
3. National Key Laboratory of Pattern Recognition, Institute of Automation Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080, China)

Abstract: In this paper, a new method based on multiscale autoregressive moving average (MARMA) models is presented to compress SAR (Synthetic Aperture Radar) image. The method uses the multiscale representation as the cornerstone of the modeling process, and constructs the MARMA models of image. Thus we predict the initialized image data using these multiscale models, and the compression is subsequently achieved through coding the residual image. Unlike published methods, supervising segmentation for SAR image is not used in our compression processes. So the prior knowledge of segmentation is not required. Experimental results have proven that the proposed method achieves high compression ratios with impressive image quality.

Key words: SAR image compression; multiscale autoregressive moving average (MARMA) model; residual image

1 引言

合成孔径雷达 SAR (Synthetic Aperture Radar, 简记为 SAR) 图像的产生过程可分成三个阶段^[1]: (1) 使用 SAR 对目标区域进行侦测; (2) 将 SAR 回波信号和压缩信息, 从卫星传送到地面站; (3) 进行数据处理, 将 SAR 信号重构为图像数据. 在后两个阶段, 巨大数量的数据需要进行存储和传输. 因而, 为了利用有限的存储容量存储更多的 SAR 图像, 或者为了以最短的时间传递尽可能多的 SAR 图像, 手段之一就是 SAR 图像进行有效的压缩.

现今的 SAR 图像压缩技术, 大致为三类^[1]: (1) 使用 SQ (Scalar Quantization) 的 SAR 压缩技术; (2) 使用 VQ (Vector Quantization) 的 SAR 压缩技术; (3) 使用 TD (Transform Domain) 的 SAR 压缩技术. 第一类算法简单, 易实现, 但信噪比较低;

第二类算法信噪比较高, 却增加了算法复杂度; 第三类算法的压缩效果, 很大程度上依赖于所选择的正交基.

近几年来, 随着多分辨 (多尺度) 分析技术的提出和发展, SAR 图像的多尺度分析技术引起学术界的高度关注^[2-4]. 文献[4]提出了一种基于 MAR 模型的 SAR 图像有监督多尺度分割, 然后在分割基础上给出 SAR 图像的压缩技术. 这种 SAR 图像压缩方法的特点是: 基于 MAR 模型; 需要 SAR 图像分割的先验知识; SAR 图像压缩需要使用相应 SAR 图像分割结果. 然而在许多情况下, 没有关于 SAR 图像的先验知识, 也就无法先对 SAR 图像进行有监督分割, 但却需要对 SAR 图像进行压缩. 本文研究基于 MARMA 模型的 SAR 图像压缩新方法, 以建立 MARMA 模型和 MAR 模型来直接刻画 SAR 图像的统计相依性为基础, 据此构造压缩算法. 文献[2]给出 MARMA 过程的定义, 并且对 SAR 图像的分类进行了研究, 但没有对

MARMA 模型的理论和其它应用进行深入的研究. 本文给出建立 MARMA 模型的方法, 并且将其应用于 SAR 图像的压缩. 本文提出的方法, 不使用对 SAR 图像的分割结果, 而是直接对 SAR 图像建立 MARMA 模型, 并进行压缩, 因而无需 SAR 图像分割的先验知识. 最后以 SAR 图像的实例说明基于 MARMA 模型的 SAR 图像压缩方法是一类很有潜力的方法.

2 MAR 过程和 MARMA 过程

为了更好地说明如何建立 SAR 图像的 MAR 模型和 MARMA 模型, 先给出 MAR 过程和 MARMA 过程的定义.

定义 1 MAR 过程 定义在同态树上的随机过程称为 MAR 过程. 如果父子结点的状态向量间满足以下关系:

$$X(s) = A(s)X(s\bar{y}) + w(s) \quad (1)$$

其中 $A(s)$ 为自回归系数矩阵, $w(s)$ 是白噪声, 且 $w(s)$ 和 $X(0)$ (树的根结点处的状态向量) 不相关, $X(s)$ 表示子结点状态, $X(s\bar{y})$ 表示父结点状态, \bar{y} 为上移算子.

定义 2 MARMA 过程 定义在同态树上的随机过程称为 MARMA 过程. 如果父子结点的状态向量之间满足以下关系:

$$X(s) = A(s)X(s\bar{y}) + B(s)w(s\bar{y}) + w(s) \quad (2)$$

其中 $A(s)$ 为自回归系数矩阵, $B(s)$ 为滑动平均系数矩阵.

MAR 模型是 MARMA 模型的特例. 与 MAR 模型相比, MARMA 模型是一类更为广泛的多尺度随机模型, 它是将时间序列分析中 ARMA 模型的定义推广到树状结构上.

3 建立 SAR 图像的 MAR 模型和 MARMA 模型

以原始图像 I , 产生一多分辨分析图像 I_0, I_1, \dots, I_R , 其中 I_0, I_R 分别对应于最高和最低分辨率的图像, 且 $I_0 = I$. I_m 中的像素 $I_m(k, l)$ 由下面的方法产生:

$$IM_m(k, l) = \sum_{i=2^m k}^{2^{m(k+1)}-1} \sum_{j=2^m l}^{2^{m(l+1)}-1} I(i, j) \quad (3)$$

$$\hat{I}_m(k, l) = 20 \log_{10} |IM_m(k, l)| \quad (4)$$

$$I_m(k, l) = \hat{I}_m(k, l) - C_m \quad (5)$$

其中 C_m 为 $\hat{I}_m(k, l)$ 的样本均值, $m = 1, \dots, R$.

式(4)和式(5)中之所以对数据取对数和归一化处理, 是因为这样可使图像数据中同一类的数据趋于一致, 更易于剔除数据的冗余, 从而提高压缩效果^[3,4]. 得到的多尺度序列形成一

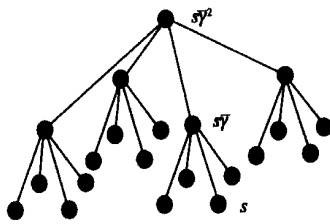


图1 三个尺度的 SAR 图像四叉树表示

个四叉树(图 1), 每个结点对应四个子结点, 一个父结点.

在结点 s , 建立如下的 MAR 模型:

$$I(s) = a_{1, m(s)}I(s\bar{y}) + \dots + a_{R, m(s)}I(s\bar{y}^R) + \omega(s) \quad (6)$$

其中 $m(s)$ 为结点 s 的尺度, R 为自回归阶数, $a_{m(s)} = (a_{1, m(s)}, a_{2, m(s)}, \dots, a_{R, m(s)})^T$ 是回归系数, $\omega(s)$ 是误差图像.

回归系数用最小二乘法估计:

$$a_{m(s)} = \arg \min_{a_{m(s)}} \left\{ \sum_{s \in \mathcal{A}} [I(s) - a_{1, m(s)}I(s\bar{y}) - \dots - a_{R, m(s)}I(s\bar{y}^R)]^2 \right\} \quad (7)$$

误差图像 $\omega(s)$ 由下述方法产生:

$$\omega(s) = I(s) - [a_{1, m(s)}I(s\bar{y}) + \dots + a_{R, m(s)}I(s\bar{y}^R)] \quad (8)$$

进而, 将误差图像 $\omega(s)$ 处理为一个多分辨率的图像序列 w_0, w_1, \dots, w_Q , 则关于误差图像 $\omega(s)$, 有如下形式的多尺度自回归模型:

$$w(s) = b_{1, m(s)}w(s\bar{y}) + \dots + b_{Q, m(s)}w(s\bar{y}^Q) + \xi(s) \quad (9)$$

将式(9)代入式(6), 就对 SAR 图像建立了如下形式的 MARMA 模型:

$$I(s) = a_{1, m(s)}I(s\bar{y}) + \dots + a_{R, m(s)}I(s\bar{y}^R) + b_{1, m(s)}w(s\bar{y}) + \dots + b_{Q, m(s)}w(s\bar{y}^Q) + \xi(s) \quad (10)$$

其中 R 表示自回归阶数, Q 表示滑动平均阶数, $\xi(s)$ 为残量图像.

注意到, 误差图像和残量图像是不同的. 误差图像是 MAR 模型式(6)中的 $\omega(s)$. 对 MAR 模型式(6)中的 $\omega(s)$ 再进行 MAR 建模, 进而得到 MARMA 模型式(10). 残量图像就是式(10)中的 $\xi(s)$.

4 基于 MARMA 模型的 SAR 图像压缩方法

先对粗分辨率的图像 I_R 进行简单的标量量化并进行熵编码. 有了这样的粗分辨率图像, 就可以利用多尺度模型的特点对更细分辨率图像进行有效编码. 假定 $I_1, \dots, I_R, w_1, \dots, w_Q$ 已被编码, 得到编码图像 $\tilde{I}_1, \dots, \tilde{I}_R$ 与 $\tilde{w}_1, \dots, \tilde{w}_Q$. 由式(10), 忽略残量项, 可计算出预测图像 \hat{I}_0 中的每个结点, 从而得到残量图像:

$$E_0 = I_0 - \hat{I}_0 \quad (11)$$

E_0 具有更小的动态范围, 且携带有足够的信息以重构图像 I_0 . 因此, 可用 E_0 代替 I_0 来进行编码. 由于多尺度模型能很好地捕获不同尺度分辨率特征, 因而剔除了图像中的冗余.

为进一步提高压缩性能, 利用小波变换对残量图像进一步处理. 小波变换能将输入图像分解为一系列分辨率由低到高的图像序列, 从而根据信息在不同分辨率上的重要程度来分配带宽, 给出空间和频率的很好折衷, 实现图像的有效压缩. 此外, 基于小波变换的子带编码也更适合于基于视觉特性的图像变换.

对残量图像进行小波变换后, 为得到进一步的压缩效果, 在量化和熵编码之前, 先对小波变换后的系数进行软阈值处理. 软阈值处理去掉了图像固有的噪声, 同时又保留了细节, 因而提高了压缩效率.

基于 MARMA 模型的 SAR 图像压缩和解压算法如图 2 所示, 图 2 中虚线部分为压缩过程, 短虚线部分为解压过程. SAR 图像压缩的 MARMA 模型方法的具体步骤为:

(1) 建立 SAR 图像的 MARMA 模型;

(2) 用对 $I_1, \dots, I_R, w_1, \dots, w_Q$ 进行编码后得到的 $\tilde{I}_1, \dots, \tilde{I}_R, \tilde{w}_1, \dots, \tilde{w}_Q$, 依据 MARMA 模型对 I_0 进行预测, 得到 \hat{I}_0 ;

(3) 由图像数据 I_0, \hat{I}_0 得到残量图像 E_0 ;

(4) 对 E_0 依次进行小波变换、软阈值处理、量化、熵编码, 最后得到压缩数据.

数据的解压过程与压缩过程相反, 即对压缩数据进行熵

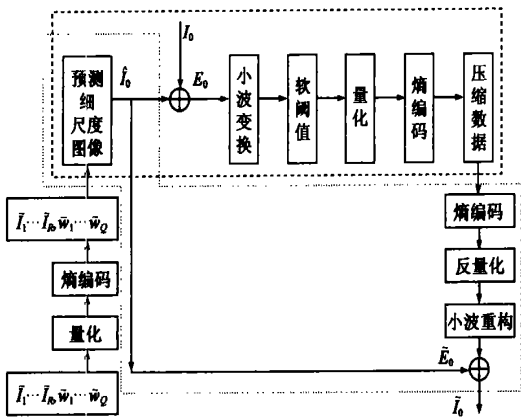


图 2 SAR 图像的 MARMA 模型压缩算法

解码、反量化、小波重构, 得到残量图像的估计 E_0 , 然后利用 I_0 , 由式(12)得到解压数据 T_0 :

$$T_0 = I_0 + \tilde{E}_0 \quad (12)$$

由于 MAR 模型是 MARMA 模型的特例, 因此本文中基于 MARMA 模型的图像压缩方法, 也适用于 MAR 模型. MAR 模型压缩方法与 MARMA 模型压缩方法的不同之处, 是在对残量图像预测时, 使用的是 MAR 模型. 即用 I_1, \dots, I_R 的编码图像 $\tilde{I}_1, \dots, \tilde{I}_R$, 由式(6), 忽略噪声项, 计算出预测图像 \hat{I}_0 中的每个结点, 由式(11)得到残量图像 E_0 , 之后再对 E_0 进行压缩处理.

5 实验结果

为了说明上面所介绍的压缩方法, 本文对图 3 的 SAR 图像 (256 × 256 像素) 分别建立如下模型(1)、模型(2)及模型(3), 并进行压缩处理.

模型(1) 二阶多尺度自回归过程 MAR

(2):

$$I(s) = -0.050888I(s\bar{y}) + 0.44427I(s\bar{y}) + \omega(s) \quad (13)$$

模型(2) 四阶多尺度自回归过程 MAR(4):

$$I(s) = -0.021294I(s\bar{y}) + 0.1399I(s\bar{y}^2) + 0.41297I(s\bar{y}^3) + 0.4321I(s\bar{y}^4) + \omega(s) \quad (14)$$

模型(3) 二阶多尺度自回归滑动平均过程 MARMA(2,

2):

$$I(s) = -0.5089I(s\bar{y}) + 0.4443I(s\bar{y}^2) - 0.01379w(s\bar{y}) + 0.04138w(s\bar{y}^2) + \xi(s) \quad (15)$$

本文对 $I_1, \dots, I_R, w_1, \dots, w_Q$ 和 E_0 使用的编码方法为信息无损的 LZW(Lempel Ziv & Welch)^[5] 方法. 这种编码与游程编码类似, 也是一种基于字典的编码压缩技术, 通过对字符串的编码而实现对数据的压缩. 然而, 与游程编码有所不同的是, LZW 算法对数据进行编码压缩的同时, 还将原始数据中

的重复字符串保存为一个表, 并以该重复字符串中的索引来取代原始数据.

图 4 给出本文提出的压缩方法与 JPEG 压缩算法的结果比较. 需要说明的是, 对 $I_1, \dots, I_4, w_1, w_2$ 进行编码后得到的 $\tilde{I}_1, \dots, \tilde{I}_4, \tilde{w}_1, \tilde{w}_2$, 也包括在最后的压缩数据中.

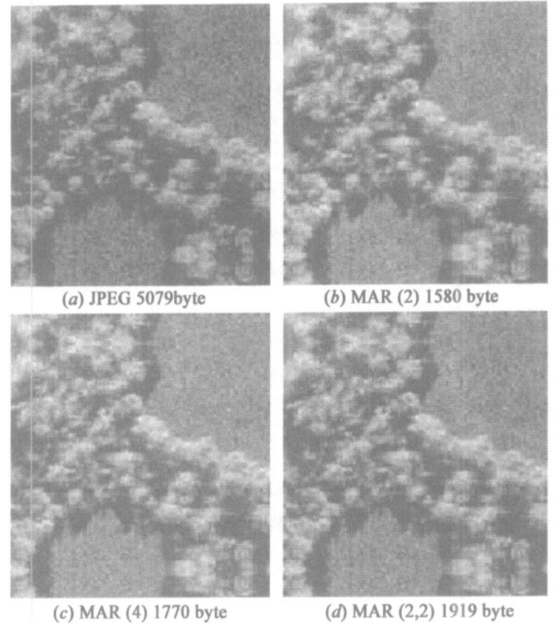


图 4 对 SAR 图像的 JPEG、MAR(2)、MAR(4)、MARMA(2,2) 压缩算法比较

为了对压缩后图像的质量进行评价, 令 $f(m, n)$ 为输入图, $\hat{f}(m, n)$ 为先压缩又解压缩后得到的 $f(m, n)$ 的近似, 我们引入客观保真度准则—峰值信噪比 (PSNR)^[6]:

$$PSNR = 10 \log_{10} \left[\frac{MN \left(\max_{m,n} \{f(m,n)\} - \min_{m,n} \{f(m,n)\} \right)^2}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [f(m,n) - \hat{f}(m,n)]^2} \right] \quad (16)$$

表 1 列出了对以上几种压缩方法的评价. 从实验结果看, 本文的方法不仅有比 JPEG 更高的压缩率, 而且有比 JPEG 更高的保真度. 将 MAR(2) 方法、MAR(4) 方法和 MARMA(2,2) 方法的压缩结果进行相比, MAR(2) 的压缩率最高, 保真度最低; MARMA(2,2) 的压缩率最低, 保真度最高.

表 1 压缩算法的客观保真度评价

压缩方法	JPEG	MAR(2)	MAR(4)	MAR(2,2)
Bits/pixel(位/像素)	0.0775	0.0241	0.027	0.0293
PSNR	55.492dB	64.66dB	64.121dB	66.992dB

6 结论

本文提出了一种新的基于 MARMA 模型的 SAR 图像压缩方法. 该方法在没有关于 SAR 先验知识的假设下, 先对图像进行 MARMA 建模, 随后进行压缩处理. 实验证明, 使用 MARMA 模型, 能够有效地对 SAR 图像进行压缩, 这是一类有应用前景的新方法. 关于多尺度自回归滑动平均模型的统计性质和其它应用的研究目前正在进行中.

参考文献:

- [1] U Benz, K Strodl, A . Moreria. A comparison of several algorithms for SAR raw data compression[J]. IEEE Trans Geos Remote Sense, 1995, 33(5): 1266- 1276.
- [2] J Schoeder, D Howard, A Guanawardean. Multiscale modeling for target detection in complex synthetic aperture radar imagery[A]. Signals Systems & Computers, 1998. Conference Record of the Thirty Second Asilomar Conference[C]. 1998, 2(1- 4): 1288- 1293.
- [3] C H Fosgate, H Krim, W Irving, W C Karl, A S Willsky. Multiscale segmentation and anomaly enhancement of SAR imagery [J]. IEEE Trans Image Processing, 1997, 6(1): 7- 20.
- [4] Andrew Kim, Hamid Krim. Hierarchical stochastic modeling of SAR imagery for segmentation/ compression[J]. IEEE Trans Processing. 1999, 47(2): 458- 468.
- [5] 郎锐. 数字图像处理学: Visual C++ 实现[M]. 北京: 希望电子出版社, 2003.
Lang Rui. Science of digital image processing: realizing of Visual C++ [M]. Beijing: Publishing house of hope industry, 2003. (in Chinese)

- [6] 章毓晋. 图像处理和分折[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
Zhang Yur Jin. Processing and analysis of image[M]. Beijing: Publishing house of Qinghua university, 2001. (in Chinese)

作者简介:



纪建女, 1971 年生于陕西西安, 西北工业大学计算机应用技术专业博士生, 主要从事模式识别和图像处理与分析等方面的研究。
E mail: jijiangao@126.com.



田铮女, 1948 年生于陕西西安, 教授, 西北工业大学理学院应用数学系博士生导师、计算机科学与工程系博士生导师。研究方向: 非线性时间序列分析与信息处理、多尺度随机模型与遥感图像处理。E mail: zhtian@nwpu.edu.cn.