

基于2D实值离散Gabor变换的SAR原始数据压缩

张文超^{①②} 王岩飞^① 潘志刚^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 该文采用时频分析的方法, 结合合成孔径雷达(SAR)原始数据的线性调频特性, 提出了一种基于2D实值离散Gabor变换的SAR原始数据压缩方法。该方法对I,Q两路原始数据进行分块, 先对每一块进行二维实值离散Gabor变换(2D-RDGT), 在时频平面内对各频率平面根据方差进行比特分配, 然后采用BAQ量化各频率平面。用同一块数据进行压缩解压缩成像实验并与已有的方法进行比较, 实验结果表明该文提出的方法在数据域和图像域的性能都优于已有的方法。

关键词: 原始数据压缩; 二维实值离散Gabor变换; 比特分配; 分块自适应矢量量化

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)03-0569-04

SAR Raw Data Compression Based on 2D Real-Valued Discrete Gabor Transform

Zhang Wen-chao^{①②} Wang Yan-fei^① Pan Zhi-gang^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

^②(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: This paper proposes a compression method for Synthetic Aperture Radar (SAR) raw data, which is based on time-frequency analysis theory and the linear frequency modulation properties of the SAR raw data. In this method, the raw data of I and Q channels is divided into blocks at first, then each block is transformed into time-frequency domain by 2D-RDGT (Two-Dimensional Real valued Discrete Gabor Transform) and the desired bits are allocated to each frequency plane, finally each frequency plane is quantized with BAQ(Block Adaptive Quantization). The same raw data is experimented with this method and the existing methods. The experiments results show that this method outperforms the existing methods in raw data domain and SAR image domain.

Keywords: Raw data compression; 2D-RDGT(Two Dimensional Real valued Discrete Gabor Transform); Bit allocation; BAQ (Block Adaptive Quantization)

1 引言

合成孔径雷达(SAR)原始数据压缩技术是解决SAR海量数据与有限信道容量之间矛盾的重要手段。人们已经发展了多种原始数据压缩算法, 已有压缩算法中, 目前只有分块浮点量化(BFPQ)算法^[1]和分块自适应量化(Block Adaptive Quantization, BAQ)算法^[2]分别应用于挑战者号航天飞机SIR-C系统和探测金星的Magellan任务中; 文献[3]将矢量量化和BAQ相结合提出了BAVQ (Block Adaptive Vector Quantization)算法; 文献[4]将原始数据的幅度和相位分别进行压缩提出了幅相压缩 (Amplitude-Phase, AP)算法, 体现了对相位的保留。为进一步提高压缩性能, 需要对SAR原始数据做正交变换进行去相关处理, 小波变换编码是目前得到广泛应用的变换域数据压缩方法, 目前已有文献将小波^[5]和小波包变换^[6]应用于SAR原始数据压缩, 但所取得的压缩效

果并不理想。已有方法只考虑了SAR原始数据域或其变换域的统计特性, 没有考虑SAR原始数据的频率时变特性。

SAR原始数据可以看成是距离向和方位向的二维线性调频信号的线性平移叠加, 具有频率时变震荡特性。文献[7]指出对于频率时变震荡信号的数据压缩, 时间-频率分析方法好于时间-尺度(小波)方法。Gabor变换具有联合时频域局部特性, 可以反映信号频率的时变特性^[8]。因此, 本文将SAR原始数据进行离散Gabor变换将其变换到时间-频率域, 从时频分析的角度对变换系数进行压缩。实验结果表明本文所提方法的性能无论在原始数据域还是图像域都优于目前已有的方法。

2 2D实值离散Gabor变换

二维Gabor变换是一维Gabor变换的二维推广, 传统的Gabor变换系数为复系数, 计算较为麻烦, 文献[9,10]发展了实值Gabor变换, 其变换系数为实数, 并给出其快速算

法。实值 Gabor 变换系数与复 Gabor 变换系数有简单的转换关系。对于 Gabor 变换的有关内容可参见文献[11]，下面简要介绍文中用到的二维实值离散 Gabor 变换。

设一数据块 $I(x, y)$, $x=0,1,2,\dots,X-1$; $y=0,1,\dots,Y-1$ 。将其分成 $K \times L$ 个维数为 $M \times N$ 的不重叠的格子，使得 $X = KM$ 和 $Y = LN$, K, L 为时域采样点数， M, N 为频域采样点数。二维实值离散 Gabor 变换及 Gabor 展开也称 Gabor 逆变换，定义为

$$a(k, l, m, n) = \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} I(x, y) g_{k,l,m,n}(x, y) \quad (1)$$

$$I(x, y) = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} a(k, l, m, n) h_{k,l,m,n}(x, y) \quad (2)$$

式中 Gabor 基函数又称综合窗 $h_{k,l,m,n}(x, y)$ 及其对偶分析窗 $g_{k,l,m,n}(x, y)$ 定义为

$$h_{k,l,m,n}(x, y) = \tilde{h}(x - kM, y - lN) \text{cas} \left\{ 2\pi \left[\frac{mx}{M} + \frac{ny}{N} \right] \right\} \quad (3)$$

$$g_{k,l,m,n}(x, y) = \tilde{g}(x - kM, y - lN) \text{cas} \left\{ 2\pi \left[\frac{mx}{M} + \frac{ny}{N} \right] \right\} \quad (4)$$

其中 $\text{cas}(x) = \cos(x) + \sin(x)$ 为 Hartley 函数。

给出综合窗可以通过数值法求得其二正交分析窗，具体求解过程参见文献[11]。由于二维高斯综合窗函数 $h(x, y)$ 作为可分离窗函数可以分为两个一维高斯综合窗函数的乘积，即 $h(x, y) = h_x(x)h_y(y)$ 。下面给出一维 128 点高斯综合窗和其 32×4 时频采样分析窗，如图 1(a), 1(b) 所示，其中高斯综合窗为

$$h(k) = 128^{-0.25} \exp \left\{ \frac{-\pi(k - 63.5)^2}{256} \right\}, k = 0, 1, \dots, 127 \quad (5)$$

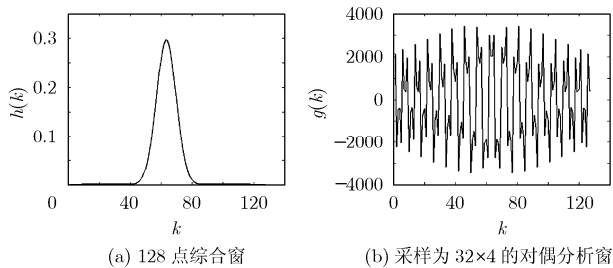


图1 高斯综合窗及其对偶分析窗

有了对偶分析窗，就可利用快速的二维 DHT 计算式(1)中的 $a(k, l, m, n)$ 。具体算式如下：

$$\begin{aligned} a(k, l, m, n) &= \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} I(x, y) \tilde{g}(x - kM, y - lN) \text{cas} \left\{ 2\pi \left[\frac{mx}{M} + \frac{ny}{N} \right] \right\} \\ &= \sum_{j_1=0}^{M-1} \sum_{j_2=0}^{N-1} \left\{ \sum_{i_1=0}^{K-1} \sum_{i_2=0}^{L-1} R_{mn}(i_1M + j_1, i_2N + j_2) \right\} \\ &\quad \cdot \text{cas} \left\{ 2\pi \left[\frac{mj_1}{M} + \frac{nj_2}{N} \right] \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $R_{mn}(x, y) = I(x, y) \tilde{g}(x - kM, y - lN)$, $x = i_1M + j_1$, $y = i_2N + j_2$ 。

计算式(6)可以利用 $M \times N$ 次 2D-DHT(2D-Discrete Hartley Transform)算法。其运算复杂性为 $K \times L$ 次 $M \times N$ 的 2D-DHT + $K \times L \times X \times Y$ 次实数乘法 + $(K \times L - 1) \times X \times Y$ 次实数加法。

3 SAR 原始数据的 2D-RDGT 变换压缩

将 SAR 原始数据分成 $KM \times LN$ 的数据块，对每一块进行 2D 实值离散 Gabor 变换，得到一个四维 Gabor 系数矩阵 $a(k, l, m, n)$ ，其中 $0 \leq k \leq K-1$, $0 \leq l \leq L-1$, $0 \leq m \leq M-1$, $0 \leq n \leq N-1$ 。包括两个频率分量和两个空间(时间)分量。确定两个频率分量，就可以得到对应的二维频率平面。当 $m=0$, $n=0$ 时的频率平面 $a(k, l, 0, 0)$ 称为直流系数(DC)，其余的频率平面称为交流系数(AC)。Gabor 变换系数的概率分布可以用广义的 Gauss 函数来模拟[12]。下面给出其中的一 128×128 原始数据块的归一化概率统计分布以及其 Gabor 变换后的直流系数和一个交流系数的归一化概率统计分布，分别见图 2(a), 2(b)及 2(c)。为进行比较，图中也给出标准高斯分布概率曲线，如粗线所示。表 1 给出原始数据和变换系数的归一化概率分布与标准高斯分布的相关系数。由于该原始数据块的归一化概率分布与标准高斯分布的相关系数经计算仅为 0.8778，因此从图 2 和表 1 可以得出结论：经 RDGT 变换后，其直流系数以及交流系数的概率分布较原始数据更好地趋近标准高斯分布，这说明了 RDGT 变换的去相关作用。

原始数据块，选择 $(K \times L) \times (M \times N)$ 采样，经过二维 RDGT 变换后得到一个维数为 $K \times L$ 的 DC 系数平面和

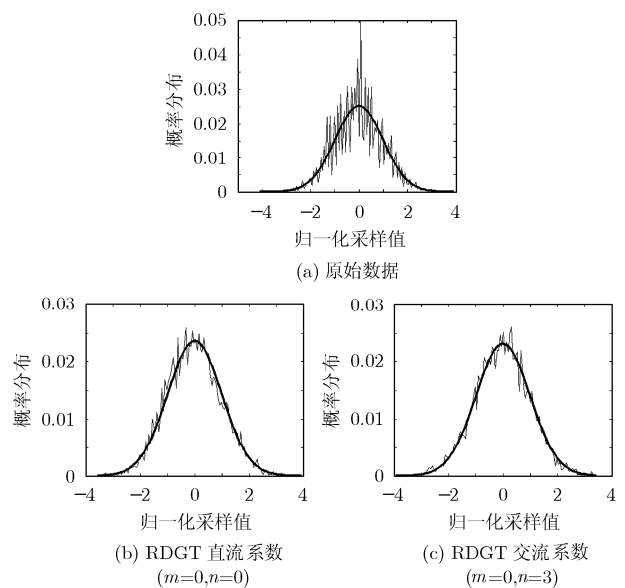


图2 原始数据及其经 RDGT 变换后直流/交流系数的统计分布

表1 各频率平面概率分布与标准高斯分布的相关系数

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| (m,n) | (0,0) | (0,1) | (0,2) | (0,3) | (1,0) | (1,1) | (1,2) | (1,3) | (2,0) | (2,1) | (2,2) | (2,3) | (3,0) | (3,1) | (3,2) | (3,3) |
| ρ | 0.988 | 0.986 | 0.990 | 0.983 | 0.987 | 0.975 | 0.993 | 0.984 | 0.989 | 0.993 | 0.990 | 0.984 | 0.986 | 0.982 | 0.992 | 0.986 |

$MN - 1$ 个维数为 $K \times L$ 的交流系数平面。它们都服从标准正态分布,因此可以采用分块自适应量化,但其能量分布不同,因此,需要采用适当的比特分配措施。本文采用文献[12]提出的基于方差的多分量比特分配方案。如式(7)所示:

$$R_{r,s} = R + \frac{1}{2} \log_2 \frac{\sigma_{r,s}^2}{(\prod_{m=0, n=0}^{M-1, N-1} \sigma_{m,n}^2)^{\frac{1}{MN}}} \quad (7)$$

式(7)中 R 为平均量化比特率。 $R_{r,s}$ 为 $m = r, n = s$ 频率平面的量化比特率。

另外,数据分块的大小以及块内时频平面的划分会对系统压缩产生一定的影响,主要体现在两个方面:一个是运算复杂性;一个是压缩性能。实际应用时应考虑运算复杂性和压缩性能的合理折中。运算的复杂性主要决定于2D-DHT的计算量。压缩性能主要体现在数据块的统计特性能否使各频率平面满足高斯分布进行BAQ量化要求。数据块固定,较多的频率平面可以很好刻画其频率时变特征进而得到更精确的比特分配,但也可能会造成各频率平面统计特性不能满足压缩要求。通常,频率平面的数据量多于100就可以很好的满足BAQ压缩处理的统计特性要求,频率平面数取4到16就可以很好地描述其频率的时变特征。本文的数据块取 128×128 , 选择 $(32 \times 32) \times (4 \times 4)$ 采样,即取16个频率平面。基于RDGT的SAR原始数据变换压缩处理流程如图3所示。

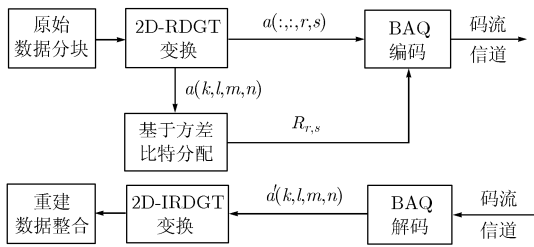


图3 基于3D RDGT的SAR原始数据压缩流程框图

4 实验结果分析比较

为验证本文提出方法的有效性,实验采用方位向8192点,距离向1024点的I,Q两路机载SAR原始数据,将数据分为 128×128 的子块,每子块采用 $(32 \times 32) \times (4 \times 4)$ 采样,并进行2D-RDGT变换,对所有的频率平面采用式(7)进行比特分配,每频率平面按得到的比特率进行BAQ量化。最后再将重建的Gabor变换系数通过二维RDGT逆变换,得到重建原始数据。最后在原始数据域和采用R-D(距离-多普勒)算法成像后的图像域进行性能评估,并与常见的原始数据压缩算法进行比较。

数据域采用的评估参数有量化信噪比:

$$SNR = 10 \times \lg(s / \epsilon) \quad (8)$$

其中 $s = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g(i, j)^2$ 为信号功率, $\epsilon = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [g(i, j) - f(i, j)]^2$ 为平均量化噪声功率。

平均相位误差:

$$\bar{\phi} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |\phi_0(i, j) - \phi_1(i, j)| \quad (9)$$

其中 $\phi_0(i, j)$ 为原始数据相位, $\phi_1(i, j)$ 为重建数据相位。

图像域采用的评估参数有量化信噪比: $SNR = 10 \cdot \lg(s / \epsilon)$, 量化信噪比的定义与数据域相同。

相关系数:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g(i, j) f(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g(i, j)^2 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f(i, j)^2}} \quad (10)$$

式(8),式(10)中, $g(i, j)$ 为原始数据或用原始数据成像后的图像数据, $f(i, j)$ 为压缩解压缩之后的重建原始数据或重建原始数据成像后的图像数据。表2,表3为在比特率为2时本文方法和其他方法在原始数据域和图像域的评估比较。图4为成像结果,其中图4(a)为原始数据直接成像结果,图4(b)为原始数据采用BAQ在比特率为1.0时的压缩解压缩后的成像结果,图4(c)为原始数据采用本文方法在比特率为1.0时的压缩解压缩后的成像结果,图4(d)为原始数据采用BAQ在比特率为2.0时的压缩解压缩后的成像结果,图4(e)为原始数据采用本文方法在比特率为2.0时的压缩解压缩后的成像结果。图5为本文算法与其他算法在不同比特率下的原始数据域和图像域的信噪比曲线。从图5和表2,表3可以看出,在采用相同数据,压缩比相同时,本文提出的方法数据域的信噪比较BAQ提高了3.4~5.5dB之多,图像域信噪比较BAQ提高了3.8~5.1dB之多。从图4还可以看出,即使在比特率为1时,本文算法还可以取得较清晰的图像,相比于1比特时的BAQ算法要好的多。与其它方法相比,数据域中仅有平均相位误差略高于AP算法。总体来说,本文提出的方法无论在原始数据域还是图像域的评估指标均优于已有方法。

表2 原始数据域评估结果(比特率为2.0bit/s)

| 评估参数 | BFPQ | BAQ | BAVQ | AP | WT-BAQ | RDGT-BAQ |
|---------|--------|--------|--------|--------|---------|----------|
| SNR(dB) | 6.6617 | 9.1900 | 9.422 | 9.1961 | 11.2645 | 14.303 |
| 平均相位 | | | | | | |
| 误差 | 0.3213 | 0.3649 | 0.3809 | 0.2061 | 0.3612 | 0.3185 |

表3 图像域评估结果(比特率为 2.0bit/s)

| 评估参数 | BFPQ | BAQ | BAVQ | AP | WT-BAQ | RDGT-BAQ |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| SNR(dB) | 12.5521 | 16.2838 | 16.5244 | 16.1370 | 19.1601 | 20.224 |
| 相关系数 | 0.9769 | 0.9885 | 0.9894 | 0.9882 | 0.9940 | 0.9952 |

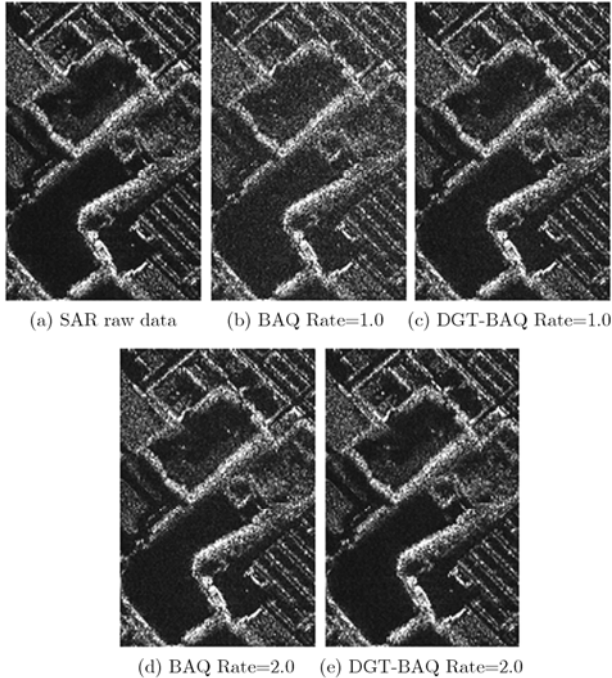


图4 实验结果成像比较

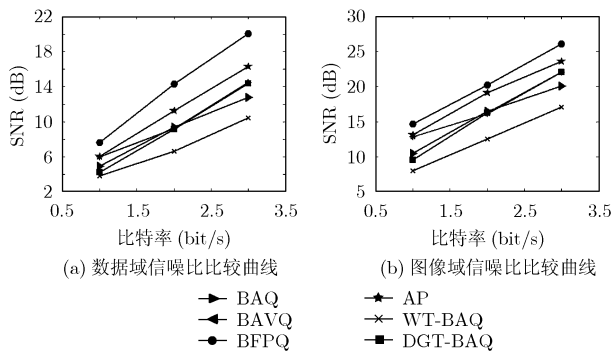


图5 几种算法在不同比特率下的数据域和图像的信器噪比曲线

5 结束语

本文从 SAR 原始数据的线性调频本质特性出发, 利用原始数据信号频率的时变特性, 从时频分析角度对原始数据采用二维实值离散 Gabor 变换并对变换后的多频率平面采用基于方差的比特分配, 之后再行 BAQ 量化。实验结果表明该方法的压缩性能较已有方法有较大提高, 是一种很不错的原始数据压缩算法。由于 Gabor 变换的运算较大, 因此,

其快速算法是下一步研究的重点。

参考文献

- [1] Humeycutt B L. Spaceborne imaging Radar-C instrument[J]. *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing*, 1989, 27(2) : 164-169.
- [2] Kwok R and Johnson W T K. Block adaptive quantization of Magellan SAR data[J]. *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing*, 1989, 27(4) : 375-383.
- [3] Moreira A and Blaser F. Fusion of block adaptive and vector quantizer for efficient SAR data compression. in Proceedings of the International Geoscience Remote Sensing Symposium, Tokyo, 1993: 1583-1585.
- [4] 姚世超, 王岩飞, 张冰尘, 廖蜀燕. 合成孔径雷达原始数据幅相压缩算法[J]. *电子与信息学报*, 2002, 24(11): 1627-1633.
- [5] Pascazio V and Schirinzi G. Wavelet transform coding for SAR raw data compression. Proc. IGARSS, Hamburg, 1999: 2251-2253.
- [6] Pascazio V and Schirinzi G. SAR phase history data compression by using wavelet packets. Proc. IGARSS, Hawaii, 2000: 2639-2641.
- [7] David L and Donoho M V. Data compression and harmonic analysis [J]. *IEEE Trans. on Information theory*, 1998, 44(6): 2435-2476.
- [8] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998, 109-152.
- [9] Qian Shie, Chen Dapang. Discrete Gabor transform[J]. *IEEE Trans. on Signal processing*, 1993, 41(7): 2429-2438.
- [10] Tao Liang and Kwan H K. 2-D real Gabor transform. Proceeding of the 1999 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Edmonton, Alberta, Canada, 1999, 831-834.
- [11] 王宏禹. 非平稳随机信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 126-172.
- [12] Baxter R A. SAR image compression with the Gabor transform [J]. *IEEE Trans. on Geoscience and remote sensing*, 1999, 37(1): 574-588.

- 张文超: 1978年生, 博士生, 研究方向为微波成像、数据压缩、图像处理。
- 王岩飞: 1963年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为微波成像与数字信号处理。
- 潘志刚: 1976年生, 助理研究员, 研究方向为微波成像与数字信号处理、数据压缩。