

基于块自适应量化的 SAR 复数图像实时压缩算法

夏卫平¹⁾ 王贞松²⁾ 韩冀中²⁾

¹⁾(中国科学院研究生院,北京 100049) ²⁾(中国科学院计算技术研究所,北京 100080)

摘要 随着合成孔径雷达(SAR)分辨率的提高,实时成像处理器单位时间内产生的图像数据越来越多,需要有效的复数图像压缩算法来降低数据存储、传输的负担。复数图像压缩算法可以在保证数据有效性的前提下减少数据量,复数图像的压缩有相位保持的特殊问题。普通光学图像的压缩方法不适用于复数图像的压缩,同时 SAR 图像的斑点噪声和相位的随机性也增加了压缩难度。通过考察复数图像数据的特性提出了在消除频率域冗余的基础上使用块自适应量化的 SAR 复数图像压缩算法。块自适应量化方法很好地适合复数图像数据动态范围大的特性,减小了量化误差。压缩前后 SAR 图像参数指标,如分辨率、积分旁瓣比、相位干涉效果图等表明,本文的方法可以有效地保留复数图像相位和模值信息,在一些情况下压缩比能够达到 16:1。而且该算法复杂度不高,易于实时实现。

关键词 合成孔径雷达(SAR) 复数图像 块自适应量化 算术编码

中图分类号: TP391 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2006)08-1097-08

A Real-time Data Compression Algorithm for SAR Complex Images Based on Block Adaptive Quantization

XIA Wei-ping¹⁾, WANG Zhen-song²⁾, HAN Ji-zhong²⁾

¹⁾(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

²⁾(Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract With the development of high resolution synthetic aperture radar(SAR), great quantity of complex data are generated by the real-time SAR image processor which makes effective complex image compression algorithm necessary to release the burden of the capacity of the downlink and the storage system. Complex image compression can reduce the data amount. However the compression algorithm for the SAR complex images is special, which needs to keep the phase preserved. Generally speaking, the optical image compression algorithm isn't suitable for SAR complex images. The coherent speckle noise and the random phase of SAR complex images make compression difficult. By examining the characteristic of complex image data, this paper presents an efficient compression method based on block adaptive quantization(BAQ) after removal of frequency redundancy. The BAQ is adapted to the high dynamic range of SAR complex images and reduces the quantization error. The calibrations of SAR image such as resolution in azimuth and range, integrated side lobe ratio and peak to side lobe ratio, interference images etc. indicate that our method is effective for the fidelity of SAR images' magnitude and phase under the compression ratio of 16:1. What is more, it has the preference of low complexity and easy implementation in real-time system.

Keywords SAR(synthesize aperture radar), complex image, block adaptive quantization(BAQ), arithmetic codec

1 引言

合成孔径雷达(SAR)是一种高分辨率的微波成

像雷达,具有全天时、全天候、不受大气传播和气候影响、穿透能力强等优点,在地理测绘、军事侦察上都得到了快速的发展和运用。随着合成孔径雷达分辨率的提高,它产生的大量复数图像数据对于存储

基金项目:国家自然科学基金项目(69896250-2);国家“973”计划项目(2004CB318202)

收稿日期:2004-11-17;改回日期:2005-08-31

第一作者简介:夏卫平(1978 ~),男。现为中国科学院计算技术研究所博士研究生。主要研究方向为 SAR 信号处理、图像压缩、视频信号处理。E-mail:wpxia@ict.ac.cn

和传输都是很大的挑战,例如对于脉冲重复频率 (PRF) 为 2 000 的雷达系统来说,采集一幅 $16\text{K} \times 16\text{K}$ 的图像只需要大约 8s,如果 I 路和 Q 路都用 16 位数据表示,数据产生率为 128MB/s 。因此,需要对 SAR 复数图像数据压缩,以便能够满足存储容量和传输带宽的要求。SAR 图像压缩近年来已经成为国内外 SAR 数据处理研究的热点之一。

SAR 复数图像不同于普通的光学图像,它具有光学图像不具有的 3 种性质:SAR 复数图像是带有相位信息和模值信息的复数数据;SAR 图像动态范围很大,16 比特的数据的动态范围为 $[-32\ 768, 32\ 767]$;SAR 复数图像中包含丰富的纹理^[1]。因此普通的光学图像的压缩方法用来压缩 SAR 复数图像的压缩效率不高。

目前国内外对 SAR 复数数据压缩的研究从以下 3 个方面考虑:

(1) 原始数据的压缩,即对 I 路、Q 路数据直接压缩,目前通常采用的方法是自适应块量化 BAQ;

(2) SAR 复数图像实部、虚部的压缩,一般在频率域处理;

(3) SAR 复数图像模值、相位的压缩,一般采用小波变换的方法处理。原始数据的压缩通常采用灵活的块适应量化方法 (FBAQ; flexible block adaptive quantization),这种方法可以将 8bits/sample 的数据压缩到 $4 \sim 2\text{bits/sample}$,它的思想是基于均方误差最小的判别准则^[1]。实部、虚部同时压缩采用消除频率域冗余后均匀量化的方法,它的基本思想是 SAR 复数图像是过采样得到的,存在频率域的冗余^[2]。模值图像的压缩采用小波变换和矢量量化的方法^[3,4]。相位由于随机性比较大没有好的压缩方法,在一定的误差允许范围内可以使用 TCQ (trellis code quantization) 的量化方法或者采用小波变换的方法,利用相位数据在小波变换的高频段服从零均值高斯分布的特性^[5,6]。

本文考虑压缩经过 SAR 成像处理器以后的复数图像数据,采用实部、虚部一起压缩的方法。这是因为 SAR 原始数据经过成像匹配滤波器滤波以后数据的相关性提高。首先将 SAR 图像分成 128×128 大小的数据块,经过 2 维 FFT 变换 (fast fourier transform) 后消除频率域的数据冗余;然后对有效数据采用块自适应量化的方法进行量化,最后对量化以后的数据使用算术编码进一步消除统计冗余。块自适应量化方法充分利用了 SAR 图像数据动态范

围大的特点,不同的数据块之间的数据差别较大,块自适应量化算法可以结合各数据块的特性采用不同的量化步长,从而有效地降低了量化误差。实验结果表明,块自适应量化方法是一种行之有效的 SAR 复数图像压缩方法。

2 SAR 复数图像特征分析

2.1 变换编码的压缩方法

基于变换的图像压缩技术得到了广泛的应用,合适的变换可以消除数据之间的相关性从而便于数据压缩。变换以后的数据主要能量集中在少部分数据上,变换后的系数收敛速度越快可以达到的压缩比就越高。理想的线性变换是 Karhunen-Loeve (KL) 变换,它能够很好地消除数据之间的相关性、能量收敛最快,然而 KL 变换需要计算自相关矩阵和转秩,计算复杂度高,因此在图像压缩中很少使用。在图像和视频压缩中使用比较多的是离散余弦变换 (DCT)、离散小波变换 (DWT)、快速傅里叶变换 (FFT)、哈格玛变换 (Hadamard) 等。近年来小波变换由于其能够多尺度地分解信号,在图像、视频压缩中得到了广泛的应用,并衍生出一系列适合于特定数据集合的变换,如 Bandelets、Curvelet 等。与基于 DCT 的方法相比,基于小波的方法能达到更高的压缩比,同时在低比特率时没有方块效应。小波变换的优点可以从静止图像压缩标准的变化反映出来,在 JPEG 中采用 8×8 的 DCT 变换,而在后来的 JPEG2000 中采用 DWT 变换。在相同的峰值信噪比 (PSNR) 下, JPEG2000 的压缩比比 JPEG 要高,而且 JPEG2000 还具有渐进传输等优点^[7]。不同的变换对于不同类型数据产生的收敛效果是不一样的。不同变换对于标准测试图像 Lena 变换后效果如图 1 所示。

从图 1 可以看出,不同的变换产生的效果差别很大。对于 Lena 图像,FFT 变换并做频谱搬移后系数集中在中心位置,四周有很多小数据,FFT 变换后由原来的实数数据变为复数数据,数据量增加了,这种变换不利于光学图像的数据压缩;DCT 变换以后系数集中在左上角,通过 Zigzag 扫描方式扫描以后后面大部分数据为零,可以通过游程编码和 Huffman 编码的方法压缩图像数据,这也是 JPEG 的压缩方法;DWT 变换以后系数分成若干子带,其中基带是原始图像的降采样逼近,细节子带数据很少,这种变换适合于用 EZW、SPIHT 等方法进行编码,

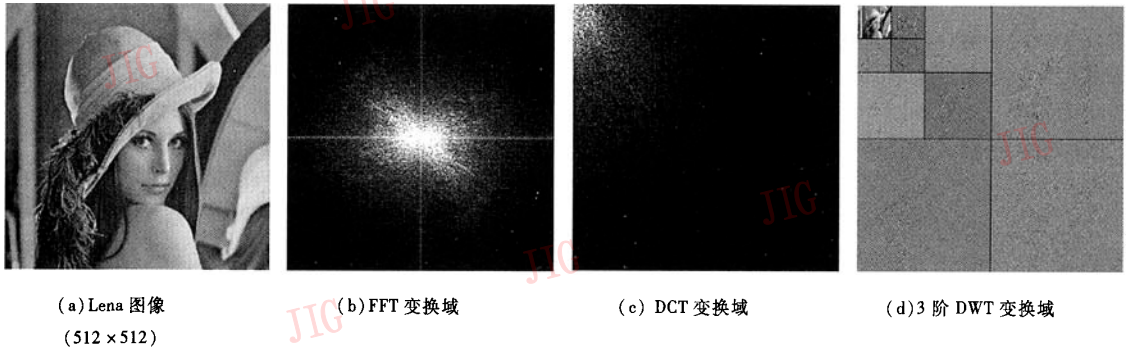


图 1 Lena 图像在不同变换域的图像特征
Fig.1 Lena image comparison after different transform

光学图像压缩使用 DWT 变换优于 DCT 变换,在 JPEG2000 中就是采用 DWT 变换加 EBCOT 编码^[7]。

2.2 SAR 图像数据变换

SAR 复数图像由实部、虚部两部分数据组成的特征决定了通过数据变换消除复数数据的空间相关性行不通。在大部分自然区域,SAR 回波信号是许多相邻点回波信号的矢量和,不同点的回波相互独立,因而 SAR 图像的复数值统计上相互独立。一般情况下 SAR 采样频率高于 Nyquist 采样频率,SAR 图像在频率域存在冗余,可以利用这一性质压缩 SAR 复数图像^[2]。机载 SAR 的复数图像及其 FFT 变换后的模值图像如图 2、图 3 所示。

从图 2、图 3 可以看出,FFT 变换对 SAR 复数数据具有理想的收敛效果。这是由于 SAR 图像在一定

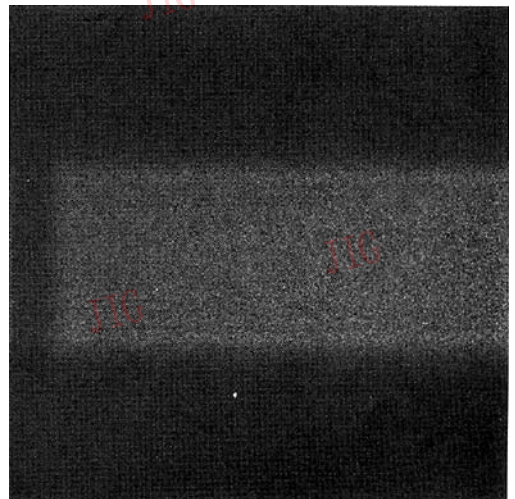


图 3 SAR 复数数据 FFT 变换后模值图像
Fig.3 SAR magnitude image after FFT

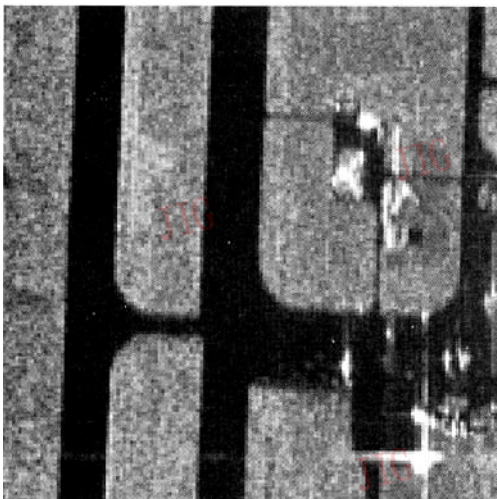


图 2 机载 SAR 图像
Fig.2 SAR image of airborne

的频率范围内采样,超过这个频带范围的数据就很小,可以把这些数值较小的数作为噪声除去,在解压缩的时候使用零填充,这样不但压缩了数据量,而且去除了部分 SAR 图像的斑点噪声。如图 3 中,频率域的有效数据基本集中在中间,大概只有三分之一左右,在数据处理时记下有效数据区域的位置,对该区域以外的数据用零代替。实验结果表明将 SAR 复数图像分成 128×128 大小的块处理比较易于 DSP 实时实现。

3 块自适应量化和编码

3.1 块内有效数据区域选择

FFT 变换以后,SAR 复数图像频率域的特性就

表现出来了,如何选择有效数据的边界成为压缩中的一个关键问题。在本算法首先计算每一块区域中行的和与列的和,并分别得出行和列和的最大值,然后从块的 4 个边界算起,当行和、列和分别大于它们的最大值与阈值 T (如 $T=0.5$) 之积,表示从该行起数据有效,并记下该行、列的坐标,以便解压缩时用。这种方法可以通过调整阈值 T 的大小来动态地调整压缩比。复数数据值大小,一般通过模值来表示,然而求一个复数的模值需要两次乘法、一次加法和一次开方运算,不利于算法的实时实现。在实验中发现实部或者虚部的绝对值可以用来代替模值表示一行、列的数据大小。图 4 就是显示的一块 SAR 复数图像数据 FFT 变换以后实部绝对值行和列和的统计图,块大小为 128×128 。

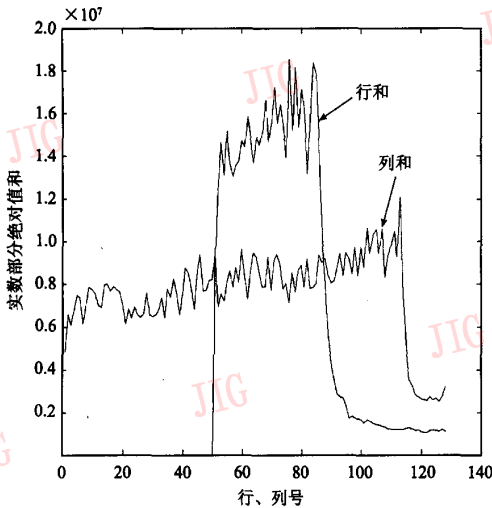


图 4 FFT 变换后实部绝对值的行和列和

Fig. 4 The sum of line and column for absolute real

从 SAR 模值图像的显示效果来看,模值图像、实部图像、虚部图像的效果接近,因此实部的绝对值和可以代替模值表示数据的大小。通过这种方法筛选出的该块有效数据区域为行的上边界 52、下边界 85,列的左边界 1、右边界 115,这基本把该块的有效数据表示出来了。实际上,单从行和、列和的最大值表示该块的能量的峰值并不完全理想,因为如果存在奇异的最大值点,那么可能将大部分有效数据也剔除了。在实现过程中采用了 5 阶平滑滤波器对最大值进行滤波,取得了较好的效果。

3.2 块自适应量化 (BAQ)

SAR 复数图像具有很大的动态范围,有些区域比较暗,数据值比较小;有些区域特别亮,数值比较

大。FFT 变换以后数据的动态范围变得更大,增加了压缩的难度。块自适应量化 BAQ 方法最初被用来压缩 SAR 原始数据,SAR 原始数据服从高斯分布,通过估计每一块数据的方差来查表决定每一块的量化步长,通过 BAQ 可以将 8bits 的数据压缩到 2bits^[8]。本文考虑使用 BAQ 的方法来压缩 SAR 成像以后的复数图像数据。

由于 SAR 复数图像数据经过 FFT 变换以后数据动态范围大,量化的任务是将区间 $[-u_{max}, u_{max}]$ 上的数用固定长度的比特表示出来。不同的数据块 u_{max} 差别比较大,如果对于所有的数据块使用同样的量化步长,就要使用所有块中的最大的 u_{max} ,对于不同数据块 u_{max} 变化范围比较大,这显然不是理想的方法。块自适应量化是一种能够适应块局部特性的量化方法。量化时先计算出每块的最大数据值,根据该值计算量化步长,为了便于实时实现,量化步长通过移位数来表示,如每个数量化为 β 比特,则量化步长为

$$Q_{step} = \text{floor}(\log_2(u_{max})) - \beta + 1$$

其中, $\text{floor}(x)$ 表示不大于 x 的最大整数。每一个数据块压缩时只需要记下量化步长。图 5 显示的是对一幅 $4K \times 2K$ 的 SAR 图像的块量化步长统计信息,可以看出量化变化范围比较大,量化步长相差 8 倍左右。块自适应量化比均匀量化具有显著的优点,它产生的平均量化误差 (MQE) 要比均匀量化产生的平均量化误差小得多^[4]。在本文量化模型中,假设产生 N 个量化步长,第 i 个移位步长为 K_i ($i = 0, 1, \dots, N-1$),每个移位步长产生的概率为 P_i ($i = 0, 1, \dots, N-1$),最大移位为 K 。均匀分布的数据使

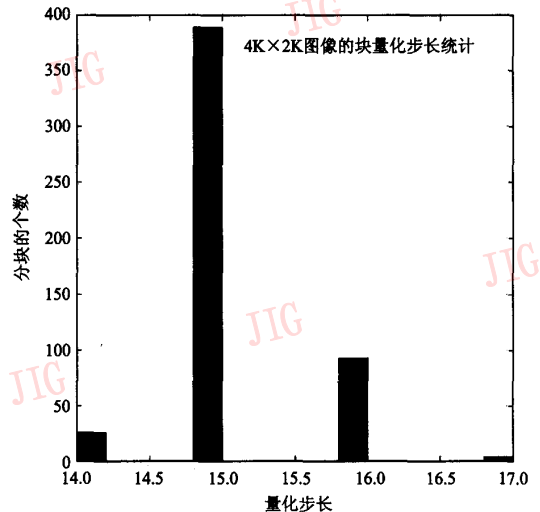


图 5 一幅图像块量化步长统计图

Fig. 5 The statistic of quantization step

用均匀量化器,若量化步长为 Q ,则平均量化误差 $MQE = Q/4$ 。使用块自适应量化产生的平均量化误差为

$$MQE_{baq} = \sum_{i=0}^{N-1} 2^{K_i} / 4P_i = \sum_{i=0}^{N-1} 2^{K_i-2} P_i \quad (1)$$

使用均匀量化 (uniform quantization) 的方法,量化步长移位统一变为 K ,对于原来移位步长为 K_i 块现在使用移位步长为 K 进行量化,产生的平均量化误差为 $MQE = 2^K / 4$,从而使用均匀量化参数的 MQE_{uq} 为

$$MQE_{uq} = \sum_{i=0}^{N-1} 2^K / 4P_i = 2^{K-2} \quad (2)$$

MQE_{baq} 要比 MQE_{uq} 小很多,例如对于图 5 中 $N=4, K_i$ 分别为 14、15、16、17, P_i 分别为 0.048、0.746、0.183、0.023。 $MQE_{baq} = 10\ 207.232$, 而 $MQE_{uq} = 32\ 768$ 。

3.3 量化后的数据的统计特征和自适应算术编码

区间 $[-u_{max}, u_{max}]$ 上的数据经过 BAQ 量化成 4bits 的数据,即映射到 $[-7, 8]$ 区间上的 16 个整数。量化以后的数值为 i ,通过下式将数据转换到 $[0, 15]$ 区间上。

$$f(i) = \begin{cases} 2i - 1 (i > 0) \\ -2i (i \leq 0) \end{cases} \quad (3)$$

实验中发现,经过量化以后的数据服从一定的分布,如图 6 所示,它反应的是一块数据量化后的各个数据值的分布情况。根据香农的离散随机变量的熵公式 $H(F) = - \sum_{f \in F} p(f) \log_2 p(f)$ (其中 $p(f)$ 表示

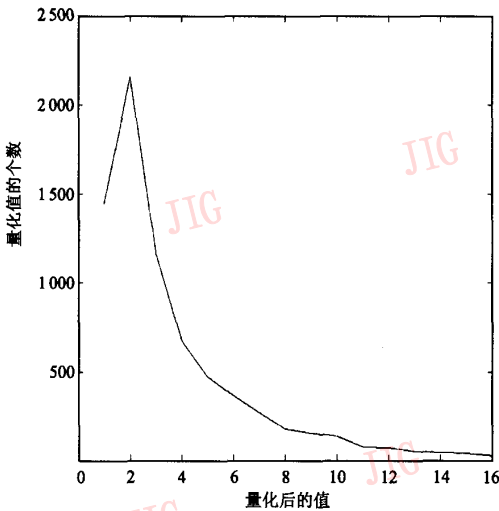


图 6 量化后的数据分布图

Fig.6 The distribution after quantization

事件 f 发生的概率),图 6 所示的数据块信息熵为 3.78,而量化后每个数据为 4bits。因此可以进一步利用熵编码来提高压缩比。在 Huffman 编码和算术编码中选择了算术编码,因为它的编码效率更高,基本接近于熵,它的一个缺点就是运算复杂度较高。不同数据块的分布特性不一样,块自适应的算术编码可以根据各数据块的分布情况及时地调整概率分布从而得到较好的熵编码效率。不同的数据块采用不同的概率模型,同一块内采用固定概率模型,这种块自适应的算术编码效率比较高,它能够在每个块内部达到最优的编码效率从而达到全局的最优^[9]。

3.4 压缩比分析

SAR 复数图像压缩分为 2 维 FFT 变换、有效数据区域选择、BAQ 量化、自适应算术编码几个步骤。数据量的减少在后 3 个步骤中都有体现,设数据块的大小为 $N_1 \times N_2$,压缩率为 CR ,则有效数据区域选择过程的压缩率一般在 $CR_s = 3.8$ 左右,BAQ 量化的压缩率为 $CR_q = 4$,算术编码的压缩率一般为 $CR_{ac} = 4/H(F) \approx 1.067$ 。每一数据块在压缩过程中需要保留一些该数据块的统计信息,如边界值、量化移位步长、量化后概率分布,设每块数据需要 B_{ctrl} 比特。如果 SAR 复数图像数据是实部、虚部各 16bits 的 Short 型数据,每一块压缩后的数据率

$$R = \frac{32N_1N_2}{CR_s CR_q CR_{ac}} + B_{ctrl} = \frac{32}{CR_s CR_q CR_{ac}} + \frac{B_{ctrl}}{N_1N_2}$$

整体的数据压缩比为 $CR = 32/R$ 。如 N_1, N_2 都为 128, B_{ctrl} 为 296, 则 $R = 1.973 + 0.018 \approx 1.991$ bpp, $CR = 32/R = 32/1.991 \approx 16.07$ 。

4 压缩质量评估

衡量一个压缩算法是否有效,关键是看该压缩算法能否有效地保持图像的信息,SAR 复数图像压缩算法首先要能够有效地保持模值和相位两方面的信息,然后再看压缩的视觉效果、压缩比、运算复杂度等参数。SAR 复数图像点目标的分辨率、积分旁瓣比、峰值旁瓣比等是衡量 SAR 图像质量的指标,评判压缩前后图像的这些参数指标可以说明压缩算法的有效性。SAR 复数图像还具有光学图像不具备的相位信息,可以通过比较压缩前后相位的误差和对同一地区的两幅复数图像做干涉、解卷绕以后相位的误差来分析压缩对相位的影响。

4.1 常用压缩指标衡量

常用压缩效果衡量指标包括压缩前后图像的主观视觉效果、峰值信噪比 $PSNR$ 、压缩比 CR 、压缩时间等参数。图 7、图 8 是压缩前后的两幅图像的效果情况。表 1 是压缩的量化指标的评估,实验的平台为 TI 的定点 DSP SM320c6416, DSP 的频率为 720MHz。其中, $PSNR = 10 \log_{10} \frac{Max \times Max}{MSE}$, Max 为信

号的峰值, MSE 为均方误差, MPE 为平均相位误差。通常情况下 $PSNR$ 到达 30, 人眼就很难区分开压缩带来的差别。从实验的结果来看, 使用一个 DSP 压缩 $16K \times 16K$ 大小的复数图像需要 69s 左右, 在脉冲重复频率为 2000 的情况下, 实时实现大约需要 $69/8 \approx 9$ 个 DSP 同时工作, 这对于这么高速率的数据量来说相对较快。

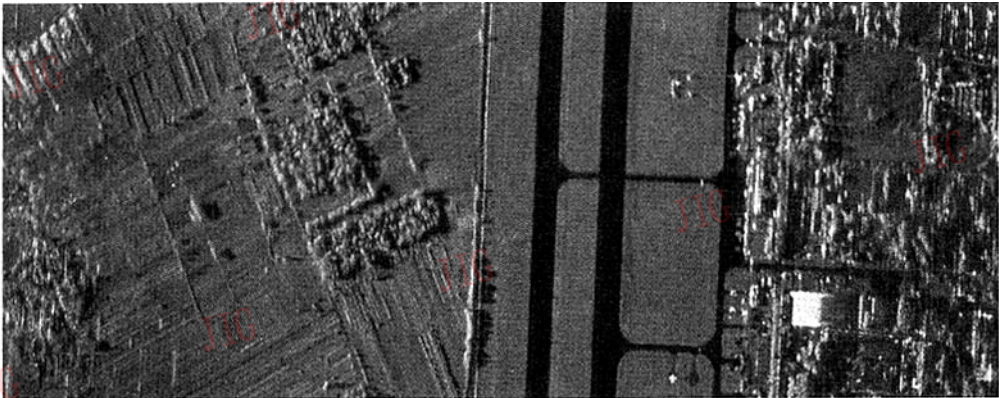


图 7 压缩前 SAR 模值图像

Fig. 7 The magnitude image of SAR complex image

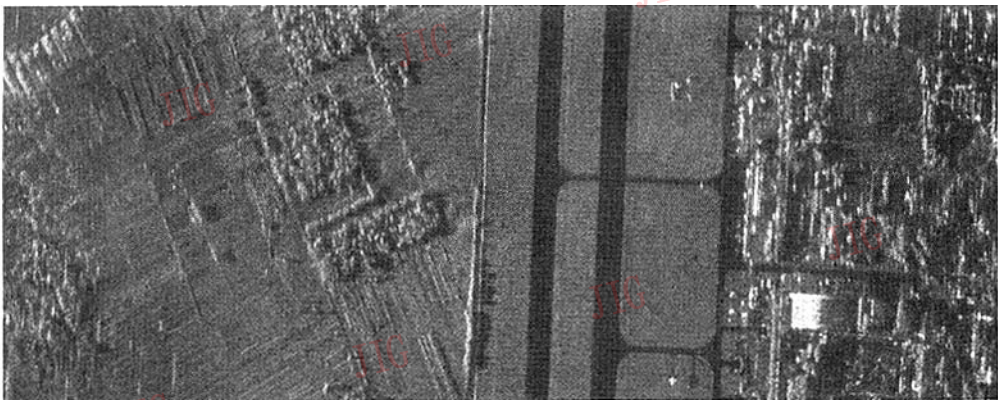


图 8 解压缩后的 SAR 模值图像

Fig. 8 The decompressed image of SAR magnitude

表 1 图像压缩的评估参数

Tab. 1 The evaluating parameters of SAR image compression algorithm

图像大小	压缩时间(ms)	压缩比 CR	实部 $PSNR$	实虚 $PSNR$	模值 $PSNR$	MPE (度)
1K × 1K	316.56	15.443	49.639	48.420	48.9816	30.2
2K × 2K	1201.9	15.534	47.614	47.766	48.8279	30.5
8K × 2K	4315.4	15.836	42.682	43.317	43.043	24.5

4.2 压缩前后 SAR 点目标图像参数指标衡量

SAR 复数图像点目标的分辨率、积分旁瓣比、峰值旁瓣比等是衡量 SAR 图像质量的指标,评判压缩前后图像的这些参数指标可以说明压缩算法的有效性。点目标 SAR 图像的分辨率可以用 3DB 宽度来表示,它的计算可以用峰值波形两侧在值为峰值的一半时的距离来衡量,3DB 宽度越小表示 SAR 系统的分辨率越高。峰值旁瓣比(PLSR)是指点扩散函数的最大旁瓣值与主瓣值的比,表示为 $PLSR = 10\log_{10}\frac{P_s}{P_m}$ (其中 P_m 、 P_s 分别表示最大的主瓣值和最

大的旁瓣值),这是一个负值,PLSR 越小,表示主瓣越强,图像效果越好。积分旁瓣比(ISLR)是局部图像对比的衡量指标,ISLR 越小,表示旁瓣的效果比较弱,图像效果越好^[10]。

从表 2 的数据可以看出,压缩以后图像的 3DB 宽度、峰值旁瓣比提高了,而积分旁瓣比有所降低,这是因为压缩算法将“扰动”的频谱作为噪声滤除了,图像的参数指标性能得到了改善,同时解压缩以后的图像更加平滑而使得积分旁瓣比增加。

表 2 点目标图像压缩前后性能指标

Tab.2 Performance comparison of point target for compression

	距离向			方位向		
	3DB 宽度 (m)	峰值旁瓣比 (dB)	积分旁瓣比 (dB)	3DB 宽度 (m)	峰值旁瓣比 (dB)	积分旁瓣比 (dB)
原始图像	0.710487	-3.155310	6.726983	0.710487	-0.141909	9.569751
解压缩后的图像	0.691414	-3.274507	7.186416	0.691414	-0.143470	9.839910
与原始图像的比较	0.018973 ↑	0.119197 ↑	0.459433 ↓	0.018973 ↑	0.001561 ↑	0.270159 ↓

4.3 压缩对相位信息的影响

能否有效地保留相位信息是判断复数图像的压缩算法是否有效的重要指标之一。衡量相位信息通常有两种方法,一种是直观地通过平均相位误差(MPE)进行;另一种是通过干涉后高程信息的误差来判断,后一种比较复杂,但是真正具有实际价值。从表 1 实验结果可以看出,压缩以后的平均相位误差在 30°左右,约为 8.5%。

保留相位的目的是能够让我们利用同一地区

的重复轨道飞行成像后的复数图对图像进行干涉,通过一系列的处理并结合地面控制点,能够进一步得到地表的高度信息^[11]。干涉处理由以下几个步骤组成:图像配准,干涉图生成,去平,滤波,相位展开,基线估计,DEM 图生成^[12]。图 9 是两幅相干图像干涉相位展开后一条距离线数据。从图中可以看出,解卷绕以后产生的高程图相对误差比较小,平均相对误差约 5%,压缩算法有效地保留了相位信息。

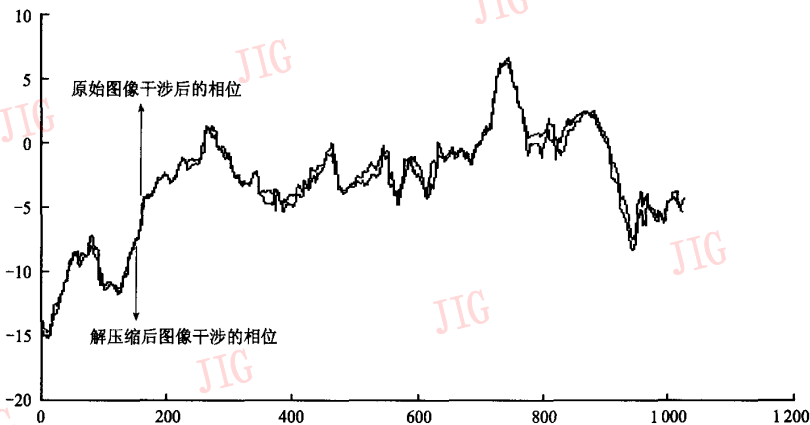


图 9 相位解卷绕后一条距离线的相位分布图

Fig.9 The comparison of unwrapped phase in range

5 结 论

本文提出了一种基于块自适应量化方法的复数图像压缩算法,该算法避开了 SAR 模值图像斑点噪声大难以压缩的特点,直接对复数数据的实部、虚部处理。基于块自适应的量化方法能够有效地压缩复数图像,并且在一定程度上消除 SAR 图像的斑点噪声。压缩前后 SAR 图像的分辨率、峰值旁瓣比、干涉效果图等表明这是一种有效的复数图像压缩算法,可以同时保留复数图像的模值和相位信息,并且易于实时实现。

参考文献 (References)

- 1 Ronald Kwok. Block Adaptive Quantization of Magellan SAR Data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1989, 27(4): 375 ~ 383.
- 2 Paul Eichel, Robert W Ives. Compression of complex-valued SAR images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(10): 1483 ~ 1487.
- 3 Philippe Monet, Eric Dubois. Block adaptive quantization of images [J]. IEEE Transactions on Communications, 1993, 41(2): 303 ~ 306.
- 4 Gorman John D, Horowitz Michael J, Neuhoff David L, *et al.* Wavelet transform synthetic texture VQ coding of SAR imagery [A]. In: International Conference on Image Processing [C], Washington DC, USA, 1995, 3:204 ~ 207.
- 5 James H Kasner, Michael W Marcellin. Universal trellis coded quantization [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(12): 1677 ~ 1687.
- 6 Brandfass M, Coster W, Benz U, *et al.* Wavelet based approaches for efficient compression of complex SAR image data [J]. Geoscience and Remote Sensing, 1997, 4: 2024 ~ 2027.
- 7 Taubman David S, Marcellin Michael W. JPEG2000 Image Compression Fundamentals Standards and Practice [M]. Boston, MA, USA: Kluwer Academic Publishers, 2001: 513 ~ 524.
- 8 McLeod I H, Cumming I G. On-board encoding of the ENVISAT wave mode data [A]. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium [C], Firenze, Italy, 1995:1681 ~ 1683.
- 9 Alistair Moffat, Radford Neal, Witten Ian H. Arithmetic coding revisited [A]. In: Data Compression Conference [C], Snowbird Utah, USA, 1995: 202 ~ 211.
- 10 Huang Y H, Mao S Y, Zhao Y Q. Space-borne SAR image quality evaluation [J]. Data Acquiring and Processing, 1995, 1:1 ~ 9. [黄永红,毛士艺,周荫清. 星载 SAR 图像质量评估 [J]. 信息获取与处理技术, 1995, 1:1 ~ 9.]
- 11 Qiao R R. Studies on Space-borne Multi-mode SAR System and Signal Processing [D]. Beijing: The Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2000. [乔蓉蓉. 星载合成孔径雷达多模式系统研究与信号处理 [D]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 2000.]
- 12 Tang J, Wang Z S. The study of two-dimensional phase unwrapping algorithm for SAR interferometry [J]. Journal of Remote Sensing, 1997, 1(3): 172 ~ 177. [唐健,王贞松. 干涉 SAR 的二维相位展开算法研究 [J]. 遥感学报, 1997, 1(3):172 ~ 177.]