

基于自适应加权方法的复值 SAR 图像的频域压缩改进算法

孙 明 李春升

(北京航空航天大学电子工程系 北京 100083)

摘 要 该文提出了一种基于自适应加权方法的复值 SAR 图像的频域压缩改进算法。该算法在原有频域压缩算法的基础上采用了自适应的加权方法,在低压缩比(<20:1)的情况下能够很好地保留原始数据图像的特征,是一种有效的复值 SAR 图像的压缩算法。复值空域相关系数指标评估,以及原始数据、重建数据的幅度图对比和两幅数据图像之间的相关系数图都验证了算法的有效性。

关键词 复值 SAR 图像, 数据压缩, 自适应加权, 二维快速傅里叶变换

中图分类号: TN958, TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)01-0012-04

An Adaptively Weighted Method Based Approach for Data Compression of Complex-Valued SAR Images in Frequency Domain

Sun Ming Li Chun-sheng

(Department of Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract In this paper, an adaptively weighed method based approach is proposed for data compression of complex-valued SAR images in frequency domain. Based on the conventional compression algorithm in frequency domain, the improved approach adopts an adaptively weighed method and preserves the characteristic of the raw SAR images well at low compression ratio (<20:1). It proves the efficiency of the improved approach for data compression of complex-valued SAR images through evaluating complex spatial correlation coefficient, comparing the amplitude images of raw data and decompressed data, and displaying the correlation map visually.

Key words Complex-valued Synthetic Aperture Radar (SAR) image, Data compression, Adaptively weighted, 2D-FFT

1 引言

随着高分辨率 SAR 的不断发展,人们不仅要应用到实值 SAR 图像,而且在许多场合要应用到复值 SAR 图像。通常来说复值 SAR 图像比实值 SAR 图像产生更大的数据量。对于实现星上实时成像处理的星载 SAR 来说,大数据量的图像数据的下传相对于有限的带宽来说是非常困难的,此外,大数据量的复值 SAR 图像的存档也将占据很大的存储空间,因此,对于复值 SAR 图像的压缩是非常必要的。

不同于普通光学图像,复值 SAR 图像通常有着很大的动态范围、很小的空域相关性和固有的斑点噪声,这就使得许多普通图像的压缩算法应用到该领域有很大的局限性;另一方面,许多的复值 SAR 图像应用,像干涉应用,对于相位准确性和相位保持的要求很高,这对于重建图像的准确性有更高的要求,从而对于压缩算法的选择带来很大的难度。

目前国外对于复值 SAR 图像的压缩算法相对较少,主要集中在变换域方法,像小波变换框架下的压缩^[1-3],而此类算

法的复杂程度通常较高,并且斑点噪声的存在严重影响压缩效率,而频域压缩^[4]的算法复杂程度则相对较低,本文给出的基于自适应加权方法的复值 SAR 图像的频域压缩改进算法则充分地利用了复值 SAR 图像的频域特性在低压缩比情况下能够很好地保留图像的特征,重建图像有很好的准确性。

本文第 2 节详细介绍了基于自适应加权方法的复值 SAR 图像的频域压缩改进算法,第 3 节介绍了评估复值 SAR 图像压缩性能的指标:复值空域相关系数。最后,应用该算法对复值 SAR 图像进行压缩,给出了利用评估参数进行评估的结果,以及原始数据、重建数据的幅度图和两幅图像之间的相关系数图,从视觉效果进行对比,并且给出了相应的结论。

2 基于自适应加权方法的频域压缩改进算法

复值 SAR 图像在频域内的信号等同于地面散射体的射影函数,而射影函数是整个 SAR 波束照射区域内所有散射子叠加的结果,根据中心极限定理,该变换域内信号的分布为

两维高斯分布^[5]。复值SAR图像的频域压缩算法的基本思路正是将复值SAR图像数据经过二维快速傅里叶变换(2D-FFT)变换到频域,利用频域信号实部和虚部满足独立同分布的高斯分布而采用Lloyd-Max最优量化器进行量化压缩^[4]。

该算法压缩比的获得通常有 3 个途径:由于距离向信号带宽小于采样率(比例通常为 80-85%),而且成像时方位向也常采取过采样的手段,亦即多普勒带宽小于脉冲重复频率,因此,在变换域处理带宽之外将会出现小系数,该部分小系数在压缩过程中将被丢弃,不进行处理,实现了部分压缩比;由于成像过程中通常为了抑制旁瓣而采取加窗处理,所以对于处理带宽之内的系数通常通过除以该窗函数而去除窗函数加权的影响,使其系数满足独立同分布的高斯分布,然后采用 Lloyd-Max 最优量化器进行量化提高压缩比;最后对量化后的数据进行无损的熵编码进一步提高压缩比。

一般说来,如果成像过程中所加的窗函数不能精确获知,或者窗函数不是严格为正,就不能通过简单的除以窗函数来使得频域信号满足独立同分布的高斯分布这样的前提,从而使得 Lloyd-Max 最优量化器达不到最优量化的效果,此外,如果调频信号存在较大失真,这样的操作同样不能保证高斯分布的前提而达不到最佳的压缩效果。

改进的算法采用了自适应的加权方法,避免了这样的问题,其核心在于根据频域内信号的实际的幅度包络自适应地调整加权函数,从而使得加权函数匹配于不同图像的频域信号,消除了各种因素对于图像的频域信号的影响。它首先分别计算频域内信号沿距离向和方位向的平均的幅值包络,距离向和方位向的加权函数在处理带宽内分别取值为归一化的距离向和方位向的平均幅值包络,处理带宽外取值为零,然后利用加权函数分别对信号沿距离向和方位向进行加权处理。图 1 分别给出了真实复值 SAR 图像数据的频域信号沿距离向和方位向的平均幅值包络(a)和相应的加权函数(b)。

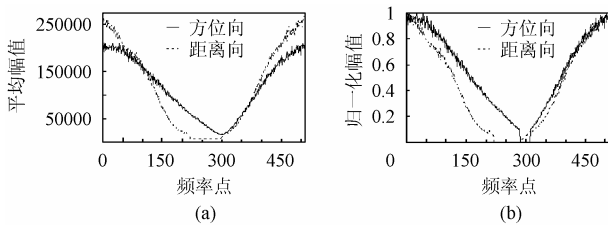


图 1 距离向和方位向的平均幅值包络(a)和加权函数(b)

由于采用了同输入信号相匹配的加权函数,因此可以很好地抵消掉由于成像过程中加窗等各种因素造成的影响,从而使得复值 SAR 图像在频域内的信号分布很好地满足独立同分布的高斯分布。图 2 给出了未加权时真实复值 SAR 图像在频域内信号实部的概率函数分布曲线(a)和采用自适应加权方法后真实复值 SAR 图像在频域内信号实部的概率函数分布曲线(b),其中空白框线为拟合的高斯分布的概率函数

分布曲线,频域内信号的虚部也符合同样的分布,从图中可以看出采用这种自适应加权方法的信号很好地满足了高斯分布的前提,从而可以最大限度地利用 Lloyd-Max 最优量化器压缩信号。

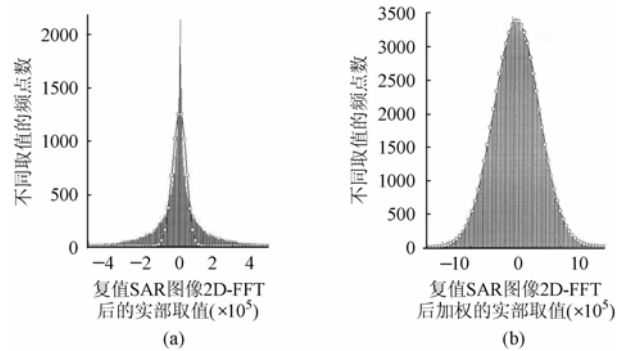


图 2 复值 SAR 图像经 2D-FFT 经变换后未加权(a)和采用自适应加权后(b)的实部的概率函数分布曲线及拟合的高斯分布曲线

图像的重建过程就是编码压缩的反过程,包含压缩和重建的整个改进算法的结构框图见图 3,其中 Lloyd-Max 量化器对频域信号的实部和虚部分别进行量化编码,值得注意的是在重建过程中去除加权函数后要进行处理带宽外的补零工作。

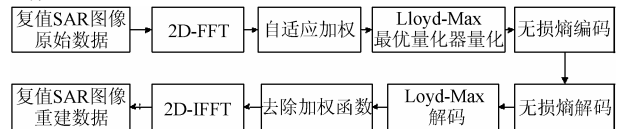


图 3 改进的频域压缩算法的编码和解码结构框图

3 复值空域相关系数

对于图像有损压缩性能的评估是非常重要的但又难以处理的一个问题,至今仍然没有形成统一的标准。在许多图像处理的应用场合, MSE、SNR和PSNR等指标被用来衡量压缩图像的质量,但是它们有很大的局限性,通常不能反映压缩图像的局部性能,并且将它们应用到像SAR图像等具有大动态范围的图像处理中可能会产生不可信的结果^[6]。近年来提出的复值空域相关系数(CSCC)在评估复值SAR图像压缩的性能时则能提供较为客观的结果,被广泛地采用。本文在评估压缩的复值SAR图像的局部性能时采用了CSCC评估参数^[4,6]。对于复值SAR原始图像 f 和重建图像 g ,在像素点 (x, y) 处的复值空域相关系数的定义如下:

$$c(x, y) = \frac{\left| \sum_i \sum_j f(i, j) \cdot g^*(i, j) \right|}{\sqrt{\sum_i \sum_j \|f(i, j)\|^2 \cdot \sum_i \sum_j \|g(i, j)\|^2}} \quad (1)$$

其中索引值 i 和 j 表示像素点 (x, y) 邻域内的像素,应用式(1)对每个像素点进行邻域求值时,相关系数将落在[0.0,1.0]范围内。当原始图像和重建图像在邻域内的每个复数值都相

等时, 该像素点的相关系数取值为 1.0, 表示两幅图像在该像素点完全相关, 当取值为 0.0 时意味着完全不相关。式(1)的应用前提为在邻域内的复数据均值为零, 对于复值 SAR 图像来说, 当邻域尺寸足够大时(例如 5×5), 这样的假设通常是成立的。

通过计算所有像素点的相关系数值和绘制相关系数图, 我们可以很直观地从视觉上获知重建图像和原始图像在邻域内的局部相似程度, 相关系数值越大、相关系数图中像素点亮度越大, 意味着重建图像和原始图像的相似程度越好。如果对整幅图像 (M×N) 的相关系数求平均值时, 获得了平均空域相关值(ASC):

$$C_{avg} = \frac{1}{MN} \sum_x \sum_y c(x,y) \quad (2)$$

该参数给出了整幅图像平均的相似程度, 可以用来衡量重建图像的全局性能。

4 计算机仿真结果

使用改进的频域压缩算法对 SAR 单视复图像进行处理, 亦即复值 SAR 图像数据的实部和虚部均采用有符号的 16 位整型数来表示。数据是 SAR 对中国南方某地区进行照射、接收回波和成像处理而得到的 1m×1m 高分辨率真实复值 SAR 图像数据, 我们按 512×512 大小从中选取了有代表性的 5 幅图像, 分别采用未加权和自适应加权的方法进行处理, 计算重建图像和原始图像之间的复值空域相关系数图和平均空域相关值(在此邻域的尺寸选择为 5×5), 表 1 给出了压缩比为 4:1 时 5 幅图像采用两种处理方法对应的平均空域相关值, 表 2 则给出了压缩比为 8:1 时相应的平均空域相关值, 此处的压缩比指采用 Lloyd-Max 最优量化器量化获得的部分压缩比, 以下未加说明压缩比均为此含义, 压缩比 4:1 意味着原始数据频域处理带宽内的像素点采用 8 位表示, 而压缩比 8:1 则为 4 位表示。

从表 1, 表 2 中可以看出采用自适应加权的方法后平均空域相关值优于未加权的結果, 并且随着压缩比的提高, 优势体现得更加明显, 从 4:1 时的 0.03 到 8:1 时的 0.08。为了能直观清晰的说明改进算法的优势, 图 4 给出了图像 1 原始数据的幅度图, 图 5 给出了在压缩比为 4:1 时采用自适应加

权方法(a)和未加权方法(b)时图像 1 的重建幅度图, 而图 6 则给出了两种方法下相应的复值空域相关系数图, 从图中可以看出采用自适应加权方法的复值空域相关系数图中的像素点比较亮, 表明改进的压缩算法具有较好的局部性能, 采用自适应加权方法的平均空域相关值约为 0.96 也优于未加权方法的 0.90, 表明改进的压缩算法也具有较好的全局性能。

由表 2 通过计算可得在压缩比 8:1 的情况下 5 幅图像平

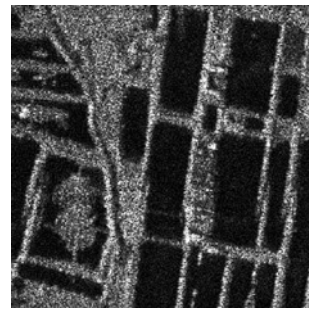


图 4 图像 1 原始数据的幅度图

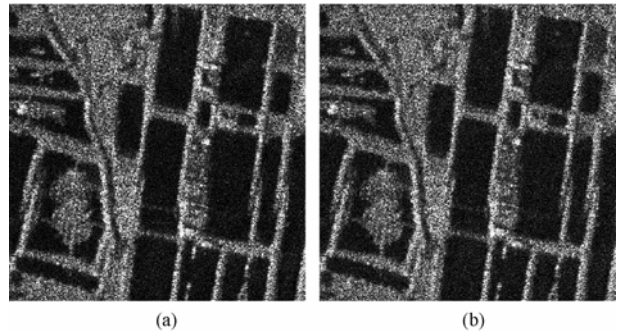


图 5 压缩比为 4:1 时采用自适应加权方法(a)和未加权方法(b)时图像 1 的重建幅度

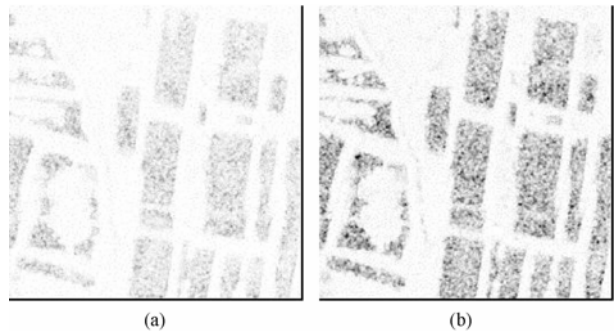


图 6 压缩比为 4:1 时采用自适应加权方法(a)和未加权方法(b)时图像 1 的复值空域相关系数图

表 1 压缩比为 4:1 时的平均空域相关值

处理方法	图像 1	图像 2	图像 3	图像 4	图像 5
自适应加权	0.958793	0.982704	0.994049	0.984527	0.993753
未加权	0.897693	0.950049	0.972319	0.952782	0.968520

表 2 压缩比为 8:1 时的平均空域相关值

处理方法	图像 1	图像 2	图像 3	图像 4	图像 5
自适应加权	0.782497	0.871605	0.926284	0.887281	0.921408
未加权	0.708542	0.792703	0.846038	0.807813	0.834201

均的平均空域相关值仍然达到 0.88, 在很大程度上能够达到很多应用场合下对于相位保持的要求。

整体压缩比主要取决于上文提到的压缩比, 即为采用 Lloyd-Max 最优量化器量化获得的部分压缩比。通过去除处理带宽外的小系数获得的部分压缩比一般是不固定的, 这取决于距离向信号带宽与采样率的比值以及方位向多普勒带宽与脉冲重复频率的比值, 通常说来此部分压缩比可达到 2:1, 如果方位向的过采样率比较大时(对于机载 SAR), 此部分压缩比可以更高, 文献[4]中此部分压缩比达到 2.4:1。无损的熵编码通常也能带来 1.2:1 的部分压缩比。当原始数据的频域处理带宽内的像素点采用 8 位表示时对应的整体压缩比可达到 9.6:1, 当采用 4 位表示时整体压缩比可达到 19.2:1。因此, 改进的压缩算法在低压缩比(<20:1)的情况下可以获得很好的压缩效果。

此外, 观察表 2 可以注意到, 在压缩比较高的情况下, 图像 1 和图像 3 的平均空域相关值相差比较大, 达到 0.14, 作为比较, 图 7 和图 8 分别给出了在压缩比为 8:1 时采用自适应加权方法下图像 1(a)和图像 3(b)的重建幅度图和它们的复值空域相关系数图。从图中可以看出, 复值空域相关系数图中对应于幅度图的阴影区(低散射系数区)的像素点比较暗, 复值空域相关系数在此范围内取值较小, 表明与原始图

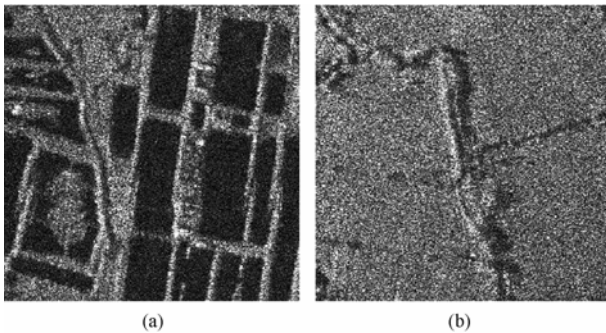


图 7 压缩比为 8:1 时采用自适应加权方法下
图像 1(a)和图像 3(b)重建幅度图像

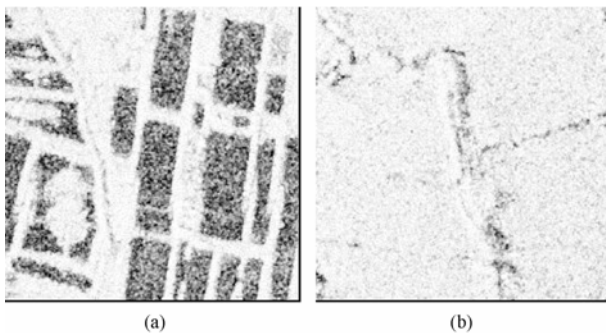


图 8 压缩比为 8:1 时采用自适应加权方法下
图像 1(a)和图像 3(b)的复值空域相关系数图

像的相关性差, 存在较大失真, 而图像 1 相对于图像 3 存在大范围的阴影区, 使得图像 1 的平均空域相关值相对于图像 3 小得多。因此, 此改进的压缩算法适应于像图 3 这样具有少量阴影区的均匀场景。对应于阴影区的复值空域相关系数取值较小的原因有待进一步研究。

5 结束语

改进的复值 SAR 图像的频域压缩算法由于采用了自适应的加权方法, 可以在不知道成像过程中所加窗函数的情况下自适应地补偿掉各种因素对于频域内信号为独立同分布的高斯分布的影响, 从而最大限度地利用了 Lloyd-Max 最优量化器, 平均空域相关值和复值空域相关系数图都充分表明该算法优于未加权的频域压缩算法, 取得了很好的全局和局部效果, 在低压缩比时有着很好的重建准确性。

参考文献

- [1] Werness S A, Wei S C, Carpinella R. Experiments with wavelets for compression of SAR data. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(1): 197 – 201.
- [2] Brandfass M, Coster W, Benz U, Moria A. Wavelet based approaches for efficient compression of complex SAR image data. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 4(8): 2024 – 2027.
- [3] Ives R W, Magotra N, Kiser C. Wavelet compression of complex SAR imagery using complex- and real-valued wavelets: a comparative study. Thirty-Second Asilomar Conference. Signals, Systems & Computers, 1998, 2 (11): 1294 – 1298.
- [4] Eichel P, Ives R W. Compression of complex-valued SAR images. *IEEE Trans. Image Processing*, 1999, 8 (10): 1483 – 1486.
- [5] Jakowatz C V, Thompson P A. A new look at spotlight mode synthetic aperture radar as tomography: Image three-dimensional targets. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1995, 4(5): 699 – 703.
- [6] Robert LCDR, Ives R W, Eichel P, Magotra N. A new SAR image compression quality metric. Forty-Second Midwest Symposium, Circuits and Systems, 1999, 2 (8): 1143 – 1146.

孙 明: 男, 1978 年生, 硕士生, 从事高分辨率雷达数据压缩等方面的研究工作。

李春升: 男, 1965 年生, 教授, 从事信号与信息处理、高分辨率雷达成像等方面的研究工作。