

一种有效的合成孔径雷达原始数据高倍数压缩算法

秦 蕾 王岩飞 胡晓新
(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘要: 在分析分块自适应量化(BAQ)压缩数据的分布特性、量化信噪比、动态范围及其对矢量量化数据压缩性能和运算量影响的基础上,对分块自适应矢量量化(BAVQ)压缩算法进行了改进,提出了采用高比特数 BAQ 压缩的方案。利用改进的 BAVQ 算法压缩高分辨率 SAR 原始数据的结果表明,在相同压缩比的条件下,该文提出的改进算法可获得更大的量化信噪比。解压缩数据生成的图像可以清晰地保留图像中的细节信息。

关键词: 原始数据压缩, 分块自适应矢量量化, 高倍数压缩

中图分类号: TN957.52, TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)08-1233-04

An Efficient High Compression Ratio Algorithm for SAR Raw Data

Qin Lei Wang Yan-fei Hu Xiao-xin
(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract In this paper, the factors that affect the Block Adaptive Vector Quantization (BAVQ) compression performance are analyzed, which are the Signal to compression Noise Ratio (SNR) of Block Adaptive Quantization (BAQ), the encoding algorithm computation complexity, the statistics and dynamic range of BAQ compressed data. Based on these factors, the paper proposes an improved BAVQ algorithm to compress Synthetic Aperture Radar (SAR) raw data. In the improved algorithm, the traditional block adaptive quantizer is replaced by more bits one. Using this improved BAVQ algorithm to compress high resolution SAR raw data, larger SNR values than the previous compression algorithms under the same compression ratio are obtained. The decompressed images reserve most of details on the images resulted from raw data.

Key words Raw data compression, Block adaptive vector quantization, High compression ratio

1 引言

合成孔径雷达(SAR)是现代遥感领域中重要的探测手段之一,其高分辨力、全天时、全天候等特点,使得它成功地应用在国民经济、国防建设以及科学研究等各个领域。SAR 提供大量信息的同时带来的问题就是数据量非常大。因此,如何压缩 SAR 原始数据,减轻对数据传输及存储的要求成为研制星载 SAR 系统必须解决的一个重要问题。

在 SAR 原始数据的压缩方法中,分块自适应矢量量化(BAVQ)^[1, 2]压缩方法是一种有效的高倍数压缩方法。首先对数据进行分块自适应量化(BAQ)压缩^[3],获得较少量化位数的压缩数据,在此基础上再进行矢量量化(VQ)压缩^[4]。进行 BAQ 压缩,一方面减少了量化位数降低了数据量;另一方面使得压缩后的数据具有相同的统计分布特性,简化 VQ 码书的设计和 VQ 编码的查找方案,从而降低星上硬件设计的复杂性。在文献[1]给出的 BAVQ 压缩中,考虑到简化 VQ 实现等因素,采用了 2bitBAQ 压缩。在对实际数据进行压缩时,

当要求增大压缩比的情况下,相应的数据量化信噪比偏低,在一定程度上影响了数据压缩的效果。针对这一问题,本文在分析 BAQ 压缩数据的分布特性,量化信噪比,动态范围及其对 VQ 数据压缩性能和运算量影响的基础上,对 BAVQ 压缩算法进行了改进,提出了采用高比特数 BAQ 压缩的方案。尽管在方案的实现上会带来一定的复杂性,但数据的压缩效果明显优于文献[1]中给出的方案。文章最后给出了本文的改进压缩算法与以往 BAVQ 算法的数据率-量化信噪比曲线,以及实际 SAR 原始数据压缩的成像结果。

2 改进的分块自适应矢量量化算法

本节在分析 BAQ 压缩数据对 BAVQ 压缩算法性能影响的基础上,提出了对 BAVQ 的改进算法,并给出了其工作过程。下面首先讨论影响数据压缩性能的几方面因素:压缩数据的分布特性,量化信噪比,压缩数据的动态范围,算法编码的计算复杂性。

2.1 BAQ 压缩对数据分布特性变化的影响

SAR 的回波数据是符合高斯分布的随机变量^[3]。对数据进行数字化时,采用 A/D 变换器将 SAR 的回波数据进行量化会对 SAR 原始数据的统计特性产生影响。再对 A/D 变换器的输出数据进行分块自适应量化时,每个采样数据由高比特量化数据(通常为 8bit)量化到更少的比特数 $i(i < 8)$,输出电平相应地减小到 2^i ,对数据的分布特性进一步产生了影响。考虑到数据压缩主要是利用数据间的相关特性这一特点,本文首先讨论 BAQ 压缩对数据相关特性的影响问题。

数据 X 与 Y 之间的相关系数定义为

$$\rho_{XY} = \frac{E\{[X - E(X)][Y - E(Y)]\}}{\sqrt{D(X)}\sqrt{D(Y)}}$$

其中 $E(\bullet)$ 表示数据的均值, $D(\bullet)$ 表示数据的方差。对于实数形式的 SAR 数据,上述相关系数定义应作如下改动,即

$$\hat{\rho}_{rg}(r) = \frac{\sum_{i,j} [x(i,j) - E(x)][x(i,j-r) - E(x)]}{\sum_{i,j} [x(i,j) - E(x)]^2}$$

$$\hat{\rho}_{az}(r) = \frac{\sum_{i,j} [x(i,j) - E(x)][x(i-r,j) - E(x)]}{\sum_{i,j} [x(i,j) - E(x)]^2}$$

其中 $\hat{\rho}_{rg}(r)$ 和 $\hat{\rho}_{az}(r)$ 分别定义为距离向以及方位向间隔 r 个数据点的数据间的相关系数; $x(i,j)$ 为距离向第 i 点方位向第 j 点处的数据值。

考虑到实际情况,本文采用数值分析的方法对模拟数据和实际数据进行分析。按照矢量量化数据压缩的方法,本文分别计算了经 1~5bitBAQ 压缩后,压缩数据构成的矢量(矢量维数为 8)的距离向相关系数(矢量是由距离向的标量数据依序构成的)。图 1 为矢量内数据的相关系数比较。

从计算结果中得出,BAQ 压缩数据位数的不同,会影响到数据间的相关特性的变化。量化位数越高,数据的相关特性越接近原始数据的相关特性。考虑到 VQ 压缩的性能还与数据的分布特性相关,当数据的分布是高斯型的随机变量时,可以获得 VQ 性能上的提高^[1]。因此,量化位数越高,数据的分布特性越接近原始数据的高斯分布,压缩效果也越好。而且,计算结果表明当量化位数大于 3bit 以后,压缩数据的相关特性基本上变化不大。因此,考虑用高比特数 BAQ 代替低比特数 BAQ 时,量化位数选择大于 3bit 即可。

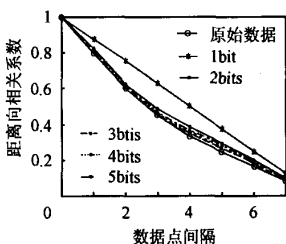


图 1 矢量内数据的距离向相关系数比较

2.2 BAQ 压缩数据对量化信噪比的影响

用 BAQ 算法压缩数据将产生量化噪声,且量化的比特数越多,量化引起的噪声越小,量化信噪比就越大。数据压缩中,量化信噪比按下式定义:

$$SNR = 10 \times \lg \left(\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g(i,j)^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [g(i,j) - f(i,j)]^2} \right)$$

其中 $g(i,j)$ 和 $f(i,j)$ 分别为原始数据和重建数据在 (i,j) 点的值; M 和 N 为原始数据方位向和距离向的点数。按照量化信噪比的定义,信噪比越大,量化引起的失真越小,量化数据就越接近原始数据。因此,高比特数的 BAQ 压缩使得量化数据的分布特性更接近于原始数据的高斯分布特性, VQ 的性能更好。

根据 SAR 回波信号的统计特性,本文计算了 1~5bitBAQ 压缩的量化信噪比曲线,见图 2。分块自适应量化器的预测性能表明,BAQ 的量化比特数增多,量化信噪比会随之增加。因此,采用高比特数的 BAQ 压缩可以获得更好的数据压缩性能。

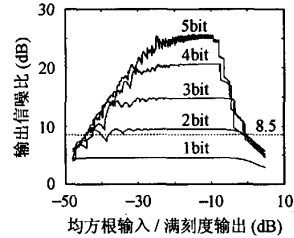


图 2 分块自适应量化器的预测性能

2.3 数据压缩对动态范围的影响

数据经 BAQ 压缩后,动态范围比原始数据的动态范围小。因此,BAQ 压缩后的数据再进行 VQ 压缩时,压缩效果要比直接进行 VQ 压缩的效果好。图 2 不仅反映了量化位数与量化信噪比的关系,还反映了量化位数对动态范围的影响。若以 8.5dB 作为衡量动态范围的标准^[3],那么 2~5bit 分块自适应量化器将获得等于以及高于 39.5dB 且小于 45dB 的动态范围。并且对应于不同量化位数的 BAQ 压缩,数据的动态范围几乎不变。因此,采用高比特数的 BAQ 压缩不会明显降低 VQ 的压缩性能。

2.4 压缩对算法编码的计算复杂性的影响

对于大小为 $m \times n$ 的数据块,当进行 i bitBAQ 压缩时,平均要进行 $2^{i-1} \times m \times n$ 次比较运算。因此,对于给定大小的数据块,BAQ 编码时的比较运算量随着量化位数 i 的增加以指数增长。BAQ 的量化位数同时影响着 VQ 码书的尺寸。对于长度为 N 矢量维数为 L 的码书,总位数为 $N \times L \times i$ 。因此,对于一个给定长度和矢量维数的 VQ 码书,BAQ 的量化位数与码书的尺寸成比例。由此可见,BAQ 的量化位数不宜过多,

否则将增加 BAQ 的编码计算复杂性以及 VQ 的码书尺寸。

本文计算了对应于不同压缩比的 BAVQ 方法对模拟 SAR 原始数据压缩的信噪比。并将 1~5bitBAQ 压缩的 5 种 BAVQ 压缩方案进行了比较, 见图 3。根据图 3 的比较结果, 当 BAQ 的量化位数大于 4bit 时, 信噪比的改善趋势减小。

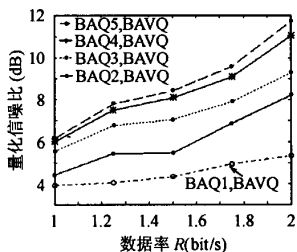


图 3 5 种 BAVQ 的数据率-量化信噪比曲线

基于上述对不同量化比特数 BAQ 压缩后数据的分布特性, 量化信噪比, 压缩后数据的动态范围以及压缩算法的编码计算复杂性 4 个方面的分析可以看出, 采用较高量化比特数的 BAQ 对整个 BAVQ 算法是有利的。权衡上述压缩算法的性能分析以及算法实际实现的复杂性, 本文做了如下 BAVQ 压缩算法的改进: 采用 4bit 的分块自适应量化代替以往的 2bit 分块自适应量化。图 4 给出了改进的 BAVQ 算法压缩 8bit/s 数据的方框图。

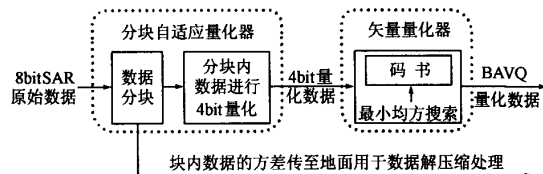


图 4 改进的 BAVQ 方框图

改进的 BAVQ 编、解码工作过程如下:

(1) BAQ 压缩 8bit/s 的 SAR 原始数据: 将分块后数据与事先计算所得的 15 个阈值比较, 输出压缩后的 4bit/s 数据。数据块的方差直接下传, 用于接收端的解压缩处理;

(2) 4bit/s 数据作为矢量量化器的输入, 由移位寄存器将标量数据转换成矢量数据, 只读存储器(ROM)中存储事先生成的码书, 对输入的矢量数据按距离最小准则搜索码书中的码字, 输出对应的码字索引;

(3) 地面接收端进行解码时, 先进行 VQ 解码, 再将矢量转换成标量, 然后进行 BAQ 解码, 最后重建出 8bit/s 的解压缩数据。

改进的 BAVQ 压缩算法具有下述优点: 在满足高倍数压缩比的条件下, 可以通过适当地增加算法计算的复杂性来获得较高的量化信噪比; BAVQ 广义上属于一种非线性压缩算法, 压缩算法本身不会降低 SAR 数据成像的分辨率^[5]; BAQ 量化器输出的数据具有相同的统计特性, 因此只需要一个与数据系统无关的码书, 生成码书不需要额外的星上硬件;

BAQ 压缩减少了数据位数, 矢量量化的编码搜索简单, 不会过多增加星上硬件设计的复杂性。

3 利用改进的 BAVQ 算法压缩 SAR 原始数据的仿真结果

利用本文改进的 BAVQ 算法与以往的 BAVQ 算法压缩高分辨率 SAR 原始数据的数据率-量化信噪比的比较曲线见图 5。

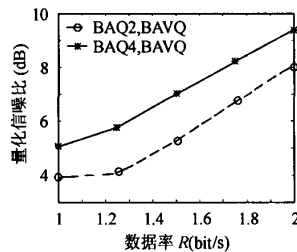


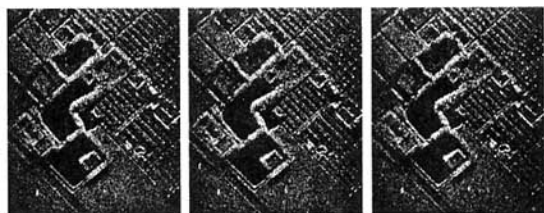
图 5 改进的算法与原算法的数据率-量化信噪比曲线比较

由数据率-量化信噪比曲线知, 当采用改进的 BAVQ 算法时, 在数据率为 1bit/s 的情况下, 量化信噪比高达 5.06dB, 而原来的 BAVQ 算法只能获得 3.92dB。比较可知, 本文提出的改进算法可以明显地获得量化信噪比的改善。对应于不同数据率的量化信噪比以及数据压缩比分别列于表 1。

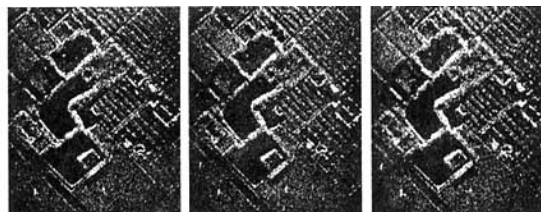
图 6 是原始数据直接成像以及本文的改进算法压缩 SAR 原始数据的解压缩数据成像。

表 1 不同数据率对应的量化信噪比比较

数据率(比特/采样/通道)	2	1.75	1.50	1.25	1
压缩比	4	4.57	5.33	6.4	8
SNR (dB)	9.391	8.214	7.007	5.756	5.059



(a) R=2 bit/s (b) R=1.75bit/s (c) R=1.5 bit/s



(d) R=1.25bit/s (e) R=1bit/s (f) 原算法 R=1bit/s

图 6 改进 BAVQ 算法与原算法的解压缩数据成像

(a)~(e) 为改进算法的解压缩数据成像结果, (f) 为原算法的解压缩数据成像结果

用本文改进的 BAVQ 算法压缩高分辨率 SAR 原始数据,解压缩数据成像与原始图像单从视觉上比较,几乎看不出什么不同。改进算法的压缩结果不仅图像清晰,而且保留了图像细节。

4 结束语

数据压缩是一种有效的解决数据率与下行链路带宽、存储器容量之间矛盾的方法。好的数据压缩算法相当于极大地扩宽了下行链路,并且压缩比越高,数据率越低,下行链路带宽以及存储器的要求就越容易满足。本文将改进的 BAVQ 算法应用于高分辨率 SAR 原始数据压缩中,当数据压缩比高达 8 倍时,不仅可以获得较高的量化信噪比,而且可以获得比较清晰的且保留图像细节的 SAR 图像。从数据压缩结果上看,本文提出的这种改进的 BAVQ 算法是一种有效的高倍数压缩算法。

本文针对模拟数据和 SAR 原始数据的压缩性能分析在计算结果中略有不同,这是由于模拟数据的统计分布特性与实际数据的分布特性不完全相同所产生的结果。这些差异不会影响到本文的结论,作为改进的方案,以后将会进一步探讨针对原始数据的实际分布特性来改进数据压缩的性能。

致谢 本文的工作得到了张冰尘副研究员,唐禹博士和黄倩博士的帮助,在此表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] Moreira A, Blaser F. Fusion of block adaptive and vector quantizer for efficient SAR data compression. IGARSS, 1993: 1583 - 1585.
- [2] Lebedeff D, Mathieu P, Barlaud M, Lambert-Nebout C, Bellemain P. Adaptive vector quantization for raw SAR data. IGARSS, 1995: 2511 - 2514.
- [3] Kwok R, Johnson W T K. Block adaptive quantization of Magellan SAR data. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1989, 27(4): 375 - 383.
- [4] Linde Y, Buzo A, Gray R M. An algorithm for vector quantizer design. *IEEE Trans. on Communications*, 1980, 28(1): 84 - 95.
- [5] 王岩飞, 朱敏慧. 合成孔径雷达原始数据非线性量化压缩频谱分析. *电子与信息学报*, 2001, 23(12): 1264 - 1270.

秦 蕾: 女, 1979 年生, 硕士生, 研究方向为合成孔径雷达数据压缩算法。

王岩飞: 男, 1963 年生, 博士生导师, 研究方向为微波成像雷达系统及其理论、数字信号处理等。

胡晓新: 女, 1977 年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达数据压缩算法。