

SAR 原始数据两种量化压缩方式的性能评估

仇晓兰^{①②} 雷斌^{①②} 葛蕴萍^{①②} 胡东辉^{①②} 丁赤飏^②

^①(中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

摘要: 原始数据压缩是高分辨率 SAR 需要着重考虑的环节。该文针对目前星载 SAR 比较常用的 4 bit 量化和 8:3 bit BAQ 两种量化压缩方式, 在不同输入功率下对量化信噪比、功率保真能力和目视图像效果这几个方面进行了深入的分析 and 评估。分析得出, 综合各项性能后 4 bit 和 8:3 bit BAQ 的最佳输入功率范围分别为 26.1 dB~34.9 dB 和 23.5 dB~36.5 dB, 这为星载 SAR 实际运行中 MGC 值的设置提供了依据。

关键词: SAR; 数据压缩; 分块自适应量化; 信噪比

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)09-2268-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01101

Performance Evaluation of Two Compression Methods for SAR Raw Data

Qiu Xiao-lan^{①②} Lei Bin^{①②} Ge Yun-ping^{①②} Hu Dong-hui^{①②} Ding Chi-biao^②

^①(Key Laboratory of Technology on Geo-spatial Information Processing and Application System,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Raw data compression is an important step for high resolution SAR systems. This paper bases on two data compression methods, the 4 bit quantization and the 8 to 3 bit Block Adaptive Quantization (BAQ), which are widely used in spaceborne SAR, the evaluations are made on the Signal-to-Noise Ratio (SNR), the fidelity of the amplitude, and the vision effects of the images under different quantization input power. From the evaluations, the reasonable power regions of the quantization input for 4 bit and 8:3 bit BAQ are provided, which are 26.1 dB~34.9 dB and 23.5 dB~36.5 dB, respectively. This offers a good reference to the Manual Gain Control (MGC) value for the SAR mission.

Key words: SAR; Data compression; BAQ (Block Adaptive Quantization); SNR

1 引言

随着军事和民用领域应用要求的不断提高, 合成孔径雷达(SAR)正不断提高其宽测绘带、高分辨率的成像能力, 由此导致的数据量增加对数据压缩方式、信道传输能力等提出了挑战, 因此在设计数据压缩方式时, 有必要对各种压缩方式的性能有全面的了解。SAR 原始数据量化压缩方法的研究自上世纪 80 年代以来一直没有停止过^[1-8], 随着信号处理技术的发展, 一些新方法(如小波变换、压缩感知等)也被引入至 SAR 的数据压缩中^[4-8]。但由于实现方式简单高效, N bit(常用的有 4 bit, 6 bit 等)均匀量化和 BAQ 压缩(常用的有 8:4 bit, 8:3 bit 等)仍是目前最常用的两种方式。

已有文献对 BAQ 等量化压缩方法的性能进行了一定的研究^[9-12], 但其均在量化输入功率合理的情况下进行。在 SAR 实际运行过程中, 由于受到天线方向图调制及侦察场景本身散射特性变化的综合影响, 回波信号的量化输入功率存在较大的变化, 因此通常采用自动或人工增益控制(Auto Gain Control 简称 AGC 或 Manual Gain Control 简称 MGC)来调节量化输入功率。为了设置更加准确的 MGC 值, 获取更高信噪比的图像, 同时也为了对 SAR 图像产品质量有更好的把握, 有必要全面的分析不同输入功率下各种量化压缩方式的性能, 并给出各种量化方式的最佳输入功率范围。

为此, 本文在不同的输入功率下, 分析并比较了 4 bit 量化和 8:3 bit BAQ 压缩两种方式的性能(包括量化信噪比、功率保真能力以及目视图像效果), 并且根据上述性能的评估给出了两种方式下输入功率的合理范围, 从而为 MGC 值的设置提供了依据。

2009-08-17 收到, 2009-12-21 改回

国家 863 计划项目(2009AA7010113)资助课题

通信作者: 仇晓兰 qiu Xiaolan@gmail.com

本文结构安排如下:第2节给出性能指标的定义,第3节对两种数据量化压缩方式进行性能评估并分析性能曲线,第4节根据评估结果总结一些具有工程应用价值的结论,第5节总结全文。

2 性能指标定义

为了使得4 bit量化和8:3 bit BAQ两种方式可在相同的输入功率下进行衡量,本文采用图1的方式来表示两种量化压缩方法。图中 S 表示信号,包括实部(I)和虚部(Q); P 表示功率;下标“BAQ”,“4b”和“8b”分别表示BAQ压缩,4 bit量化和8 bit量化。

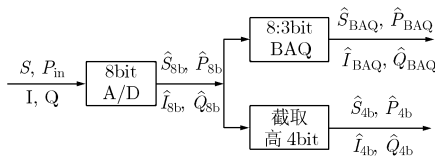


图1 两种量化压缩方式示意图

本文考察的性能指标及其计算方法分别定义如下:

(1)量化信噪比(SNR) 量化信噪比是指信号与量化噪声之间的功率比值,它是影响图像质量的重要因素,计算方法为

$$\text{SNR} = 10 \lg \left[\frac{1}{N_a N_r} \sum_{i=1}^{N_a} \sum_{j=1}^{N_r} |S_{ij}|^2 \right] - 10 \lg \left[\frac{1}{N_a N_r} \sum_{i=1}^{N_a} \sum_{j=1}^{N_r} |S_{ij} - \hat{S}_{ij}|^2 \right] \text{(dB)} \quad (1)$$

其中 N_a, N_r 分别为数据的方位向和距离向尺寸, S_{ij} 和 \hat{S}_{ij} 分别为 (i, j) 处的量化输入值和输出值。

(2)功率保真能力 功率保真能力是指信号在量化压缩后对于功率的保持能力,其对于绝对辐射精度有很大的影响,这里采用实部、虚部的平均功率损失 P_{Loss} (一般采用dB为单位)来表征,其计算方法为

$$P_{\text{Loss}} \text{(dB)} = P_{\text{in}} \text{(dB)} - \hat{P} \text{(dB)} = 10 \lg \left[\frac{1}{N_a N_r} \sum_{i=1}^{N_a} \sum_{j=1}^{N_r} (|I_{ij}|^2 + |Q_{ij}|^2) / 2 \right] - 10 \lg \left[\frac{1}{N_a N_r} \sum_{i=1}^{N_a} \sum_{j=1}^{N_r} (|\hat{I}_{ij}|^2 + |\hat{Q}_{ij}|^2) / 2 \right] \quad (2)$$

(3)图像目视效果 图像目视效果是一种主观的评判方法,但对于基于图像灰度的应用,图像视觉效果非常重要。本文给出不同量化条件下的图像

并进行对比,从而对量化压缩对于图像的影响有一个直观的印象。

3 量化压缩方式的性能评估

根据中心极限定理,SAR原始回波的实部和虚部分别服从零均值的高斯分布,故本文首先通过仿真不同功率的高斯分布数据来考察前两项指标,此处BAQ压缩的块尺寸为 64×64 ,每块的幅度均值采用6 bit均匀量化。

3.1 量化信噪比

图2为仿真计算得到的8 bit,4 bit均匀量化及8:3 bit BAQ三种方式的量化信噪比曲线,可见:

(1)8 bit量化时,输入功率为30.2 dB时,量化信噪比最大,为40.57 dB;4 bit量化的最大信噪比为19.35 dB,此时输入功率为33.5 dB;而8:3 bit BAQ能达到的最大信噪比为14.6 dB,并且在较长的一段输入功率范围内都保持在这一水平。

(2)8 bit和4 bit均匀量化的信噪比曲线以各自最佳信噪比所对应的输入功率为界,左右两边明显不同:当输入功率小于最佳输入功率时,信噪比随输入功率的增加而近似线性增大;而当输入功率大于最佳输入功率时,信噪比则急剧下降,并在0 dB处维持恒定。这是因为在最佳输入功率左侧,无量化饱和现象,量化噪声服从均匀分布,与输入信号无关;在最佳输入功率右侧,则存在饱和现象,信号出现“削顶”现象,“削顶”噪声服从高斯分布,与信号强相关;当信号特别大时,“削顶”噪声基本与信号相同,故信噪比趋于0 dB。

(3)8:3 bit BAQ压缩的量化信噪比曲线也可分为两个部分,在输入不存在饱和时,其信噪比保持恒定;当输入功率增加至8 bit量化的饱和区域时,由于8:3 bit BAQ是在8 bit量化基础上的再次量化,故其无法恢复8 bit的量化饱和损失,因此信噪比随输入功率的增大而降低。

(4)另外,8:3 bit BAQ压缩的量化信噪比曲线并不光滑,在输入功率较小的区域存在“锯齿”现象,而当输入功率较大、进入饱和区时则存在“阶梯”现象。当信号功率比较小,由于在同一个标准差对应的区间内量化噪声功率存在的波动相对明显,故出现“锯齿”。而当输入功率过大、进入8 bit量化的饱和区后,由于8 bit量化使得信号存在上限(± 127.5),故BAQ的8个量化值并不一定全部生效,由此便出现了“阶梯”现象。图3给出了输入功率为40 dB、45 dB时,8:3 BAQ压缩示意图,可见两种输入下分别只用到了6,4个量化值。

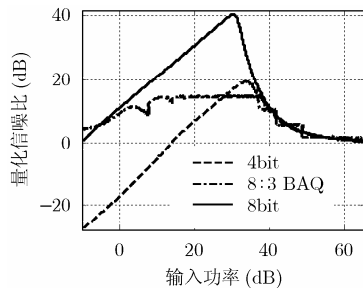


图 2 量化信噪比曲线

3.2 功率保真性

图 4(a)给出了不同量化方式下的量化功率损失曲线, 可见 8 bit 和 8:3 bit BAQ 量化的功率无损区间明显宽于 4 bit 量化。8 bit, 4 bit, 8:3 bit BAQ 量化功率损失在 ± 0.2 dB 内的输入功率范围分别为 [2.2, 35.2] dB, [26.1, 34.9] dB, [23.5, 36.5] dB。

另外, 由量化噪声功率曲线(图 4(b))可见, 对于均匀量化, 无损量化区间内的量化噪声因服从量化间隔内的均匀分布, 故其噪声功率保持恒定; 而进入饱和区域后, 增加了“削顶”部分噪声的高斯分布, 故其量化噪声功率迅速上升。而对于 8:3 bit BAQ 而言, 在无损区域, 虽其归一化的量化噪声保持恒定, 但由于信号方差不同, 其实际量化噪声随信号功率而线性增加, 这便是 BAQ 量化的信噪比在相当长一段范围内保持恒定的原因。

3.3 图像目视效果

为了对不同量化方式下图像的效果有一个直观的印象, 下面采用文献[13]附带光盘的 RadarSat-1 温哥华数据进行仿真实验。该数据的原始回波采用 4 bit 量化, 并且采用了 AGC 技术, 经计算该图像大部分区域量化信噪比能够达到 12 dB 以上, 本文选取其中图像内容较为丰富且信噪比相对较好的 2048×2048 大小的区域作为仿真场景, 仿真得到回波数据, 然后调整回波功率并分别进行 4 bit 量化、8:3 bit BAQ 压缩, 最后通过成像处理得到图像。

图 5 和图 6 分别给出了平均输入功率为 42.74 dB 和 20.74 dB 时的 4 bit 量化和 8:3 bit BAQ 的成像结果。根据信噪比曲线, 输入功率为 42.74 dB 时, 两种量化方式的信噪比均约为 8 dB; 当输入功率为 20.74 dB 时, 4 bit 量化的信噪比约为 8 dB, 而 BAQ 的信噪比则约为 14.5 dB, 但由于受该原始数据本身量化信噪比的限制, 此时的信噪比约为 12 dB。

比较图 5(a), 5(b)和图 6(a)可见, 两种量化方式在信噪比相似时, 图像均存在噪点较多、层次较

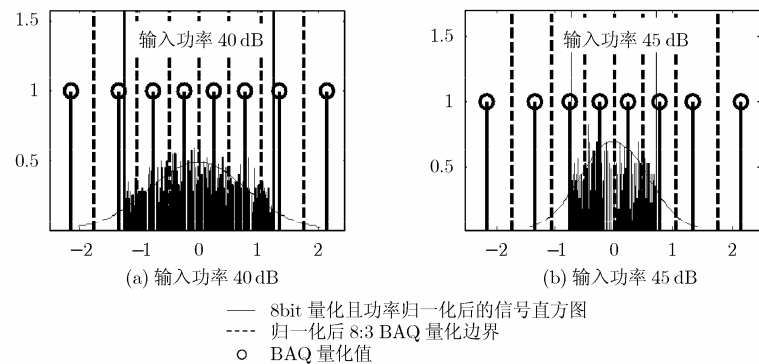


图 3 不同输入功率下 8:3 bit BAQ 量化压缩示意图

差的现象; 另外, 仔细对比这 3 幅图像可以发现其由噪声特性不同而带来的细节上的区别: 图 5(a)和 5(b)主要是“削顶”噪声, 故其在强目标区域层次明显变差, 但陆地与海面的对比依然比较明显; 而图 6(a)主要是均匀噪声, 对小信号影响更大, 故引起海陆对比度下降。另外, 比较图 5(a)、5(b)可发现图 5(b)的图像对比度的一致性优于图 5(a), 这是因为 BAQ 信噪比能在一段输入功率区间内保持恒定的缘故。比较图 6(a)和 6(b)可明显看出图 6(b)的效果明显优于图 6(a), 这是由于输入功率为 20.74 dB 时 BAQ 的信噪比高于 4 bit 量化的信噪比。

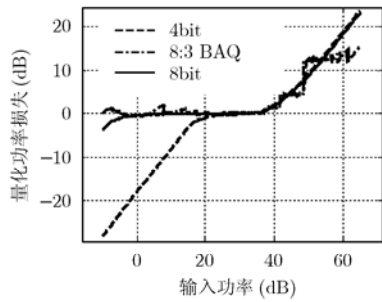
4 量化输入功率最佳范围

根据第 3 节的实验曲线, 这里将所得的结论总结于表 1。综合考虑量化信噪比、量化功率损失这两个定量的因素, 给出了这几种量化方式的最佳输入功率范围, 为 MGC 值的设置提供依据。

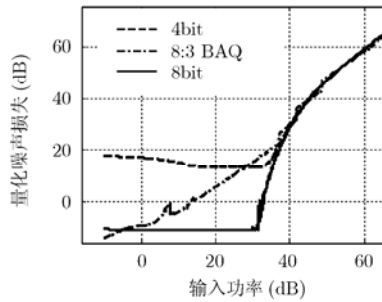
由表可见 4 bit 量化的最佳输入功率范围为 26.1 dB~34.9 dB, 跨度约为 8.8 dB, 而 8:3 bit BAQ 的最佳范围为 23.5 dB~36.5 dB, 达到了 13 dB。由于回波信号在距离向受到距离向天线方向图的调制, 即使是均匀场景也存在约 6 dB 的功率变化, 对于不均匀场景, 回波信号的功率变化更大。为了使得图像具有更加稳定一致的信噪比, 在 4 bit 均匀量化与 8:3 bit BAQ 两种方式中, 优选后者作为 SAR 原始数据压缩方式。

5 总结

本文系统而全面地评估并分析了 4 bit 均匀量化, 8:3 bit BAQ 两种量化压缩方式在不同输入信号功率条件下的性能表现, 并通过仿真给出了包括量化信噪比、功率保真性在内的性能曲线, 得出了两种量化方式的最佳输入功率范围, 为 SAR 运行中系统参数的设置提供了有用的参考。

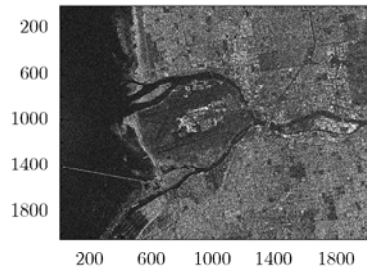


(a) 量化功率损失曲线

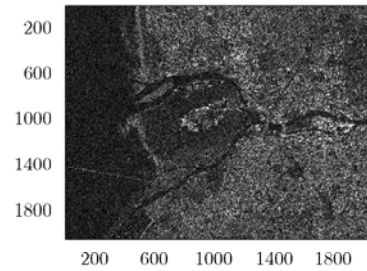


(b) 量化噪声功率曲线

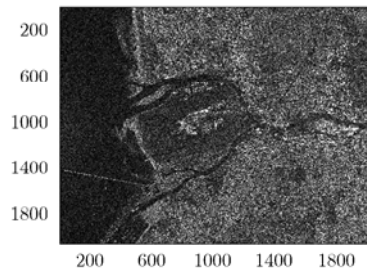
图 4 不同量化方式下的量化功率损失曲线和量化噪声功率曲线



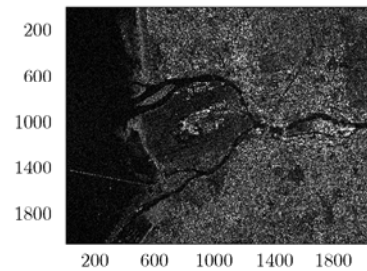
(a) 4 bit 量化



(a) 4 bit 量化



(b) 8:3 bit BAQ



(b) 8:3 bit BAQ

图 5 平均回波输入功率为 42.74 dB

图 6 平均输入功率为 20.74 dB

表 1 不同量化方式性能总结

量化方式	最大 SNR (dB)	SNR>12 dB 的输入功率(dB)	量化损失 <0.2 dB 的输入功率 (dB)	最佳输入功率区间(dB)
8 bit	40.57	1.2~39.4	2.2~35.2	2.2~35.2
4 bit	19.35	25.3~38.7	26.1~34.9	26.1~34.9
8:3 bit BAQ	14.60	8.0~37.1	23.5~36.5	23.5~36.5

参考文献

[1] Kwok R and Johnson W T K. Block adaptive quantization of Magellan SAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1989, 27(4): 375-383.

[2] Benz U, Strodl K, and Moreira A. A comparison of several algorithms for SAR raw data compression[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(5): 1266-1276.

[3] Lebedeff D, Mathieu P, and Barlaud E, *et al.* Adaptive vector quantization for raw SAR data[C]. International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. USA, 1995, 4: 2511-2514.

[4] Pascazio V, and Schirinz G. Wavelet transform coding for SAR raw data compression[C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings. Hamburg, Germany, 1999, 4: 2251-2253.

[5] Bhattacharya S, Blumensath T, and Mulgrew B, *et al.* Synthetic Aperture Radar raw data encoding using Compressed Sensing[C]. IEEE Radar Conference. Italy, 2008: 1-5.

[6] 胡晓新, 王岩飞, 秦蕾. 基于提升小波的 SAR 原始数据压缩算法[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(5): 919-922. Hu Xiao-xin, Wang Yan-fei, and Qin Lei. Lifting wavelet for SAR raw data compression[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(5): 919-922.

[7] 张文超, 王岩飞, 潘志刚. 基于 2D 实值离散 Gabor 变换的 SAR 原始数据压缩[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(3): 569-572. Zhang Wen-chao, Wang Yan-fei, and Pan Zhi-gang. SAR raw data compression based on 2D real-valued discrete Gabor transform[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(3): 569-572.

[8] 曾尚春, 朱兆达. 基于 DCT 的 SAR 原始数据压缩算法分析[J]. 电讯技术, 2009, 49(3): 56-60. Zeng Shang-chun and Zhu Zhao-da. Analysis of SAR raw data compression algorithm based on DCT[J]. *Telecommunication Engineering*, 2009, 49(3): 56-60.

[9] Qi Hai-ming, Yu Wei-dong, and Yuan Xin-zhe, *et al.* Performance evaluation of amplitude-phase algorithm for SAR raw data compression[C]. IEEE International Conference on, Geoscience and Remote Sensing Symposium, USA, 2006: 809-812.

[10] 祁海明, 禹卫东, 田旭文. 星载 SAR 原始数据 BAQ 压缩算法性能评估[J]. 现代雷达, 2007, 29(11): 17-21. Qi Hai-ming, Yu Wei-dong, and Tian Xu-wen. Evaluation of

- BAQ algorithm for spaceborne SAR raw data compression[J]. *Modern Radar*, 2007, 29(11): 17–21.
- [11] 祁海明, 禹卫东. 基于实测数据的原始数据压缩对 InSAR 系统测高影响研究[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(11): 2693–2697.
- Qi Hai-ming and Yu Wei-dong. Study of effect of raw data compression on space-borne InSAR interferometry based on real data[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(11): 2693–2697.
- [12] Younis M, Boer J, and Ortega C, *et al.* Determining the optimum compromise between SAR data compression and radiometric performance — An approach based on the analysis of terraSAR-X data[C]. IGARSS Proceedings, USA, 2008, III: 107–110.
- [13] Cumming I G and Wong F H. *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar*[M]. Boston: Artech House, 2005: 587–588.
- 仇晓兰: 女, 1982 年生, 博士, 研究领域为 SAR 成像技术、双基地 SAR 技术.
- 雷 斌: 男, 1978 年生, 副研究员, 研究领域为 SAR 信号地面处理系统技术.
- 葛蕴萍: 女, 1981 年生, 硕士, 研究领域为 SAR 定标处理、系统参数优化技术.
- 胡东辉: 男, 1970 年生, 副研究员, 研究领域为 SAR 信号处理技术、雷达对抗技术.
- 丁赤飏: 男, 1969 年生, 研究员, 博士生导师, 研究领域为雷达信号处理技术.