

一种基于动态解码的 SAR 原始数据饱和和校正方法

仇晓兰^{*①②③} 韩传钊^① 胡丁晟^{②③} 丁赤彪^③

^①(北京遥感信息研究所 北京 100192)

^②(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)

^③(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

摘要: 由于星载 SAR 原始回波数据的量化动态范围通常较小, 故实际运行中, 原始数据饱和的情况时有发生, 成为影响图像质量的重要因素之一。该文针对星载 SAR 常用的均匀量化和分块自适应量化(BAQ)压缩两种方式, 分别提出了基于动态解码的饱和校正方法, 有效减小了图像的饱和功率损失, 提高了 SAR 图像辐射精度, 并改善了图像信噪比。仿真结果验证了该文方法的有效性。

关键词: SAR; 饱和校正; 分块自适应量化(BAQ); 辐射精度; 信噪比

中图分类号: TN959.72

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)09-2147-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01270

A Method for Correcting Saturation Effect in SAR Raw Data Based on Dynamic Decoding

Qiu Xiao-lan^{①②③} Han Chuan-zhao^① Hu Ding-sheng^{②③} Ding Chi-biao^③

^①(Beijing Institute of Remote Sensing Information, Beijing 100192, China)

^②(Key Laboratory of Technology on Geo-spatial Information Processing and Application System, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^③(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Caused by the limited quantization dynamic range of the spaceborne SAR, the echo saturation phenomenon happens between times during spaceborne SAR data acquiring. In this paper, saturation correction methods based on dynamic decoding are proposed for uniform quantization and Block Adaptive Quantization (BAQ), which are two of the most commonly used quantization method in spaceborne SAR. The dynamic decoding methods can alleviate the image power loss caused by saturation, improve the radiation precision, and enhance the image signal-to-noise ratio. The simulation results validate the effectiveness of the proposed methods.

Key words: SAR; Saturate correction; Block Adaptive Quantization (BAQ); Radiation accuracy; SNR

1 引言

合成孔径雷达(SAR)因其全天时、全天候的对地观测能力而被各国所重视并广泛使用。随着 SAR 应用技术的提高和应用需求的不断深化, 对 SAR 图像质量的要求也越来越高, 提升 SAR 图像质量成为目前 SAR 领域研究的重点之一。

SAR 原始回波数据质量是 SAR 图像质量的先决条件。受系统数据率的限制, SAR(尤其是星载 SAR)的原始回波均需进行量化、压缩^[1-3], 其中均匀量化和分块自适应量化(BAQ)压缩^[4-6]由于其实现方式简单高效而成为目前星载 SAR 最常用的量化压缩方式。量化压缩使数据的动态范围受限, 同

时也引入量化压缩噪声, 影响图像信噪比。文献[7-11]分析了量化压缩的性能, 文献[7]分析指出: 4 bit 均匀量化的最佳量化信噪比为 19.35 dB, 量化信噪比大于 12 dB 且功率损失小于 0.2 dB 的输入信号功率区间(称为最佳输入功率区间)仅有 8.8 dB; 8:3 BAQ 的最佳量化压缩信噪比为 14.6 dB, 最佳输入功率区间约为 13 dB。实际中, 由于天线方向图的加权以及成像场景的复杂变化, 星载 SAR 一景原始回波数据的功率变化区间往往就会超过 13 dB。因此其对 SAR 系统增益设置提出了较为苛刻的要求: 当增益设置合理, 大部分回波落入量化压缩的最佳输入区间, 则图像信噪比较高、辐射精度较好; 而当增益设置存在偏差, 则图像信噪比和辐射精度均会受到损失。针对这一现象, 现有研究提出了能够缓解饱和的压缩方法^[6], 或在星上配备不同

2012-10-08 收到, 2013-05-17 改回

国家自然科学基金(61101200)资助课题

*通信作者: 仇晓兰 xlqiu@mail.ie.ac.cn

压缩比的压缩器,并针对不同动态范围的场景采用不同压缩方式^[9]。然而,上述方法均需对星上硬件进行升级,并且在 SAR 实际运行中,仍往往难以避免增益设置不当或压缩方式选择不当而引起的饱和现象,成为影响 SAR 图像质量的重要原因之一。现有针对饱和数据校正的研究主要是进行功率损失的补偿^[12,13],但无法改善信噪比在内的其它图像质量因素。

基于上述背景,本文提出了一种基于动态解码的 SAR 原始数据饱和校正方法,通过统计监测 SAR 回波的量化输出功率,根据先验知识推测量化输入功率,并据此动态改变解码时采用的边界码值,从而有效减小量化功率损失,并能改善量化信噪比。本文第 2 节给出动态解码方法,第 3 节通过理论分析和仿真实验给出动态解码的性能分析结果,验证方法的有效性,第 4 节总结全文。

2 抗饱和的动态解码方法

2.1 N bit 均匀量化动态解码方法

SAR 原始回波进行 N bit 均匀量化时,量化动态范围 $[-2^{N-1}, 2^{N-1}]$ 内的区间被均匀划分,每个区间以中间值为量化值。实际上,均匀量化对数据有限幅效应,其将所有大于 $2^{N-1} - 1$ 和小于 $-2^{N-1} + 1$ 的值则均分别量化为 $2^{N-1} - 0.5$ 和 $-2^{N-1} + 0.5$ (如图 1 所示)。故当信号绝对值大于 2^{N-1} 时便发生了量化饱和,引入的量化噪声增大,并出现了功率损失。

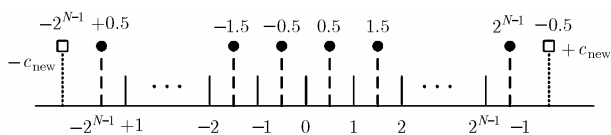


图 1 SAR 原始数据 N bit 均匀量化示意图

实践表明,星载 SAR 原始回波的实部、虚部基本服从方差缓变的零均值高斯分布,下面根据回波分布特点,给出均匀量化方式下的动态解码方法,方法实施步骤如下:

(1) 仿真生成采样后的高斯分布信号,通过模拟均匀量化过程,并统计量化输入功率(P_{in})和输出功率(P_{out}),得到量化输入-输出功率对应曲线,其中输入、输出功率均用 dB 表示;

(2) 对于均匀量化的 SAR 原始回波数据进行常规解码,并分块统计回波功率(即量化输出功率),根据输入-输出功率曲线得到输入功率,由此计算各块回波高斯信号的方差 σ_i ,计算方法为 $\sigma_i = 10^{(P_{in}/20)}$;

(3) 对于该块回波中值为 $\pm(2^{N-1} - 0.5)$ 的信号进

行重新解码,使得边界区间的量化噪声功率达到最小(如图 1 所示)。设边界区间的新解码值为 $\pm c_{new}$,则量化噪声功率为

$$P_{nAD} = 2 \int_{2^{N-1}-1}^{+\infty} (x - c_{new})^2 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left\{-\frac{x^2}{2\sigma_i^2}\right\} dx \quad (1)$$

使该噪声最小的方程为 $\frac{\partial P_{nAD}}{\partial c_{new}} = 0$, 解得

$$c_{new} = \frac{\int_{2^{N-1}-1}^{+\infty} x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left\{-\frac{x^2}{2\sigma_i^2}\right\} dx}{\int_{2^{N-1}-1}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left\{-\frac{x^2}{2\sigma_i^2}\right\} dx} \quad (2)$$

(4) 同理,该回波块中常规解码为 $\pm(2^{n-1} - 0.5)$, $n = 1, \dots, N-2$ 的信号也可根据使区间量化噪声最小的原理,重新解码为 $\pm c_{new-n}$,

$$c_{new-n} = \frac{\int_{2^{n-1}-1}^{2^{n-1}} x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left\{-\frac{x^2}{2\sigma_i^2}\right\} dx}{\int_{2^{n-1}-1}^{2^{n-1}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left\{-\frac{x^2}{2\sigma_i^2}\right\} dx} \quad (3)$$

由后文仿真结果,非边界区间是否采用动态解码对信号量化输入过大时的影响很小,故实际中往往只需采用边界区间动态解码。

2.2 BAQ 压缩动态解码方法

BAQ 压缩是在 N bit 均匀量化的基础上,利用 SAR 回波数据实、虚部分别服从高斯分布的特点,根据使量化噪声功率最小的原则,对量化后的数据进行进一步的压缩。以 8:3 BAQ 为例,首先分块统计 8 bit 均匀量化后的信号幅度,根据幅度与方差之间的先验关系曲线得到该分块量化输入方差 σ_i ,对方差进行量化编码,并对以方差归一化后的数据进行如图 2 所示的非均匀量化。当 8 bit 均匀量化后仍然服从高斯分布的数据,BAQ 压缩能够得到很好的压缩性能,量化噪声能在相同比特数条件下达到最低。然而,当 8 bit 量化存在饱和时,量化后的数据被限幅,归一化峰值幅度可能并不落入 BAQ 的边缘量化区间(如图 2 粗实线所示),换言之,此时有些为无效量化区间(如图 2 区间 3, 4, 7, 8),而有些区间(如图 2 区间 2 和 6)则包含了邻近无效量化区间的信息。此时,如区间 2, 6 仍按常规解码,则势必无法使量化噪声最小。

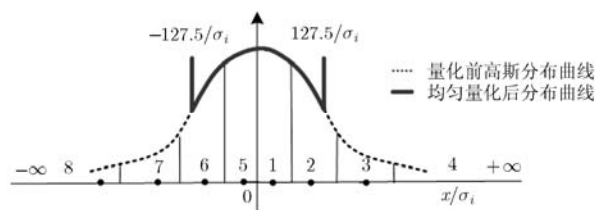


图 2 SAR 原始数据 BAQ 压缩示意图

为此，本文提出如下动态解码方法，在既定BAQ压缩方式下，减小饱和带来的量化噪声和量化损失。以 $N:M$ BAQ 为例，方法的具体实现步骤如下：

(1)根据 BAQ 每个分块的方差码，得到该分块的数据方差 σ_i ；

(2)计算归一化峰值幅度

$$p_m = (2^{N-1} - 0.5) / \sigma_i \quad (4)$$

并根据 $N:M$ BAQ 量化方法找出峰值幅度所在量化区间的下限 a_j ，有 $a_j \leq p_m < a_{j+1}$ ；

(3)重新计算区间 $[a_j, a_{j+1})$ 的解码值 $c_{j,\text{new}}$ ，并将落入 $[a_j, a_{j+1})$ 和 $(-a_{j+1}, -a_j]$ 的数据分别解码为 $\sigma_i c_{j,\text{new}}$ 和 $-\sigma_i c_{j,\text{new}}$ ，其中

$$c_{j,\text{new}} = \frac{\int_{a_j}^{+\infty} x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left\{-\frac{x^2}{2\sigma_i^2}\right\} dx}{\int_{a_j}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left\{-\frac{x^2}{2\sigma_i^2}\right\} dx} \quad (5)$$

3 饱和校正性能分析

为了验证本文方法的有效性，下面从信噪比、辐射精度、图像视觉效果 3 个方面，对星载 SAR 最常用的 4 bit 均匀量化和 8:3 BAQ 压缩进行分析并给出仿真结果。

3.1 信噪比

(1)信噪比指标定义 设量化输入端的信号为 $x = s + n$ ，其中 s 为信号， n 为接收机噪声，定义量化输入端的信噪比为

$$\text{SNR}_{\text{in}} = \frac{E\{s^2\}}{E\{n^2\}} \quad (6)$$

经过量化压缩后，输出信号为 $y = s + n + n_{\text{AD}}$ ，其中 n_{AD} 为量化压缩噪声，定义量化信噪比为

$$\text{SNR}_{\text{AD}} = \frac{E\{x^2\}}{E\{n_{\text{AD}}^2\}} \quad (7)$$

定义输出信噪比为

$$\text{SNR}_{\text{out}} = \frac{E\{s^2\}}{E\{n + n_{\text{AD}}\}^2} \quad (8)$$

通常可以认为 n 与 s 互不相关， n 与 n_{AD} 互不相关，故有

$$\text{SNR}_{\text{out}} = \frac{\text{SNR}_{\text{in}} \times \text{SNR}_{\text{AD}}}{\text{SNR}_{\text{in}} + \text{SNR}_{\text{AD}} + 1} \quad (9)$$

可见，当 $\text{SNR}_{\text{in}} \gg \text{SNR}_{\text{AD}}$ 时， $\text{SNR}_{\text{out}} \approx \text{SNR}_{\text{AD}}$ ；当 $\text{SNR}_{\text{AD}} \gg \text{SNR}_{\text{in}}$ 时， $\text{SNR}_{\text{out}} \approx \text{SNR}_{\text{in}}$ 。

对于点目标而言，更为关心的是其信杂噪比。设包含点目标回波的量化输入信号为 $x_t = s_t +$

$c + n$ ，其中 s_t 表示点目标回波， c 表示背景杂波。量化压缩后，输出信号为 $y_t = s_t + c + n + n_{\text{AD}}$ 。则点目标量化输入输出信杂噪比可分别表示如下：

$$\text{SCNR}_{\text{in}} = \frac{E\{|s_t|^2\}}{E\{|c + n|^2\} / M} \quad (10)$$

$$\text{SCNR}_{\text{out}} = \frac{E\{|s_t|^2\}}{E\{|c + n + n_{\text{AD}}|^2\} / M} \quad (11)$$

其中 M 表示统计范围内杂波所占的分辨单元数。当 $c + n$ 与 n_{AD} 相互满足统计独立假设时， SCNR_{out} 与 SCNR_{in} 及 SNR_{AD} 之间的关系如下：

$$\text{SCNR}_{\text{out}} = \frac{\text{SCNR}_{\text{in}}}{1 + 1/\text{SNR}_{\text{AD}}} \quad (12)$$

可见由量化引起的 SCNR_{out} 较 SCNR_{in} 的恶化与 SCNR_{in} 本身无关，只与 SNR_{AD} 有关。在量化信噪比为 0 dB 的极端情况下， SCNR_{out} 将比 SCNR_{in} 下降 3 dB。实际上，当系统增益设置合理， $c + n$ 范围合适，从而量化噪声基本为均匀分布时， $c + n$ 与 n_{AD} 可以近似认为相互统计独立；但当 $c + n$ 很大，引起量化饱和时， $c + n$ 与 n_{AD} 并非统计独立，故

$$E\{|c + n + n_{\text{AD}}|^2\} \leq E\{|c + n|^2\} + E\{|n_{\text{AD}}|^2\} \quad (13)$$

因此实际中信杂噪比结果比式(12)的结果略好。

(2)仿真结果 仿真功率不同的几组回波信号，每组回波功率相同但输入信噪比不同。分别经 4 bit 均匀量化和 8:3 BAQ 压缩后并进行常规解码和动态解码，统计信噪比，得到结果如图 3 和图 4 所示¹⁾。

由仿真结果可见，当输入功率过大引起量化信噪比降低时，采用动态解码相比于常规解码，输出信噪比均有一定幅度的提升，并且提升幅度随输入信噪比的提高而增大。4 bit 均匀量化时，动态解码最多约能使输出信噪比改善 4.5 dB，8:3 BAQ 时，动态解码最多约能改善 2.65 dB。此外，需要说明的是，8:3 BAQ 时曲线呈锯齿状是由 BAQ 压缩时对信号方差的量化所致。

下面仿真分析点目标信杂噪比的情况。图 5 给出了 SCNR_{in} 为 30 dB 时的仿真结果，由于杂波数量较点目标大得多，因此此时回波实、虚部仍符合高斯分布特性。由结果可见，由于量化噪声的存在， SCNR_{out} 较 SCNR_{in} 而言有所降低，最大降幅均约为 1.5 dB。动态解码较常规解码对于孤立点目标的信杂噪比有微弱的改善。该结果与前文理论分析结论相吻合。

¹⁾由于量化时为实部、虚部分别量化，因此，本文所有图中的“输入功率”均为实部虚部分别统计功率后的平均值。

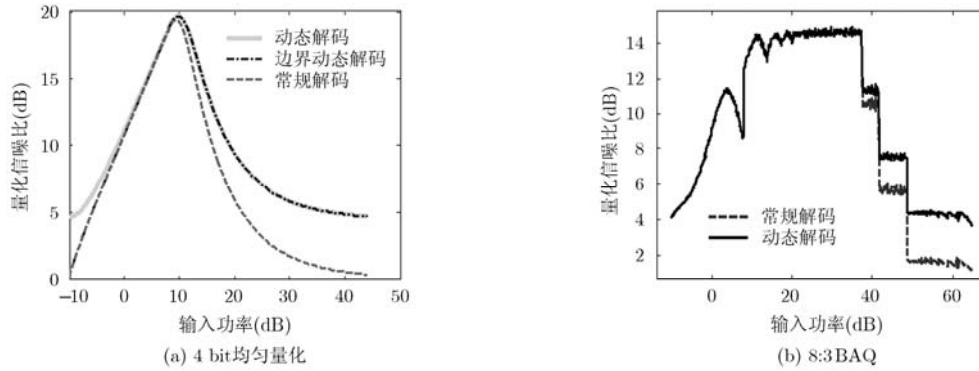


图 3 量化输入信号无噪声时的输出信噪比曲线

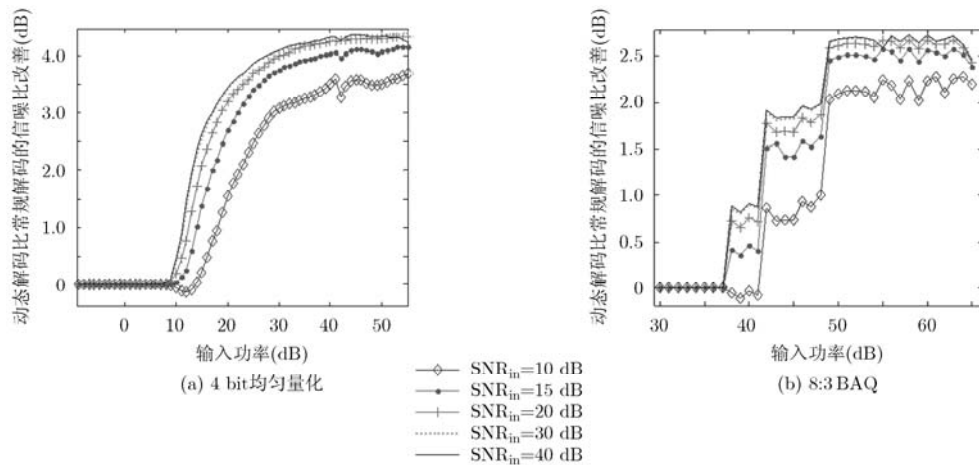


图 4 动态解码相对于常规解码的输出信噪比改善情况

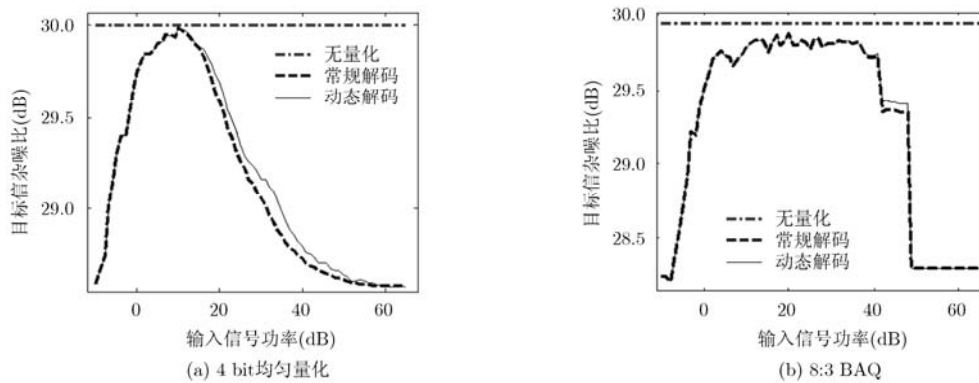


图 5 不同量化解码方式下点目标信噪比曲线

3.2 辐射精度

(1) 辐射精度指标定义 对于面目标, 本文采用如式(14)的辐射功率误差大小来衡量量化对辐射精度的影响程度。

$$\Delta P_{AD} = E\{P\} - E\{P_{AD}\} \quad (14)$$

其中 $E\{P\}$ 为无量化压缩的回波成像得到面目标的平均功率, $E\{P_{AD}\}$ 为经量化压缩的回波成像得到面目标的平均功率, $|\Delta P_{AD}|$ 越小则辐射精度越高, 通常 $|\Delta P_{AD}|$ 也称为量化功率损失。

对于点目标, 上述平均功率误差由多次随机实验求均值得到。此外, 本文用多次随机实验中点目

标功率的标准差(见式(15))来衡量量化噪声对目标功率稳定度的影响。

$$\sigma_{ADt} = \sqrt{\frac{1}{K-1} \sum_{i=1}^K |\Delta P_{ADi} - E\{\Delta P_{AD}\}|} \quad (15)$$

其中 K 为随机实验的次数, P_{ADi} 和 ΔP_{AD} 均采用 dB 形式表示。

(2) 仿真结果 两种量化方式下常规解码与动态解码的面目标仿真结果如图 6 所示。可见, 采用动态解码可以有效地降低量化功率损失, 提高 SAR 图像面目标辐射精度。

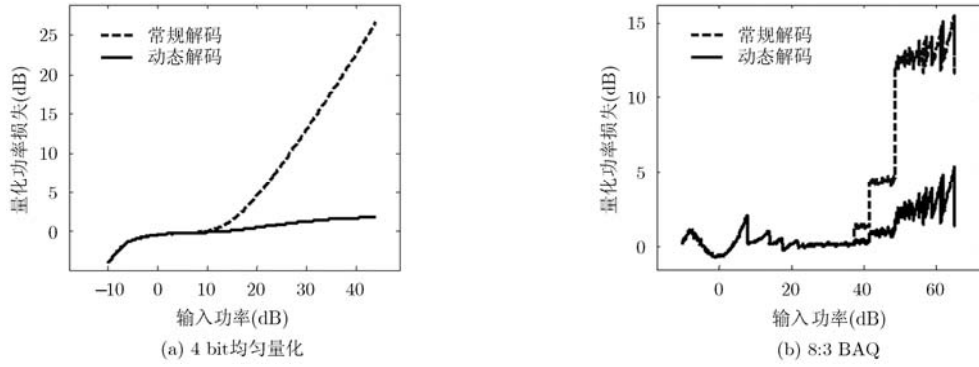


图6 不同量化解码方式下面目标量化功率损失曲线

目标信杂比为 30 dB 时的点目标仿真结果如图 7 和图 8 所示。可见，对于孤立点目标而言，目标功率同样因量化饱和而受到了严重的损失，采用动态解码后，点目标功率得到了校正，辐射精度大大提高。此外，点目标功率标准差的仿真结果表明，动态解码比常规解码的标准差略小，说明动态解码引入的噪声较小，动态解码下的图像辐射分辨率也略优于静态解码。

3.3 图像视觉效果

为了比较动态解码方法对图像视觉效果改善，下面以 X 波段机载 SAR 获取的某图像场景(如图 9 所示)为模版，生成回波数据，并进行量化压缩、常规解码、分块动态解码以及成像处理的仿真，得

到结果如图 10 和图 11 所示。

在仿真所设输入功率下，常规解码下 4 bit 量化的量化信噪比约为 3 dB 左右，其成像结果与场景模版原图相比层次变差、图像噪声严重。采用动态解码后，由于量化损失得到补偿，左上角村庄与右下方田野的辐射强度差别得以恢复，并且从视觉效果而言，图 10(b)更加接近原模版。8:3 BAQ 下也有类似结论，由于左上角村庄地区有效量化区间只有 2 个，因此其功率损失较大，采用常规解码，其图像相对亮度出现明显衰落；采用动态解码，量化功率损失得到较好的校正，图像目视效果更加接近原模版。

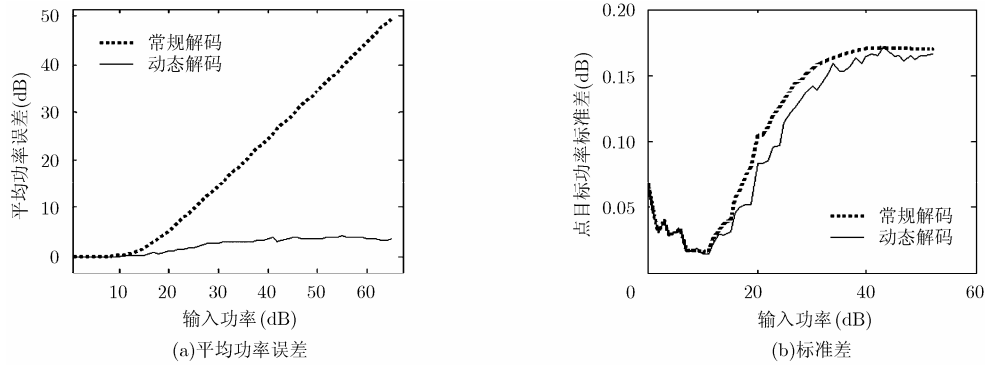


图7 4 bit 量化下点目标平均功率误差与标准差

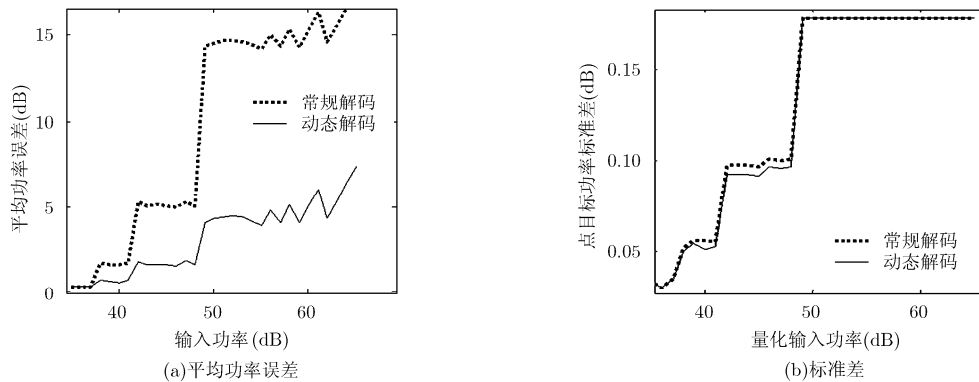


图8 8:3 BAQ 下点目标平均功率误差与标准差

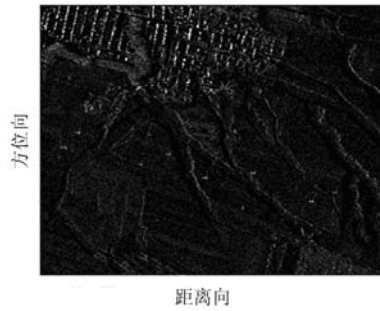
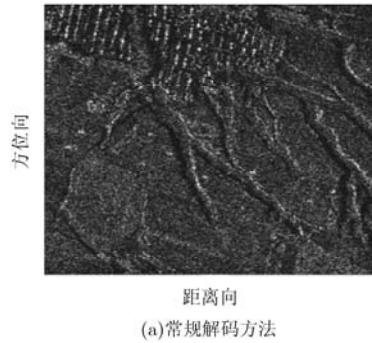
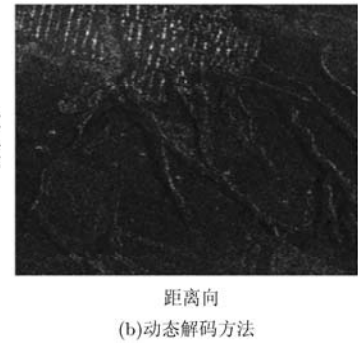


图 9 场景模版

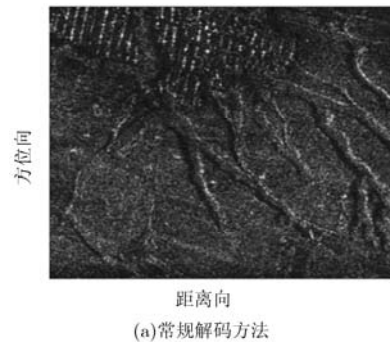


(a)常规解码方法

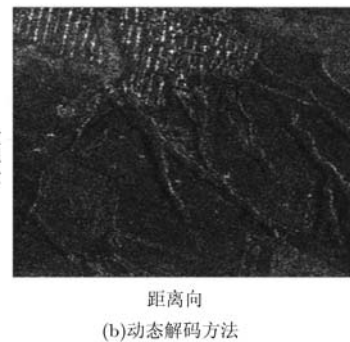


(b)动态解码方法

图 10 输入平均功率为 30 dB 时 4 bit 量化后的成像效果



(a)常规解码方法



(b)动态解码方法

图 11 输入功率为 55 dB 时 8:3 BAQ 的成像效果

4 结束语

本文针对星载 SAR 常用的均匀量化和 BAQ 两种量化压缩方式分别提出了抗饱和的动态解码方法。该方法能在不改变 SAR 回波量化的硬件实现方式下, 仅通过动态改变地面处理时的解码方法, 即可对回波的量化饱和起到很好的校正作用, 不仅减小了图像的饱和功率损失, 提高了 SAR 图像辐射精度, 而且减小了量化噪声, 提高了图像信噪比。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 张文超, 王岩飞, 潘志刚. 基于 2D 实测离散 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.
- [3] 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.
- [4] Pascazio V and Schirinzi G. Wavelet transform coding for SAR raw data compression[C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, Pasadena, USA, 1999, 4: 2251-2253.
- [5] 赵宇鹏, 万锋, 雷宏. 部分饱和 SAR 原始数据压缩[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(3): 489-494.
Zhao Yu-peng, Wan Feng, and Lei Hong. Compression on fractional saturation SAR rawdata[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2004, 26(3): 489-494.
- [6] 祁海明, 禹卫东. 针对饱和度全集上的 SAR 原始数据自适应抗饱和 BAQ 压缩算法[J]. 自然科学进展, 2009, 19(2): 227-234.
- [7] 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.
- [8] 仇晓兰, 雷斌, 葛蕴萍, 等. SAR 原始数据两种量化压缩方式的性能评估[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(9): 2268-2272.
Qiu Xiao-lan, Lei Bin, Ge Yun Ping, et al. Performance evaluation of two compression methods for SAR ra data[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(9): 2268-2272.

- [9] Younis M, Boer J, 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, Boston, 2008, III: 107-110.
- [10] 行坤, 邓云凯, 祁海明. 原始数据压缩对星载 SAR/GMTI 系统测速影响研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(6): 1321-1326.
Xing Kun, Deng Yun-kai, and Qi Hai-ming. Study of effect of raw data compression on space-borne SAR/GMTI velocity measurement[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(6): 1321-1326.
- [11] 张帆, 汪丙南, 向茂生. 基于 SAR 回波仿真的 BAQ 压缩性能研究[J]. 系统仿真技术, 2010, 6(1): 6-10.
Zhang Fan, Wang Bing-nan, and Xiang Mao-sheng. Study on BAQ compression performance based on SAR echo simulation[J]. *System Simulation Technology*, 2010, 6(1): 6-10.
- [12] Masanobu Shimada. Radiometric correction of Saturated SAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(1): 467-478.
- [13] 陈海波, 胡东辉, 丁赤飏, 等. 基于韦布尔模型的合成孔径雷达数据饱和校正方法研究[J]. 电子与信息学报, 2005, 5(4): 775-778.
Chen Hai-bo, Hu Dong-hui, Ding Chi-biao, *et al.* Study on the correction method for saturated data of SAR based on weibull model[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2005, 5(4): 775-778.
- 仇晓兰: 女, 1982 年生, 博士, 主要研究领域为单/双站 SAR 成像技术、SAR 图像几何定位技术、SAR 图像质量优化技术.
- 韩传钊: 男, 1971 年生, 研究员, 主要研究领域为星载 SAR 系统技术.
- 胡丁晟: 男, 1989 年生, 硕士生, 研究方向为极化 SAR 处理技术.
- 丁赤飏: 男, 1969 年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究领域为雷达信号处理技术.