

关于合成孔径雷达图像的量化位数和量化方法选择

武泓含¹, 冯 锦²

¹航天五院神舟学院, 北京

²航天东方红卫星有限公司, 北京

Email: WuHonghBIT@163.com

收稿日期: 2020年9月7日; 录用日期: 2020年9月21日; 发布日期: 2020年9月28日

摘 要

微小型的SAR (合成孔径雷达)设备回波经过聚焦之后, 为便于存储与二次处理, 研究一种有效的降采样方法能够在降低图像质量损失前提下, 提高图像处理速率。文章简要介绍了微小型化合成孔径雷达图像存储位数的选择, 从读取速率和算法处理效率两个方面分析了图像存储位数与图像质量的关系, 详细地阐述合成孔径雷达图像降采样方法, 并仿真得到不同量化方法所对应的信噪比和量化噪声。根据仿真的结果, 文中提出的非均匀量化方法是一种能够提高量噪比的降采样方法。

关键词

图像质量量化, SAR信噪比

Choosing the Quantization Bit and Quantization Method of Synthetic Aperture Radar Image

Honghan Wu¹, Jin Feng²

¹Shenzhou College, CAST, CASC, Beijing

²DFH Satellite Co. Ltd., CAST, CASC, Beijing

Email: WuHonghBIT@163.com

Received: Sep. 7th, 2020; accepted: Sep. 21st, 2020; published: Sep. 28th, 2020

Abstract

After the echoes of micro SAR (Synthetic Aperture Radar) equipment are focused, in order to facilitate storage and secondary processing, an effective down-sampling method is studied to increase the image processing rate while reducing the loss of image quality. This article briefly introduces the selection of micro-miniaturized synthetic aperture radar image storage bits, analyzes the relationship between image storage bits and image quality from two aspects of read rate and algorithm processing efficiency, and elaborates the synthetic aperture radar image down sampling method in detail, and simulates the signal-to-noise ratio and quantization noise corresponding to different quantization methods. According to the simulation results, the non-uniform quantization method proposed in the article is a down sampling method that can improve the volume-to-noise ratio.

Keywords

Image Quality Quantization, SAR Signal-to-Noise Ratio

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

轻小型化是合成孔径雷达的一个发展方向,在微小型 SAR 系统[1],数据快速存储、读取及实时处理成为重要组成部分,大多数的微型 SAR 设备,回波数据采用 8 bit 整型传输,传统的信号处理是将回波数据下传至地面站,经过地面站高速大功率的设备处理之后,得到成像结果。随轻小型化设备的装载,越来越多的工作需要实时处理,从而获得图像。因此需要对处理后图像进行降采样,来保障高速数据的存取及处理效率。选择合适的降采样位数和降采样的变换方法十分必要,能够在提高数据率的同时将降采样带来的信号损失降低。本文就满足高速、实时处理的要求下微小型化 SAR 存储位数选择和降采样的方法作以探讨。

2. 轻小型化 SAR 存储位数的选择

2.1. SAR 系统结构对存储位数选择有影响

对轻小型化 SAR 存储位数的选择,是基于 SAR 的结构决定。如图 1,发射通道信号由直接数字式频率合成器生成,在与本振混频后,上变频到射频经带通滤波得到窄带信号经放大器后由天线发射,接收通道信号由接收天线经过低噪放的放大之后与发射通道信号混频,经过带通滤波,获取频带信号。经过 ADC 采样后送到数字处理子系统对原始回波进行脉冲压缩及后续的信号处理将成像结果存储在闪存之中。

其中关键部件是数字信号接收及处理子系统,它可用基于通用计算机的 SAR 成像处理系统达到功能,也可用 SAR 成像处理专用系统。目的是实现对信号的处理工作从而成像。目前大多数的通用计算机可选取的位数为 8 位、16 位、32 位和 64 位。专用系统的并行输出也在 8 到 30 位之间。考虑小型平台存储及读取速率的需求,以及图像实时检测与分类的需求,采用 8 bit 存储。如图 2,合成孔径雷达系统大致结

构分为三个大部分, A-D 采样使用两路。

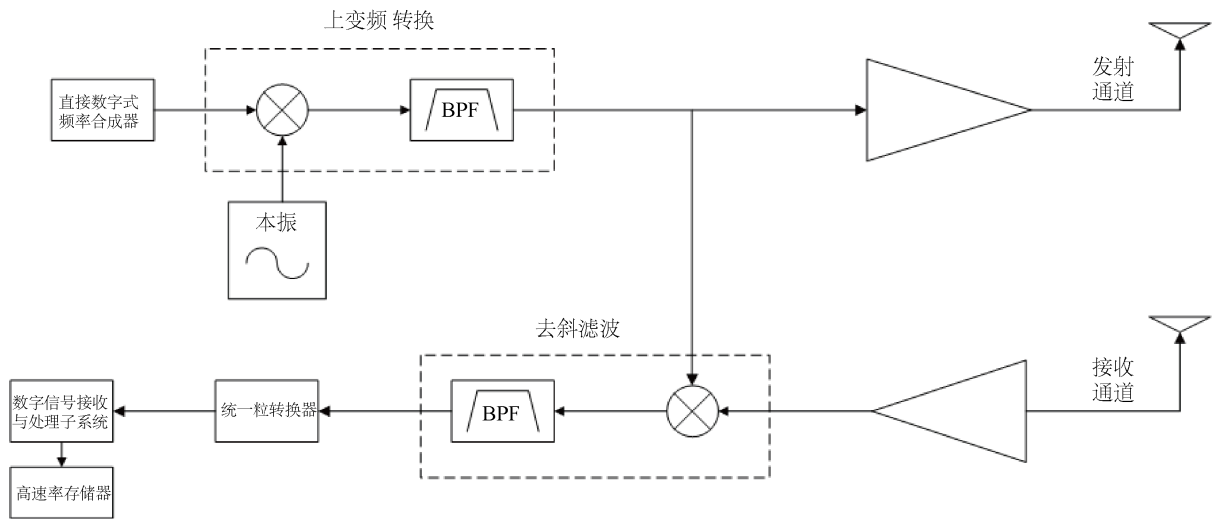


Figure 1. Schematic diagram of continuous wave radar structure
图 1. 连续波体制雷达结构示意图

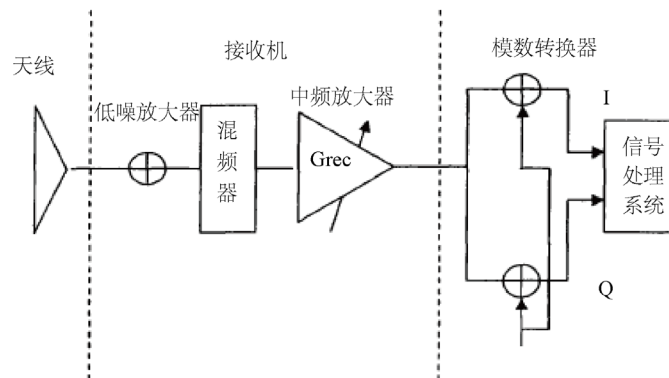


Figure 2. Diagram of the various parts of the synthetic aperture radar system
图 2. 合成孔径雷达系统各部分示意图

2.2. 量化位数的改变对信噪比带来的影响

对于量化位数变化所产生的影响, 从两个方面来反映, 一个量化噪声, 一个是量化信噪比。

2.2.1. 量化信噪比

量化误差是衡量对信号量化处理优劣的指标[2], 是指量化后的信号与量化前的信号之差, 具有随机的性质, 量化会引入量化噪声, 采用合适的量化值能够减小量化噪声对于图像信噪比的影响。

$$V_{A/D} = \frac{V_{LSB}}{\sqrt{12}}$$

在星上得到数据大多采用的是 8 bit 形式, 因此随着当前星上处理技术的发展, 下传的数据不仅是原始回波数据, 更有可能是处理后的图像数据, 使用复数双精度浮点型既不利于星上再处理也不利于下传。因此需要一种方法将处理得到的数据以一种更简要的形式存储。

这里选择了 8bit 型。下面分析两种存储各自特点。

使用量化噪声:

$$N_q = E\left[(m_k - m_q)^2\right] = \int_a^b (m_k - m_q)^2 f(m_k) dm_k = \sum_{i=1}^M \int_{m_{i-1}}^{m_i} (m_k - q_i)^2 f(m_k) dm_k$$

量化噪声比:

$$SNR = \frac{S_0}{N_q} = \frac{E(m_k^2)}{E\left[(m_k - m_q)^2\right]} = \frac{\int_a^b m_k^2 f(m_k) dm_k}{\int_a^b (m_k - m_q)^2 f(m_k) dm_k} = \frac{\int_a^b m_k^2 f(m_k) dm_k}{\sum_{i=1}^M \int_{m_{i-1}}^{m_i} (m_k - q_i)^2 f(m_k) dm_k}$$

他们用来衡量量化的水平和效果。

2.2.2. 目标检测算法速度

量化位数改变使得目标检测算法实现速度得到提升, 将存储的位数降低, 最核心的目的是提高微笑平台实时处理速率, 这个速率用目标检测算法作检验。对于检测做得越快, 说明当前存储位数的适应效果越好。如表 1 所示, 不同的存储格式所需要耗费的运算时间不同。

Table 1. Detection speed result data

表 1. 检测速度结果数据

存储格式	数据量(byte)	同范围运算比特数目(bit)	运算耗费时间(s)
uint8	1	8 * 640 * 480	4.512
double	8	64 * 640 * 480	46.523

3. 存储位数变换方法

3.1. 基于均匀量化位数变换方法

在均匀量化方式中, 除第一个和最后一个区域, 其他的所有区域都是等长的, 即

$$\begin{aligned} R_1 &= (-\infty, a] \\ R_2 &= (a, a + \Delta] \\ R_3 &= (a + \Delta, a + 2\Delta] \\ &\vdots \\ R_N &= (a + (N - 2)\Delta, +\infty] \end{aligned}$$

每一级都有一个重建电平, 即落在该区域中的不同值都会被量化为同一值, 通常每个量化间隔的重建电平也都取均匀分布的值。

设模拟抽样信号取值 $[a, b]$ 上, 量化电平数为 M , 可以得到均匀量化的量化间隔为

$$\Delta v = \frac{b - a}{M}$$

且量化区间的端点

$$m_i = a + i\Delta v, \quad i = 0, 1, \dots, M$$

如果量化输出电平为量化间隔的中点, 取值 q_i 是

$$q_i = \frac{m_i + m_{i-1}}{2}, i = 1, 2, \dots, M$$

通过以上规则, 得到量化器输出信号, 实现所需功能。

64 位转换为 8 位, 基于通用计算机软件方法。

16 位转换为 8 位, 专用 SAR 成像处理系统。

均匀量化将动态范围均匀地划分, 使用均匀量化就相当于对信号引入了一个高斯噪声, 这个高斯噪声的理论值如下:

使用均匀量化, 引入量化噪声理论值是

$$v_{qn} = \sqrt{\frac{1}{Q} \int_{-\frac{Q}{2}}^{+\frac{Q}{2}} x^2 dx} = \sqrt{\frac{1}{Q} \left[\frac{x^3}{3} \right]_{-\frac{Q}{2}}^{+\frac{Q}{2}}} = \sqrt{\frac{Q^2}{2^3 \times 3} + \frac{Q^2}{2^3 \times 3}} = \frac{Q}{\sqrt{12}}$$

Q 为在 ADC 当中。众多模拟量会被转化成同一数字量时, 对应同一个数字量的模拟量之间的最大差值。模拟输入和数字输出之间的差值被称为量化误差, 量化误差的范围是 $\pm \frac{Q}{2}$ 。

3.2. 基于非均匀压缩的位数变换方法

根据信号本身的分布情况, 对原信号进行对数型压缩, 将压缩之后的信号做量化。

从理论上讲, 取值的分布越接近均匀分布, 对其均匀量化的效果会越好[3], 产生的量化噪声会越小。因此, 对原有信号进行非均匀变换之后, 使其分布跟接近与均匀分布, 从理论上讲所做量化的能力越好。

A 律对数量化器:

国际标准的 A 律 PCM 编码的对数压缩特性为

$$f(x) = \begin{cases} \frac{Ax}{1 + \ln A}, & 0 \leq x \leq 1/A \\ \frac{1 + \ln Ax}{1 + \ln A}, & 1/A \leq x \leq 1 \end{cases}$$

由于实现上的困难, 国际上使用 13 折现法来近似 A 律非均匀对数量化方法[4]。这个方法是将输入信号幅度归一化范围到, 将其分为均匀的 16 段区间, 正负方向相同, 在正负方向上得到由 16 段直线连成的一条折线。由于第 1 区间和第 2 区间以及第-1 区间-2 区间斜率相同, 直观上看仅有 13 条折线。

经过二维脉冲压缩之后的数据, 由于数据量大, 需要经过对数据存储位数进行调整, 通过对信号进行一定程度的调整。如图 3, 这里采用先对数据进行非线性变换, 将数据分布呈现近似均匀分布, 然后对数据进行均匀量化, 所得信号进行非线性反变换, 最终将量化结果储存至存储器中。

这样处理的原理依据是, 分布目标的回波分布呈现高斯分布特征[5]。根据中心极限定理[6], 分布目标的回波由极多个小的回波向叠加, 而每个回波的幅度是相互独立, 且同分布, 最终对每个随机变量求和以后得到的。

4. 基于 MATLAB 的仿真实验

本文在进行仿真时, 仅考虑量化对图像的影响, 未考虑白噪声等加性因素的干扰。对 Radarsat-1 数据成像结果 double 类型分别进行 8 bit 均匀的和 8 bit 非均匀的量化处理[7]。

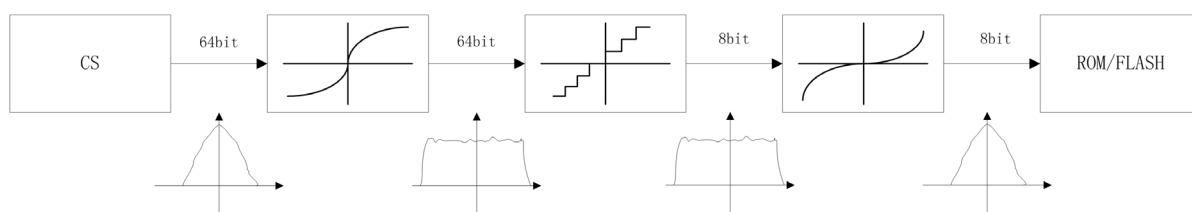


Figure 3. Schematic diagram of non-uniform compressed bit transformation
图 3. 非均匀的压缩的位数变换示意图

本文使用数据来自 radarsat-1 的数据集。如图 4，成像地带为加拿大温哥华港口。

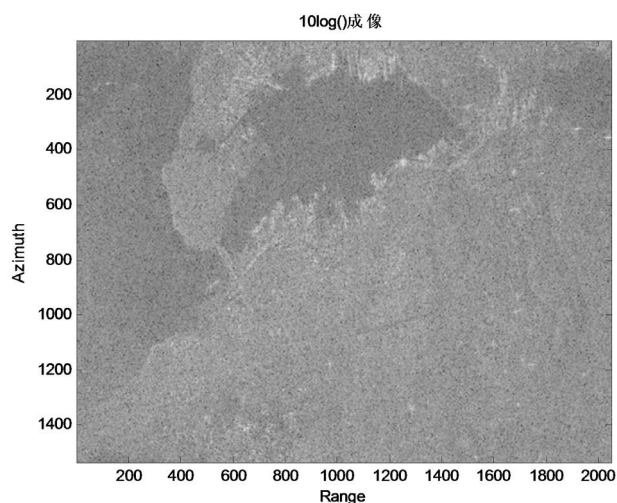


Figure 4. Radarsat-1 satellite image
图 4. Radarsat-1 卫星图像

对图像的取值分布进行分析，如图 5 发现整个图像服从类似高斯分布，取值集中具有一定特点。对比图 6 和图 7 的结果发现，采用 8 bit 方法图像较弱、采用 8 bit 非均匀的方法，图像效果较好。如图 8 所示，在经过非均匀压缩，图像数据接近均匀分布。

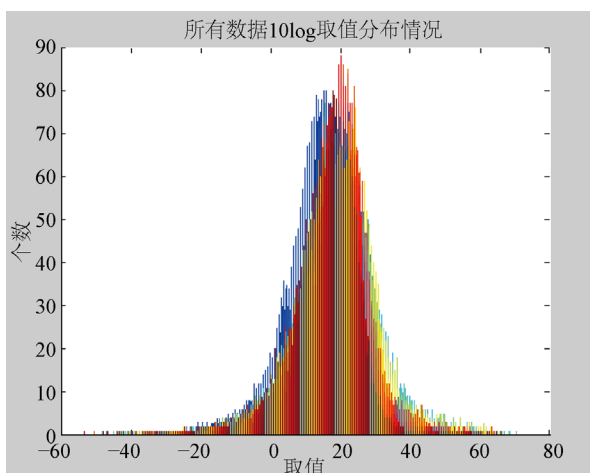


Figure 5. All image data distribution
图 5. 图像所有数据分布情况

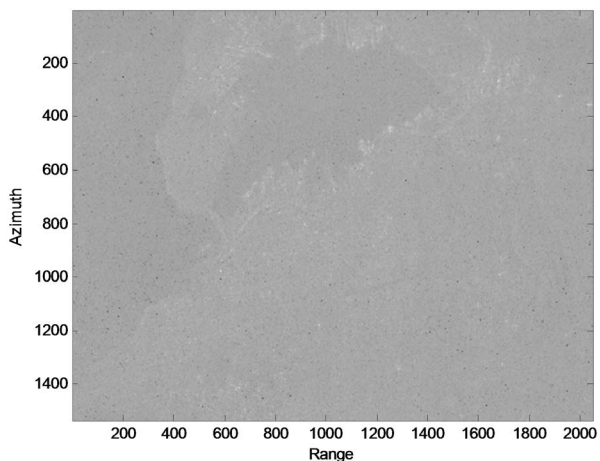


Figure 6. 8 bit uniform quantization result
图 6. 8 bit 均匀量化结果

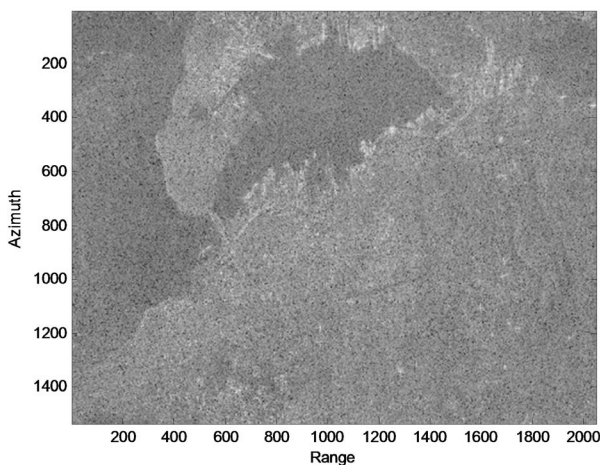


Figure 7. 8-bit non-uniform quantization result
图 7. 8 bit 非均匀量化的结果

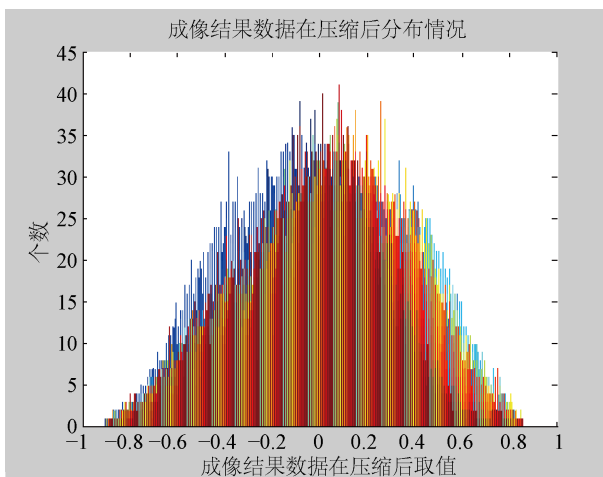


Figure 8. Compression of all image data
图 8. 图像所有数据压缩情况

如表 2 所示, 8 bit 非均匀指数量化后, 信噪比的情况优化 15 倍。

Table 2. Comparison of different quantitative results

表 2. 不同量化结果比较

	信号能量	信号功率	噪声功率	信噪比
8 bit 均匀量化	1.1820×10^{-7}	0.0019	5.0444×10^{-7}	369.91
8 bit 非均匀指数量化	1.1820×10^{-7}	0.0019	3.2379×10^{-7}	5763

5. 结束语

通过使用非线性量化提高了 8 bit 的存储数据信噪比, 进而提高了图像质量。卫星量化大多采用 8 bit 类型, 当量化位数增高时, 灰度相应范围变大从而能够分辨的细节更加丰富详细, 体现在图像上是一方面能够更好的分辨出灰暗区域(或阴影区域)的目标细节, 同时也能够探测高亮度区域里面的浅色目标。

本文理论分析与仿真试验结果表明, 遥感卫星成像结果量化位数选取 8 bit, 使用非均匀量化方法, 能够明显提升数据的信噪比, 提高遥感图像质量。

致 谢

感谢老师和同学的支持, 尤其感谢冯老师的指点。

感谢神舟学院的知识。

参考文献

- [1] Lan, G. Cumming, Frank. H. Wong. 合成孔径雷达成像: 算法与实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [2] 韩晓东, 贾小雪, 冯锦, 等. 基于水云模型的 SAR 图像量化增强算法[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(19): 5549-5554.
- [3] 姜明. 机载 SAR 图像量化及去噪声算法的工程应用研究[J]. 空载雷达, 2008(2): 17-20, 11.
- [4] 陈海波. SAR 量化饱和分析与校正技术研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院(电子学研究所).
- [5] Jin, M., Cheng, T. and Chen, M. (2002) Chirp Scaling Algorithms for SAR Processing. *Proceedings of IGARSS'93 - IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Tokyo, 18-21 August 1993, 1169-1172.
- [6] 王宇, 张志敏, 邓云凯. SAR 实时方位预处理中的量化误差分析[J]. 现代雷达, 2006(2): 36-39.
- [7] 吴红军, 皮亦鸣. 微型 SAR 成像量化显示的 FPGA 实现[J]. 电讯技术, 2009, 49(11): 27-30.