

# The Application of Interpolation Algorithm in SAR Image Processing

Jiuxiang Gu<sup>1</sup>, Hao Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing

<sup>2</sup>Institute of Geomatics, Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing

Email: [guyongxiang10@mails.ucas.ac.cn](mailto:guyongxiang10@mails.ucas.ac.cn)

Received: Feb. 24<sup>th</sup>, 2014; revised: Mar. 4<sup>th</sup>, 2014; accepted: Mar. 18<sup>th</sup>, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

---

## Abstract

In the processing of SAR echo data imaging, RCMC is an important factor which affects the focusing effect of two-dimensional image compression. In this paper, we take the positive side of SAR imaging for example, and research the application of the nearest neighbor approximation and sinc interpolation algorithm in RD imaging. By computer simulation, we analyze and compare the computation and bending effects of the two interpolation methods, and apply them in the imaging process of Radarsat-1 satellite in Matlab environment. The results show that the nearest neighbor approximation is suitable for low precision requirements with the benefits of small computation, and sinc interpolation algorithm is more suitable for high accuracy requirements with more interpolation points.

## Keywords

Interpolation, SAR, RD, sinc, Nearest Neighbor

---

# 插值运算在SAR成像处理中的应用

顾久祥<sup>1</sup>, 王浩<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京

<sup>2</sup>清华大学土木工程系地球空间信息研究所, 北京

Email: [guyongxiang10@mails.ucas.ac.cn](mailto:guyongxiang10@mails.ucas.ac.cn)

收稿日期: 2014年2月24日; 修回日期: 2014年3月4日; 录用日期: 2014年3月18日

## 摘 要

在SAR的回波数据的成像处理中,距离徙动校正是影响二维压缩成像聚焦效果的重要因素。本文以正侧视SAR成像为例,研究了2种插值算法:最近邻域近似法、sinc插值法在RD算法成像中的应用。通过计算机仿真,分析比较了2种插值方法的运算量和校正弯曲的效果结果,并在Matlab环境下利用插值算法进行了实际Radarsat-1的卫星数据成像处理。结果表明如果对精度要求低可选用运算量较小的最近邻域插值,对精度要求高时可以选择插值点较多的sinc插值。

## 关键词

插值, SAR, RD, sinc, 最近邻域

## 1. 问题的背景

SAR 遥感卫星具有全天候和全天时成像等技术特点,在环境减灾、地质勘探、农林业和国防等领域得到了广泛的应用。在合成孔径雷达(SAR)系统中, SAR 通过对接收的目标散射回波进行二维压缩处理实现对目标场景成像。雷达到目标的斜距是 SAR 处理中最重要的参数,它是方位向时间的函数。它的变化会导致不同脉冲之间的相位调制,这是 SAR 获得方位高分辨率的必要条件,同时它也会导致目标距离扭曲,即所谓的距离徙动(RCM)。当距离徙动量较小时,它对目标的成像影响可以忽略。当距离徙动量较大时,就会造成目标的散焦,影响成像质量,因此距离徙动校正是 SAR 成像处理中的重要环节。本文以星载正侧视合成孔径雷达成像为例分析了距离徙动校正的 2 种插值算法,基于仿真数据和实际 SAR 卫星数据分析了 2 种插值运算的运算量和校正效果。

## 2. SAR 成像的数学模型

SAR 处理的核心思想是对 SAR 回波信号进行距离和方位两个方向的匹配滤波,通过一个具有二维脉冲压缩作用的滤波器得到的二维压缩的图像。目前 SAR 成像已有很多成熟的算法,比较常见的有 RD、CS 算法, RD 算法是二十世纪七十年代后期由美国喷气推进实验室(JPL)的科学家首先提出的,之后又经加拿大 MDA 公司和加拿大遥感中心(CCRS)的工程师和科学家不断改进和工程化,已经成为了一种有效方便的成像处理算法, RD 算法通过在相邻的几个点之间做插值处理实现距离徙动校正,物理意义明确,易于理解。CS 算法是基于 Scaling 原理,是对 RD 算法的改进,通过让回波信号乘上一个相位因子,使得位于不同距离上的信号具有相同的徙动曲线,完成所有点的距离徙动校正[1]。本文选择了 RD 算法作为差值比较基础, RD 算法的处理流程示意如图 1 所示。

RD 算法的第一步是对回波数据完成距离压缩。首先将原始数据进行距离向 FFT,然后将距离频域方位时域信号与距离向频率匹配滤波器参考函数相乘,再对距离向匹配之后的信号进行距离向 IFFT 即完成距离压缩。在完成距离压缩后,对信号进行方位向 FFT,并对距离时域方位频域信号进行距离徙动校正(RCMC),再将完成距离徙动校正后的信号与方位向频率匹配滤波器参考函数相乘,然后进行方位向 IFFT,最后得到方位压缩后的复数图像。

在 RD 算法中,RCMC 是很重要的一个过程。RCMC 目的是使得不同距离门上的点目标距离徙动曲线和相位都被补偿到与参考距离上的距离徙动曲线的相位相等,该操作的意义是使得所有点的距离徙动曲线都具有相同的曲率。

正侧视机载 SAR 成像的空间几何关系如图 2 所示，雷达发射的线性调频信号经过接收并解调后的信号为：

$$S_0(\tau, \eta) = A_0 w_r(\tau - 2R(\eta)/c) w_a(\eta - \eta_c) \exp\left\{-j4\pi R(\eta)/\lambda + j\pi K_r(\tau - 2R(\eta)/c)^2\right\} \quad (1)$$

其中， $\tau$  是距离时间， $\eta$  是方位时间， $f_0$  为雷达频率， $K_r$  为距离 chirp 调频率， $A_0$  为增益， $w_a$  为天线的方位向加权函数， $w_r$  为发射信号包络的幅度， $R(\eta)$  为瞬时斜距，表示当前时刻目标点到雷达的距离。

距离徙动的重要原因是斜距  $R(\eta)$  随着方位向时间  $\eta$  变化。根据 SAR 回波模型和傅立叶变换的原理可知，同一距离不同方位的点目标在距离多普勒域中具有相同的轨迹，因此在距离多普勒域内统一校正距离徙动会大大简化运算量及其复杂程度。根据方位向多普勒频率和方位向时间的关系，斜距  $R(f_\eta)$  是一条关于  $f_\eta$  的抛物线，表达式近似如下：

$$R(f_\eta) \approx R_b + \lambda^2 R_b f_\eta^2 / 8v^2 \quad (2)$$

距离徙动使点目标的系统响应呈现为曲线如图 3 所示。从图中看出，距离向和方位向之间存在耦合，距离徙动补偿相当于将二维平面的系统响应曲线补偿成直线，也就是将图中的虚线进行插值到直线，该操作在 SAR 成像处理中称为二维解耦。图中每一个  $f_\eta$  处的距离弯曲量与所占的距离采样单元数  $\Delta_n$  的关系为：

$$\Delta R = R(f_\eta) - R_b = \lambda^2 R_b f_\eta^2 / 8v^2 = \Delta_n * \rho_{rs} \quad (3)$$

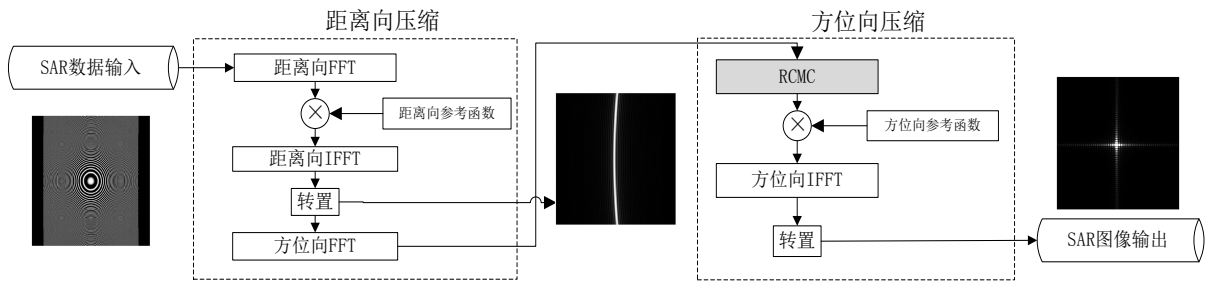


Figure 1. Procedure of RD algorithm

图 1. RD 算法处理流程

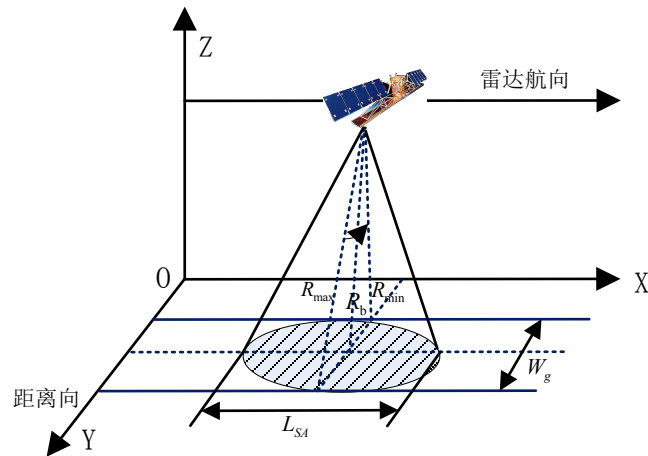


Figure 2. The geometric relationship of side looking SAR imaging

图 2. 正侧视 SAR 成像空间几何关系

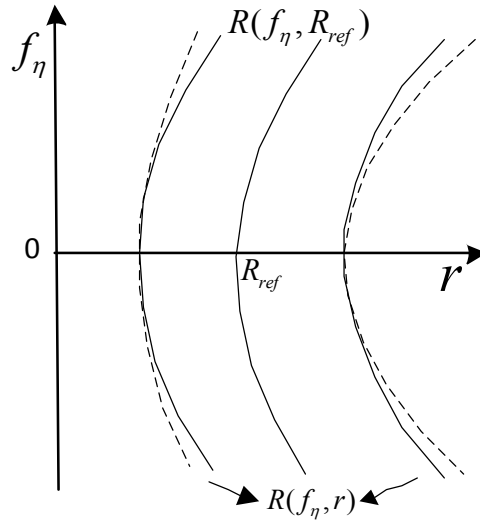


Figure 3. The bending diagram of range Doppler domain

图 3. 距离多普勒域中的弯曲示意图

上式中,  $\rho_{rs} = c/2F_s$  为采样后的距离单元,  $F_s$  为距离向采样率。

经过采样的 SAR 回波数据是一个离散的矩阵  $s(m, n)$ ,  $1 \leq m \leq Na$ ,  $1 \leq n \leq Nr$ , 其中  $Na$  为方位向的采样点数,  $Nr$  为距离向采样点数。距离迁动校正就是要校正由斜距产生的弯曲, 就是要从原始的数据  $s(m, n)$  中估计得到  $s(m, n + \Delta n)$  的值, 这个问题是一个沿着距离向的插值问题[2]。所以从这个意义上说, 距离弯曲校正问题是一个插值问题, 校正后的信号为:

$$s'(m, n) = s(m, n + \Delta n), 1 \leq m \leq Na, 1 \leq n \leq Nr \quad (4)$$

### 3. 插值算法的比较

目前常用的插值方法有最近邻域近似法、sinc 插值法, 本文就这 2 种插值方法展开论述。

#### 3.1. 最近邻域近似

最近邻域近似法直接将位置  $(m, n + 2\Delta R(m, n)f_s/c)$  最靠近的  $s(m, n)$  作为  $s(m, n + 2\Delta R(m, n)f_s/c)$  的估计值  $s_e(m, n + 2\Delta R(m, n)f_s/c)$ , 处理如下:

$$\begin{aligned} n'(m, n) &= \lceil 2\Delta R(m, n)f_s/c \rceil_{\text{取整}} \\ \Delta n(m, n) &= 2\Delta R(m, n)f_s/c - n' \end{aligned} \quad (5)$$

如果  $\Delta n$  小于 0.5, 则  $s'(m, n) = s_e(m, n + 2\Delta R(m, n)f_s/c) = s(m, n + n')$ ;

如果  $\Delta n$  大于等于 0.5, 则  $s'(m, n) = s_e(m, n + 2\Delta R(m, n)f_s/c) = s(m, n + n' + 1)$ 。

在上式中,  $n'$  为距离弯曲偏移量  $\Delta n$  四舍五入过后的整数部分,  $\Delta n$  为其小数部分, 它们都是  $m$  和  $n$  的函数。

#### 3.2. sinc 插值

sinc 插值法是利用原函数  $y(x)$  中其他的点的值进行 sinc 函数加权得到  $y(x)$  在  $x$  处的值。

$$y(x) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} y(i) \text{sinc}(x-i) \quad (6)$$

在距离弯曲校正的过程中, 考虑到运算量, 不可能对回波进行无数点的 sinc 插值, 因此要对 sinc 插值进行截断处理, 取  $P$  点的 sinc 插值, 距离弯曲校正的插值公式为:

$$s'(m, n) = s(m, n + \Delta n) = \sum_{i=-P/2}^{P/2-1} s(m, n + n' + i) \text{sinc}(\text{fracn} - i) \quad (7)$$

上式中,  $\text{fracn}$  为  $\Delta n$  的小数部分。由于对 sinc 的截断会产生吉布斯(Gibbs)效应, 所以要对 sinc 插值核进行加窗, 进而减弱 Gibbs 效应, 常用的窗函数有 hamming 窗、Kaiser 窗。在 SAR 距离弯曲校正中, 兼于精度和运算量的要求, 一般使用 8 点 sinc 插值。为了进行比较, 本文选取 4 点、8 点和 16 点 sinc 插值进行实验。

### 3.3. 运算量的比较

首先, 由于最近邻域近似方法不需要乘法和加法运算, 仅需要  $2 \times Nr \times Na$  次数据搬移操作。

由于 sinc 插值进行了对临近点的加权运算, 因此运算量会大大增加。sinc 插值是从  $s(m, n)$  中得到  $s'(m, n)$  的过程, 实际上就是一个 FIR 滤波的过程,  $P$  点插值方法都需要  $2 \times Nr \times Na \times P$  次乘法运算和  $2 \times Nr \times Na \times (P - 1)$  次加法运算。

以 2 个点目标为例进行 RD 算法仿真实验, 雷达工作频率为 1.0 GHz, 发射脉冲宽度, 带宽为 30 MHz, 雷达运行高度 6000 m, 雷达速度 100 m/s, 距离向分辨率为 5 m, 方位向分辨率为 1 m, 距离向采样频率为 60 MHz, 方位向采样频率为 100 Hz。距离向调频率为 3.0 MHz/ $\mu\text{s}$  方位向调频率为 5.7166 Hz/s。方位向场景宽度为(0 m, 2000 m), 距离向场景宽度为(0 m, 1000 m)。运用 Matlab 对 2 个点目标进行计算机仿真, 4 种插值方法的运算量如表 1 所示。

距离压缩过后未经过校正的原始距离多普勒图像和 4 种方法校正后图像如图 4 所示。

由图 4 看出: 最近邻域近似法只是粗略的校正, 因为它是最靠近  $\Delta n$  的那个整数来近似  $\Delta n$  处的值, 最近邻域近似法只是粗略的校正了弯曲; sinc 插值法比最近邻域近似法得到的图像要好一些, 但是 sinc 插值法根据不同的点数插值时间不一样, 4 点 sinc 插值法比最近邻域近似法校正效果要好, 但是校正的时间比较长。当取的点数较多时, 例如取 8 点 sinc 插值的精度就会提高, 但是运算的时间会增加很多。

最近邻域近似法和 sinc 插值方法都改善了距离向和方位向的分辨率, 方位向分辨率的改善尤其明显。根据仿真结果比较, sinc 插值法对方位向的分辨率的改善更接近于理论值。在 SAR 回波二维压缩成像处理中, 要根据具体的成像的精度和运算量的大小来决定具体的插值方法。

实际的 SAR 成像中 RCMC 采用 sinc 插值较多, RCMC 是个插值运算, 附近几个点都会参与运算, 参与计算的点数的多少直接影响插值精度, 一般情况下是附近 4 点或 8 点参与插值运算, 这种运算量很大, 因此成像对系统的运算能力要求很高, 在实际的工程应用中需要进行并行处理[3]。GPU 是单指令多数据(SIMD)的并行处理方式, 为数据并行方式, 适合数据并行方式的问题划分, 具有很强的数据处理能力。目前基于 GPU 的这类编程模型来解决大规模数据计算的问题已经广泛应用于 SAR 成像领域[4]。

## 4. 实际数据分析

为了验证 RCMC 插值在实际 SAR 成像处理的效果, 本文利用了基于 sinc 插值处理的 RD 算法针对

Table 1. System resulting data of standard experiment

表 1. 种插值方法的运算量对比

插值方法	最近邻域插值	4 点 sinc 插值	8 点 sinc 插值	16 点 sinc 插值
运行实际	5.4600 e+03 ms	6.8703 e+04 ms	1.2870 e+05 ms	2.5119 e+05 ms

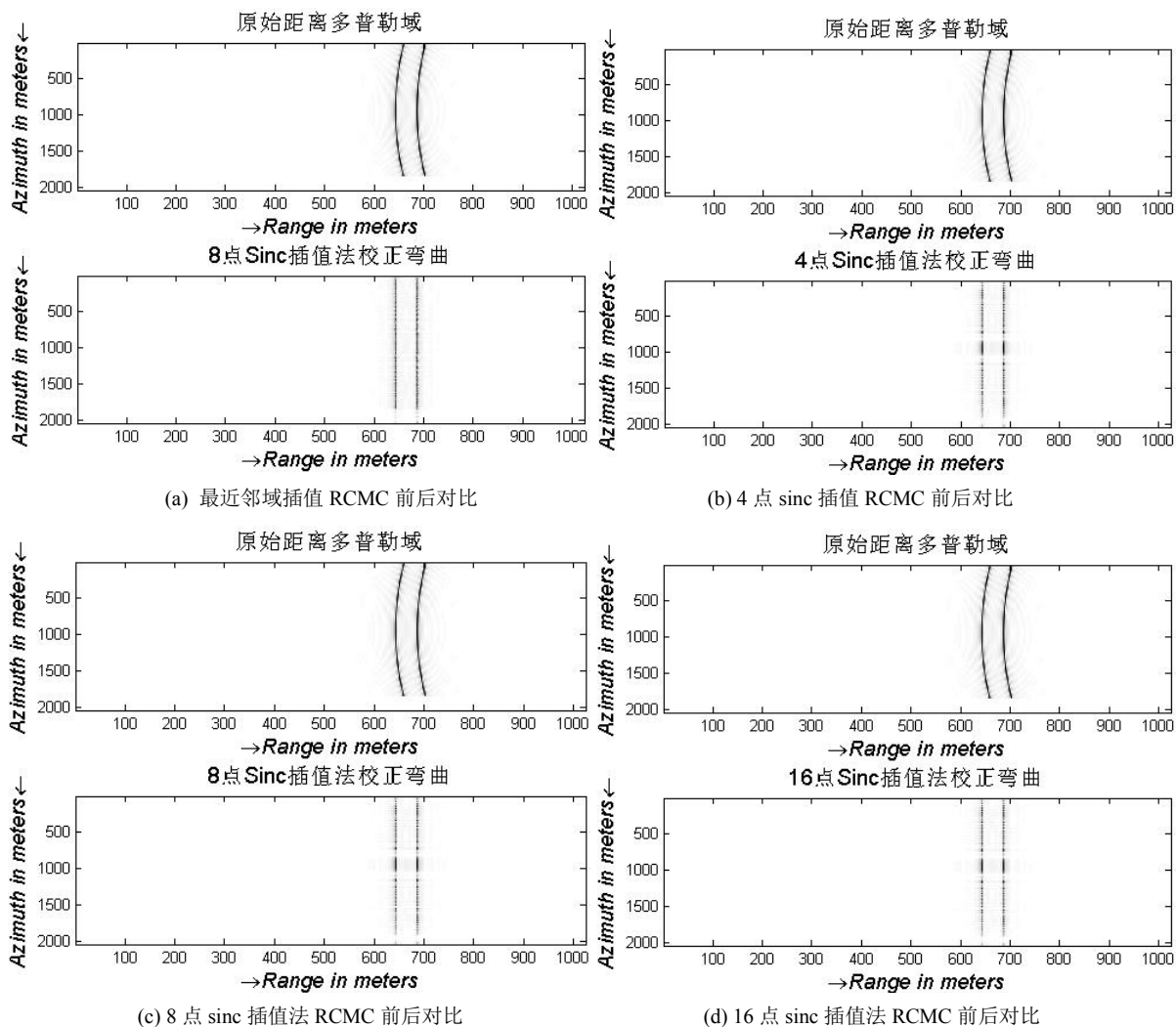


Figure 4. Comparison of the effect of interpolation on the bending correction  
图 4. 插值对弯曲校正效果的比较

Radarsat-1 的 SAR 卫星的实际数据进行成像处理，考虑到精度和速度的要求，采用 8 点 sinc 插值来进行 RD 算法的 RCMC 处理。SAR 实时成像处理在 CPU 环境中(Matlab、C++语言实现)得到程序实现，其运行环境如下：

- 操作系统：Microsoft Windows 7 Ultimate
- 处理器：2\*Intel (R) E5620 Xeon (R) CPU, 2.4GHz
- 内存：3GB(三星 DDR3 1333MHz)
- 编译环境：Microsoft Visual Studio 2008
- Matlab 版本：Matlab R2013a

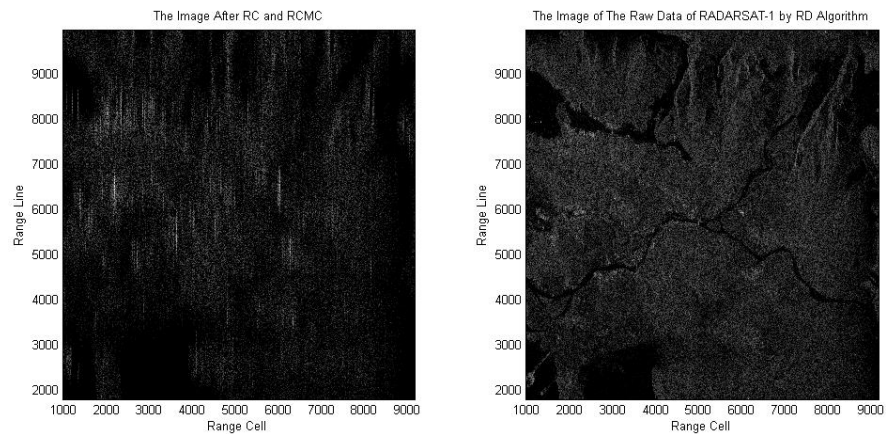
首先，在 Matlab 环境下针对 Radarsat-1 卫星获取的加拿大温哥华地区数据进行成像处理。并进行未做 RCMC 插值和采用 sinc 插值的图像对比，该地区的参数如表 2，图 5 所示。

从上面的 Matlab 仿真结果看出，采用 RCMC 插值后的图像处理结果精度明显提高，经过距离徙动校正后，分辨率基本上都得到了明显的改善。如果不进行距离 RCMC 插值，方位向和距离向都有明显恶化，在方位向表现为旁瓣太高，在距离向则表现为分辨率的明显下降。

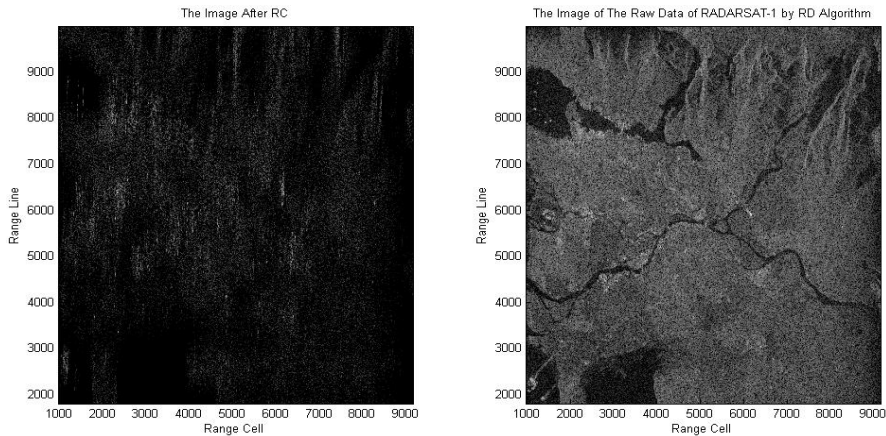


**Table 2.** The Radarsat-1 parameter of the Vancouver scenes  
**表 2.** 温哥华场景的 Radarsat-1 参数

参数	符号	数值	单位
采样率	Fs	32.317	MHz
脉冲宽度	Tr	30.111	MHz
距离调频率	Fs	0.72135	MHz/us
雷达频率	f0	5.300	GHz
脉冲重复频率	Fa	1256.98	Hz
有效雷达速度	Vr	7062	m/s
方位调频率	Ka	1733	Hz/s
多普勒中心频率	Fc	-6900	Hz



(a) 未使用 RCMC 插值的 RD 算法仿真结果



(b) 使用 RCMC 插值的 RD 算法仿真结果

**Figure 5.** RD algorithm processing results of Vancouver Radarsat-1 scene

**图 5.** 温哥华场景的 Radarsat-1 的 RD 算法成像处理结果

此外本文在 CUDA 环境下采用 GPU 对 SAR 成像进行了实现，由于传统的计算平台和 GPU 计算平台有很大差别，因此传统平台 RD 算法典型的实现方法与 GPU 平台 RD 算法实现方法是不同的：传统的处理平台一般都采用任务并行进行处理，而 GPU 平台则是采用数据并行的方式进行处理。本文只针对 RCMC 的 sinc 插值采用 GPU 进行了加速处理，sinc 插值可以看成 2 个大小为  $N_a \times N_r$  二维矩阵的相乘，

在对其进行并行处理时，可以有 2 种划分策略，一种是按照行进行划分，将原始数据划分为  $N_a$  个处理任务，每个任务处理  $N_r$  点的回波数据。这种方式比较简单，但是在并行处理时，每个线程内部还存在着串行操作。另一种划分则是按照元素进行划分，这种细粒度划分策略保证了 GPU 处理器资源的使用率。

对该问题的划分如下：

`dim3 grid(Na/16, Nr/16);`

`dim3 threads(16,16);`

该问题的划分如图 6 所示。

图 7 是在实际的 SAR 成像处理系统中，采用 4 点 sinc 插值的处理效果。考虑到处理速度，没有采用 8 点 sinc 插值。可以看出采用 4 点 sinc 插值已经能够满足 SAR 实时成像处理的要求。

### 5. 总结

本文在分析时采用了 SAR 成像处理最常用的 2 种方法进行对比，并进行了点目标的仿真，比较了 2 种插值算法在 RD 成像处理中的应用。sinc 算法和最邻近近似插值在 SAR 的方位向分辨率提高不大，但

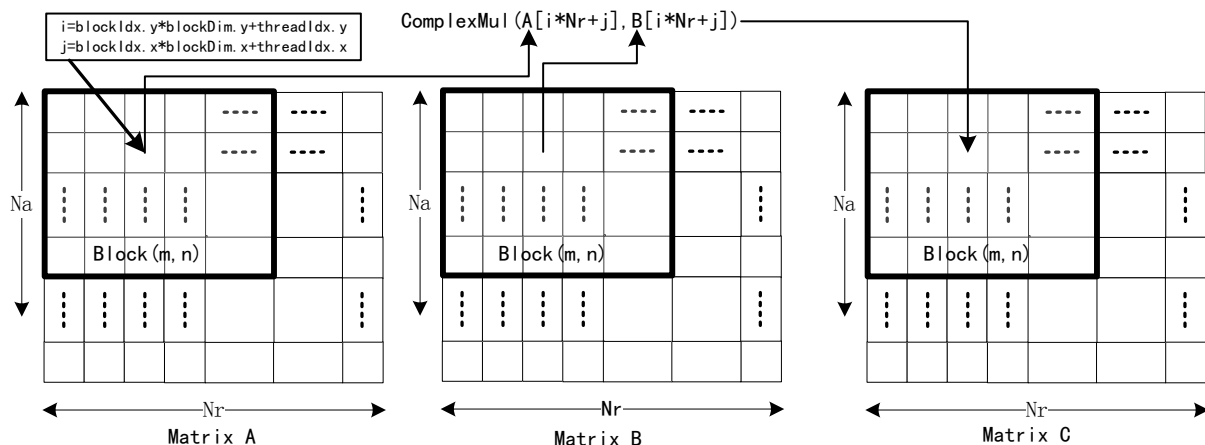


Figure 6. Schematic diagram of GPU matrix multiplication

图 6. GPU 矩阵相乘示意图

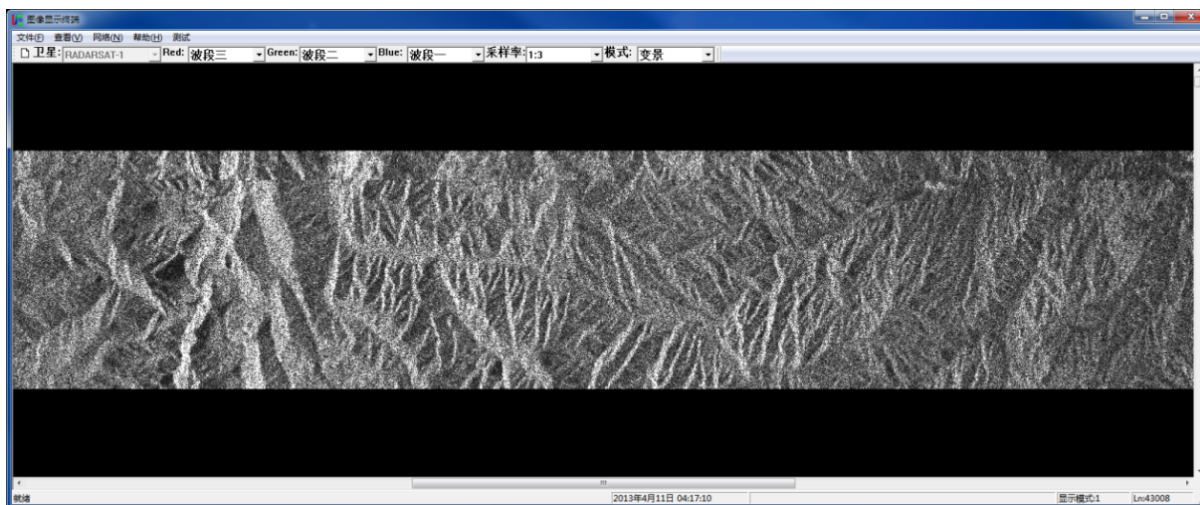


Figure 7. The actual SAR imaging processing of a certain area

图 7. 某地区实际 SAR 成像处理图



是在距离向, sinc 插值方法优于最邻近近似插值方法。并对实际的 SAR 卫星数据进行处理, 采用了 RCMC 插值的成像处理效果明显优于未做插值的图像。此外, RCMC 插值还有拉格朗日插值方法可用, 但是该方法除了计算增大很多, 在不考虑相位保真性情况下性能上并无优势可言, 且会出现 Runge 效应。Sinc 插值随着插值点的数目增加会有所提高, 但是运算的时间会增加很多。所以在 SAR 回波二维压缩成像处理中, 要根据具体的成像的精度和运算量的大小来决定具体的插值方法。

### 参考文献 (References)

- [1] Curlander, J.C., Mcdonough, R.N., 等, 著, (2006) 韩传钊, 等, 译. 合成孔径雷达——系统与信号处理. 电子工业出版社, 北京.
- [2] 禹卫东, 吴淑梅 (2001) 距离——多普勒方法中的几种插值算法的比较. *电子与信息学报*, **3**, 308-312.
- [3] 郭琨毅, 盛新庆 (2005) 高新能 Beowulf 集群的 SAR 并行成像的处理. *现代雷达*, **1**, 38-40.
- [4] 熊君君, 王贞松, 姚建平, 石长振 (2005) GPU 平台下针对 SAR 地面快视系统的 RD 算法优化. *电子学报*, **6**, 1070-1072.