# 一种机载 SAR 距离徙动修正的快速算法

张昆辉

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

**摘 要**: 距离-多普勒算法是机载合成孔径雷达成像信号处理中的常用算法, 针对其采用逐点插值进行距离徙动修正而导致运算量过大的问题, 提出了一种无需插值的快速距离徙动修正方法. 该算法通过二次快速傅里叶变换和一次复乘操作完成合成孔径雷达成像所需的距离徙动修正处理. 在分析回波信号模型的基础上, 推导了利用该技术能够精确完成距离徙动修正的最大测绘带宽度, 给出了该宽度与成像分辨率之间的关系, 并用计算机仿真验证了上述关系的正确性. 理论分析、仿真和实测数据处理结果表明, 该方法具有运算量小、精度高的优点, 非常适合于机上实时处理.

**关 键 词**: 距离-多普勒算法; 距离徙动; 距离徙动修正; 合成孔径雷达

中图分类号: TN 957

文献标识码: A 文 章 编 号: 1001-5965(2008) 11-1315-04

# Fast algorithm for airborne SAR range cell migration correction

Zhang Kunhui

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract** The range-Doppler algorithm is quite popular in airborne synthetic aperture radar (SAR) image formation. To reduce the excessive computation load associated with the pixel by pixel interpolation required in traditional range Doppler algorithm (RDA) to remove range cell migration (RCM), a fast and interpolation-free range cell migration correction(RCMC) technique which only involves operations of two FFTs and one complex multiplication was proposed. Based on the analysis of echo signal model, the constraint on attainable maximum swath with such a fast RCMC technique was derived, and the relation between this constraint and the imaging resolution was also given. The analysis was validated by simulation results. The theoretical analysis, simulation and SAR real data processing result show that this technique can reduce the computational burden dramatically with high enough precision, and is amenable to on-board real time processing.

**Key words** range-doppler algorithm; range cell migration; range cell migration correction; synthetic aperture radar

在高分辨率机载 SAR (Synthetic Aperture Radar)旁视条带成像中, 载机平台的飞行一方面引起目标回波多普勒频率的变化, 从而可以采用合成孔径技术来提高方位分辨率; 另一方面也必然产生目标的距离徙动 (RCM, Range Cell Migration), 引起回波信号的二维耦合, 导致成像难度的增大. RCM 是 SAR 成像不可回避的问题, 为了获得良好的方位聚焦质量, 成像处理算法必须进行距离徙动修正 (RCMC, Range Cell Migration Correction)[1-3].

距离-多普勒算法 (RD, Range-Doppler)[4-6] 是机载正侧视条带 SAR 成像的经典算法, 具有处理流程简单、与运动补偿结合容易, 聚焦精度较好的特点, 在实时成像处理机中的应用最为广泛. 它通常采用插值的方法在 RD 域进行 RCMC, 以消除回波信号的二维耦合, 把复杂的二维处理问题变为 2个级联的一维处理, 显著降低了成像处理的难度和复杂度, 其主要缺点是 RCMC 处理需要

收稿日期: 2007-12-05

作者简介: 张昆辉(1963-), 男, 江西萍乡人, 博士生, zhangkunhu@raa.org.cn.

逐点的插值运算,这一方面会带来很大的运算量,另一方面有限长度的插值核还会引起精度问题.

针对 RD 算法中插值 RCMC 的缺点,本文在分析距离徙动问题的基础上,提出了一种快速 RCMC 技术,它无需插值,只需两次 Fourier变换和一次复乘操作,在满足一定的约束条件下具有运算量小、精度高的优点,非常适合于工程实施.

## 1 RD算法中的距离徙动

RD 算法的标准处理步骤是在完成距离脉压后,经方位 Fourier变换进入 RD 域,此时回波信号[5]为

$$s_1(\tau, f_a; r) = \sum \sigma_r p\left[\tau - \frac{2R(f_a; r)}{c}\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi r}{\lambda}\gamma(f_a)\right] \quad (1)$$

式中,$\sigma_r$ 表示距离为 $r$ 处目标的散射系数;$c$ 为光速;$\tau$ 为快时变量;$\lambda$ 为波长,$p(\tau) = F^{-1}_{(f_\tau)} \cdot [|P(f_\tau)|^2]$ 为距离匹配滤波处理的点目标响应($|P(f_\tau)|$ 为发射基带信号的幅度谱);$f_a$ 表示多普勒频率;$\gamma(f_a) = \sqrt{1-(\lambda f_a/2v)^2}$;$v$ 为载机速度.而

$$R(f_a; r) = r/\gamma(f_a) \quad (2)$$

为 RD域中距离为 $r$ 的目标的距离徙动轨迹,可见,RD域中同一距离、不同方位位置上的点目标具有相同的徙动轨迹.

由式(1)可知,在 RD 域中距离 $r$ 处的目标需要修正的距离徙动量为

$$\Delta R(f_a; r) = R(f_a; r) - r = r[1/\gamma(f_a) - 1] \quad (3)$$

需要说明的是,由于工程化的机载 SAR 正侧视条带 SAR 成像系统一般均采用伺服稳定平台来保证天线波束始终指向零多普勒方向,因此本文不考虑斜视的情况.

由于距离徙动轨迹一般不在采样点上,因此需要用插值的方法来完成 RCMC,插值 RCMC 后得到回波信号为[5]

$$s_2(\tau, f_a; r) = \sum \sigma_r p\left[\tau - \frac{2r}{c}\right] \exp\left[-j\frac{4\pi r}{\lambda}\gamma(f_a)\right] \quad (4)$$

可见,插值 RCMC 后 RD 域中所有位置上目标的徙动轨迹都平行于多普勒频率轴,距离向和方位向的耦合已消除,使得余下的方位聚焦只需一维相关处理即可.

根据上述分析可以看出,插值处理是 RD 算法实现 RCMC 的标准步骤,一般采用截断的 sinc 插值核,以兼顾计算效率和插值精度,如通常采用长度为 8点的 sinc插值核,但逐点插值所需的计算量很大,这种情况在高分辨率、宽测绘带的情况下尤其严重.为了减小 RD算法中插值 RCMC 处理所需的大运算量,考虑在确保精度的前提下,通过采用无需插值运算的快速算法来完成 RCMC.

## 2 快速 RCMC技术

根据式(2)所示的 RD 域中的距离徙动轨迹,距离徙动具有空变特性,它与目标距离 $r$ 成正比,是多普勒频率的单值函数.如果条带测绘宽度较窄,即测绘带近端、中心和远端的距离变化不大,则在某一多普勒频率单元,对应于测绘带近端、中心和远端目标的距离徙动量相差不大,因而可以考虑以测绘带中心点的距离徙动量来对整个图像进行补偿,这样做对中心点是完全补偿,而对偏离中心点两侧的距离单元则是不完全补偿,但由于测绘带近端、远端和中心的距离徙动量相差很小,因而这种在误差允许范围内的不完全补偿的方法在工程上是合理的,具体分析如下.

如果以测绘带中心点目标的距离徙动量来对整个图像进行补偿,则最大残留距离徙动出现在近端或远端,大小相等,根据式(3)可推导出

$$\Delta r = \frac{W_r}{2}[1/\gamma(f_a) - 1] \quad (5)$$

式中,$W_r$ 为条带宽度.考虑到距离徙动最大值出现在 $(f_a)_{max} = \pm f_p/2$ 处,$f_p$ 为雷达脉冲重复频率,而在工程实现中一般取

$$f_p = k_a \cdot B_d = k_a \cdot v/\rho_a \quad (6)$$

式中,$B_d$ 为获得方位分辨率 $\rho_a$ 所需处理的多普勒宽度;$k_a$ 为方位过采样因子,一般取 1.25.

由式(5)和式(6),可以得到最大残留距离徙动为

$$\Delta r_{max} = \frac{W_r}{2}\{[1-(\lambda k_a/4\rho_a)^2]^{-\frac{1}{2}} - 1\} \quad (7)$$

如果最大残留距离徙动量小于一个距离分辨率单元,即 $\Delta r_{max} \leqslant p_r = c/2f_s$($f_s$ 为距离采样率),则工程上可以认为这种以测绘带中心点的距离徙动量来对整个图像进行补偿的方法是精确的,因此可以推导出利用这种方法能够精确完成 RCMC 的测绘带宽度为

$$W_r \leqslant 2p_r/\{[1-(\lambda k_a/4\rho_a)^2]^{-\frac{1}{2}} - 1\} \quad (8)$$

据此可以算出利用该 RCMC 技术所能精确完成距离徙动修正的最大测绘带宽度随方位分辨率变化的曲线(如图 1所示),计算中取 $k_a = 1.25$,图

中分别给出了机载 SAR 常用的 Ku和 X两个波段的情况.

从式(8)和图 1中可以知道, 对于 X或 Ku波段机载 SAR 系统, 当分辨率指标为 1m, 采样率为 200MHz时, 该方法可对 34km 或 76km 的测绘带宽度进行精确 RCMC, 而当分辨率为 0.5m, 采样率为 375MHz时, 该方法可对 4.5km或 10km 的测绘带宽度进行精确 RCMC. 考虑到目前工程化的机载 SAR 系统在 1m 分辨率时测绘带宽度指标一般为 10km 左右, 而在 0.5m 分辨率时测绘带宽度指标一般为 4km 左右, 因此在式(8)所允许的测绘带宽度范围内, 采用测绘带中心点的距离徙动量来对整个图像进行 RCM 补偿的方法在工程上是足够精确的.

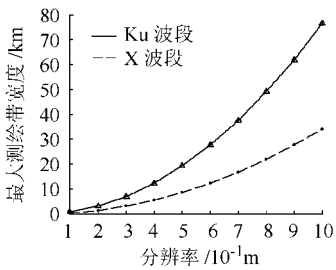


图 1　快速 RCMC技术适用的最大测绘带宽度随方位分辨率变化曲线

根据离散时间线性系统理论[6], 信号在距离时域的位移对应于距离频域的线性相位, 所以为了在 RD域的距离维实现 RCMC, 可以通过距离 Fourier变换到二维频域, 在二维频域中对每个多普勒单元乘上一个距离频率的线性相位因子, 然后再做一次距离逆 Fourier变换, 就可完成 RCMC, 这一处理步骤仅仅涉及二次 Fourier变换和一次复乘, 详细分析如下.

对式(1)进行距离 Fourier变换, 可以得到回波信号的二维频域表达式

$$S_2(f_\tau, f_a; r) = |P(f_\tau)|^2 \sum \sigma_r \exp\left(-\mathrm{j}\frac{4\pi f_\tau}{c} r\right) \cdot \underbrace{\exp\left(-\mathrm{j}\frac{4\pi f_\tau}{c}\Delta R(f_a; r)\right)}_{\text{距离徙动项}} \exp\left[-\mathrm{j}\frac{4\pi r}{\lambda}\Psi(f_a)\right] \tag{9}$$

式中, 第二个指数项是距离频率的线性相位, 代表距离徙动项, 如果消除这一项, 就可完成 RCMC.

对式(9)乘一个 RCM 校正函数, 即

$$H(f_\tau, f_a; r_0) = \exp\left[\mathrm{j}\frac{4\pi f_\tau}{c}\Delta R(f_a; r_0)\right] \tag{10}$$

式中, $r_0$为雷达 APC(Antenna Phase Center)到测绘带中心的距离, 可得

$$S'_2(f_\tau, f_a; r) = |P(f_\tau)|^2 \sum \sigma_r \cdot \exp\left[-\mathrm{j}\frac{4\pi r}{\lambda}\Psi(f_a)\right] \exp\left(-\mathrm{j}\frac{4\pi f_\tau}{c} r\right) \cdot \exp\left\{-\mathrm{j}\frac{4\pi f_\tau}{c}[\Delta R(f_a; r) - \Delta R(f_a; r_0)]\right\} \tag{11}$$

根据上面的分析, 当测绘带宽度指标满足式(8)时, 可以认为 $\Delta R(f_a; r) \cong \Delta R(f_a; r_0)$, 即上式的最后一个指数项为 1, 因此得到

$$S''_2(f_\tau, f_a) = \sum \sigma_r |P(f_\tau)|^2 \cdot \exp\left(-\mathrm{j}\frac{4\pi f_\tau}{c} r\right) \exp\left[-\mathrm{j}\frac{4\pi r}{\lambda}\Psi(f_a)\right] \tag{12}$$

对式(12)作距离逆 Fourier变换, 得到的结果与式(4)相同, 可见, 回波信号距离徙动已完全消除.

以上分析可见, 这种 RCM 校正的运算只有两次 Fourier变换和一次复乘, 每个像素点需要的浮点操作数[7]为 $10\log_2 N_r + 6$, 当距离样本数 $N_r = 4096$时, 浮点操作数为 126次/像素. 而采用 8点 sinc核的插值 RCMC, DSP(Digital Signal Processing)实现中 8个 sinc系数的计算需要约 $8 \times 30$次浮点操作, 而每个输出样本需要 8点加权和 32个浮点操作, 因而浮点操作数约为 272次/像素, 两者相比, 本文方法的运算量不到传统插值 RCMC 运算量的 1/2. 另外, DSP实现中 Fourier变换可由 FFT(Fast Fourier Transform)快速实现, 因此, 相比插值 RCM 校正处理, 这种 RCM 校正技术具有运算量小、速度快的优点, 因而称作快速 RCMC 技术, 非常适合在 DSP实时成像处理机中实现.

## 3　仿真及实测数据验证

### 3.1　仿真分析

仿真参数为: 作用距离 $R = 50$km; 雷达波长 $\lambda = 3$cm; 线性调频信号带宽 $B = 165$MHz, 对应理论距离向分辨率 $\rho_r$为 0.91m; 距离向采样率 $f_s = 200$MHz, 对应距离向像素 $p_r$为 0.75m; 载机速度 100m/s; 合成孔径长度取 1072m, 对应理论方位分辨率 $\rho_a = \lambda R/2L_s$为 0.7m; 脉冲重复频率 $F_s = 500$Hz, 方位预滤波抽取比 3:1, 对应方位向像素 $p_a$为 0.6m; 测绘带宽度为 6144m, 3个点目标分布在近距、中心和远距, 近距和远距点目标距测绘带中心点目标的距离均为 3000m.

成像处理采用 RD算法流程, 其中距离徙动校正采用上节中提出的快速 RCMC技术, 仿真结果如图 2所示, 图 2a和图 2b为近距点目标和远距点目标的二维等高线图, 可见点目标聚焦良好,

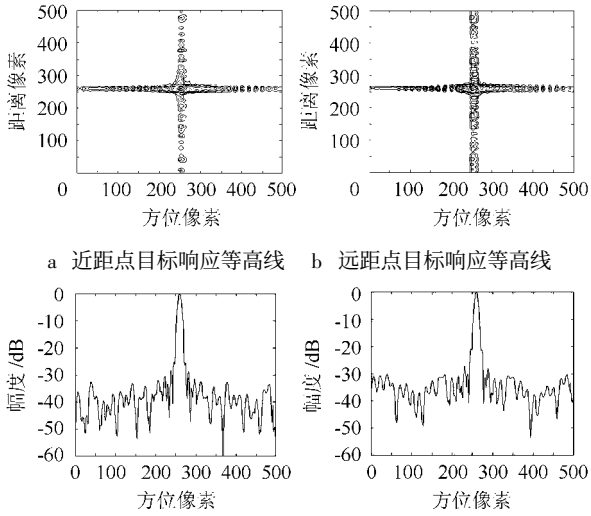


图 2 用快速 RCMC方法的 RD算法点目标响应仿真结果

图 2c和图 2d为近距点目标和远距点目标的方位剖面(已内插 8倍),从中可以测出点目标方位响应特性,即 3 dB宽度对应的分辨率,峰值旁瓣比(PSLR, Peak Side Lobe Ratio)和积分旁瓣比(ISLR, Integrated Side Lobe Ratio),见表 1.可见,实测分辨率指标与理论值相近,需要说明的是成像处理中未作加权处理,但由于预滤波所用滑窗对方位信号起到了一定的加权效果,所以 PSLR和 ISLR两个指标较高,近距和远距点目标与中心点目标的方位冲击响应指标基本相同,均满足设计分辨率要求,可见采用快速 RCMC技术的 RD算法能够对测绘带内所有目标完成精确聚焦,仿真结果证明了快速 RCMC技术的有效性和正确性.

表 1 基于快速 **RCMC**的 **RD**算法点目标响应方位剖面

| 目标 | 指标 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 理论分辨率/m | 实测分辨率/m | PSLR/dB | ISLR/dB |
| 近距点 | 0.7 | 0.68 | -25.2 | -19.7 |
| 中心点 | 0.7 | 0.68 | -26.7 | -20.8 |
| 远距点 | 0.7 | 0.69 | -22.0 | -19.5 |

### 3.2 实测数据验证

利用基于快速 RCMC技术的 RD算法对某 X波段机载 SAR获取的 1m×1m分辨率正侧视条带模式原始数据进行高分辨率成像处理,距离测绘带宽度 6144m,远小于式(8)确定的最大测绘带宽度,因此,基于快速 RCMC技术的 RD算法能够对该型 SAR数据进行精确聚焦,成像结果如图 3所示,从图中可清晰地看出公路桥、铁路桥、高速公路、村庄、农田、山丘、干涸的河床等目标,并且近距、远距的场景聚焦质量与测绘带中心区域的聚焦质量相当,这一成像结果表明了文中提出的快速 RCMC技术的有效性和正确性.




图 3 实际 SAR数据成像结果

## 4 结束语

在分析 RD算法中距离徙动问题的基础上,提出了一种无需逐点插值,只用二次 FFT和一次复乘操作的快速 RCMC技术,以替代 RD算法中常用的插值 RCMC处理步骤,所需计算量小于需要逐点进行的插值 RCMC,文中还推导了利用该技术能进行精确 RCMC的最大测绘带宽度指标,仿真和实测数据试验结果表明:该快速 RCMC技术具有运算量小、速度快和精度高的优点,非常适合于工程实施.

### 参考文献 (**References**)

[1] Curlander J C, McDonough R N. Synthetic aperture radar systems and signal processing[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1991

[2] Bamler R. A comparision of range-doppler and wavenumber domain SAR focusing algorithms[J]. IEEE Trans On GRS, 1992, 30(4): 706-713

[3] Raney R K, Runge H, Bamler R, et al. Precision SAR processing using chirp scaling[J]. IEEE Trans On GRS, 1994, 32(4): 786-799

[4] Madsen S N. The danish SAR system: design and initial test [J]. IEEE Trans On GRS, 1991, 29(3): 417-425

[5] 禹卫东. 合成孔径雷达信号处理研究[D]. 南京:南京航空航天大学电子工程系, 1997
Yu Weidong. Studies on synthetic aperture radar signal processing[D]. Nanjing: Department of Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1997 (in Chinese)

[6] Oppenheim A V, Schafer R W. Digital signal processing[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1975

[7] Carrara W G, Goodman R S, Majewski R M. Spotlight synthetic aperture radar: signal processing algorithms[M]. Norwood MA: Artech House, 1995

(责任编辑:娄 嘉)