

基于尺度变换原理的SAR波数域成像算法

韦 维 朱岱寅* 吴 迪

(南京航空航天大学电子信息工程学院雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室 南京 211106)

摘 要: 距离徙动算法(RMA)作为一种合成孔径雷达(SAR)频域成像算法,理论上能够达到最优性能。然而,该算法采用逐像素点卷积运算实现Stolt映射,其计算效率无法满足SAR大数据量处理需求。据此,该文提出基于尺度变换原理(PCS)的RMA成像算法。首先,将SAR回波数据沿距离向进行划分,利用子带参考距离处2阶距离方位耦合项与高阶项对子带信号进行补偿;然后,转化非线性Stolt映射为线性形式;最后,利用PCS原理实现Stolt插值,以实现高效率的数据重采样。所提PCS-RMA算法仅利用快速傅里叶变换和复矢量相乘操作即可实现改进型Stolt映射,兼具良好的聚焦性能与较高的计算效率。基于多组仿真数据与X波段1.2 GHz带宽的机载SAR实测数据处理结果,验证了所提算法的有效性,同时该算法可进一步应用于弹载/星载/无人机载SAR数据的快速成像处理。

关键词: 合成孔径雷达;改进型距离徙动算法;尺度变换原理;高分辨成像;子带划分

中图分类号: TN957.5

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2020)02-0354-09

DOI: [10.12000/JR19112](https://doi.org/10.12000/JR19112)

引用格式: 韦维,朱岱寅,吴迪. 基于尺度变换原理的SAR波数域成像算法[J]. 雷达学报, 2020, 9(2): 354–362. doi: 10.12000/JR19112.

Reference format: WEI Wei, ZHU Daiyin, and WU Di. Wavenumber domain algorithm based on the principle of chirp scaling for SAR imaging[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(2): 354–362. doi: 10.12000/JR19112.

Wavenumber Domain Algorithm Based on the Principle of Chirp Scaling for SAR Imaging

WEI Wei ZHU Daiyin* WU Di

(Key Laboratory of Radar Imaging and Microwave Photonics, Ministry of Education, College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: As a frequency-domain algorithm for Synthetic Aperture Radar (SAR) imaging, the Range Migration Algorithm (RMA) can theoretically achieve optimal performance. However, because its Stolt mapping is performed using pixel-by-pixel convolution, the computational efficiency of RMA is inadequate for massive SAR data processing requirements. In this paper, we propose a modified RMA based on the Principle of Chirp Scaling (PCS). First, SAR echo data is divided along the range direction, and the subswath signal is compensated by the second-order range-azimuth coupling term and high-order terms at the reference distance. Then, the nonlinear Stolt mapping is modified to become linear. Finally, Stolt interpolation is realized using PCS to efficiently resample the processed data. Demonstrating both well-focused performance and high computational efficiency, the proposed PCS-RMA employs only fast Fourier transforms and complex vector multiplication operations to achieve modified Stolt mapping. The processing results of several simulation data and X-band-measured airborne SAR data with a pulse bandwidth of 1.2 GHz verify the effectiveness of the proposed algorithm. The proposed algorithm can also be employed for the rapid processing of missile-borne, spaceborne, and drone-borne SAR data.

收稿日期: 2019-12-16; 改回日期: 2020-02-13; 网络出版: 2020-03-02

*通信作者: 朱岱寅 zhudy@nuaa.edu.cn

*Corresponding Author: ZHU Daiyin, zhudy@nuaa.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0502700), 国家自然科学基金(61671240), 航空科学基金(20182052013)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (2017YFB0502700), The National Natural Science Foundation of China (61671240), The Aeronautical Science Foundation of China (20182052013)

责任编辑: 林赞 Corresponding Editor: LIN Yun

Key words: Synthetic Aperture Radar(SAR); Modified Range Migration Algorithm(RMA); Principle of Chirp Scaling(PCS); High-resolution imaging; Subswath division

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)作为一种有源传感器,能够实现全天时、全天候的空对地超视距探测^[1]。高分辨成像处理是SAR观测系统的关键,并朝着极高分辨和宽测绘带的趋势发展,由此引起了回波数据量的显著增加。因此,快速成像处理对于SAR实用系统尤为重要。

近年来,为了满足快速响应与监测的需求,对实时SAR成像技术的研究成为热点^[2],提高算法计算效率是最为有效的方式。时域后向投影(Back Projection, BP)算法能够规避非理想航迹对成像质量的影响,然而时域算法面临大数据量处理时通常表现为低效率性,限制了其在实时成像系统中的应用^[3]。频域算法例如距离徙动算法(Range Migration Algorithm, RMA, 亦可称作Omega-K算法),线性调频变标算法(Chirp Scaling Algorithm, CSA)和极坐标格式算法(Polar Format Algorithm, PFA)等通常基于快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)进行成像处理,较高的效率易在工程应用中发挥作用。相较于CSA和PFA算法,RMA不存在CSA中对信号模型的近似^[4]与PFA中的平面波前假设。理论上,该算法能够实现近场成像,以及对大斜视角数据的超高分辨成像处理^[5,6],从而被广泛应用。文献^[7]对弹载SAR俯冲段斜距历程进行分析,改进了RMA中的参考函数相乘(Reference Function Multiply, RFM)步骤,完成了对大斜视数据的成像处理。文献^[8]扩展了RMA算法,对停走假设失效引起的相位误差进行补偿,使其适用于弯曲轨道下的星载SAR数据处理。尽管如此,RMA中Stolt插值计算效率较低的问题仍然存在,且对精度要求越高时所需卷积核越长,算法运算效率越低。一般地,可用于替代插值的方法包括尺度变换原理(Principle of Chirp Scaling, PCS)和Chirp Z变换(Chirp Z Transform, CZT)。文献^[9]依据PCS实现PFA距离向与方位向数据的重采样,完成对chirp和dechirp两种信号的聚焦。文献^[10]利用CZT替代PFA中的距离向插值,并且由于插值存在卷积核的截断,PCS和CZT相较于sinc插值更难以产生相位和幅度误差。此外,文献^[11]针对两步法中距离空变参考函数导致的方位向像素间隔不均匀问题,采用CZT实现了采样间隔的统一。就算法原理而言,PCS依靠线性调频信号特性实现插值与重采样,而CZT则基于频率取值范围和采样间隔

的调整^[12]。然而,CZT一般需补零操作,运算效率次优于PCS^[13],且对所有多普勒单元重采样时CZT一般为计算密集型算法^[14]。尽管如此,CZT和PCS两种变换仅能实现线性插值,而Stolt插值属于非线性映射,并不能直接嵌入至RMA算法进行重采样。

针对传统RMA算法中的Stolt映射难以满足高效成像处理的难题,本文提出一种基于PCS原理的改进型RMA算法。首先,进行多子带回波数据的划分,从而保证经RFM后的回波信号的残余2阶两维耦合及高阶耦合项相位被限制在较小范围内。然后,忽略残余2次距离压缩(Secondary Range Compression, SRC)及高阶耦合相位补偿,将非线性Stolt映射进行线性转换;最后,利用PCS原理实现线性Stolt插值,从而提高传统RMA算法处理速度。所提PCS-RMA算法能够在保证良好聚焦性能的前提下显著地提高运算效率。基于点目标仿真实验与X波段机载SAR实测数据成像处理结果验证了所提算法的有效性。

2 聚束SAR成像模型

本文假设雷达系统工作于聚束模式,如图1所示。载机沿y轴以速度 v_s 飞行,点目标P到雷达航迹的最短斜距为 R_0 。

依据SAR成像理论,经正交解调后点目标P的回波信号形式为

$$s(t_r, t_a) = C w_r \left(t_r - \frac{2R(t_a)}{c} \right) w_a(t_a - t_c) \cdot \exp \left(-j4\pi f_c \frac{R(t_a)}{c} \right) \cdot \exp \left[j\pi K_r \left(t_r - \frac{2R(t_a)}{c} \right)^2 \right] \quad (1)$$

其中, C 为常数, c 为光速, f_c 为载频, K_r 为距离向

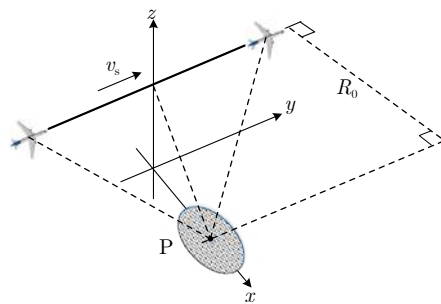


图1 聚束模式几何模型

Fig. 1 Geometric model of spotlight mode

调频率, t_c 为波束中心时刻, $R(t_a)$ 为 P 与雷达之间的瞬时斜距。 t_r 和 t_a 分别为快时间和慢时间。 w_r 和 w_a 分别为回波距离向和方位向的包络。 回波信号变换至波数域可获得

$$S(f_r, f_a) = C' W_r(f_r) W_a(f_a - f_{dc}) \cdot \exp\left(-j\pi \frac{f_r^2}{K_r}\right) \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi R_0}{c} \sqrt{(f_c + f_r)^2 - \frac{c^2 f_a^2}{4v_s^2}}\right] \quad (2)$$

其中, C' 为常数, f_{dc} 为多普勒中心频率, f_r 和 f_a 为距离向和方位向频率, W_r 和 W_a 分别为信号距离和方位频谱包络。

3 基于尺度变换原理的距离徙动算法

3.1 改进型Stolt映射误差分析

RMA算法包含两个关键步骤: RFM和Stolt插值。 首先对波数域信号做两维匹配滤波处理

$$S(f_r, f_a) = S(f_r, f_a) \cdot \exp\left(j\pi \frac{f_r^2}{K_r}\right) \cdot \exp\left[j \frac{4\pi R_{\text{ref}}}{c} \sqrt{(f_c + f_r)^2 - \frac{c^2 f_a^2}{4v_s^2}}\right] \quad (3)$$

其中, R_{ref} 为参考距离。 此时, 信号相位表示为

$$\exp\left[-j \frac{4\pi(R_0 - R_{\text{ref}})}{c} \sqrt{(f_c + f_r)^2 - \frac{c^2 f_a^2}{4v_s^2}}\right] \quad (4)$$

RFM完成了对参考距离处信号的完全聚焦, 为进一步实现非参考距离处的信号聚焦, 需对式(3)做Stolt插值处理, 原算法的Stolt映射为

$$\sqrt{(f_c + f_r)^2 - \frac{c^2 f_a^2}{4v_s^2}} = f_c + f_r' \quad (5)$$

Stolt映射采用逐脉冲形式将原始距离频率 f_r 非线性映射为新的距离频率 f_r' , 而PCS原理难以直接实现上述变换。 为此, 本文将式(4)展开为 f_r 的泰勒级数

$$\exp\left\{j \left(\phi_0 + \phi_1 f_r + \phi_2 f_r^2 + \sum_{m=3}^{+\infty} \phi_m f_r^m\right)\right\} \quad (6)$$

$$\text{其中, } \begin{cases} \phi_0 = -\frac{4\pi(R_0 - R_{\text{ref}})}{c} f_c D(f_a, v_s) \\ \phi_1 = -\frac{4\pi(R_0 - R_{\text{ref}})}{c} \frac{1}{D(f_a, v_s)} \\ \phi_2 = \frac{4\pi(R_0 - R_{\text{ref}})}{c} \frac{c^2 f_a^2}{8v_s^2 f_c^3 D^3(f_a, v_s)} \\ \phi_m = \frac{1}{m!} \frac{\partial^m \phi(f_r, f_a)}{\partial f_r^m} \end{cases},$$

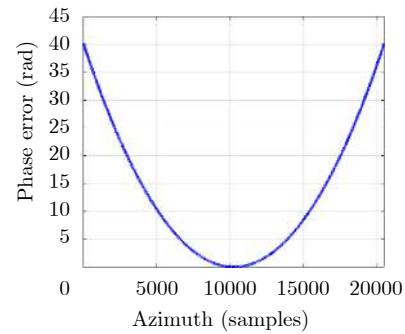
$D(f_a, v_s) = \sqrt{1 - \frac{c^2 f_a^2}{4v_s^2 f_c^2}}$, $\phi(f_r, f_a)$ 为式(4)中的相位, ϕ_0 为残余方位调制项, ϕ_1 为残余距离徙动项, ϕ_2 为SRC校正的距离方位耦合项, ϕ_m 为高阶项, 且该项极小可不予考虑。

上述泰勒展开式(6)在 $f_r = 0$ 附近有效, 且距离向幅宽越大时, 距离向边缘点与中心点之间的距离方位耦合相位偏差越明显。 为了解决该问题, 本文对回波数据进行距离向划分, 控制子带距离门数以有效缩小式(7)中的相位误差。 同时利用参考距离处的2阶及高阶距离方位耦合相位对整个子带距离向信号进行补偿, 并忽略式(7)的残余SRC及高阶耦合相位补偿, 从而实现Stolt映射的线性形式转换

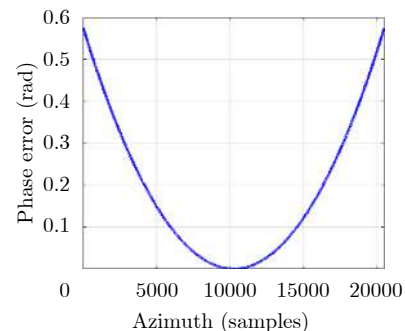
$$\exp\left\{j \left[\phi_2 f_r^2 + \sum_{m=3}^{+\infty} \phi_m f_r^m\right]\right\} \quad (7)$$

为了验证该假设的可行性, 本文对式(7)的相位误差进行了分析。 假设某一SAR系统工作于X波段, 其主要参数如表1所示。 图2(a)和图2(b)分别给出了距离向子带划分前后, 信号经RFM处理所获得的最大残余2阶及高阶耦合相位误差。

由图2可知, 经过子带划分的信号, 忽略的残



(a) 距离向划分前
(a) Before subswath division



(b) 距离向划分后
(b) After subswath division

图 2 残余相位误差

Fig. 2 Residual phase error

表 1 点目标仿真参数

Tab. 1 Point target simulation parameters

参数	数值
载频	9.65 GHz
信号带宽	1.5 GHz
脉冲重复频率	1500 Hz
载机速度	100 m/s
中心斜距	10 km
方位向分辨率	0.1 m

余相位误差能够被控制在较小的范围内, 并始终小于 $\pi/4$ 。由文献[15]可知, 当2阶相位误差 $\phi_2 f_r^2$ 小于 $\pi/4$ 时, 其引起的冲激响应宽度(Impulse Response Width, IRW)展宽, 峰值旁瓣比(Peak SideLobe Ratio, PSLR), 积分旁瓣比(Integrated SideLobe Ratio, ISLR)上升可忽略不计。式(7)中的相位误差与整体的系统参数相关, 应用时需根据每种情况进行具体分析。当子带划分后误差小于 $\pi/4$ 时, 能够利用PCS实现改进的Stolt插值, 从而实现SAR信号的快速处理。

3.2 利用尺度变换原理实现改进型Stolt插值

经上述操作, 已实现对Stolt映射的近似处理与线性化操作。所得信号可由PCS原理实现信号重采样, 并能够保证成像质量与计算效率。改进型Stolt映射中仅包含残余距离徙动校正(Range Cell Migration Correction, RCMC)和残余方位压缩, 可表示为

$$f_r = f_r' D(f_a, v_s) + f_c (D(f_a, v_s) - D^2(f_a, v_s)) \quad (8)$$

然后, 算法以图3所示流程实现基于PCS原理的改进型Stolt插值, 其中 D 为距离向的变标因子 $D(f_a, v_s)$, $\Delta f = f_c (D(f_a, v_s) - D^2(f_a, v_s))$, $\alpha = K_r \pi$ 。根据驻留相位定理关于求解线性调频信号近似频谱的应用条件, α 的选择仅需保证处理流程中的chirp信号的时间带宽积较大即可。此外, 为了避免处理过程中信号发生搬移, 限制信号频谱始终在与采样频率有关的范围内, 可以设定 $t_c' = \frac{2R_0}{c}$ 。

在a点, 利用FFT性质得到信号为

$$\begin{aligned} S_a(t_r, f_a) &= \int_{-\infty}^{\infty} S(u, f_a) \exp(j\alpha(t_r - u)^2) du \\ &= \exp(j\alpha t_r^2) \int_{-\infty}^{\infty} S(u, f_a) \exp(j\alpha u^2) \\ &\quad \cdot \exp(-j2\alpha t_r u) du \end{aligned} \quad (9)$$

同理, 在b点能够得到

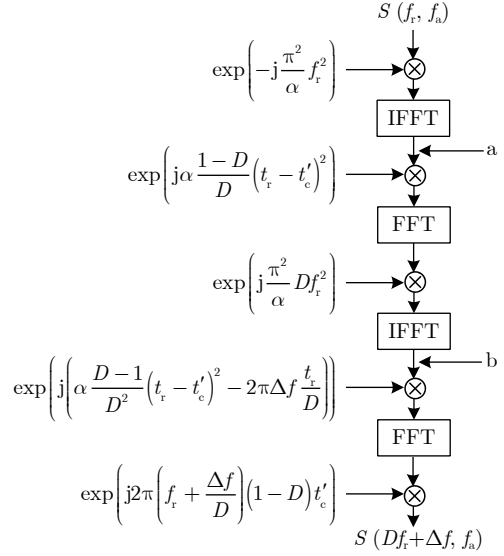


图 3 改进型Stolt插值处理流程

Fig. 3 Processing flow of modified Stolt interpolation

$$\begin{aligned} S_b(t_r, f_a) &= \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(j\alpha \frac{1-D}{D} (v - t_c')^2\right) \\ &\quad \cdot S_a(v, t_a) \exp\left(-j\frac{\alpha}{D} (v - t_r)^2\right) dv \\ &= \exp\left(j\alpha \frac{1-D}{D} t_c'^2\right) \exp\left(-j\frac{\alpha}{D} t_r^2\right) \\ &\quad \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-j2\alpha \frac{1-D}{D} vt_c'\right) \exp\left(j2\frac{\alpha}{D} vt_r\right) \\ &\quad \cdot \int_{-\infty}^{\infty} S(u, f_a) \exp(j\alpha u^2) \exp(-j2\alpha vu) dudv \end{aligned} \quad (10)$$

接下来, 将式(10)乘以

$$\begin{aligned} &\exp\left\{j\left[\alpha \frac{D-1}{D^2} (t_r - t_c')^2 - 2\pi\Delta f \frac{t_r}{D}\right]\right\} \text{后得到} \\ &\exp\left(-j2\pi\Delta f \frac{t_r}{D}\right) S\left(\frac{t_r + (1-D)t_c'}{D}, f_a\right) \end{aligned} \quad (11)$$

并对式(11)做FFT后得到

$$\begin{aligned} &\mathcal{F}\left[\exp\left(-j2\pi\Delta f \frac{t_r}{D}\right) S\left(\frac{t_r + (1-D)t_c'}{D}, f_a\right)\right] \\ &= S(Df_r + \Delta f, f_a) \exp\left[-j2\pi(1-D)t_c' \left(f_r + \frac{\Delta f}{D}\right)\right] \end{aligned} \quad (12)$$

最后, 将式(12)乘以 $\exp\left[j2\pi \left(f_r + \frac{\Delta f}{D}\right) (1-D)t_c'\right]$ 即可获得 $S(Df_r + \Delta f, f_a)$ 。

综上所述, 本文所提PCS-RMA算法可归结为一幅流程图如图4所示。其中子带划分的步骤如下:

(1) 根据雷达系统的速度 v_s , 最短斜距 R_0 等参数, 计算式(7)所示残余相位误差;

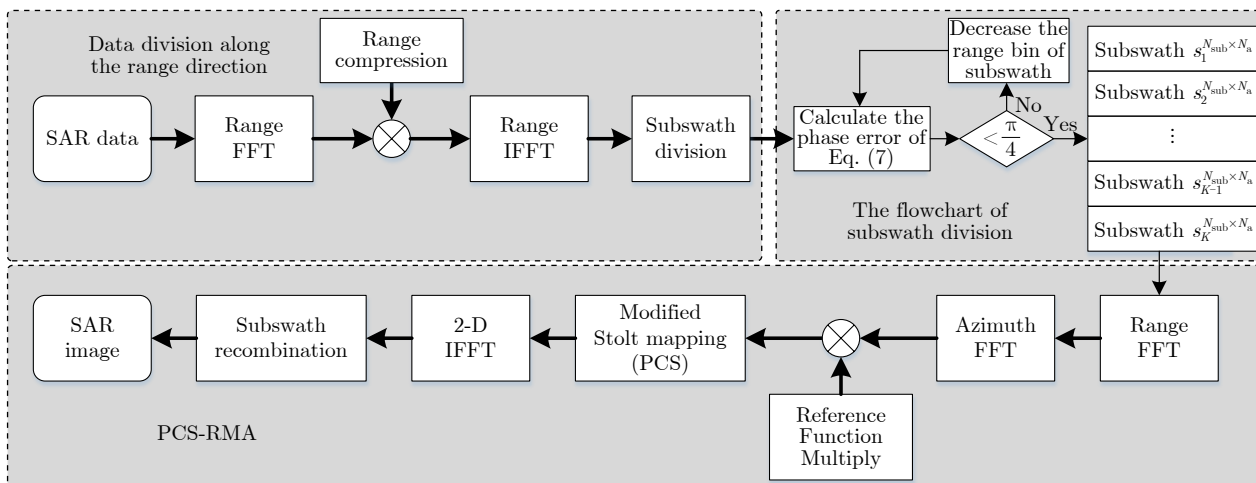


图4 PCS-RMA算法处理流程

Fig. 4 Processing flow of PCS-RMA

(2) 式(7)中最大残余相位误差与信号距离向幅宽有关, 缩小子带距离门数以使其小于 $\pi/4$;

(3) 基于上述计算出的子带距离门数对脉冲压缩处理后的时域回波信号进行划分。完整回波被划分为 K 个子带信号, 可记为 $[s_1^{N_{\text{sub}} \times N_a}, s_2^{N_{\text{sub}} \times N_a}, \dots, s_{K-1}^{N_{\text{sub}} \times N_a}, s_K^{N_{\text{sub}} \times N_a}]^T = s^{N_r \times N_a}$, 其中 $s^{N_r \times N_a}$ 为距离向和方位向长度分别为 N_r, N_a 的完整回波信号, $s_K^{N_{\text{sub}} \times N_a}$ 为距离门数为 N_{sub} 的子带信号, T表示转置。

3.3 计算复杂度分析

SAR成像算法的计算复杂度通常基于浮点运算(实数相加或相乘)的重复执行次数。PCS-RMA算法仅包含FFT、逆FFT和复数相乘运算, 而传统RMA算法则还需要插值运算。对于 $N \times N$ 大小的数据, 其算法复杂度均为 $O(N^2 \log_2 N)$ 。然而, 具体实现插值时, 还需要查找新采样点在原采样点中的位置。二分查找法是时间复杂度最低的算法(哈希表法需建立哈希表, 难以适用), 则 N^2 次查找的时间复杂度为 $O(N^2 \log_2 N)$ 。查找步骤的时间复杂度考虑的是两实数相比的次数, 相较于实数相比, 数字信号处理器更擅长进行浮点运算, 则查找步骤将会耗费较多时间。因此, PCS-RMA算法的计算效率相对于传统RMA算法更高。

另一方面, PCS与CZT均是利用FFT和复数相乘替代插值。然而CZT利用圆周卷积快速实现线性卷积时, 需对信号进行补零。对于 $N \times N$ 大小的数据, 其计算复杂度最低为 $O(N^2 \log_2(2N-1))$, 从而效率低于PCS算法^[16]。

4 仿真与实测数据处理

4.1 点目标仿真实验

为了验证所提基于PCS原理的RMA算法的有

效性, 本文进行聚束SAR的仿真实验, 场景大小为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 。按照如图5设置3个点目标并均匀分布于成像区域内。为了验证超高分辨率成像情况下算法的适用性, 两维分辨率理论值均设置为 0.1 m 。

图6—图8所示为3种反映算法聚焦性能的点目标成像结果剖面。同时, 进一步量化分析了本文所提算法的性能。表2给出了经计算得到的点目标脉冲响应函数(Impulse Response Function, IRF)的PSLR, ISLR和IRW^[17]。图7和图8对比了经RMA和PCS-RMA算法处理后的IRF两维剖面, 结果表明PCS-RMA算法的聚焦性能与RMA极为接近。以边缘点目标A为例进行分析, 其二维PSLR可达到理论值 -13 dB , 且ISLR可达到 -10 dB , 在该条件下, 强目标及散射区不会掩盖和污染弱目标与暗回波区。此外, 点目标A的距离向和方位向IRW也与设定的分辨率相符。结合3个点目标的IRF等高线及其距离向和方位向剖面可以看出, 回波信号最终被处理成理想的两维sinc函数。综合上述分析可得, 改进型快速距离徙动算法虽然忽略了残余SRC及高阶耦合相位补偿, 但经过子带分割处理, RMA良好的聚焦性能能够得以保留。

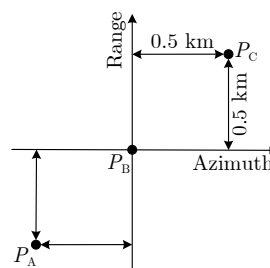


图5 点目标分布几何关系

Fig. 5 Geometric relationship of point target distribution

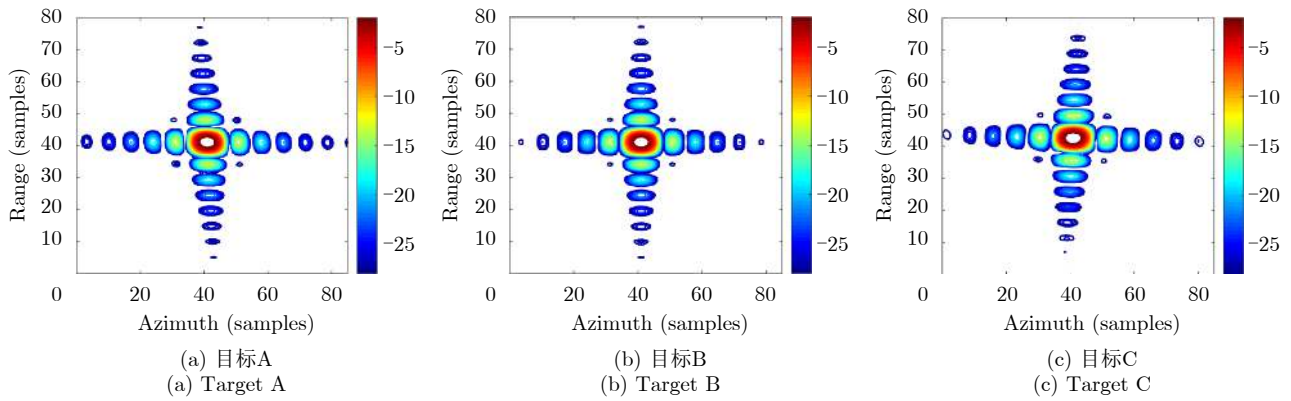


图 6 点目标IRF等高线

Fig. 6 Contours of point target IRF

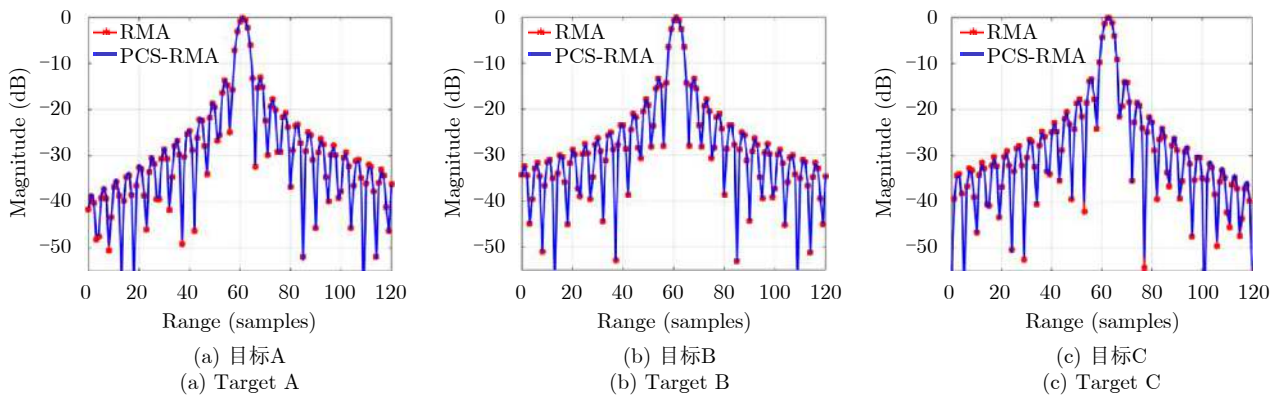


图 7 点目标IRF距离向剖面

Fig. 7 Range profiles of point target IRF

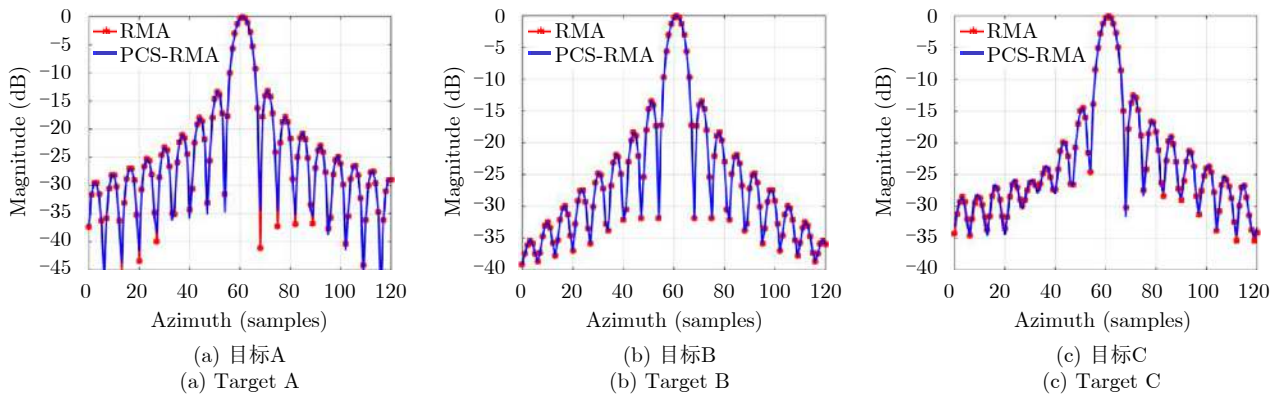


图 8 点目标IRF方位向剖面

Fig. 8 Azimuth profiles of point target IRF

表 2 点目标IRF聚焦性能参数

Tab. 2 Focusing performance parameters of point target IRF

点目标	距离向			方位向		
	PSLR(dB)	ISLR(dB)	IRW(m)	PSLR(dB)	ISLR(dB)	IRW(m)
A	-13.3728	-11.5636	0.0990	-13.2710	-11.1409	0.1017
B	-13.4564	-11.5881	0.1001	-13.3030	-11.2275	0.1000
C	-13.5875	-9.8772	0.1001	-13.5265	-10.7503	0.1033

为了进一步验证PCS-RMA算法的高效性,本节分别对比了距离向和方位向数据长度同时变化及其单一变化时,CSA, PFA, PCS-PFA、传统RMA与PCS-RMA算法的处理时间。在同等实验条件下,图9给出了相应的仿真回波处理时间对比结果。

对于这5种算法,PCS-RMA与基于二维sinc插值的PFA分别为运算效率最高与最低算法。此外,结合PCS的PFA算法同样极大地提升了算法的处理速度。由图9(a)可知,随着SAR数据量的增大,PCS-RMA算法的处理速度优势越发明显。以数据量大小达到 32×16 K为例,PCS-RMA算法相较于传统RMA算法,处理时间可节省620 s,处理速度可提升39%。随着数据进一步增加到 32×32 K时,其处理时间能够减少1338 s,处理速度提升了43%。可见数据量越大,所提算法计算效率提升幅度越大。

除此之外,相较于CSA, PCS-RMA算法能够处理脉冲压缩处理后的数据,并且对于感兴趣区域能够截取部分数据进行针对性的处理,实现快速响

应与监测。与此同时,PCS-RMA能够灵活地与“一步运动补偿法”相结合,提高机载SAR成像质量。

由图9(b)和图9(c)可知,距离向和方位向数据长度单一变化时,其处理时间变化趋势相似,说明PCS替代插值在计算速度的提升方面对于任意维数据长度变化时均具备有效性。因此,本文所提算法能够极大地缩减大数据的处理时间,满足实时SAR系统对于数据处理速度的需求。

4.2 实测数据处理实验

为了进一步验证所提算法的有效性,对机载聚束SAR实测数据进行了处理。对于机载SAR高分辨率成像,运动补偿是必要的。本文利用文献[18]中的一步运动补偿法对数据进行预处理,距离空变与空不变误差均在RCMC之前补偿,使得距离误差对RCMC的影响最小,从而实现高精度的运动补偿。图10和图11分别为RMA和PCS-RMA算法的处理结果,图10(b)和图11(b)分别为局部场景S1的放大结果。对于 32×16 K大小的机载实测数据,两种算法的处理时间分别为1598.3 s和978.767 s。从成像处

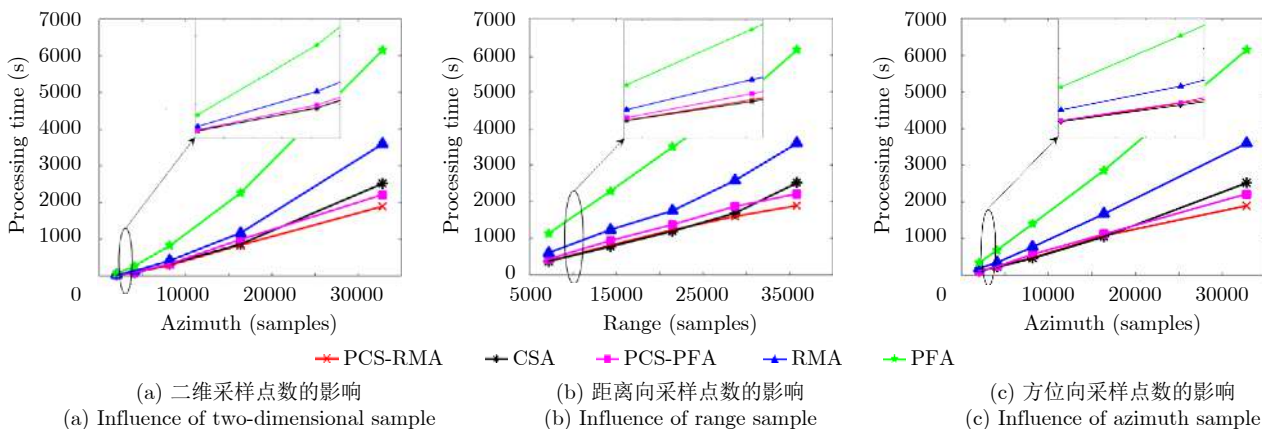
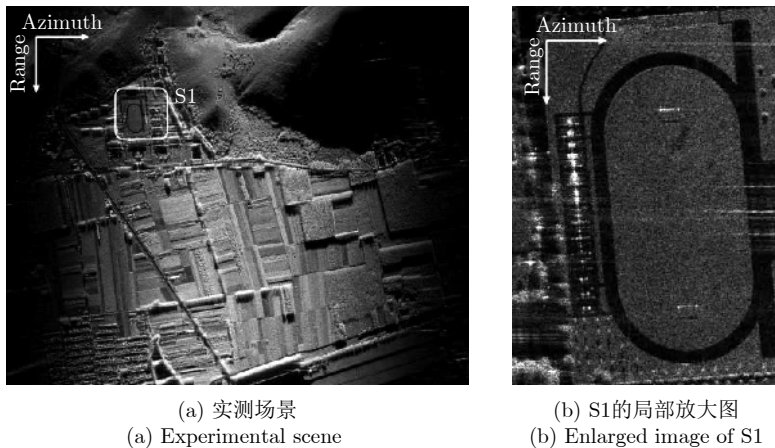


图 9 数据处理时间对比

Fig. 9 Comparisons of data processing time



(a) Experimental scene (a) 实测场景
(b) Enlarged image of S1 (b) S1的局部放大图

图 10 RMA处理结果

Fig. 10 Processing results of the traditional RMA

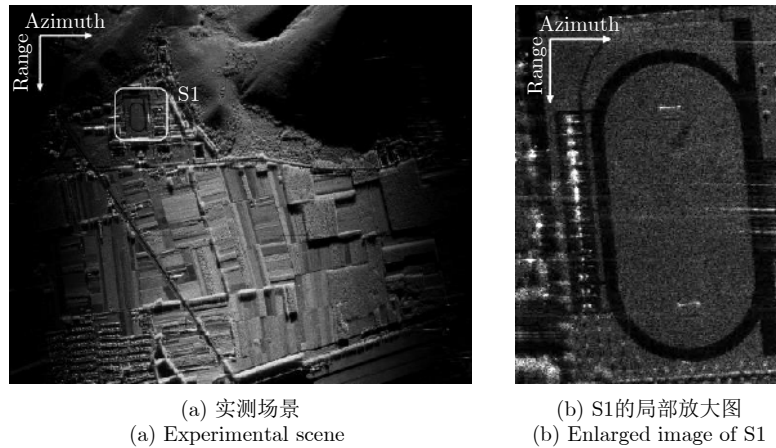


图 11 PCS-RMA处理结果

Fig. 11 Processing results of the proposed PCS-RMA

理的视觉效果可知，PCS-RMA与传统RMA算法的聚焦性能相近无几。综上所述，PCS-RMA能够在保证聚焦质量的前提下提升算法的处理效率。

5 结束语

为了显著提高RMA计算效率，并保证算法聚焦性能，本文提出了一种结合PCS原理的改进型RMA成像算法。

(1) 子带划分能够控制非参考距离处的残余距离方位耦合及高阶耦合相位在较小范围内，从而实现了非线性Stolt映射的线性转换。

(2) 利用尺度变换原理实现改进的Stolt插值，显著提高了原算法的计算效率。

(3) 基于点目标仿真与机载SAR实测数据处理结果验证了本文算法的有效性。

(4) 本文算法可进一步适用于高效的弹载、星载、无人机载SAR成像处理系统。

(5) 针对斜视信号处理，本文PCS-RMA算法可进一步与相关算法相结合，例如线性距离走动校正技术^[19]。

参考文献

- [1] MOREIRA A, PRATS-IRAOLA P, YOUNIS M, *et al.* A tutorial on synthetic aperture radar[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2013, 1(1): 6–43. doi: [10.1109/MGRS.2013.2248301](https://doi.org/10.1109/MGRS.2013.2248301).
- [2] 詹学丽, 王岩飞, 王超, 等. 一种基于脉冲压缩的机载条带SAR重叠子孔径实时成像算法[J]. *雷达学报*, 2015, 4(2): 199–208. doi: [10.12000/JR14126](https://doi.org/10.12000/JR14126).
ZHAN Xueli, WANG Yanfei, WANG Chao, *et al.* Research on overlapped subaperture real-time imaging algorithm for pulse compression airborne strip SAR system[J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(2): 199–208. doi: [10.12000/JR14126](https://doi.org/10.12000/JR14126).
- [3] 唐江文, 邓云凯, 王宇, 等. 高分辨率滑动聚束SAR BP成像及其异构并行实现[J]. *雷达学报*, 2017, 6(4): 368–375. doi: [10.12000/JR16053](https://doi.org/10.12000/JR16053).
TANG Jiangwen, DENG Yunkai, WANG Yu, *et al.* High-resolution slide spotlight SAR imaging by BP algorithm and heterogeneous parallel implementation[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(4): 368–375. doi: [10.12000/JR16053](https://doi.org/10.12000/JR16053).
- [4] 胡静秋, 刘发林, 周崇彬, 等. 一种新的基于omega-K算法的稀疏场景压缩感知SAR成像方法[J]. *雷达学报*, 2017, 6(1): 25–33. doi: [10.12000/JR16027](https://doi.org/10.12000/JR16027).
HU Jingqiu, LIU Falin, ZHOU Chongbin, *et al.* CS-SAR imaging method based on inverse omega-K algorithm[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(1): 25–33. doi: [10.12000/JR16027](https://doi.org/10.12000/JR16027).
- [5] 王金波, 唐劲松, 张森, 等. 一种宽带大斜视STOLT插值及距离变标补偿方法[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(7): 1575–1582. doi: [10.11999/JEIT171068](https://doi.org/10.11999/JEIT171068).
WANG Jinbo, TANG Jinsong, ZHANG Sen, *et al.* Range scaling compensation method based on STOLT interpolation in broadband squint SAS imaging[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(7): 1575–1582. doi: [10.11999/JEIT171068](https://doi.org/10.11999/JEIT171068).
- [6] LIN Yun, HONG Wen, TAN Weixian, *et al.* Extension of range migration algorithm to squint circular SAR imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(4): 651–655. doi: [10.1109/LGRS.2010.2098843](https://doi.org/10.1109/LGRS.2010.2098843).
- [7] TANG Shiyang, ZHANG Linrang, GUO Ping, *et al.* An omega-K algorithm for highly squinted missile-borne SAR with constant acceleration[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(9): 1569–1573. doi: [10.1109/LGRS.2014.2301718](https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2301718).
- [8] SHIN H S and LIM J T. Omega-K algorithm for spaceborne spotlight SAR imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(3): 343–347. doi: [10.1109/LGRS.2011.2168380](https://doi.org/10.1109/LGRS.2011.2168380).
- [9] ZHU Daiyin, YE Shaohua, and ZHU Zhaoda. Polar format

- algorithm using chirp scaling for spotlight SAR image formation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2008, 44(4): 1433–1448. doi: [10.1109/TAES.2008.4667720](https://doi.org/10.1109/TAES.2008.4667720).
- [10] FAN Bo, QIN Yuliang, YOU Peng, *et al.* An improved PFA with aperture accommodation for widefield spotlight SAR imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(1): 3–7. doi: [10.1109/LGRS.2014.2322858](https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2322858).
- [11] LUO Xiulian, DENG Yunkai, WANG R, *et al.* Image formation processing for sliding spotlight SAR with stepped frequency chirps[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(10): 1692–1696. doi: [10.1109/LGRS.2014.2306206](https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2306206).
- [12] LIU Yongcai, WANG Wei, PAN Xiaoyi, *et al.* Inverse omega-K algorithm for the electromagnetic deception of synthetic aperture radar[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(7): 3037–3049. doi: [10.1109/JSTARS.2016.2543961](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2543961).
- [13] NIE Xin, ZHU Daiyin, MAO Xinhua, *et al.* The application of the principle of chirp scaling in processing stepped chirps in spotlight SAR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(4): 860–864. doi: [10.1109/LGRS.2009.2027212](https://doi.org/10.1109/LGRS.2009.2027212).
- [14] PIGNOL F, COLONE F, and MARTELLI T. Lagrange-polynomial-interpolation-based keystone transform for a passive radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(3): 1151–1167. doi: [10.1109/TAES.2017.2775924](https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2775924).
- [15] CUMMING I G and WONG F H. *Digital Signal Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*[M]. Boston, MA, USA: Artech House, 2005: 225–362.
- [16] LANARI R and FORNARO G. A short discussion on the exact compensation of the SAR range-dependent range cell migration effect[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(6): 1446–1452. doi: [10.1109/36.649799](https://doi.org/10.1109/36.649799).
- [17] 吴玉峰, 叶少华, 冯大政. 基于方位相位编码的脉内聚束SAR成像方法[J]. *雷达学报*, 2018, 7(4): 437–445. doi: [10.12000/JR17114](https://doi.org/10.12000/JR17114).
WU Yufeng, YE Shaohua, and FENG Dazheng. Intra-pulse spotlight SAR imaging method based on azimuth phase coding[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(4): 437–445. doi: [10.12000/JR17114](https://doi.org/10.12000/JR17114).
- [18] YANG Mingdong, ZHU Daiyin, and SONG Wei. Comparison of two-step and one-step motion compensation algorithms for airborne synthetic aperture radar[J]. *Electronics Letters*, 2015, 51(14): 1108–1110. doi: [10.1049/el.2015.1350](https://doi.org/10.1049/el.2015.1350).
- [19] XING Mengdao, WU Yufeng, ZHANG Y D, *et al.* Azimuth resampling processing for highly squinted synthetic aperture radar imaging with several modes[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(7): 4339–4352. doi: [10.1109/TGRS.2013.2281454](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2281454).

作者简介



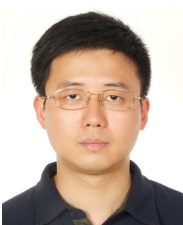
韦 维(1996–), 男, 江苏人, 硕士生。研究方向为超高分辨率合成孔径雷达成像技术。

E-mail: weiw@nuaa.edu.cn



吴 迪(1982–), 男, 河南人, 副教授, 硕士生导师。研究方向为雷达信号处理、地面动目标指示技术。

E-mail: wudi82@nuaa.edu.cn



朱岱寅(1974–), 男, 江苏人, 教授, 博士生导师。研究方向为合成孔径雷达/逆合成孔径雷达(SAR/ISAR)成像以及自聚焦算法, 干涉SAR成像, SAR地面动目标指示, 以及机载雷达动目标指示技术。自2018年开始担任《雷达学报》编委。

E-mail: zhudy@nuaa.edu.cn