

doi:10.3969/j.issn.1001-2400.2017.01.001

一种加速时域成像算法及其自聚焦方法

曾乐天, 梁毅, 李震宇, 怀园园, 邢孟道
(西安电子科技大学 雷达信号处理国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要: 针对机载合成孔径雷达的导航系统精度不足这一问题,提出了一种与自聚焦方法相结合的加速时域成像算法.通过引入全局虚拟极坐标系,构建出聚焦域和相位历程域之间的傅里叶变换对关系,并采用基于加权最小均方相位梯度自聚焦方法实现运动误差高精度补偿.该方法采用快速傅里叶变换实现子图像的融合过程,避免了耗时的二维插值操作,且易与高精度自聚焦算法相结合,提取信号中的残余运动误差并补偿,提高成像质量.

关键词: 合成孔径雷达;加速时域成像算法;傅里叶变换对;加权最小均方相位梯度自聚焦

中图分类号: TN857.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2017)01-0001-05

Accelerated time domain imaging algorithm and its autofocus approach

ZENG Letian, LIANG Yi, LI Zhenyu, HUAI Yuanyuan, XING Mengdao
(National Key Lab. of Radar Signal Processing, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: The measurement accuracy of a navigation system is inadequate for airborne synthetic aperture radar (SAR). This may seriously degrade the image quality. In this paper, we propose an accelerated time domain (ATD) imaging algorithm combined with the autofocus method. By introducing the global pseudo polar coordinate (GPPC), we construct the Fourier transform pair (FTP) relationship. Then, the weighted least square phase gradient autofocus (WLS-PGA) algorithm is adopted to implement accurate phase error compensation. This method uses fast Fourier transform to implement sub-image fusions instead of time-consuming two-dimensional interpolation. Also, it has good compatibility with the high-accuracy autofocus algorithm to estimate the residual motion errors within the radar echoes and to obtain a well-focused image.

Key Words: synthetic aperture radar (SAR); accelerated time domain (ATD) imaging algorithm; Fourier transform pair (FTP); weighted least square phase gradient autofocus (WLS-PGA)

由于受到大气湍流等因素的影响,合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)^[1]平台不可能始终做匀速直线运动,运动误差^[2-4]会导致 SAR 图像的散焦和几何失真.基于惯导的运动补偿,其精度往往达不到 SAR 图像聚焦所需的精度要求,这时,能够提取数据中的残余误差的自聚焦算法^[4-6]可极大地提高 SAR 图像的聚焦质量.但是自聚焦算法有两个限制条件^[4]: ①由残余运动误差引起的图像散焦在距离脉冲压缩相位历程域(Range-Compressed Phase History, RCPH)中仅沿方位向分布; ②聚焦域和相应的 RCPH 域之间存在傅里叶变换对(Fourier Transform Pair, FTP)关系.时域成像算法^[7-9]依靠方位时域的后向投影(Back Projection, BP)积分重建方位维图像,致使聚焦域与 RCPH 域之间的 FTP 关系复杂且难以获取^[10],因此,针对时域成像算法与自聚焦技术相结合以提取信号中运动误差、实现 SAR 图像的精聚焦具有重要意义.

收稿日期: 2016-01-19 **网络出版时间:** 2016-05-23

基金项目: 海洋公益性行业科研专项经费资助项目(201405001);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(K5051302046);航空科学基金与航空电子系统射频综合仿真航空科技重点实验室联合资助项目(20132081011)

作者简介: 曾乐天(1988—),男,西安电子科技大学博士研究生, E-mail: zengletian@stu.xidian.edu.cn.

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1076.TN.20160523.1727.002.html>

近年来,时域成像算法与自聚焦方法相结合的技术尚在初步的研究中,其中文献[11]以图像锐化度为目标函数,采用参数优化搜索的方法求解运动误差,使得图像锐化度达到最大,但该方法计算量太大,在实际中并不实用.文献[12]将多孔径图像偏移自聚焦算法和改进的快速分解后向投影(Fast Factorized Back Projection, FFBP)算法中的孔径递归融合结合起来,逐级估计相位误差并进行补偿,但该方法在处理复杂形式相位误差时,性能会下降.为了实现 SAR 图像的快速重建和高精度自聚焦处理,笔者提出了一种结合加权最小均方的相位梯度自聚焦(Weighted Least Square Phase Gradient Autofocus, WLS-PGA)的加速时域(Accelerated Time Domain, ATD)成像算法^[13].该方法采用快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)操作,避免了 FFBP 算法中的二维插值操作,大大提高了算法的处理精度和运算效率,且易与运动补偿方法相结合.仿真实验和实测数据验证了所提方法的有效性和实用性.

1 ATD 成像算法

如图 1 所示,雷达工作在聚束模式下,其波束始终指向场景中心点 O ,平台 A 以速度 v 沿 X 轴正方向做匀速直线运动,形成长度为 L 的合成孔径.定义平台位于合成孔径中心 C 的时刻为方位慢时间 t_m 的零时刻, O 点到 C 点距离为 R_s , O 点相对于 C 的斜视角为 θ_s .以 C 为原点建立虚拟极坐标系 $R-\Omega$,其中 R 表示场景中某一点目标到 C 的斜距,且 $\Omega = \sin\theta$,则在 t_m 时刻,对于场景中任一点目标 $P(R_p, \Omega_p)$ 的瞬时斜距为

$$r(U; R_p, \Omega_p) = (R_p^2 + U^2 - 2R_p U \Omega_p)^{1/2}, \quad (1)$$

其中, $\Omega_p = \sin\theta_p$, U 表示平台的瞬时方位位置, $U = vt_m$.

假设雷达发射线性调频信号,则经过距离脉冲压缩后的回波信号为

$$s_{s_R C}(\tau, U) = S_a[\tau - \Delta\tau_p] g_L(U) \exp(-j2\pi f_c \Delta\tau_p), \quad (2)$$

其中, τ 为快时间, B 表示发射信号带宽, $\Delta\tau_p$ 表示雷达回波的双程时延, $\Delta\tau_p = 2r(U; R_p, \Omega_p)/c$, c 表示雷达回波的传播速度, $S_a(\tau) = \sin(\pi\tau)/(\pi\tau)$, $g_L(U)$ 为矩形窗函数, $g_L(U) = \begin{cases} 1, & |U/L| \leq 1/2 \\ 0, & |U/L| > 1/2 \end{cases}$, f_c 为载波中心频率.

ATD 成像算法将整个合成孔径分解为若干子孔径,将子孔径数据投影到以合成孔径中心为原点的极坐标系,即全局虚拟极坐标系(Global Pseudo-Polar Coordinate, GPPC).所谓 GPPC,是指以合成孔径中心为原点、在 R 和 Ω 维分别以 R_s 和 $\sin\theta_s$ 为中心均匀张开的 $R-\Omega$ 坐标网格,在子孔径成像过程中,将各个子孔径数据均后向投影到该坐标系.由于采用 GPPC,所有子图像的二维波数谱(Two-Dimension Wavenumber Spectrum, 2-D WS)均位于同一波数空间,通过各子图像 2-D WS 拼接便可得到全孔径 2-D WS.

1.1 子孔径处理

将全孔径平均分成 N 个子孔径,每个子孔径数据的长度 $l = n_a \Delta x / N$ (n_a 表示全孔径雷达回波的个数, Δx 表示方位向的采样间隔).假设第 n ($n=1, 2, \dots, N$) 个子孔径中心的位置为 x_n ,将第 n ($n=1, 2, \dots, N$) 个子孔径数据后向投影到 $R-\Omega$ GPPC,有

$$H_n(r, \Theta) = \int_{-l/2+x_n}^{l/2+x_n} \exp[-jk_r \Delta r(U; R, \Omega)] dU, \quad (3)$$

其中, k_r 表示距离向中心波数, $k_r = 4\pi/\lambda$, λ 表示载波波长, $\lambda = c/f_c$, $\Delta r(U; R, \Omega) = r(U; R_p, \Omega_p) - r(U; R, \Omega)$.

首先考虑方位向,令 $R \approx R_p$,则 $\Delta r(U; R, \Omega) = \Delta r(U; R_p, \Omega)$.当雷达工作在远场时, $U \ll R_p$,对 $\Delta r(U; R_p, \Omega)$ 在 $U=0$ 处进行 Taylor 级数展开,有

$$\Delta r(U; R_p, \Omega) = (\Omega - \Omega_p)U + ((\Omega^2 - \Omega_p^2)/(2R_p))U^2 + o(U^3), \quad (4)$$

忽略 U 的二次项以及二次以上的高次项,式(3)变为

$$H_n(\Omega) \approx \int_{-l/2+x_n}^{l/2+x_n} \exp[-jk_r (\Omega - \Omega_p)U] dU. \quad (5)$$

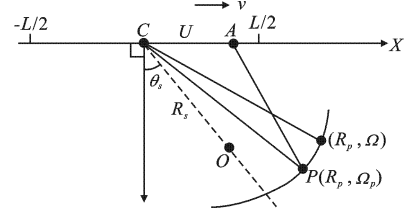


图 1 投影几何关系

从式(5)可以看出, U 和 $k_{\kappa}(\Omega - \Omega_p)$ 之间存在 FTP 的关系. 欲使该 FTP 关系成立, 必须满足 $|(\Omega - \Omega_p)U| < \rho_r/2$, 且当斜距近似引起的二次相位误差 (Quadratic Phase Error, QPE) 不超过 $\pi/8$ 时, QPE 对图像质量的影响可以忽略^[12]. 假设 Ω 位于 Ω_p 的 $\Delta\Omega$ 邻域内, 即 $\Omega = \Omega_p + \Delta\Omega$, 有 $\Delta\Omega < \rho_r/L$. 根据式(3)和式(4), 有 $|(4\pi/\lambda)((\Omega^2 - \Omega_p^2)/(2R_p))U^2| \leq \pi/8$, 则在孔径两端处, QPE 取最大值, 有

$$\frac{4\pi\Omega_p L \rho_r}{\lambda R_p} U^2 < \frac{\pi\Omega_p L \rho_r}{\lambda R_p} \leq \frac{\pi}{8}, \quad (6)$$

即 $\Omega_p L \leq \lambda R_p / (8\rho_r)$. 在式(5)中, 令 $k_{\Omega} = k_{\kappa} U$, 有

$$H_n(\Omega) \approx \int_{-\Delta k_{\Omega_u}/2 + k_{\Omega_u}}^{\Delta k_{\Omega_u}/2 + k_{\Omega_u}} \exp[-j(\Omega - \Omega_p)k_{\Omega}] dk_{\Omega}, \quad (7)$$

其中, $k_{\Omega_u} = k_{\kappa} x_u$, $\Delta k_{\Omega_u} = k_{\kappa} l$. 对式(7)进行方位逆傅里叶变换 (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT), 可得

$$H_n(k_{\Omega}) \approx \int_{-\Delta A/2 + A_{cu}}^{\Delta A/2 + A_{cu}} H_n(\Omega) \exp[jk_{\Omega}\Omega] d\Omega = g_{\Delta k_{\Omega_u}}(k_{\Omega} - k_{\Omega_u}) \exp[jk_{\Omega}\Omega_p], \quad (8)$$

其中, A_{cu} 表示在 GPPC 下第 n ($n=1, 2, \dots, N$) 个子孔径图像网格斜视角的正弦值, ΔA 表示在 GPPC 下第 n ($n=1, 2, \dots, N$) 个子孔径图像网格斜视角正弦值的变化范围.

然后考虑距离向, 令 $\Omega \approx \Omega_p$, 则 $\Delta r(U; R, \Omega) = \Delta r(U; R, \Omega_p)$, 对 $\Delta r(U; R, \Omega_p)$ 在 $U=0$ 处进行 Taylor 级数展开, 并忽略 U 的二次项以及二次以上的高次项, 式(3)变为

$$H_n(R) \approx \int_{-l/2 + x_u}^{l/2 + x_u} \exp[-jk_{\kappa}(R_p - R)] dU \approx l \exp[jk_{\kappa}(R - R_p)]. \quad (9)$$

对式(9)进行距离 FFT, 可得距离频域信号 $H_n(k_r)$. 因此, 第 n ($n=1, 2, \dots, N$) 个子孔径数据的 2-D WS 可以表示为

$$H_n(k_r, k_{\Omega}) = H_n(k_r) H_n(k_{\Omega}). \quad (10)$$

1.2 子图像 2-D WS 融合

由于 GPPC 是一个固定的成像网格, 所有子图像 2-D WS 均位于该波数空间, 但是, 不同子孔径相对于 GPPC 所形成的观测角不同, 不同子图像 2-D WS 的水平偏移量也不同, 很可能会引起子图像 2-D WS 的混叠. 通过对各子图像 2-D WS 进行循环移位操作^[13], 可得到无混叠的子图像 2-D WS. 然后, 开辟全孔径数据矩阵, 进行各子图像 2-D WS 的无缝拼接, 得到全孔径无混叠 2-D WS. 整个过程采用 FFT 实现, 避免了二维插值, 在具有高精度的同时又兼顾高效率. 最后, 经过距离 IFFT, 得到全孔径 RCPH 域数据, 经方位 FFT, 得到全分辨率图像, 有

$$H'(R, \Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} H'_n(k_{\Omega}) \exp[-jk_{\Omega}\Omega] dk_{\Omega} = \int_{-\Delta k_{\Omega_c}/2 + k_{\Omega_c}}^{\Delta k_{\Omega_c}/2 + k_{\Omega_c}} \exp[-jk_{\Omega}(\Omega - \Omega_p)] dk_{\Omega}, \quad (11)$$

其中, $H'_n(k_{\Omega})$ 为全分辨率图像的方位维信号, k_{Ω_c} 和 Δk_{Ω_c} 分别对应全分辨率数据积分区间的中点位置和长度. 通过采用 GPPC, 在某一距离处, 聚焦域和 RCPH 域之间的 FTP 关系成立, 可通过傅里叶变换实现信号的方位向聚焦. 对于所含相位误差 $\varphi(k_{\Omega})$ 仅沿方位向分布的 RCPH 数据, 经方位 FFT, 有

$$H'(R, \Omega) = \int_{-\Delta k_{\Omega_c}/2 + k_{\Omega_c}}^{\Delta k_{\Omega_c}/2 + k_{\Omega_c}} \exp[-jk_{\Omega}(\Omega - \Omega_p)] \exp[j\varphi(k_{\Omega})] dk_{\Omega}, \quad (12)$$

即聚焦域与相应的 RCPH 域之间存在 FTP 关系, 因此, 自聚焦算法可以直接应用于 RCPH 数据, 以提取信号中的相位误差.

2 结合 ATD 成像算法的自聚焦处理流程

由于 GPPC 下的全孔径信号与 RCPH 域的信号之间存在 FTP 关系, 可以利用自聚焦算法提取信号中的相位误差. 在文中, 采用 WLS-PGA 算法估计 GPPC 下的全孔径信号的相位误差.

PGA^[15] 根据场景中强点目标的聚焦性能, 提取相应的相位误差信息. 信号的信杂比越高, 相位误差的估计性能越好. WLS-PGA 通过选取信杂比高的距离单元数据, 并采用不同的权系数对它们进行加权, 增加高

信杂比数据在相位误差估计中的权值,以提升相位误差的估计性能.同时,它不要求各个距离单元内杂波具有相同的分布特性,是一种非参数自聚焦算法,可以估计复杂形式的相位误差.

在 SAR 实测数据中,笔者结合惯导粗补偿并嵌套 WLS-PGA 精补偿,整个处理流程如图 2 所示.首先,利用惯导信息,解算平台的斜距误差,并对距离脉冲压缩后的回波数据进行包络误差和相位误差的粗略补偿,使得包络误差不超过 1/4 个距离分辨单元.然后,进行孔径分解,分别将各个子孔径数据后向投影到 GPPC 下;经距离 FFT、方位 IFFT,并进行循环移位操作,得到无混叠的各子图像的 2-D WS;开辟全孔径数据矩阵,进行各子图像 2-D WS 的无缝拼接,通过距离 IFFT,将全孔径数据变换到 RCPH 域,采用 WLS-PGA 算法对其进行相位误差估计和校正,经方位 FFT 将数据聚焦到 GPPC 下.最后,通过坐标系转换得到直角坐标系下的图像.

3 仿真实验及实测数据验证

为了验证所提方法的有效性,采用 X 波段雷达参数进行 SAR 成像仿真,仿真参数如表 1 所示.在成像场景中布置 11 个点目标,它们位于同一直线上且距离向和方位向的范围均为 -90 m 到 90 m.在雷达回波生成过程中,加上如图 3(a)所示的相位误差.

表 1 仿真参数

参数	脉宽/ μs	采样率/MHz	斜视角/ $^{\circ}$	速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	中心斜距/km	脉冲重复频率/Hz
数值	1	300	6	100	6	1 000

使用 ATD 成像算法进行图像重建,不进行自聚焦处理,所得成像结果如图 3(b)所示.经计算,文中参数满足 FTP 关系成立的条件.使用文中方法进行处理,所得结果如图 3(c)所示.可见,图 3(b)中点目标出现明显的方位向散焦,图 3(c)中点目标的聚焦情况得到明显改善.对于图 3(b)和图 3(c)中方框内点目标,其等高线图分别位于其右上角.为定量说明文中方法的有效性,对其方位向 IRF 进行分析,分别如图 4(b)和图 4(c)所示.无误差时,该点目标的方位向 IRF 如图 4(a)所示,其峰值旁瓣比(Peak Side-Lobe Ratio, PSLR)和积分旁瓣比(Integration Side-Lobe Ratio, ISLR)分别为 -13.25 dB 和 -10.01 dB,方位向分辨率为 0.455 m.在图 4(b)中,方位向 IRF 的 PSLR 和 ISLR 分别为 -0.35 dB 和 6.85 dB.在图 4(c)中,方位向 IRF 的 PSLR 和 ISLR 分别为 -13.15 dB 和 -10.02 dB,方位向分辨率为 0.457 m,很接近理想情况下的数值,说明了文中方法的有效性.

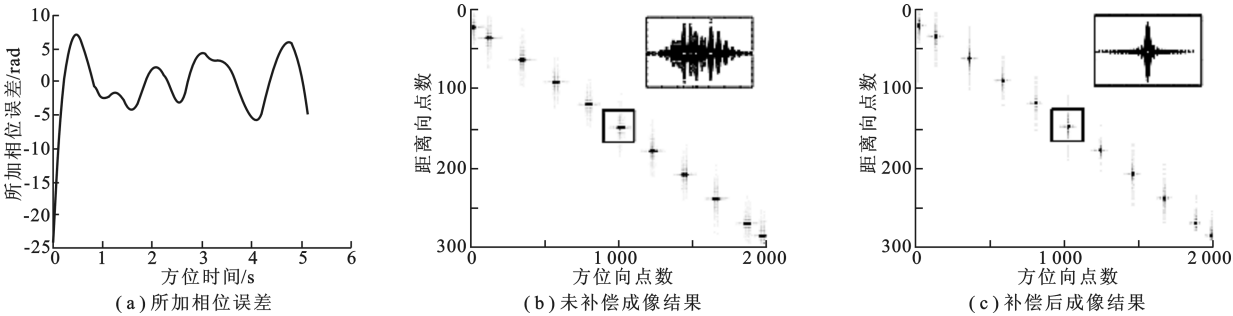


图 3 成像处理结果

进一步通过聚束 SAR 实测数据处理实验验证文中方法的有效性.雷达系统工作于 X 波段,平台速度约为 110 m/s,距离和方位分辨率均为 1 m,SAR 图像的距离向和方位向场景宽度分别为 1 km×1 km.利用惯

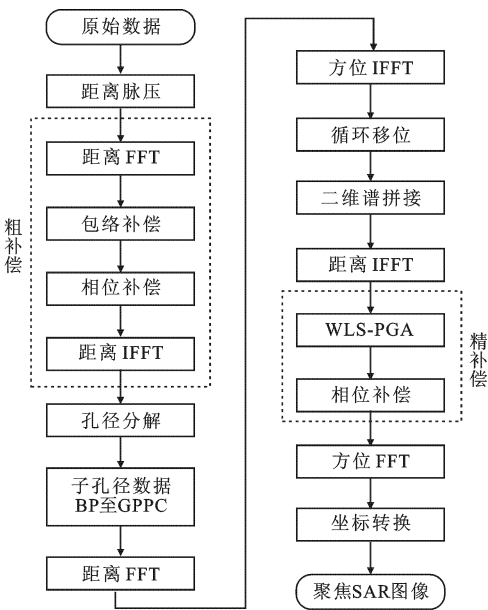


图 2 结合 ATD 成像算法的自聚焦处理流程

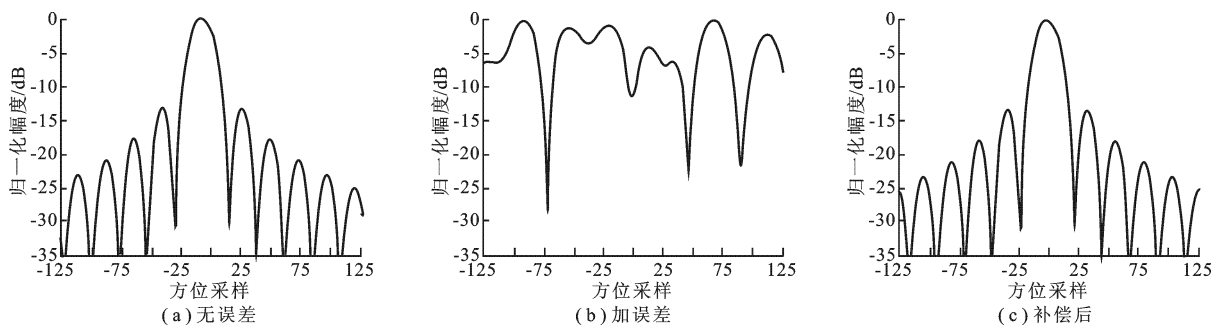


图 4 方位向 IRF 剖面图

性导航系统解算出斜距误差,并进行包络误差和相位误差的粗略补偿,采用 ATD 成像算法处理,成像结果如图 5(a)所示.可见,利用惯导信息进行粗补偿,采用 ATD 成像算法对成像场景达到了粗略聚焦,如图 5(b)局部放大图所示,其熵值和对比度分别为 12.86 和 0.84.利用文中方法处理该实测数据,可得到良好的聚焦效果,如图 5(c)所示.这说明文中方法可以精确地补偿残余相位误差,获得良好的聚焦效果,如图 5(d)局部放大图所示,其熵值和对比度分别为 9.09 和 1.00.一般来说,图像熵越小,对比度越大,则说明图像聚焦性能越好.

4 总 结

笔者提出了一种结合自聚焦方法的 ATD 成像算法,通过将各子孔径数据后向投影到 GPPC,经距离 FFT 和方位 IFFT 获得各子图像 2-D WS 并融合,经距离 IFFT,得到全孔径的 RCPH 域数据,利用聚焦域与相应的 RCPH 域之间的 FTP 关系,采用 WLS-PGA 算法进行相位误差估计并补偿,实现时域成像算法与自聚焦的结合,具有较高的运算效率和精度.最后,通过仿真实验和实测数据验证了所提算法的有效性和实用性.

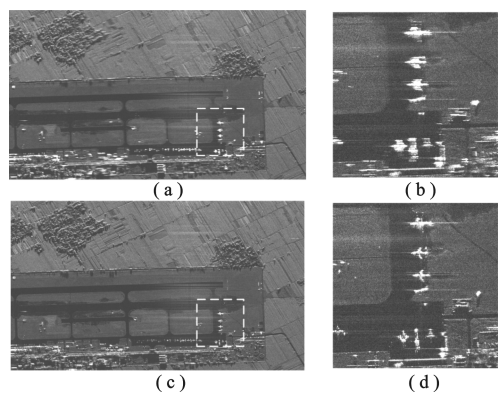


图 5 实测数据处理结果

参考文献:

[1] 李震宇, 杨军, 梁毅, 等. 弹载 SAR 子孔径大斜视成像方位空变校正新方法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2015, 42(4): 88-94.
LI Zhenyu, YANG Jun, LIANG Yi, et al. New Method for Azimuth-dependent Correction of Highly Squint Missile-borne SAR Subaperture Imaging [J]. Journal of Xidian University, 2015, 42(4): 88-94.

[2] 丁振宇, 谭维贤, 王彦平, 等. 基于波数域子孔径的机载三维 SAR 偏航角运动误差补偿 [J]. 雷达学报, 2015, 4(4): 467-473.
DING Zhenyu, TAN Weixian, WANG Yanping, et al. Yaw Angle Error Compensation for Airborne 3-D SAR Based on Wavenumber-domain Subblock [J]. Journal of Radars, 2015, 4(4): 467-473.

[3] MARSTON T M, PLOTNICK D S. Semiparametric Statistical Stripmap Synthetic Aperture Autofocusing [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(4): 2086-2095.

[4] ZENG L T, XING M D, LIANG Y, et al. A Novel Motion Compensation Approach for Airborne Spotlight SAR of High-resolution and High-squint Mode [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, 13(3): 429-433.

[5] 胡克彬, 张晓玲, 师君, 等. 基于图像强度最优的 SAR 高精度运动补偿方法 [J]. 雷达学报, 2015, 4(1): 60-69.
HU Kebin, ZHANG Xiaoling, SHI Jun, et al. A High-precision Motion Compensation Method for SAR Based on Image Intensity Optimization [J]. Journal of Radars, 2015, 4(1): 60-69.

[6] SHENG J L, XING M D, ZHANG L, et al. ISAR Cross-range Scaling by Using Sharpness Maximization [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(1): 165-169.

(下转第 70 页)