

基于恒加速度模型的斜视 SAR 成像 CA-ECS 算法

孙 兵, 周荫清, 陈 杰, 李春升
(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 针对空载 SAR 俯冲模式下的高精度运动补偿方法进行研究, 推导了恒加速度运动条件下的等效斜视距离模型, 基于该模型推导出 Extend Chirp Scaling 相位补偿因子的数学表达式, 提出了一种 CA-ECS (Constant Acceleration ECS) 算法. 该算法的相位补偿因子包含多个方向速度和加速度参数, 能够实现恒加速度条件下的运动补偿, 是一种通用性强、适用面广的子孔径成像算法. 计算机仿真结果表明本文使用的等效斜视距离模型的误差较小, CA-ECS 算法能有效地完成加速度运动补偿.

关键词: 合成孔径雷达; 成像算法; CA-ECS; 等效斜视距离模型; 运动补偿

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 09-1595-05

CA-ECS Algorithm for Squinted SAR Imaging Based on Constant Acceleration Model

SUN Bing ZHOU Yin-qing CHEN Jie LI Chun-sheng
(School of Electronic and Information Engineering of BUAA, Beijing 100083, China)

Abstract This paper concentrates on accurate motion compensation method for airborne SAR imaging model. The equivalent squint range model is deduced in the case of constant acceleration movement and CA-ECS (Constant Acceleration-Extended Chirp Scaling) imaging algorithm is proposed with new phase compensation factors based on this range model. The influences of multi-directional velocities and accelerations are taken into account in phase compensation factors of CA-ECS algorithm, so motion compensation with acceleration can be achieved via phase compensation. This algorithm is a more versatile and applicable imaging algorithm for subaperture data. The computer simulation results illustrate that the squint range model has less error and CA-ECS algorithm can be used to accomplish motion compensation with acceleration efficiently.

Key words SAR; imaging algorithm; constant acceleration-extended chirp scaling; equivalent squint range model; motion compensation

1 引言

雷达载体平台的运动不稳定性直接影响回波信号的多普勒特性, 从而使 SAR 图像质量下降. 对机载和弹载 SAR 而言, 特别是在一些特殊的应用下 (如战斗机俯冲、导弹再入等), 平台的机动性很强, 明显偏离匀速直线平移运动状态. 此时, 具备高精度运动补偿能力的成像处理算法是得到高分辨率图像的关键. 一般的运动补偿手段可以通过逐个脉冲调整雷达系统参数进行补偿或者利用杂波锁定和自聚焦进行处理, 但是前者对硬件系统的要求较为苛刻而且系统灵活性较差, 后者运动补偿的精度与地面场景辐射特性以及算法密切相关, 而且计算量较大.

采用 Burst 的工作方式能够有效的减小相位误差积累, 在子孔径时间内可以近似认为雷达载体做匀加速运动. 一般来说图像质量性能指标对加速度比较敏感, 特别是径向加速度. 文献 [1] 中详细分析了机载 SAR 运动横向加速度和径向加速度对运动补偿的定量要求. 横向加速度会引入三次相位误差, 径向加速度会造成二次相位误差, 如果能在成像处理过程中直接补偿加速度造成的相位误差就可以得到高精度的图像, 而加速度可以通过高灵敏度惯导装置直接敏感得到或者利用速度数据估计得到. 经典 Chirp Scaling 算法^[2,3]以及 ECS 算法^[4,5]都是在匀速直线运动距离模型的基础上推导的, 通过精确的相位修正完成高精度的二维成像, 但是对于加速度运动模型, 直接使用

这些成像算法很难得到高分辨率图像。

本文在匀加速运动模型的基础上, 推导了含有加速度参数的等效斜距模型以及 CA-ECS算法。加速运动时, 不考虑加速度参数的多普勒参数计算值可能远远偏离实际信号的多普勒参数, 此时杂波锁定和自聚焦无法快速准确收敛, 图像会严重散焦; 而采用本文的距离模型, 即使实际得到的加速度值等参数并不十分精确, 也能够为杂波锁定和自聚焦处理提供更佳的多普勒参数初值, 从而提高参数估计收敛速度和精度。CA-ECS算法的相位补偿因子考虑多个方向速度和加速度因素, 相位补偿因子计算量与经典 ECS相位因子计算量相当, 几乎不会增加总的计算量。因而 CA-ECS算法是一种更通用的 ECS算法, 经典的 ECS算法以及基于等效斜视模型的改进 ECS算法是这种算法的特例。最后通过计算机仿真验证了距离模型和成像算法的有效性。

2 恒加速度斜距模型

本文的运动模型建立在三维空间中, 考虑了三个方向的速度、三个方向的加速度以及斜视因素, 虽然问题的复杂性大大增加, 但是模型更具一般性。图 1 给出了恒加速度运动模型示意图。

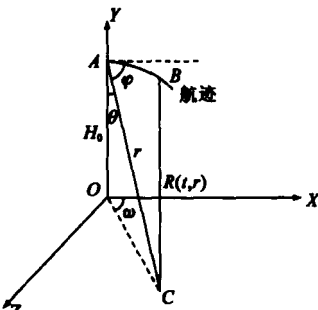


图 1 恒加速度运动模型示意图

在北天东直角坐标系中, 设 t_A 时刻天线相位中心位于 A 点, 坐标为 $(0, H_0, 0)$, 以速度为 (V_x, V_y, V_z) , 加速度为 (A_x, A_y, A_z) 的规律运动, $t + t_k$ 时刻运动到 B 点, 坐标为 $(V_x t + 0.5A_x t^2, H_0 + V_y t + 0.5A_y t^2, V_z t + 0.5A_z t^2)$, C 点为 t_k 时刻的波束指向与地面交点, 坐标为 $(r \sin\theta \cos\omega, 0, r \sin\theta \sin\omega)$ 。相关符号含义如图 1 标注, 则有下列关系式:

$$\cos\varphi = \cos\omega \sin\theta \tag{1}$$

$$r \cos\theta = H_0 \tag{2}$$

$$R^2(t, r) = (V_x t + 0.5A_x t^2 - r \sin\theta \cos\omega)^2 + (H_0 + V_y t + 0.5A_y t^2)^2 + (V_z t + 0.5A_z t^2 - r \sin\theta \sin\omega)^2 \tag{3}$$

将式(3)作进一步整理可得, 忽略 2 次以上的高阶项, 并令

$$\alpha = V_x^2 + V_y^2 + V_z^2 - rA_x \cos\varphi + A_y H_0 - rA_z \sin\omega \sin\theta \tag{4}$$

$$\beta = V_x \cos\varphi - V_y \cos\theta + V_z \sin\omega \sin\theta \tag{5}$$

可得基于恒加速度模型的斜距表达式

$$R(t, r) = \sqrt{r^2 - 2\beta r t + \alpha t^2} \tag{6}$$

对于子孔径信号, 由于信号积累时间较短, 使用式(6)带来的距离误差是很小的。利用斜距二次逼近模型^[6] $R(t, r) = r + \frac{1}{2} \left[f_d t + \frac{1}{2} f_r t^2 \right]$, 可得到基于恒加速度模型的多普勒参数计算公式为:

$$f_d = -\frac{2\beta}{l} \tag{7}$$

$$f_r = \frac{2\alpha}{l} - \frac{f_d^2}{2r} \tag{8}$$

则位于方位时间为 t_k 的单点目标子孔径回波信号的数学表达式形式^[5]为

$$S(t, r) = \sigma_A \cdot \text{rect} \left\{ \frac{t}{T_d} \right\} \cdot W_a(t - t_k) \cdot p \left[t - \frac{2R(t - t_k; r)}{c} \right] \cdot \exp \left\{ -j \left[\frac{4}{l} R(t - t_k; r) + b \left[t - \frac{R(t - t_k; r)}{c} \right]^2 \right] \right\} \tag{9}$$

式中, T_d 为子孔径时间, σ_A 为点目标后向散射特性, c 为光速, l 为发射脉冲波长, b 为调频率, t 和 t' 分别为距离向快变时间和方位向慢变时间, $\text{rect}(t)$ 为单位矩形函数, $W_a(t)$ 是方位向天线方向性函数, $p(t)$ 发射脉冲包络, $R(t - t_k; r)$ 是点目标 A 到天线相位中心距离的变化函数。

3 CA-ECS成像算法

算法流程图与经典 ECS流程^[4] 完全相同, 利用驻定相位原理和傅里叶变换的性质, 推导步骤与文献[5]相同, 但补偿因子较为复杂。

3.1 方位向 FFT

这是本算法推导的关键步骤。回波信号经过方位向 FFT 变换到距离多普勒 (R-D) 域, 信号表达式为

$$S_1(t, f, r) = \sigma_A \cdot \text{rect} \left\{ \frac{1}{T_d} \left[\frac{(f + f_d) t}{\alpha} \sqrt{\frac{\alpha - \beta^2}{4\alpha - f^2}} + t_k \right] \right\} \cdot W_a \left[\frac{(f + f_d) t}{\alpha} \sqrt{\frac{\alpha - \beta^2}{4\alpha - f^2}} \right] \cdot P \left[t - \frac{2}{c} R_f(f; r) \right] \cdot \exp \left\{ -j p b_r(f; r) \left[t - \frac{2}{c} R_f(f; r) \right]^2 \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{2pr}{l} \sqrt{(\alpha - \beta^2)(4\alpha - f^2)} \right\} - j \frac{2pr\beta}{\alpha} f - p f t_k \tag{10}$$

其中 f 表示方位向频率,

$$R_f(f; r) = 2r \sqrt{\frac{\alpha - \beta^2}{4\alpha - f^2}} \tag{11}$$

$$b_r(f; r) = \frac{b}{1 + \frac{4br f^2 \sqrt{\alpha - \beta^2}}{c^2 (4\alpha - f^2)^{\frac{3}{2}}}} \tag{12}$$

3.2 R-D 域 Chip Scaling 因子补偿

将信号变换到 R-D 域后与 Chip Scaling 因子 $\phi_1(t; f, r_{ref})$ 相乘, 使得不同距离门的距离徙动曲线与参考距离处的距离徙动曲线一致。

$$\phi_1(t; f, r_{ref}) = \exp \left\{ -j p b_r(f; r_{ref}) C_s(f) \left[t - t_{ref}(f) \right]^2 \right\} \tag{13}$$

其中

$$C_s(f) = 2 \sqrt{\frac{\alpha_{ref} - \beta^2}{4\alpha_{ref} - f^2}} - 1 \tag{14}$$

$$\tau_{\text{ref}}(f) = \frac{2}{c} r_{\text{ref}} [1 + C_s(f)] \quad (15)$$

$$\alpha_{\text{ref}} = V_x^2 + V_y^2 + V_z^2 - r_{\text{ref}} A_x \cos \varphi_{\text{ref}} + A_y H_0 + r_{\text{ref}} A_z \sin \omega \sin \theta_{\text{ref}} \quad (16)$$

$$\beta_{\text{ref}} = V_x \cos \varphi_{\text{ref}} - V_y \cos \theta_{\text{ref}} + V_z \sin \omega \sin \theta_{\text{ref}} \quad (17)$$

式中, r_{ref} 为参考斜距, θ_{ref} 和 φ_{ref} 分别为参考斜距对应的视角和等效锥角。

3.3 距离向 FFT

经过 Chirp Scaling 因子补偿之后的信号作距离 FFT 之后得到的信号表达式为

$$\begin{aligned} SS(f_\tau, f) = & \sigma_A \cdot \text{rect} \left\{ \frac{1}{T_d} \left[\frac{(f+f_d) \lambda r}{\alpha} \sqrt{\frac{\alpha-\beta^2}{4\alpha-\lambda^2 f^2}} + t_A \right] \right\} \\ & \cdot W_a \left[\frac{(f+f_d) \lambda r}{\alpha} \sqrt{\frac{\alpha-\beta^2}{4\alpha-\lambda^2 f^2}} \right] \\ & \cdot P \left\{ -\frac{f_\tau}{b_r(f; r_{\text{ref}}) [1 + C_s(f)]} \right\} \\ & \cdot \exp \left\{ -j\pi \frac{f_\tau^2}{b_r(f; r_{\text{ref}}) [1 + C_s(f)]} \right\} \\ & \cdot \exp \{-j2\pi f_\tau t'\} \\ & \cdot \exp \left\{ -j \frac{2\pi r}{\lambda \alpha} \sqrt{(\alpha-\beta^2)(4\alpha-\lambda^2 f^2)} \right\} \\ & \cdot \exp \{-j(\Theta_1 + \Theta_2)\} \cdot \exp \{-j2\pi f t_A\} \end{aligned} \quad (18)$$

其中 f_τ 表示距离向频率,

$$t' = \frac{2}{c} [rM + C_s(f) r_{\text{ref}}] \quad (19)$$

$$\Theta_1 = \frac{4\pi C_s(f) [1 + C_s(f)]}{c^2} (rM - r_{\text{ref}})^2 \quad (20)$$

$$\Theta_2 = \frac{2\pi r \beta_f}{\alpha} \quad (21)$$

$$M = \sqrt{\frac{(\alpha-\beta^2)(4\alpha_{\text{ref}}-\lambda^2 f^2)}{(\alpha_{\text{ref}}-\beta_{\text{ref}}^2)(4\alpha-\lambda^2 f^2)}} \quad (22)$$

式(18)中的第一个相位因子是 f_τ 的二次项, 为距离调频信号经过距离向 FFT 的结果, 第二个相位项为 f_τ 的线性项, 包含点目标的准确距离和距离徙动信息。

3.4 二维频域距离补偿因子补偿

在二维频域乘以距离补偿因子 $\phi_2(f_\tau, f)$ 完成距离徙动校正。

$$\phi_2(f_\tau, f) = \exp \left\{ -j \frac{\pi f_\tau^2}{b_r(f; r_{\text{ref}}) [1 + C_s(f)]} + j \frac{4\pi}{c} f_\tau r_{\text{ref}} C_s(f) \right\} \quad (23)$$

3.5 距离向 IFFT

信号经过距离向 IFFT 变换到 R-D 域完成距离压缩, 再经过方位向视加权处理, 信号表达式为

$$\begin{aligned} sS_2(\tau, f) = & \sigma_A \cdot \text{rect} \left\{ \frac{1}{T_d} \left[\frac{(f+f_d) \lambda r}{\alpha} \sqrt{\frac{\alpha-\beta^2}{4\alpha-\lambda^2 f^2}} + t_A \right] \right\} \\ & \cdot P \left(\tau - \frac{2rM}{c} \right) \cdot \exp \left\{ -j \frac{2\pi r}{\lambda \alpha} \sqrt{(\alpha-\beta^2)(4\alpha-\lambda^2 f^2)} \right\} \\ & \cdot \exp \{-j(\Theta_1 + \Theta_2)\} \cdot \exp \{-j2\pi f t_A\} \end{aligned} \quad (24)$$

其中 $P(\cdot)$ 为距离压缩后的距离向包络。完成距离压缩后, 沿距

离门斜距和采样时间不再是线性关系, 它们之间的关系式为

$$rM = \frac{c\tau}{2} \quad (25)$$

距离压缩以后各距离门对应的斜距参数、多普勒参数需要根据此关系式重新计算得到。

3.6 R-D 域方位因子补偿与方位 IFFT

R-D 域信号与方位补偿因子 $\phi_3(\tau, f)$ 完成残留相位补偿和频谱扩展。

$$\begin{aligned} \phi_3(\tau, f) = & \exp \left\{ -j \frac{2\pi c \tau}{\lambda M} \left[1 - \frac{\sqrt{(\alpha-\beta^2)(4\alpha-\lambda^2 f^2)}}{2\alpha} \right] \right. \\ & \left. + j(\Theta_1 + \Theta_2) + j\Delta\varphi \right\} \end{aligned} \quad (26)$$

$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{f_{\text{rscl}}} f^2 + \frac{2\pi f_d f}{f_{\text{rscl}}} \quad (27)$$

其中 f_{rscl} 为频谱扩展后的多普勒调频率, f_d 为各距离门对应的多普勒中心频率。两个相位分别完成方位频谱扩展和补偿多普勒频移引起的相位。经过方位向 IFFT, 信号表达式为

$$\begin{aligned} sS_2(\tau, t) = & \sigma_A \cdot \text{rect} \left\{ \frac{1}{T_d} \left[t_A - \frac{f_{\text{rscl}}}{f_r} (t_A - t) \right] \right\} \cdot P \left[\tau - \frac{2rM}{c} \right] \\ & \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi r}{\lambda} \right\} \cdot \exp \left\{ -j2\pi f_{\text{rscl}} \left[t - t_A + \frac{f_d}{f_{\text{rscl}}} \right]^2 \right\} \end{aligned} \quad (28)$$

3.7 方位向去斜处理与 FFT

将时域信号进行方位 deramp 处理, 即与相位因子 $\phi_4(f)$ 相乘。

$$\phi_4(t) = \exp \left\{ j\pi f_{\text{rscl}} t^2 + j\pi \frac{f_d}{f_{\text{rscl}}} \right\} \quad (29)$$

最后, 经过方位向 FFT 得到 SAR 图像为

$$\begin{aligned} sS_3(\tau, f) = & D_A \cdot \text{sinc} \left[\pi(f+f_d - f_{\text{rscl}} t_A) \frac{f_{\text{rscl}}}{f_r} \right] \\ & \cdot P \left(\tau - \frac{2rM}{c} \right) \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi r}{\lambda} \right\} \end{aligned} \quad (30)$$

其中 D_A 是与 t 无关的一个复常数。由式(30)可以看出 A 点回波经过成像处理, 方位向峰值位置对应于方位频率 $f = f_{\text{rscl}} t_A - f_d$, 距离向峰值位置对应于 $\tau = \frac{2rM}{c}$ 。

4 仿真结果

4.1 仿真参数

为验证本文模型和算法的有效性, 进行了计算机仿真, 仿真目标场景为 200m × 200m 的点阵。主要仿真参数如表 1 所示, 其中 B_a 为调频信号带宽, f_s 为采样率, f_p 为重频, t_p 为脉冲宽度。

表 1 计算机仿真主要参数

B_a	f_s	f_p	t_p	T_d	λ	θ_{ref}	θ_a
50MHz	60MHz	8kHz	10us	0.04s	0.03m	30°	1.7189°
V_x	V_y	V_z	A_x	A_y	A_z	H_0	ω
1000m/s	-100m/s	-100m/s	-100m/s ²	-50m/s ²	-50m/s ²	10km	87°

4.2 斜距模型误差分析

根据仿真参数计算等效斜视模型和不考虑加速度的二次逼近模型带来的距离误差如图 2所示。

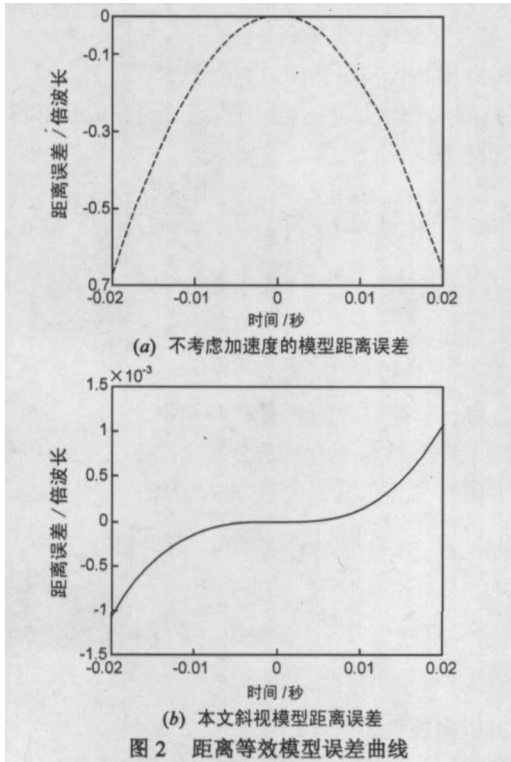


图 2 距离等效模型误差曲线

从图中可以看出在仿真时间内, 恒加速度等效斜视模型带来的斜距误差更小, 远小于一倍波长, 因而其造成的相位误差可忽略不计。

4.3 成像处理结果

对子孔径数据分别利用基于未作加速度补偿的斜视改进 ECS算法(算法 1)和本文提出的 CA-ECS算法(算法 2)进行成像处理, 得到图像如图 3(a)和 3(b)所示, 图 3(c)和 3(d)分别给出了点目标 5 成像结果三维效果图。由于主要区别在于方位向压缩不同, 表 2 给出了经过算法 1 成像处理点目标的方位向指标和经过算法 2 处理得到的点目标方位向和距离向指标结果。

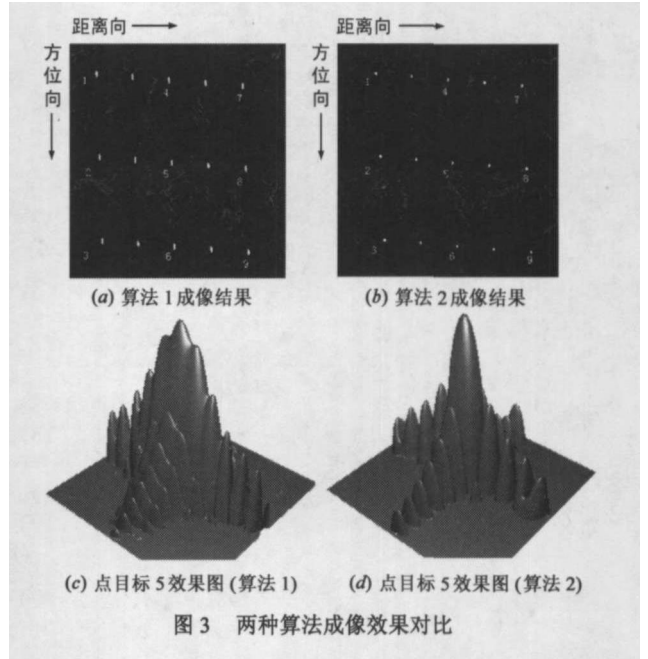


图 3 两种算法成像效果对比

表 2 点目标图像质量评估结果(未加权)

	算法 1 成像方位向指标			算法 2 成像方位向指标			算法 2 成像距离向指标		
	分辨率 (m)	峰值旁瓣比 (dB)	积分旁瓣比 (dB)	分辨率 (m)	峰值旁瓣比 (dB)	积分旁瓣比 (dB)	分辨率 (m)	峰值旁瓣比 (dB)	积分旁瓣比 (dB)
1	10.04	-6.26	-15.16	4.74	-13.37	-10.93	2.66	-13.38	-10.84
2	9.50	-6.40	-14.55	4.73	-13.29	-11.44	2.68	-13.17	-10.78
3	9.01	-7.76	-15.08	4.73	-13.27	-10.62	2.63	-13.44	-10.80
4	10.03	-9.06	-15.01	4.66	-13.44	-10.78	2.66	-13.36	-10.89
5	9.18	-6.16	-13.32	4.65	-13.30	-10.80	2.65	-13.49	-10.74
6	8.86	-8.28	-14.78	4.69	-13.28	-11.28	2.65	-13.33	-10.80
7	9.88	-6.94	-14.70	4.60	-13.18	-10.22	2.66	-13.43	-10.88
8	9.32	-6.55	-15.05	4.64	-13.27	-11.39	2.69	-13.30	-10.88
9	8.60	-8.89	-14.08	4.65	-13.20	-11.58	2.67	-13.08	-10.79
均值	9.38	-7.37	-14.64	4.68	-13.29	-11.01	2.66	-13.33	-10.82
理论值	2.99	-13.26	-9.90	4.70	-13.26	-9.90	2.66	-13.26	-9.90

由于算法 1 计算多普勒调频率没有考虑加速度, 算法 2 根据式 (8) 计算多普勒调频率, 从而使得两者的多普勒带宽和方位向分辨率指标理论值存在较大差异。从点目标指标可以看出本文提出的算法能够有效补偿加速度带来的相位误差, 点目标聚焦效果良好。

5 结论

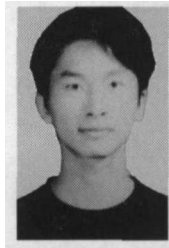
本文建立了基于恒加速运动模型的等效斜视距离模型, 在此基础上推导了一种更具适用性的高精度子孔径成像算法——CA-ECS算法。计算机仿真结果表明该等效距离模型近似误差小, 使用 CA-ECS 成像算法能够通过精确

相位因子补偿实现加速度的运动补偿, 图像聚焦效果好, 而且几乎不会增加的计算量。

参考文献:

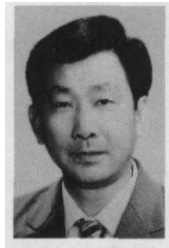
- [1] 张澄波, 等. 综合孔径雷达原理、系统分析与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1989.
Zhang Chengbo, et al Synthetic Aperture Radar Theory, System Analysis and Application [M]. Beijing Science Press 1989. (in Chinese)
- [2] H Runge R Bamler A novel high precision SAR focusing algorithm based on chirp scaling [A]. Proceedings of IEEE 1992 International Geosciences and Remote Sensing Symposium [C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 1992. 372-375
- [3] 黄岩, 李春升, 陈杰, 周荫清. 高分辨率星载 SAR 改进 Chirp Scaling 成像算法 [J]. 电子学报, 2000, 28(3): 35-38
Huang Yan, Li Chunsheng, Chen Jie, et al Refined chirp scaling algorithm for high resolution spaceborne SAR imaging [J]. Acta Electronic Sinica, 2000, 28(3): 35-38. (in Chinese)
- [4] Alberto Moreira, Josef Mittermayer and Rolf Scheiber Extended chirp scaling algorithm for air and spaceborne SAR data processing in stripmap and scanSAR imaging modes [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing 1996 34(5): 1123-1136
- [5] 文竹, 周荫清, 陈杰. 基于 ECS+ FR 的星载 SAR 快视成像算法 [J]. 电子学报, 2004, 6(6): 933-937.
Wen Zhu, Zhou Yinqing, Chen Jie A New Quick-look algorithm for spaceborne synthetic aperture radar based on ECS+ FR [J]. Acta Electronic Sinica, 2000, 32(6): 933-937.
- [6] 魏钟铨, 等. 合成孔径雷达卫星 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
Wei Zhongquan, et al Synthetic Aperture Radar Satellite [M]. Beijing Science Press, 2001. (in Chinese)

作者简介:



孙 兵 男, 1981年 7月生于湖北广水, 博士生, 主要从事高分辨率雷达成像处理、弹载 SAR 系统总体分析与仿真、SAR 图像质量评估方面的研究工作。

E-mail: sun@ee.buaa.edu.cn



周荫清 男, 1936年 4月生于湖南湘潭, 教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, 主要从事信息获取与处理、高分辨率成像雷达和时变谱估计等方面的教学和科研工作。