

基于方位波数域聚束模式 PFA 的运动补偿新方法研究

杨磊 唐禹 孙光才 邢孟道 保铮

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 该文在对聚束模式 SAR 数据进行极坐标算法(PFA)形式成像的过程中, 通过研究载机运动误差对散射点方位向波数表达式的影响, 给出了一种基于方位波数域进行运动误差估计及相关补偿的新方法。该方法首先应用距离匹配滤波和方位 dechirp 实现对原始数据的 2 维调频率去斜处理, 同时经过距离 FFT 和极坐标算法的操作将原来极坐标下的数据重采样到直角坐标系下的 2 维波数域, 最后对数据进行距离和方位的分块误差估计及补偿。这种方法能很好地针对运动误差造成的方位二次及高次误差相位项进行精确补偿, 同时也能处理误差相位的空变性问题, 因此可以获得相对传统时域补偿方法更好的图像聚焦效果。实测数据的处理和分析, 验证了该文所述方法的有效性, 证明了与传统时域运动补偿方法相比的优越性。

关键词: 聚束式合成孔径雷达; 运动补偿; 波数域; 极坐标算法

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)11-2661-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01423

Study on Azimuth Wavenumber Domain Spotlight Mode Motion Compensation Based on PFA

Yang Lei Tang Yu Sun Guang-cai Xing Meng-dao Bao Zheng

(Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: In this paper, the motion compensation of spotlight mode SAR data processing is studied with Polar Format Algorithm (PFA). A new approach for motion error estimation and compensation in azimuth wavenumber domain is proposed. The framework applies range matched filtering and azimuth dechirp processing to obtain the two dimensional wavenumber data support. First, range compression via fast Fourier transform and PFA interpolation to transform the polar coordinate support to rectangular one is performed. Then the error phase is estimated and compensated in sub-apertures respectively. This framework can both compensate the second or high order motion error accurately, and solve the spatial-variant errors. Compared with the traditional time domain motion compensation, the proposal can achieve better performance for focusing synthetic aperture radar imagery. Experiment with real data is done to verify the effectiveness and advantage of the proposal.

Key words: Spotlight SAR; Motion compensation; Wavenumber domain; Polar Format Algorithm (PFA)

1 引言

聚束式合成孔径雷达^[1-3]通过控制天线相位中心(APC)的指向使得雷达波束在整个合成孔径时间内始终照射地面的固定区域, 增加了成像的相干积累时间, 从而提高了方位向分辨率, 因此是一种有效的高分辨成像手段。目前针对聚束式 SAR 主要的成像算法有 RMA, PFA 及 WPFA^[4]等。从应用角度来看, PFA 算法以其较高的运算效率成为研究的热点^[3,5,6]。经典的极坐标算法根据聚束模式的成像特点, 通过以场景中心为成像处理的参考点, 分别进行距离向和方位向的去斜率处理, 再将数据进行极

坐标到直角坐标的 2 维插值, 最后进行 2 维 IFFT 从而有效地重建聚束式 SAR 图像。但是机载 SAR 在飞行过程中容易受到大气湍流的影响, 使得载机不可能做理想的匀速直线飞行, 从而导致回波相位畸变, 最终造成成像质量的恶化。载机的运动误差可以分为两类^[7]: 第 1 类是转动误差, 这类误差随着现代雷达伺服系统对雷达射线的精确控制已经比较小, 可以忽略不计, 而且这种误差一般引起的是幅度调制; 第 2 类是平动误差, 主要是由于载机的非匀速直线运动造成的, 这种平动的运动误差会造成回波相位的畸变, 影响方位向相位的相干性, 其中一次相位误差将造成图像的几何形变; 二次相位误差将造成主瓣展宽及旁瓣电平升高, 使得图像轮廓模糊, 分辨率下降; 三次及更高次的相位误差将使压缩波形产生非对称畸变, 旁瓣电平升高等一系列

2009-11-02 收到, 2010-03-03 改回

国家部委基金资助课题

通信作者: 杨磊 xdtomasyl@gmail.com

参考函数 $\exp(j\pi f_r^2/K_r)$ ，并忽略窗函数可以得到

$$s(f_r, u) = \exp(-j2\pi(f_c + f_r)\tau_n) \quad (4)$$

由平面波假设，忽略距离和方位位置的二阶及二阶以上变化，对式(2)的距离位置变量 y_n 和方位位置变量 x_n 在零处进行一阶泰勒展开后代入式(4)可以得到下式

$$S(k, u) \approx \exp\left(-j \cdot k \left(\sqrt{(u + \Delta u)^2 + (Y_c + \Delta Y)^2} + a(\Delta Y, \Delta u)y_n + b(\Delta Y, \Delta u)x_n \right)\right) \quad (5)$$

$$a(\Delta Y, \Delta u) = \left((Y_c + \Delta Y) / \sqrt{(u + \Delta u)^2 + (Y_c + \Delta Y)^2} \right) \quad (6)$$

$$b(\Delta Y, \Delta u) = -\left((u + \Delta u) / \sqrt{(u + \Delta u)^2 + (Y_c + \Delta Y)^2} \right) \quad (7)$$

其中 $k = (4\pi/c)(f_c + f_r)$ 。

由于在实际运动补偿处理中，需对距离和方位进行分块操作，这样实际处理中每个子块的 Δu 和 ΔY 相对斜距 Y_c 一般都比较小，所以分别对式(6)和式(7)在 Δu 和 ΔY 等于零处进行一阶泰勒展开可以得到

$$a(\Delta Y, \Delta u) \approx \frac{Y_c}{\sqrt{u^2 + Y_c^2}} + \frac{u^2}{(u^2 + Y_c^2)^{3/2}} \Delta Y - \frac{uY_c}{(u^2 + Y_c^2)^{3/2}} \Delta u \quad (8)$$

$$b(\Delta Y, \Delta u) \approx -\frac{u}{\sqrt{u^2 + Y_c^2}} + \frac{uY_c}{(u^2 + Y_c^2)^{3/2}} \Delta Y - \frac{Y_c^2}{(u^2 + Y_c^2)^{3/2}} \Delta u \quad (9)$$

同时假设在每个方位子块时间内沿航线的速度变化量 Δv_a 和垂直航线的加速度 a_y 均为常数，所以此时沿航线方向位置误差可以表示为 $\Delta u = \Delta v_a \cdot t$ ，垂直航线方向的位置误差量可以表示为 $\Delta Y = a_y t^2/2$ ，在这里认为方位子块内垂直航线方向的初速度为零。接下来根据经典 PFA 算法将式(5)乘以方位向 dechirp 函数得

$$S_{\text{comp}}(k, u) = \exp\left(j \cdot k \left(\sqrt{u^2 + Y_c^2} \right)\right) \quad (10)$$

从而得到

$$S(k, u) \approx \exp\left(-j \cdot k \left(\sqrt{(u + \Delta u)^2 + (Y_c + \Delta Y)^2} - \sqrt{u^2 + Y_c^2} + a(\Delta Y, \Delta u)y_n + b(\Delta Y, \Delta u)x_n \right)\right) \quad (11)$$

其中 $a(\Delta Y, \Delta u)$ 和 $b(\Delta Y, \Delta u)$ 分别为式(8)和式(9)所示，再令距离向波数变量 k_y 和方位向波数变量 k_x 分别为

$$k_y = kY_c / \sqrt{u^2 + Y_c^2} \quad (12)$$

$$k_x = -ku / \sqrt{u^2 + Y_c^2} \quad (13)$$

由式(12)，式(13)可以得到

$$u = -(k_x/k_y)Y_c \quad (14)$$

将式(12)代入式(11)有

$$S(k_y, u) \approx \exp\left(-j \cdot k_y \left(\sqrt{(u + \Delta u)^2 + (Y_c + \Delta Y)^2} - \sqrt{u^2 + Y_c^2} \right) \frac{\sqrt{u^2 + Y_c^2}}{Y_c} + c(\Delta Y, \Delta u)y_n + d(\Delta Y, \Delta u)x_n \right) \quad (15)$$

其中

$$c(\Delta Y, \Delta u) \approx 1 + \left(u^2 / (u^2 + Y_c^2) Y_c \right) \Delta Y - \left(u / (u^2 + Y_c^2) \right) \Delta u \quad (16)$$

$$d(\Delta Y, \Delta u) \approx -\left(u / Y_c \right) + \left(u / (u^2 + Y_c^2) \right) \Delta Y - \left(Y_c / (u^2 + Y_c^2) \right) \Delta u \quad (17)$$

再将 $u = v_a t$ 代入式(14)得到 $t = -(Y_c/v_a)(k_x/k_y)$ ，并将其代入 $\Delta Y = a_y t^2/2$ ，便得到

$$\Delta Y = \left(a_y Y_c^2 / 2v_a^2 \right) \left(k_x/k_y \right)^2 \quad (18)$$

下面将 $\Delta u = \Delta v_a \cdot t$ 和 $t = -(Y_c/v_a)(k_x/k_y)$ 以及式(14)，式(18)代入式(15)可以得到

$$S(k_y, k_x) \approx \exp\left(-j \cdot \left(f(k_y, k_x) + k_y y_n + g(k_y, k_x) + k_x x_n + h(k_y, k_x) \right)\right) \quad (19)$$

其中

$$f(k_y, k_x) = k_y Y_c \left[\sqrt{\left(\frac{k_x}{k_y} \right)^2 \left(1 + \frac{\Delta v_a}{v_a} \right)^2 + \left(1 + \frac{a_y Y_c}{2v_a^2} \left(\frac{k_x}{k_y} \right)^2 \right)^2} - \sqrt{\left(\frac{k_x}{k_y} \right)^2 + 1} \right] \sqrt{\left(\frac{k_x}{k_y} \right)^2 + 1} \quad (20)$$

$$g(k_y, k_x) = \left(\frac{k_x^2}{(k_x^2 + k_y^2)} \frac{a_y Y_c}{2v_a^2} \frac{k_x^2}{k_y} - k_y \frac{k_x^2}{(k_x^2 + k_y^2)} \frac{\Delta v_a}{v_a} \right) y_n \quad (21)$$

$$h(k_y, k_x) = \left(-\frac{k_x^2}{(k_x^2 + k_y^2)} \frac{a_y Y_c}{2v_a^2} k_x + k_x \frac{k_y^2}{(k_x^2 + k_y^2)} \frac{\Delta v_a}{v_a} \right) x_n \quad (22)$$

从上面推导可得, 式(19)为散射点回波信号的 2 维波数域表达式, 如果运动误差 Δv_a 和 a_y 均为零, 则式(20)-式(22)也均等于零, 此时式(19)退化为标准经典极坐标算法下的回波信号表达式, 再对其进行 2 维 IFFT 后就可以得到清晰的聚束模式 SAR 图像。但是由于运动误差的存在, 导致回波表达式中引入了 3 个运动误差相位项, 进而造成图像的几何形变以及散焦等变化, 如果可以分别对其进行补偿, 则可以重建原来的聚束式 SAR 图像, 从而解决由于运动误差造成的图像质量下降问题。其中式(20)为运动误差的非空变项, 表示与目标的距离位置和方位位置无关的误差项, 在对该项运动误差进行精确估计后, 可以对数据进行统一的补偿; 式(21)为沿距离向空变的误差项, 表示在方位位置相同而距离位置不同的目标点, 相同运动误差对回波相位具有不同影响的误差项, 该项会引起沿距离向空变的方位散焦, 对于该误差项的处理可以在方位分块的基础上再对距离进行分块处理, 假设在距离小块内运动误差的空变性可以忽略, 并对该小块内的运动误差精确估计, 然后在方位向将误差拟合至全孔径下, 此时不但得到了每个距离单元内沿整个合成孔径的相位误差变化曲线, 即方位误差相位项, 而且也拟合出方位子块内沿距离向的空变变化曲线, 这样可以得到沿距离向空变的误差相位项, 最后沿距离向进行补偿就可以消除该项所引起的散焦影响。式(22)为沿方位向空变的误差项, 表示在距离位置相同而方位位置不同的目标点, 相同运动误差对回波相位影响不同的误差项, 由于方位向在处理过程中没有进行类似距离压缩的处理, 所以该项是无法进行估计和补偿的, 而且在方位向上采用子孔径技术进行成像, 其方位空变误差相位比较小, 可以忽略其影响。继续观察式(19)可见, 此时得到的该表达式为 2 维波数域下带有运动误差的回波表达式, 其中变量 k_y 和 k_x 分别为距离向波数变量和方位向波数变量, 这里需要说明的是在传统意义下的波数变量应该是与频率相对应的, 例如距离波数变量应与距离向频率相对应, 方位波数变量应与方位向多普勒频率相对应, 但是本文中并没有进行方位向 FFT 因此所涉及的方位向波数变量与传统的波数变量有所不同, 根据式(13)在进行方位插值后可以将本文所提及的方位波数变量与传统波数变量一样对待进行处理, 在运动补偿后运用方位向 IFFT 实现成像, 后面的实测数据处理证实了这种方法的可行性。

下面继续分析式(20)-式(21)进而导出引起方位散焦的误差相位项, 令式(20)中

$$p(k_y, k_x) = \sqrt{p\left(1 + \left(\frac{\Delta v_a}{v_a}\right)^2\right)^2 + \left(1 + \left(\frac{a_y Y_c}{2v_a^2}\right)p\right)^2} \quad (23)$$

其中 $(k_x/k_y)^2 = p$, 对式(23)在 $p = 0$ 处一阶泰勒展开得到

$$\begin{aligned} p(k_y, k_x) &\approx 1 + \frac{\left(1 + \frac{\Delta v_a}{v_a}\right)^2 + a_y Y_c / v_a^2}{2} p \\ &= 1 + \frac{\left(1 + \frac{\Delta v_a}{v_a}\right)^2 + a_y Y_c / v_a^2}{2} \left(\frac{k_x}{k_y}\right)^2 \end{aligned} \quad (24)$$

再由泰勒展开, 近似可得

$$\sqrt{\left(\frac{k_x}{k_y}\right)^2 + 1} \approx 1 + \frac{\left(\frac{k_x}{k_y}\right)^2}{2} \quad (25)$$

分别将式(24)和式(25)代入式(20), 并仅取 k_x 的平方项得到

$$f(k_y, k_x) \approx \frac{Y_c}{2k_y} \left(\frac{a_y Y_c + \Delta v_a^2}{v_a^2} + \frac{2\Delta v_a}{v_a} \right) k_x^2 \quad (26)$$

另外沿距离向空变的运动误差推导中, 同样令 $(k_x/k_y)^2 = p$ 则式(21)可以化简为

$$g(k_y, k_x) = \frac{p}{1+p} \left(\frac{a_y Y_c}{2v_a^2} p - \frac{\Delta v_a}{v_a} \right) k_y y_n \quad (27)$$

为了得到关于 k_x 的二次项, 对式(27)在 $p = 0$ 处一阶泰勒展开得到

$$\begin{aligned} g(k_y, k_x) &\approx -\left(\frac{\Delta v_a}{v_a}\right) p k_y y_n \\ &= -\left(\frac{\Delta v_a}{v_a}\right) \left(\frac{k_x^2}{k_y}\right) y_n \end{aligned} \quad (28)$$

根据式(26)和式(28)在对其进行距离 IFFT 后其中的波数域变量 k_y 项可以用 $k_c = 4\pi/\lambda$ 来近似代替, 因而推导出式(20)和式(21)对应的引起方位散焦的误差项, 所以需要进行补偿的误差相位为两项: 其中一项为误差的非空变相位项 $f(k_y, k_x)$ 中的关于波数域变量 k_x 的二次误差项; 另一项为沿距离向空变相位项 $g(k_y, k_x)$ 中关于波数域变量 k_x 的二次误差项。

3 算法流程

通过上面的理论分析和推导我们已经得到带有运动误差的雷达回波在 PFA 下的 2 维波数域显式表达式, 从中得到了需要进行补偿的误差非空变项和误差空变项, 从而得出对应于本文提出的基于极坐标算法(PFA)聚束模式运动补偿的具体实现流程, 如图 2 所示。

在图 2 所示的算法流程中, 首先将得到的回波数据做距离向 FFT 如式(3)所示, 变化到距离频率域, 再与距离参考函数相乘完成距离向的频率去斜, 并按方位单元依次和式(10)相乘完成方位向 dechirp 操作, 然后根据经典极坐标算法(PFA)完成距离和

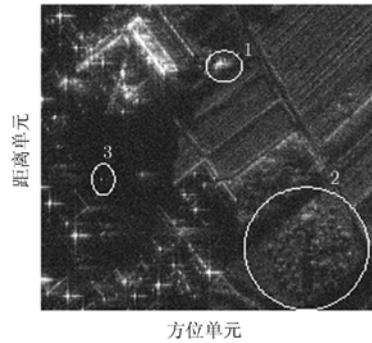


图 6 时域运动补偿细节图像

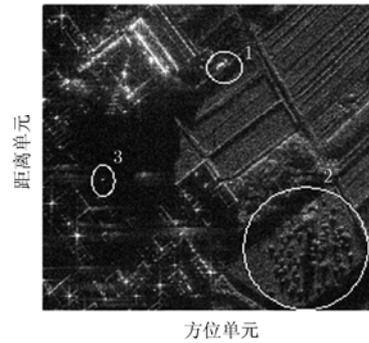


图 7 本文方法运动补偿细节图像

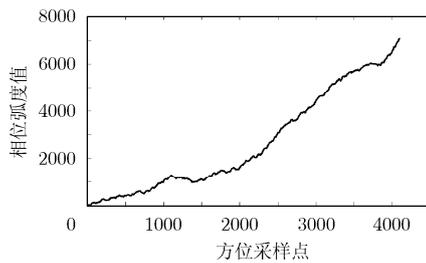


图 8 运动补偿之前相位

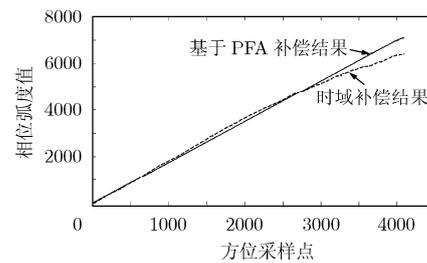


图 9 两种方法补偿相位的结果对比

值, 此时对该点方位向进行 IFFT 则可以完全对点目标进行聚焦成像, 但是由于运动误差的存在, 导致该相位曲线偏离直线, 其线性程度下降, 所以在运动补偿过程中对相位误差补偿的越彻底越完全, 得到该点最终的方位向相位越趋近于直线, 进而可以获得质量较好的聚束式 SAR 图像。基于以上讨论, 本文在图 6 和图 7 中选取了同一场景特显点(如图 3 所示)对应的距离单元分析其方位向相位, 分析时需要处理流程中方位 IFFT 之前的数据域提取该距离单元对应的方位向 4096 点, 讨论其相位变化。图 8 为没有运动补偿时该特显点对应的方位向相位, 其相位偏离标准斜直线的程度较大, 可见运动误差对相位的影响很明显, 也就直接导致了图像的模糊和散焦; 而图 9 为时域运动补偿的相位结果和本文方法运动补偿的相位结果对比, 其中时域运动补偿效果明显, 消除了运动误差引起的大部分非线性项, 但相位中还包含了一定的残余相位误差, 导致补偿效果不能满足聚束高分辨成像的要求, 而基于方位波数域 PFA 的运动补偿方法实现了对相位误差更加精细的补偿。

最后, 对于 SAR 图像聚焦效果的衡量可以用图像对比度^[15]和图像信息熵^[16]来表示。图像对比度越大, 信息熵越小表示图像的聚焦效果越好, 图像的信息量越充足。本文对图 3-图 5 对应的场景图像应用对比度和信息熵进行计算分析, 结果如表 1 所示, 对应图像方位向 8192 点, 距离向 4096 点。从表中

数据可见, 相比传统的时域运动补偿, 基于方位波数域 PFA 的运动补偿方法在图像对比度和图像信息熵的改善上都有很明显的效果。

另外本文给出另一组数据处理的对比结果, 证明本文提出的方法具有广泛的适用性。从下面图 10-图 12 可见, 由于时域运动补偿对运动误差高次项的估计和补偿不够精确, 导致场景点目标对应信号旁

表 1 运动补偿效果对比

指标名称	没有运动补偿	时域运动补偿	本文运动补偿方法
图像对比度 (10^4)	30.3830	32.9650	34.6930
图像信息熵 (10^4)	1.4814	1.4496	1.3858

瓣电平较高, 图像轮廓模糊。而运用本文提出的运动补偿方法即图 2 所示处理流程得到的聚束 SAR 图像其清晰度和对比度都明显优于传统时域补偿的结果, 对比图 11 和图 12 中对应的圆圈处场景效果更加明显。

5 结束语

本文首先通过聚束模式的成像几何模型得到存在运动误差情况下回波信号的表达式, 并且在极坐标算法下推导得到 2 维波数域直角坐标系下需要进行补偿的运动误差非空变相位项和空变相位项, 从而提出相应相位误差项的估计和补偿方法。然后在此基础上提出了基于方位波数域 PFA 的运动补偿

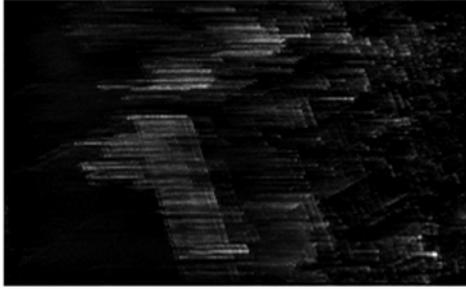


图 10 未运动补偿的聚束 SAR 图像



图 11 时域运动补偿结果截图

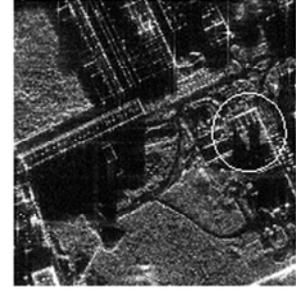


图 12 本文方法运动补偿结果截图

处理算法流程，并进行了实测数据分析和验证。最后通过与传统时域运动补偿方法进行成像比较，验证了本文提出方法的优越性和有效性。同时该方法避免了计算量较大的 PGA 计算过程，适用于实时聚束成像处理，并得到了稳定清晰的聚束式 SAR 图像。

参 考 文 献

- [1] Eineder M, Adam N, and Brcic R. High bandwidth spotlight SAR interferometry with TerraSAR-X[C]. IGARSS 2008, Boston, USA, 2008, 2: III113-III116.
- [2] Tan Wei-xian, Li Dao-jing, and Hong Wen. Airborne spotlight SAR imaging with super high resolution based on back-projection and autofocus algorithm. IGARSS 2008, Boston, USA, 2008, 4: IV1300-IV1303.
- [3] Carrara G, Goodman S, and Majewski M. Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms[M]. Boston & London: Artech House, 1995, Chapter 3.
- [4] Carrara G, Goodman S, and Ricoy M A. New algorithms for widefield SAR image formation[C]. Proc. IEEE Radar Conference 2004, Philadelphia, USA, 2004: 38-43.
- [5] Tang Yu, Xing Meng-dao, and Bao Zheng. The polar format imaging algorithm based on double Chirp-Z transforms[J]. *IEEE Geoscience Remote Sensing Letters*, 2008, 5(4): 610-614.
- [6] Zhu Dai-yin, Ye Shao-hua, and Zhu Zhao-da. Polar format algorithm using chirp scaling for spotlight SAR image formation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2008, 44(4): 1433-1448.
- [7] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005, 第 7 章.
- [8] Fornaro G. Trajectory deviation in airborne SAR: analysis and compensation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(3): 997-1009.
- [9] Prats P, Reigber A, and Mallorqui J J. Topography-dependent motion compensation for repeat-pass interferometric SAR systems[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2005, 2(2): 206-210.
- [10] Reigber A, Alivizatos E, and Potsis A. Extended wavenumber-domain synthetic aperture radar focusing with integrated motion compensation[J]. *IEEE Proceedings. Radar Sonar and Navigation*, 2006, 153(3): 301-310.
- [11] Fu Wen-xian, Li Shao-hong, and Hong Wen. Motion compensation for spotlight SAR mode imaging[C]. 2001 CIE International Conference on Radar, Beijing, China, 2001: 938-942.
- [12] Yuan Y, Sun J, and Mao S. PFA algorithm for airborne spotlight SAR imaging with nonideal motions[J]. *IEEE Proceedings Radar Sonar and Navigation*, 2002, 149(4): 174-182.
- [13] Xing Meng-dao, Jiang Xiu-wei, Wu Ren-biao, Zhou Feng, and Bao Zheng. Motion compensation for UAV SAR based on raw radar data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2009, 47(8-2): 2870-2883.
- [14] 李刚, 许稼, 彭应宁, 夏香根. 一种稳健的机载雷达杂波多普勒参数估计方法[J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(12): 2867-2870.
- [15] Li Gang, Xu Jia, Peng Ying-ning, and Xia Xiang-gen. A robust algorithm of doppler parameters estimation for airborne radar. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(12): 2867-2870.
- [15] 刘碧丹, 韩松, 王岩飞. 图像幅度和值最小化自聚焦算法[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(4): 768-771.
- [15] Liu Bi-dan, Han Song, and Wang Yan-fei. Minimizing sum of image amplitudes autofocus algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(4): 768-771.
- [16] 邢孟道, 保铮. 基于运动参数估计的 SAR 成像[J]. *电子学报*, 2001, 29(12): 1824-1828.
- [16] Xing Meng-dao, and Bao Zheng. Motion parameter estimation based SAR imaging[J]. *Acta Electronic Sinica*, 2001, 29(12): 1824-1828.

杨 磊: 男, 1984 年生, 博士生, 从事聚束模式 SAR 成像方面的研究工作。

唐 禹: 男, 1976 年生, 副教授, 从事 SAR 成像算法、运动补偿算法以及新体制雷达的研究。

邢孟道: 男, 1975 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达成像和目标识别。

保 铮: 男, 1927 年生, 教授, 中国科学院院士, 研究方向为数字信号处理、阵列信号处理、自适应信号处理和雷达成像。