

一种基于子孔径自聚焦的高频运动误差估计和补偿方法

张双喜 孙光才 周峰 刘艳阳 邢孟道
(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

摘要: 采用现有的运动补偿方法, 通过多次迭代, 理论上可以将 SAR 成像中运动误差的低频分量补偿掉, 但对高频分量是无法进行估计和补偿的, 最终会造成当 SAR 平台运动不稳定时, 无法进行高分辨成像。该文针对这一问题, 提出了在进行常规运动补偿后对方位数据进行子孔径高频误差分量估计和补偿的方法。这种方法不仅能获得比传统运动补偿方法更好的成像效果, 而且运算量也有所减小。仿真和实测数据的处理结果证实了该文方法可以对高频运动误差进行有效性的补偿。

关键词: 合成孔径雷达; 运动补偿; PGA; 子孔径

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)12-3013-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00119

A Method of Based on Sub-aperture Autofocus to Estimate the High-frequency Motion-error and Compensation

Zhang Shuang-xi Sun Guang-cai Zhou Feng Liu Yan-yang Xing Meng-dao
(Key Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: With the traditional motion compensation methods, the low-frequency motion-error can be completely compensated during SAR imaging process in the theory. But the high-frequency motion-error can't be estimated and compensated. So when the platform of SAR system is not stable, the high-resolution imagery is hardly obtained. In the paper, a new compensation method is proposed to solve this problem—compensating the high-frequency motion-error based on sub-aperture autofocus after traditional motion compensation. With this new method, not only the imaging results are greatly improved, also the operation quantity is greatly cut down. The experiment results using both simulated data and measured data validate the effectiveness of the method for the compensation of high-frequency motion-error.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Motion compensation; Phase Grad Autofocus (PGA); Sub-aperture

1 引言

合成孔径雷达(SAR)作为一种微波有源成像系统, 因其具有全天时、全天候工作的能力而受到越来越广泛地关注。对于机载 SAR 而言, 其工作环境存在气流波动、载体机械振动等不利因素, 使其运动偏离理想航迹, 从而影响 SAR 成像质量, 因此对其进行运动补偿是很有必要的^[1,2]。

目前机载 SAR 运动补偿是国内外 SAR 领域的一个热点问题^[3-6]。SAR 的运动补偿大体可以分为两大类: 第 1 类是基于惯导信息的运动补偿方法^[7], 第 2 类是基于回波数据的运动误差参数估计和补偿的方法^[8,9]。基于惯导信息的运动补偿方法^[7]是对惯导参数进行解算从而得到运动误差补偿量, 并利用这些补偿量进行运动补偿。在系统配备高精度惯导

的情况下, 该方法是一种有效的运动补偿方法。然而目前国内惯导精度很难达到 SAR 运动补偿所需的精度要求, 因此基于惯导信息的运动补偿方法不适合国内的实际应用。因此研究基于回波数据的运动补偿方法就显得很有必要了。该方法可以分为两类: 基于原始回波数据的运动误差参数估计与补偿方法^[8]和基于 SAR 图像的自聚焦方法^[9]。文献^[8]介绍的基于原始回波数据的运动误差参数估计与补偿方法主要包括利用原始回波数据进行运动误差量估计和对原始回波数据进行运动补偿(本文把该方法简称为常规运动补偿方法)。该方法比较适合于国内的实际应用。但其主要存在两点不足: 一是该方法只对运动误差的低频分量进行补偿; 二是当补偿精度要求比较高时, 该方法需要多次迭代, 运算量大。基于 SAR 图像的自聚焦方法^[9]主要是在图像域中利用特显点进行运动误差相位提取, 并进行补偿。该方法也存在两点不足: (1)对非均匀场景聚焦效果比较明显, 而对均匀场景聚焦效果并不理想; (2)该方

2010-01-29 收到, 2010-05-13 改回

国家部委基金和教育部博士学科点专项科研基金(200807010002)资助课题

通信作者: 张双喜 shuangxizhang1984@163.com

法在提高整体图像聚焦效果的同时,会使图像局部聚焦效果变差。

本文正是考虑了前面提到的基于回波数据的运动误差参数估计和补偿方法的优缺点,在常规运动补偿方法的基础上提出了基于子孔径自聚焦的高频运动误差估计和补偿方法。该方法是在完成距离脉冲压缩、徙动校正和常规运动补偿之后,把子孔径数据沿方位向进行解线性调频操作(即数据变到图像域),接着利用自聚焦方法对运动误差的高频分量进行提取和补偿。最后进行全孔径方位脉冲压缩得到聚焦较好的图像。本文内容安排如下:第2节对运动误差信号模型进行介绍以及对基于图像的自聚焦方法进行讨论;第3节给出了利用本文方法处理实测数据的算法流程;第4节通过仿真和两组实测数据的处理结果验证本文方法的可行性,最后在第5节给出了本文的结论。

2 运动误差信号模型

2.1 基于子孔径运动补偿的运动误差信号模型

假设 SAR 系统工作在正侧视模式下,当不存在运动误差时回波信号经过距离脉冲压缩和徙动校正后沿方位向表示为 $s_0(t_m)$,当存在运动误差时信号可以表示为

$$s(t_m) = s'(t_m) \exp(j\varphi_1(t_m)) \quad (1)$$

其中 $s'(t_m)$ 为 $s_0(t_m)$ 存在包络误差时的信号表达式, t_m 代表方位慢时间, $\varphi_1(t_m)$ 为由运动误差所产生的相位误差

$$\varphi_1(t_m) = \varphi_{L1}(t_m) + \varphi_{H1}(t_m) \quad (2)$$

其中 $\varphi_{L1}(t_m)$ 表示由运动误差低频分量产生相位误差, $\varphi_{H1}(t_m)$ 表示由运动误差高频分量产生的相位误差。采用常规的运动补偿方法进行运动补偿后,沿方位向上的信号可以近似表示为

$$s(t_m) = s_0(t_m) \exp[j(\varphi'_{L1}(t_m) + \varphi_{H1}(t_m))] \quad (3)$$

其中 $\varphi'_{L1}(t_m)$ 为经过常规运动补偿之后剩余运动误差低频分量产生的相位误差, $\varphi_{H1}(t_m)$ 为运动误差高频分量产生的相位误差。在文献[1]中提到当相位误差小于 $\pi/4$ 时,直接进行成像就可以得到聚焦图像。一般而言对于运动平台比较平稳的 SAR 系统经过常规运动补偿之后,剩下的相位误差 $\varphi'_{L1}(t_m) + \varphi_{H1}(t_m)$ 是小于 $\pi/4$ 。而对于像无人机这一类的不平稳 SAR 运动平台,经过常规运动补偿之后剩余的相位误差 $\varphi'_{L1}(t_m) + \varphi_{H1}(t_m)$ 通常是超过 $\pi/4$ 的,此时如果不进一步地进行运动补偿是很难得到聚焦较好的图像。文献[5]提到的相位梯度自聚焦方法是属于在常规运动补偿方法的基础上进行进一步运动补偿的方法。

2.2 自聚焦方法的运动误差模型

文献[9]提出的相位梯度自聚焦作为基于 SAR 图像的自聚焦方法,当成像场景对比度明显的时候可以取得很好的聚焦效果,而当成像场景比较均匀对比度不明显时聚焦效果并不理想。本小节将从信号模型角度对文献[5]的方法进行讨论。

采用驻相点原理对式(3)进行傅里叶变换,令信号在驻相点处时

$$t_m = t_m(f_a) \quad (4)$$

把式(4)代入式(3),得到式(3)的傅里叶变换表达式为

$$s(f_a) = s_0(t_m(f_a)) \exp[j(\varphi'_{L1}(t_m(f_a)) + \varphi_{H1}(t_m(f_a)))] \quad (5)$$

设频域脉冲压缩参考函数为 $s_{\text{ref}}(f_a)$,对式(5)所表示的信号进行频域脉冲压缩得到信号的频域表达式为

$$s_{\text{out}}(f_a) = s_0(t_m(f_a)) \cdot s_{\text{ref}}(f_a) \cdot \exp[j(\varphi'_{L1}(t_m(f_a)) + \varphi_{H1}(t_m(f_a)))] \quad (6)$$

令 $a_r(t_m) = \text{IFFT}(s_0(t_m(f_a)) \cdot s_{\text{ref}}(f_a))$, $\xi_m = \varphi'_{L1}(t_m(f_a)) + \varphi_{H1}(t_m(f_a))$,则式(6)变到时域为

$$s_{\text{out}}(t_m) = a_r(t_m) \otimes \text{IFFT}(\exp(j\xi_m)) \quad (7)$$

在式(7)中 $a_r(t_m)$ 代表聚焦的图像。由于 $s_{\text{out}}(t_m)$ 等于 $a_r(t_m)$ 与 $\text{IFFT}(\exp(j\xi_m))$ 进行卷积,所以 $s_{\text{out}}(t_m)$ 为散焦的图像。文献[9]提出自聚焦方法是在图像域里面对强散射点加窗后变到频率域提取由运动误差产生的相位误差 ξ_m 并进行补偿,最后得到聚焦的图像。该方法在提取相位误差时利用多个特显点提取各自相位误差进行求平均得到 ξ_m 。这样对于方位时间较短的数据是有很有效的,既可以消除单个特显点受到随机相位噪声的影响,又能估计出比较准确的相位误差。然而对于方位时间较长的数据而言,这样估计出来的相位误差是不准确的。

3 子孔径运动误差相位的提取、补偿和算法流程

本节将主要讨论如何利用最小熵自聚焦方法来提取相位误差并进行运动补偿。很多自聚焦方法^[9-12]如 PGA^[9], PACE^[12]等都可以用来提取相位误差,本文选择最小熵自聚焦方法,主要是因为:(1)它可以整体提高图像聚焦效果,而 PGA 主要用来提高不均匀场景如城区的图像聚焦效果,而对于像田野那样比较均匀场景的图像聚焦效果是得不到提高的,甚至有时图像聚焦效果还会变差;(2)对于最小熵自聚焦方法,文献[13]提出了快速最小熵计算方法,利用该方法可以显著地提高算法的计算速度。本文提出的运动补偿方法是基于文献[13]的快速最小熵自聚焦方法 FMEA。FMEA 是借用 2 维图像熵的概念,通过相位补偿的快速迭代,使图像熵达到

最小,从而实现 SAR 图像的聚焦,该方法不仅保证了图像的良好聚焦效果,而且具有较快的收敛速度。

由于在 FMEA 中定义的是图像熵,本文先对子孔径数据在方位向上进行解线性调频(Dechirp)操作把数据变到图像域,再利用 FMEA 提取相位误差并进行补偿,接着对数据做 Dechirp 反操作,最后进行全孔径方位脉冲压缩就可以得到聚焦好的图像。设某一个子孔径数据经过距离脉冲压缩、徙动校正和常规运动补偿后,其某一个距离单元的信号为

$$s(t_m) = \sum_i a_i(t_m - t_i) \exp(-j\pi\gamma_a(t_m - t_i)^2) \cdot \exp(j\varphi'(t_m)) \quad (8)$$

其中 $a_i(t_m - t_i)$ 为该距离单元内某一散射点信号幅度, t_m 代表慢时间, i 代表第 i 个散射点, t_i 代表不同散射点对应的不同慢时间, γ_a 为理想航迹的调频率, $\varphi'(t_m)$ 为经过常规运动补偿后剩余的相位误差,其是运动误差的高频分量和一小部分低频分量产生的。在进行 Dechirp 操作时,所使用的参考函数为

$$s_{\text{ref}}(t_m) = a_{\text{ref}}(t_m) \exp(j\pi\gamma_a t_m^2) \quad (9)$$

其中 $a_{\text{ref}}(t_m)$ 代表矩形窗,在子孔径内它的长度一般等于 $a_i(t_m)$,把式(8)和式(9)相乘得到

$$s(t_m) = \sum_i a_i(t_m - t_i) \exp(j2\pi\gamma_a t_m t_i - j\pi\gamma_a t_i^2) \cdot \exp(j\varphi'(t_m)) \quad (10)$$

只要对式(10)进行方位向上 IFFT (逆傅里叶变换)操作就可以得到 Dechirp 图像。因为 $\varphi'(t_m)$ 的存在使得图像出现散焦,可以利用 FMEA 来提取 $\varphi'(t_m)$ 并把它补偿掉。补偿后的信号变为

$$s(t_m) = \sum_i a_i(t_m - t_i) \exp(j2\pi\gamma_a t_m t_i - j\pi\gamma_a t_i^2) \quad (11)$$

把式(11)乘以式(9)的共轭函数,即对数据进行 Dechirp 的反操作。由此得到

$$s(t_m) = \sum_i a_i(t_m - t_i) \exp(-j\pi\gamma_a(t_m - t_i)^2) \quad (12)$$

式(12)相当于把式(8)的相位误差去掉。对式(12)得到的各个子孔径数据沿方位向进行拼接,然后沿方位向上进行方位脉冲压缩就可以得到聚焦好的图像。数据处理流程如图 1 所示。

4 实验数据验证

4.1 仿真分析结果

在仿真中, SAR 系统工作在正侧视模式,脉冲重复频率为 400 Hz,加入运动误差量如图 2(a)中实线所示,并加入信噪比为 10 dB 的噪声。该运动误差量是由一个幅度为 0.03 m 的低频正弦信号和一个幅度为 0.0025 m 的高频正弦信号组成。在数据处理时,沿方位向上分子孔径进行处理,常规运动补偿

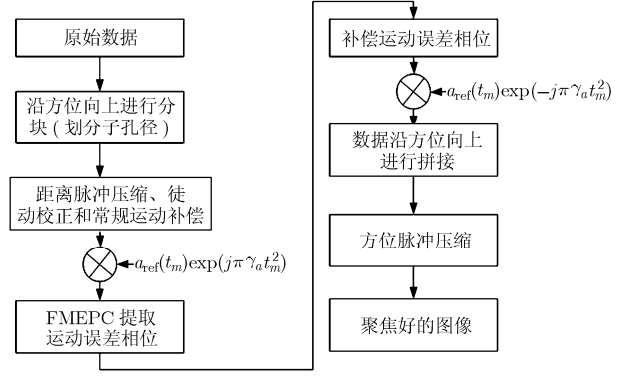


图 1 基于自聚焦相位估计的运动补偿方法数据处理流程图

方法是对每一个子孔径进行运动误差量估计,并利用这些误差量进行全孔径拟合,拟合后得到如图 2 中虚线所示的各个脉冲的运动误差估计量,最后利用这些估计得到的运动误差量进行运动补偿。图 2(a)所示是估计得到的运动误差量(虚线)和真实运动误差量(实线)的比较图,从图中可以看出虚线和实线之间的存在误差,这说明常规运动补偿方法无法进行有效地估计和补偿。图 2(b)为运动误差估计量(虚线)和运动误差低频分量(实线)的比较图,图 2(c)为图 2(b)椭圆区域的局部放大图。从这两个图中可以看出,运动误差的估计量虽然比较接近运动误差的低频分量,但还是会存在微小的差异。这说明常规运动补偿不能完全补偿掉运动误差的低频分量。通过对比图 2 中运动误差量及其估计量,可以看出常规运动补偿方法存在不足之处:一小部分低频分量和大部分高频分量无法得到补偿。

4.2 实测数据处理结果

本部分通过两组实测数据处理,验证本文方法的有效性。实测数据分别为 C 波段和 X 波段数据,距离分辨率分别为 0.5 m 和 0.3 m。

(1)C 波段数据处理结果 图 3(a)为常规运动补偿的成像图。由于载体运动不平稳,经过常规运动补偿后,从图像中基本可以得到场景的轮廓,但是还存在明显的散焦,如建筑物屋顶上的强散射点聚焦不好以及道路和田野的轮廓模糊不清。图 3(b)为进一步采用 PGA 方法进行处理的结果,从图中可以看出,经过自聚焦处理后建筑物附近区域成像效果明显改善,而对于田野区域成像效果并没有得到改善,这说明 PGA 只能对非均匀场景进行精聚焦。图 3(c)为本文方法得到的结果,图中可以看出整个场景的成像效果都得到较大的改善。为了进一步对比这 3 种方法,我们将局部图像进行了放大处理。图 4(a)为图 3(a)椭圆区域 1 的局部放大图,图 4(b)为图 3(c)椭圆区域 1 的局部放大图。从图 4 中两个图的比较可以看出本文方法可以改善城区的成像效果。图 5(a)为图 3(b)椭圆区域 2 的局部放大图,图

5(b)为图 3(c)椭圆区域 2 的局部放大图。在图 5(a)中田野轮廓变得很模糊，而在图 5(b)中田野的轮廓却是很清晰。从图 5 中两个图的比较可以看出本文方法同样可以改善田野区域的成像效果，而自聚焦方法没有使田野区域的聚焦效果得到提高。综上所述，常规运动补偿成像后加自聚焦跟常规运动补偿方法相比，可以提高局部区域的成像效果，而本文

提出的方法可以提高图像的整体成像效果。

(2)X 波段距离分辨率为 0.3 m 数据处理结果

图 6(a)是进行常规运动补偿后成像结果，从图中可以看出建筑物的轮廓模糊，屋顶上的强散射点出现明显的散焦。图 6(b)为本文方法的成像结果，可以明显看出图 6(b)与图 6(a)相比建筑物的聚焦效

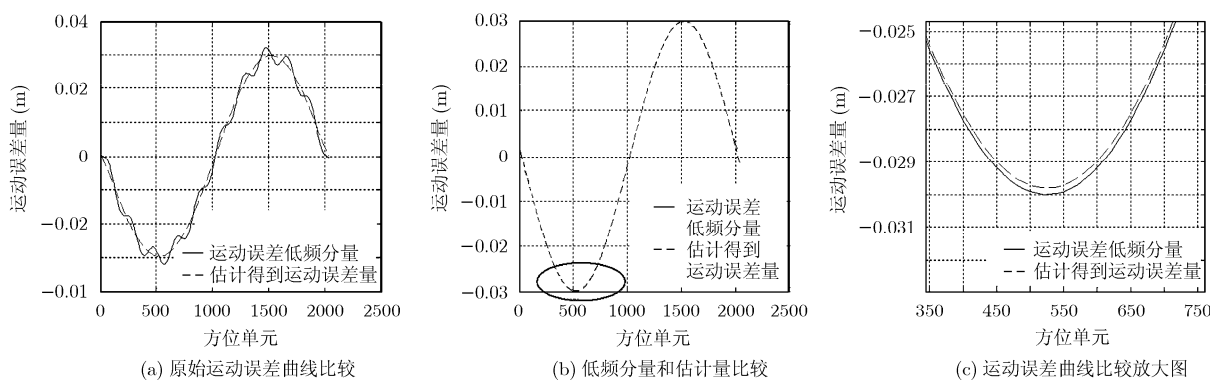


图 2 运动误差量和运动补偿量曲线

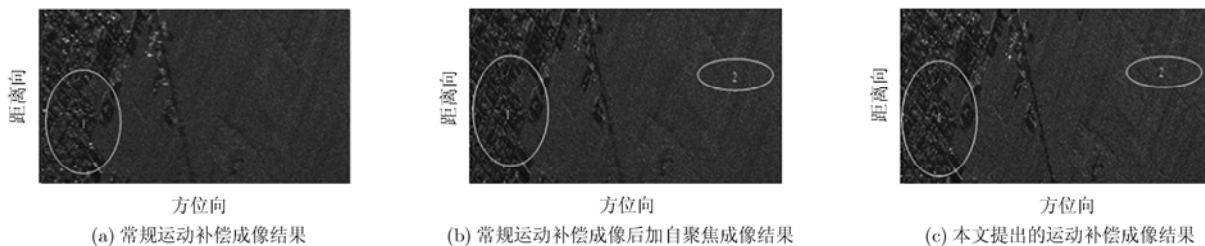


图 3 C 波段 0.5 m 分辨率成像结果

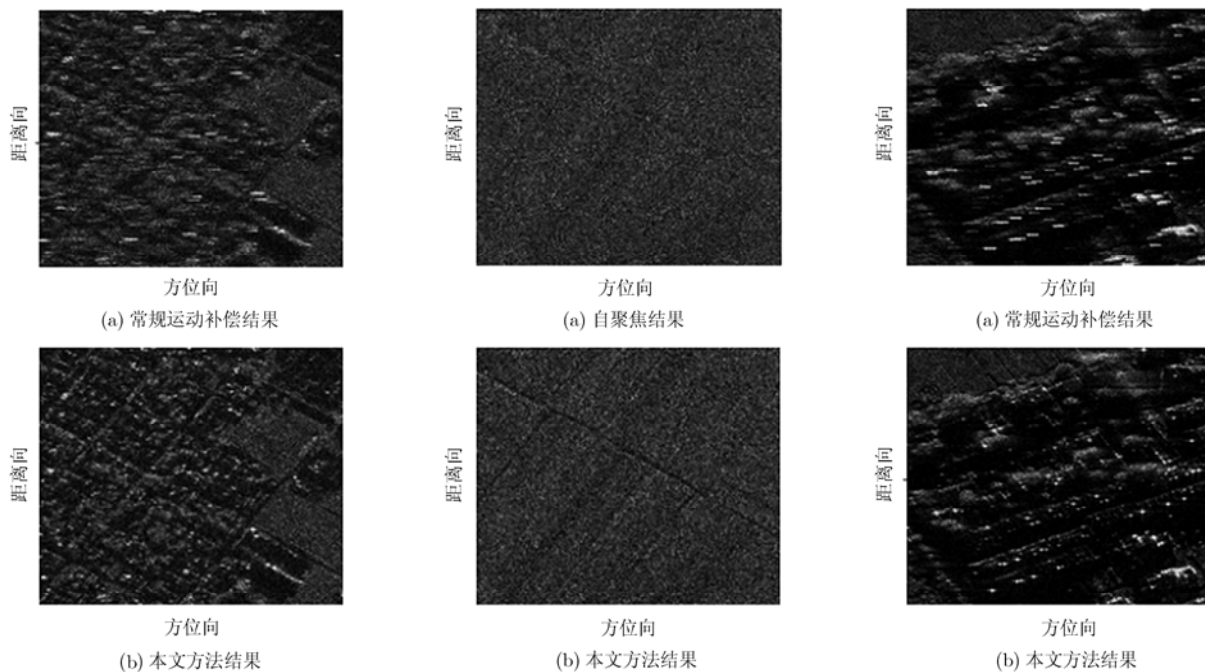


图 4 常规运动补偿和本文方法成像结果比较

图 5 自聚焦结果和本文方法成像结果比较

图 6 常规运动补偿和本文方法成像结果比较

果有很大的改善。这组数据的处理结果说明本文方法具有普适性,它适用于不同波段、不同分辨率的机载 SAR 成像处理。

5 结论

本文对文献[8]提出的运动补偿方法和文献[9]自聚焦方法进行了研究,分析了它们的不足及对 SAR 成像的影响。并在常规运动补偿方法的基础上,结合快速最小熵自聚焦方法 FMEA,提出了基于子孔径自聚焦的高频运动误差估计和补偿方法,并给出了该方法的成像处理流程图。最后对仿真数据进行运动误差分析和运用本文方法对不同波段不同分辨率的实测数据处理,实验结果说明了本文方法的有效性和可行性。

参 考 文 献

- [1] Carrara W G, Goodman R S, and Majewski R M. Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms [M]. Boston: MA, Artech House, 1995: 245-254.
- [2] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术. 北京: 电子工业出版社, 2005, 第 6 章.
- [3] Prats P, Câmara de Macedo A, Reigber K A, Scheiber R, and Mallorqui J J. Comparison of topography and aperture-dependent motion compensation algorithms for airborne SAR. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2007, 4(3): 349-353.
- [4] Yue Yang, Zhang Xiao-ling, and Jun Shi. Motion compensation for translational variant bistatic SAR using auto-correlation variance. IET International Radar Conference, Guilin, 2009: 1-4.
- [5] An Dao-xiang, Huang Xiao-tao, and Zhou Zhi-min. Two-step motion compensation of range migration algorithm for airborne spotlight SAR imaging. Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Xi'an, 2009: 350-353.
- [6] Zheng Ying-xi and Lü Ming, A design of motion compensation for high resolution imaging of missileborne SAR. International Conference on Communications, Circuits and Systems, Milpitas, 2009: 427-430.
- [7] Kennedy T A. Strapdown inertial measurement units for motion compensation for synthetic aperture radars. IEEE National Radar Conference, Michigan, 1988(10): 32-35.
- [8] Xing Meng-dao, Jiang Xiu-wei, and Wu Ren-biao. Motion Compensation for UAV SAR based on raw radar data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(8): 2870-2883.
- [9] Wahl D E, Eichel P H, Ghiglia D C, and Jakowatz C V. Phase gradient autofocus—A robust tool for high resolution SAR phase correction. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1994(30): 827-835.
- [10] 邱晓晖, Heng Wang Cheng Alice, and Yeo Siew Yam. ISAR 成像快速最小熵相位补偿方法. 电子与信息学报, 2004, 26(10): 1656-1660.
- Qiu Xiao-hui, Heng Wang Cheng Alice, and Yeo Siew Yam. Fast minimum entropy phase compensation for ISAR imaging. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2004, 26(10): 1656-1660.
- [11] Kolman J. Image reconstruction and restoration using constrained optimization algorithms. [Ph.D. dissertation], Purdue University, August, 1996.
- [12] Kolman Jesse and Lockheed Martin. PACE: an autofocus for SAR. IEEE International Radar Conference, Washington. 2005: 310-314.
- [13] Thomas Kragh J and Alaa Kharbouch A. Monotonic iterative algorithm for minimum-entropy autofocus. IEEE International Conference on Image Processing, Atlanta, 2006: 645-648.

张双喜: 男, 1984 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 的运动补偿和 SAR 抗干扰.

孙光才: 男, 1984 年生, 博士生, 研究方向为高分辨 SAR 成像算法、动目标检测成像.

周 峰: 男, 1980 年生, 副教授, 研究方向为高分辨 SAR 成像和 SAR 干扰及干扰抑制.