

# 基于回波数据的高分辨力机载 SAR 运动补偿<sup>1</sup>

雷万明 胡学成

(南京电子技术研究所 南京 210013)

**摘要:** 该文详细地分析了基于距离压缩数据的运动补偿和基于复图像的运动补偿的机理, 提出了基于回波数据的高分辨力机载 SAR 运动补偿算法。该算法采用子孔径技术, 利用修改的最大对比度法提取子孔径的多普勒调频斜率, 作距离压缩数据的时域运动补偿, 然后用 PGA 作复图像的频域运动补偿。实录数据的成像实验表明, 该算法能有效地克服单一运动补偿算法的场景依赖性, 获得比较满意的成像质量。

**关键词:** 运动补偿, 机载 SAR, 成像, PGA

**中图分类号:** TN957.51, TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)12-1908-07

## High Resolution Airborne SAR Motion Compensation Based on Echo Data

Lei Wan-ming Hu Xue-cheng

(Nanjing Research Institute of Electronic Technology, Nanjing 210013, China)

**Abstract** This paper amply analyzes the airborne SAR motion compensation mechanism on the range compression data and complex image data, and proposes a motion compensation algorithm for the high resolution airborne SAR. This algorithm makes use of the sub-aperture technique to estimate the sub-aperture's Doppler rate with the improved maximum contrast method, and then performs time-domain motion compensation for range compressing data and executes the frequency-domain motion compensation for complex image with PGA method. The raw data imaging result shows that the algorithm can effectively overcome the disadvantage of the scene dependence of the singularity motion compensation algorithm, and improve the SAR image quality.

**Key words** Motion compensation, Airborne SAR, Imaging, PGA

### 1 引言

SAR 的运动补偿分为基于运动传感器的运动补偿和基于回波数据的运动补偿两种方式, 前者主要利用地速控制脉冲重复频率, 通过地速跟踪消除因地速变化造成的方位向畸变; 利用径向速度补偿回波的多普勒频率变化, 消除载机横向运动偏差造成的飞机与目标之间的距离变化; 利用天线稳定平台补偿飞机的偏航、俯仰及滚转角变化, 保持天线波束指向预定的成像区域等。后者主要通过回波数据的相位补偿, 消除运动误差带来的相位误差, 实现高分辨力成像。本文主要研究后一种情况的运动补偿技术。

基于回波数据的运动补偿又分为两种, 一种是基于距离压缩数据的时域相位补偿<sup>[1,2]</sup>。这种算法通过将方位孔径划分为子孔径, 利用距离压缩后的数据分别提取回波的多普勒参数并计算运动误差相位, 在方位压缩之前作运动补偿。由于多普勒参数提取的场景依赖性和子孔径长度的限制, 会使部份子孔径的参数提取不准确, 导致算法的不稳定和图像的散焦。另一种是基于复图像的相位补偿<sup>[3]</sup>, 这种算法通过复图像的自聚焦处理补偿运动偏差带来的相位误差, 当载机的运动误差较大时, 没有时域运动补偿的复图像散焦会非常严重, 导致自聚焦处理后的图像仍存在散焦。针对两种运动补偿算法的缺点, 本文提出了基于 RD 算法的机载 SAR 运动补偿算法, 以有效地消除载机的运动误差。

<sup>1</sup> 2003-07-11 收到, 2004-03-15 改回

## 2 回波模型<sup>[4]</sup>

当载机在空中作理想的匀速直线运动时, 载机与地面目标之间的相对运动会使回波产生相位调制, 产生方位向的线性调频信号, 通过匹配滤波可获得方位向的高分辨力。在实际的 SAR 成像过程中, 由于大气湍流和 SAR 的平台性变化, 载机的飞行轨迹会偏离理想航线产生运动偏差。

机载 SAR 的成像几何关系如图 1 所示, 设载机的理想航线和实际轨迹分别为  $(x, h, 0)$  和  $(x, h + r_y(x), r_z(x))$ , 其中  $h$  为理想航线的离地高度,  $r_y(x)$  和  $r_z(x)$  分别是载机在垂直和水平方向与理想航线的偏差。由机载 SAR 的成像几何关系可知, 位于地面上  $(x_0, 0, d)$  的目标与载机的距离为

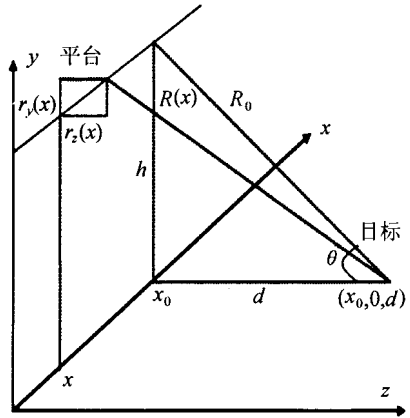


图 1 SAR 系统三维成像几何关系图

$$R(x) = \sqrt{(x - x_0)^2 + (h + r_y(x))^2 + (r_z(x) - d)^2} \quad (1)$$

如果用  $R_0 = \sqrt{h^2 + d^2}$  表示地面目标与理想航线的最近距离, 则利用  $r_y(x), r_z(x) \ll R_0$  可得

$$R(x) \approx R_0 \sqrt{1 + (x - x_0)^2 / R_0^2 - 2r(x) / R_0} \quad (2)$$

其中  $r(x) = -r_y(x) \sin \theta + r_z(x) \cos \theta$  是载机偏离理想航线带来的距离偏差, 实际上是二维向量  $(r_y(x), r_z(x))$  在斜距上的投影长度。当不考虑天线方向图、后向散射系数以及距离徙动时, 距离压缩后的目标回波可表示为

$$s(x) = \exp(j4\pi R(x) / \lambda) \quad (3)$$

其中  $x$  和  $\lambda$  分别表示方位位置和波长。

## 3 基于距离压缩数据的运动补偿

### 3.1 运动误差与方位聚焦参数的关系<sup>[4]</sup>

将信号  $s(x)$  与参考信号  $u(x)$  在合成孔径长度内相关, 可实现方位聚焦, 即

$$I(x) = \left| \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} s(x + x') u^*(x') dx' \right|^2 \quad (4)$$

其中 ‘\*’ 是共轭运算,  $L$  是参考函数长度。载机的实际轨迹是沿理想航线的扰动飞行, 参考函数必须与实际的飞行轨迹相匹配, 才能实现方位向的高分辨力。因此, 存在运动偏差时的方位参考函数为

$$u(x') = \exp \left[ j2\pi \frac{(1 - R_0 a(x))}{\lambda R_0} x'^2 \right] \quad (5)$$

其中  $a(x)$  与成像位置  $x$  有关, 并不依赖于  $x'$  的变化, 载机沿理想航线飞行时  $a(x) = 0$ 。将式 (5) 代入式 (4) 可得

$$I(x) = \left| \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} \exp \left[ j \frac{4\pi R(x + x')}{\lambda} \right] \exp \left[ -j \frac{2\pi(1 - R_0 a(x))}{\lambda R_0} x'^2 \right] dx' \right|^2 \quad (6)$$

将  $R(x)$  在  $x = x_1$  展开成泰勒级数, 并记  $R_1 = R_0 \sqrt{(x_1 - x_0)^2/R_0^2 - 2r(x_1)/R_0 + 1}$ , 则有

$$R(x) \approx R_1 + \frac{[(x_1 - x_0) - R_0 r'(x_1)]}{R_1} (x - x_1) + \frac{[1 - R_0 r''(x_1)]}{R_1} \frac{(x - x_1)^2}{2} \quad (7)$$

将  $R(x)$  入式 (6) 并利用  $R_0 \approx R_1$  可得

$$\begin{aligned} I(x) &= \left| \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} \exp \left[ j \frac{4\pi(x + x' - x_1)}{\lambda R_1} [(x_1 - x_0) - R_0 r'(x_1)] \right] \right. \\ &\quad \cdot \exp \left[ j \frac{2\pi(x + x' - x_1)}{\lambda R_1} [1 - R_0 r''(x_1)] \right] \exp \left[ -j 2\pi \frac{[1 - R_0 a(x)] r''(x_1)}{\lambda R_1} \right] dx' \left. \right|^2 \\ &\approx \left| \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} \exp \left[ j 2\pi \frac{x'^2}{\lambda R_0} (1 - R_0 a(x) - 1 + R_0 r''(x_1)) \right] \right. \\ &\quad \cdot \exp \left[ -j 2\pi \frac{2x'}{\lambda R_0} [R_0 r'(x_1) - (x_1 - x_0) - (x - x_1)(1 - R_0 r''(x_1))] \right] dx' \left. \right|^2 \quad (8) \end{aligned}$$

其中  $r'(x)$ ,  $r''(x)$  是  $r(x)$  的一阶和二阶导数。式 (8) 中的二次相位项会使  $I(x)$  的主瓣展宽产生散焦, 为了获得最优聚焦, 应选取参数  $a(x)$  使  $1 - R_0 a(x) - 1 + R_0 r''(x_1) = 0$ , 从而可得  $a(x)$  为

$$a(x) = r''(x_1) \quad (9)$$

泰勒级数展开中  $x_1$  的选取是任意的, 当选取  $x_1$  为  $x$  时有  $a(x) = r''(x)$ 。利用  $a(x)$  的二次积分可计算载机偏离理想航线的距离为

$$r(x) = \int_0^x \int_0^{x'} a(x'') dx'' dx' + xr'(0) + r(0) \quad (10)$$

### 3.2 基于距离压缩数据的运动补偿

利用距离与相位的关系可得方位向位于  $x_0$  的目标的回波相位为

$$\phi_r(x) = (4\pi R_0/\lambda) \sqrt{1 + (x - x_0)^2/R_0^2 - 2r(x)/R_0} \quad (11)$$

式 (11) 是载机偏离理想航线时的回波相位。当载机沿理想航线飞行时, 回波相位为

$$\phi_n(x) = (4\pi R_0/\lambda) \sqrt{1 + (x - x_0)^2/R_0^2} \quad (12)$$

载机偏离理想航线带来的相位误差  $\phi_c(x) = \phi_n(x) - \phi_r(x)$  为

$$\phi_c(x) \approx \frac{4\pi r(x)}{\lambda} = \left[ 4\pi \int_0^x \int_0^{x'} a(x'') dx'' dx' + xr'(0) + r(0) \right] / \lambda \quad (13)$$

由式 (11) 和式 (12) 可知, 如果将距离压缩后的数据乘以  $\exp(j\phi_c(x))$ , 则可消除载机偏离运动带来的相位误差, 将载机的实际飞行轨迹校正为直线。载机偏离理想直线的运动误差相位由  $a(x)$  决定, 理论上须通过式 (8) 分别估计每个  $x$  的  $a(x)$  才能准确地估计运动偏差相位, 这使估计  $a(x)$  的运算量变得非常大且有可能估计不准。实际上, 载机在空中飞行时尽管存在偏离理

想直线的运动, 但在很短的时间内可视为沿直线飞行, 使  $r''(x)$ (亦即  $a(x)$ ) 在这段短时间内可近似为常数, 因而可利用短时间段的子孔径数据估计  $a(x)$ 。

在 SAR 成像处理中, 方位参考函数通常都是利用多普勒调频率来表示, 由于子孔径长度内  $a(x)$  为常数, 因而方位参考函数可利用多普勒调频率表示为

$$u(s') = \exp \left[ j2\pi \frac{(1 - R_0 a(s)) V^2}{\lambda R_0} s'^2 \right] = \exp[-j\pi(f_{DR_0} + \Delta f_{DR} s'^2)] = \exp[-j\pi f_{DR} s'^2] \quad (14)$$

其中  $f_{DR_0} = -2V^2/(\lambda R_0)$  是载机理想飞行时的多普勒调频率,  $\Delta f_{DR} = 2a(s)V^2/\lambda$  是载机偏离理想航线引起的多普勒调频率的变化,  $f_{DR} = f_{DR_0} + \Delta f_{DR}$ 。相应地, 相位校正函数变为

$$\phi_c(s) = 2\pi \int_0^s \int_0^{s'} \Delta f_{DR} ds'' ds' + 4\pi \cdot \frac{Vs \cdot r'(0) + r(0)}{\lambda} \quad (15)$$

常数项对成像没有影响, 一次项会使图像产生方位移位, 但这种移位可通过图像的拼接加以消除, 因而时域运动补偿相位可表示为

$$\phi_c(s) = 2\pi \int_0^s \int_0^{s'} \Delta f_{DR} ds'' ds' \quad (16)$$

通过估计  $f_{DR_0}$  和  $f_{DR}$ , 然后由  $\Delta f_{DR} = f_{DR} - f_{DR_0}$  可计算出补偿相位  $\phi_c(s)$ 。

上述结论是在假设子孔径长度内  $a(x)$  为常数时得出的,  $\Delta f_{DR}$  能否真实地反映载机的运动状态与子孔径长度有关, 而子孔径长度的选择与机载平台和分辨力有关, 不同的载机和分辨力所要求的子孔径长度不同。在高分辨力机载 SAR 系统中, 为了估计  $\Delta f_{DR}$  所选取的子孔径长度一般比合成孔径长度小得多, 因而应根据所选用的机载平台和分辨力确定估计  $\Delta f_{DR}$  所需的方位子孔径长度, 然后利用式 (16) 估计相位误差并与数据相乘作时域运动补偿。另外, 理想航线是一条实际并不存在的虚拟航线, 在不破坏前面的近似公式的前提下可任意选取, 实际应用中可将分段估计的  $f_{DR}$  的均值作为  $f_{DR_0}$ , 基于距离压缩数据的运动补偿算法流程如图 2 所示。

运动补偿的关键是子孔径长度的确定和多普勒调频率  $f_{DR}$  的提取。由于提取  $f_{DR}$  所用的子孔径长度一般都比合成孔径长度小得多, 许多现有提取算法并不适合这种短孔径的调频率提取。为此, 我们提出了一种基于方位去斜处理的最大对比度法提取多普勒调频率, 提取步骤为

(1) 根据载机的速度范围  $[V_{min}, V_{max}]$ , 将速度划分为  $V_1, V_2, \dots, V_N$ 。

(2) 根据  $V_i$  计算多普勒调频率  $f_{DR_i} = -2V_i^2/(\lambda R)$  和参考函数  $ref(s) = e^{-j\pi f_{DR_i} s^2}$ 。

(3) 回波数据与参考函数  $ref(s)$  相乘并作方位 FFT, 获得方位压缩后的实图像。

(4) 计算实图像的对比度  $C = (\sigma + M)/M$ ,  $\sigma$  和  $M$  分别是图像幅度的方差和均值, 如果对比度大于  $V_1, \dots, V_{i-1}$  的对比度, 则记  $V = V_i$ 。

(5) 如果  $i < N$ , 则返回第 (2) 步。

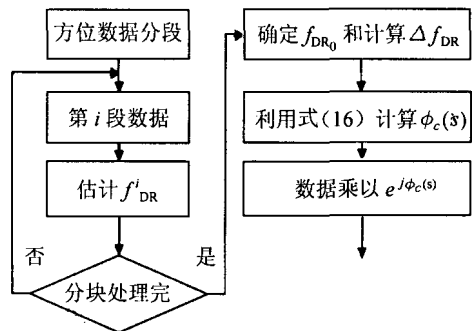


图 2 基于距离压缩数据的运动补偿流程

(6) 根据估计出来的  $V$ ，计算多普勒调频斜率  $f_{DR} = -2V^2/(\lambda R)$ 。

### 4 基于复图像的运动补偿

由于子孔径长度较短和多普勒调频斜率估计算法的场景依赖性，无论利用何种算法估计多普勒调频斜率，必然会有部分子孔径的多普勒调频斜率估计不准，导致图像散焦，因而需在复图像域进一步补偿残余运动误差。

图像的散焦相当于聚焦的图像与一个二次或更高次的相位函数相卷积的结果，在频域则相当于乘以一个二阶更高阶的相位函数。如果用  $f(s)$  和  $d(s)$  分别表示方位向的聚焦函数和散焦后的数据，则它们在频域的关系可表示为  $D(\omega) = F(\omega) \cdot \exp(j\phi(\omega))$ ，其中  $D(\omega)$  和  $F(\omega)$  分别是  $f(s)$  和  $d(s)$  的 Fourier 变换。为了得到聚焦的 SAR 图像，只须利用复图像估计相位误差  $\phi(\omega)$ ，然后加以补偿即可。在相位误差估计算法中，PGA 是基于非模型的相位误差估计算法，具有收敛速度快、相位估计精度高以及较好的鲁棒性等特点，对低阶和高阶相位误差都有非常好的补偿能力<sup>[5,6]</sup>，因而可利用 PGA 算法在复图像域补偿残余运动误差。

在条带式成像中，为了得到一个合成孔径长度的图像，需处理两个孔径的方位数据，飞机的扰动会使不同方位的数据具有不同的相位误差。因此，与距离压缩数据的时域运动补偿算法一样，利用 PGA 估计相位误差时，也需根据分辨率和平台的特性划分子孔径长度，分段估计散焦相位  $\phi(\omega)$  以及进行相位补偿。为了消除多普勒调频斜率误差带来的图像移位，子孔径的划分应重叠进行。基于复图像的 PGA 运动补偿算法处理流程如图 3 所示(单个子孔径)，分为下面的主要处理步骤：

(1) 移位 沿方位向从左至右寻找图像幅度最大点(假设它的位置为  $s_c$ )，然后对该距离门的方位数据进行圆周移动，将散射点移到方位图像中心，消除时移  $s_c$  的影响。

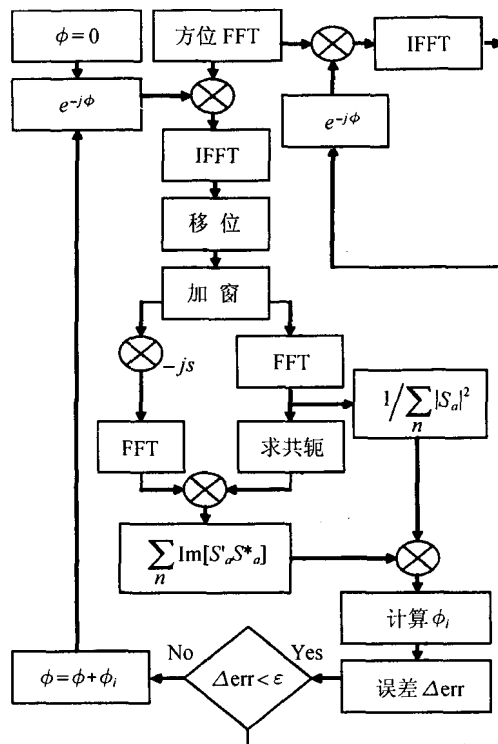


图 3 基于复图像的运动补偿算法流程

- (2) 加窗 以图像中心为窗口中心，通过加窗消除未处于图像中心的点的影响。
- (3) 计算相位梯度  $\phi_{\text{grad}}$

$$\phi_{\text{grad}} = \sum_n \text{Im}[S'_a(\omega)S_a^*(\omega)] / \sum_n |S_a(\omega)|^2 \tag{18}$$

式中  $n$  代表距离向的单元数， $S_a(\omega)$  为方位图像的 Fourier 变换，图中求导运算应用了 Fourier 变换的导数性质，即  $-jtS_a(t) \Leftrightarrow dS_a(\omega)/d\omega$ 。

- (4) 相位计算 利用相位梯度的积分计算补偿相位  $\phi_i$ ，即

$$\phi_i = \int_{-f_r/2}^{f_r/2} \phi_{\text{grad}} df \tag{19}$$

式中  $f_r$  为脉冲重复频率，积分时需去掉引起图像移位的线性偏差项。

### 5 基于 RD 算法的机载 SAR 运动补偿算法

基于距离压缩的运动补偿需通过子孔径处理提取多普勒调频斜率，估计相位误差实现运动补偿。通过修改 RD 算法，在子孔径进行距离徙动校正，可将 RD 算法与两种运动补偿算法结合起来，实现机载 SAR 的精密成像。结合两种运动补偿算法的 RD 成像处理流程如图 4 所示。

### 6 成像实验

根据本文提出的运动补偿算法，我们利用某次试飞的 1m SAR 数据进行了成像实验。1m SAR 的机载平台能近似为直线飞行的时间为 1s 左右，而方位 1m 分辨力所需要的合成孔径时间长达 10 多秒钟，远远大于飞机能平稳飞行的时间，成像过程中必须进行运动补偿，才能实现方位分辨力要求。

实验数据的方位长度为两个合成孔径长度，在基于距离压缩数据的时域运动补偿中，方位子孔径长度取 2048 点。在基于复图像的频域运动补偿中，方位子孔径长度取 1024 点，子孔径之间采用了重叠处理。图 5、图 6 和图 7 分别是未作运动补偿、基于距离压缩数据的运动补偿和两种运动补偿相结合的 SAR 图像。从图 5 可知，在高分辨力机载 SAR 中，载机在空中的扰动对成像的影响非常大，不同方位目标的散焦程度不一样，不通过运动补偿根本无法成像。图 6 说明基于距离压缩数据的时域运动补偿尽管能极大地改善聚焦效果，但如果参数提取不准确仍会使图像散焦，只不过程度已大大减轻。由图 7 可知本文提出的运动补偿算法能有效地消除载机的运动误差，实现 SAR 图像的最优聚焦。

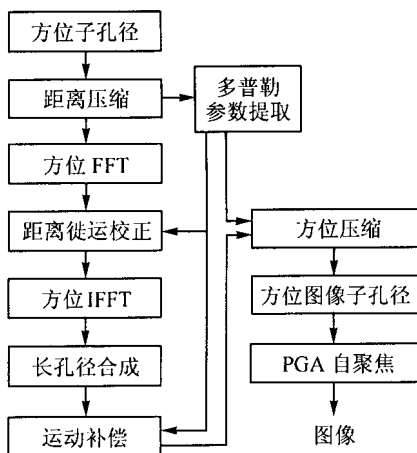


图 4 基于 RD 算法的机载 SAR 运动补偿流程

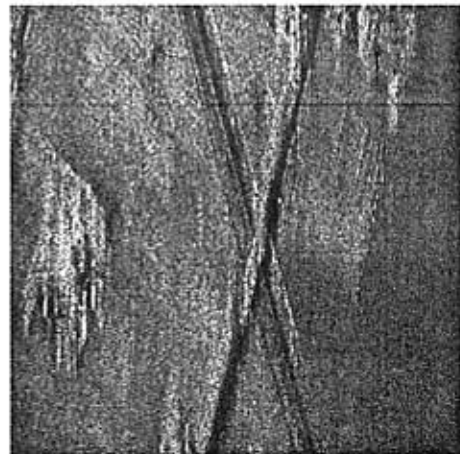


图 5 没有运动补偿的 1m SAR 图像

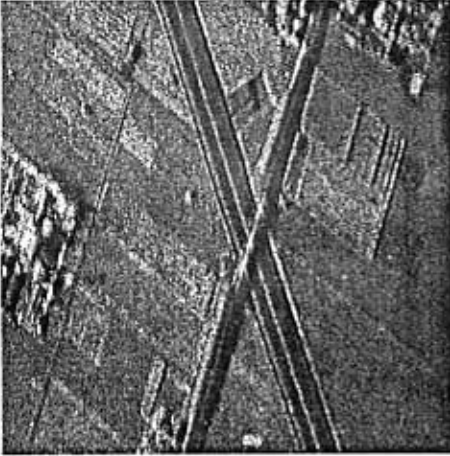


图6 基于距离压缩数据运动补偿后的 1 m SAR 图像      图7 基于两种运动补偿的 1 m SAR 图像

## 7 结论

绝大多数多普勒参数估计算法的场景依赖性, 决定了基于距离压缩数据的运动补偿算法的场景依赖性, 使得这种运动补偿算法的性能不稳定, 导致成像质量时好时坏。同样, 基于复图像的运动补偿, 在提取相位误差时也具有场景依赖性。运动补偿算法的场景依赖性通过改进算法, 提高估计精度可得到一定程度的改善, 但并不能完全消除。只有将两类运动补偿算法结合起来, 互相取长补短, 才能有效地消除载机运动误差, 获得满意的图像质量。

## 参 考 文 献

- [1] Moreira A, Huang Yonghong. Airborne SAR processing of highly squinted data using a chirp scaling approach with integrated motion compensation. *IEEE Trans. on GRS*, 1994, 32(5): 1029-1040
- [2] Moreira J R. A new method of aircraft motion error extract from radar raw data for real time motion compensation. *IEEE Trans.on GRS*, 1990, 28(4): 620-626.
- [3] Gallon A, Impagnatiello F. Motion compensation in chirp scaling SAR processing using phase gradient autofocus. IGARSS '98, Alenia, Aerospazio, Rome, Italy, 1998: 633-635.
- [4] Blacknell D, Freeman A, et al.. Geometric accuracy in airborne SAR images. *IEEE Trans. on AES*, 1989, 25(2): 241-255.
- [5] Wahl D E, Eichel P H, Ghiglia D C, et al.. Phase gradient autofocus—a robust tool for high resolution SAR phase correction. *IEEE Trans. on AES*, 1994, 30(3): 827-835.
- [6] Eichel P H, Wahl D E. Phase gradient algorithm as an optional estimator of the phase derivative. *Optics letters*, 1989, 14(20): 1101-1103.

雷万明: 男, 1964年生, 工程师, 博士, 研究方向为信号处理、主要从事 SAR 信号处理系统、SAR 成像处理等方面的研究。

胡学成: 男, 1964年生, 高级工程师, 博士生, 研究方向为信号处理、主要从事 PD 雷达信号、SAR 成像等方面的研究。