

多通道 SAR 误差估计与补偿方法及其实测数据验证

马 仑 廖桂生 李真芳

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

摘 要: 多通道 SAR 系统能够突破最小天线面积条件的约束, 同时获得宽测绘带、高分辨率的 SAR 图像。相对于单通道 SAR 系统, 多通道系统中存在更多的误差源, 这将大大降低 SAR 图像的质量。利用一组三通道 SAR 实测数据作为实验对象, 根据各种误差源对 SAR 成像处理的影响, 对系统中可能存在的各种误差源进行了分类并给出相应补偿方法。实测数据的处理结果验证了以上方法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 多普勒模糊; 分布式小卫星; 波束形成

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)06-1305-05

An Approach for Multi-channel SAR Array Error Compensation and Its Verification by Measured Data

Ma Lun Liao Gui-sheng Li Zhen-fang

(National lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Multi-channel SAR system can avoid the minimum antenna area constraint, thus achieving wide swath and high resolution SAR image. There are more deleterious factors in multi-channel SAR system compared with single-channel SAR system, which may degrade the quality of SAR image greatly. In this paper, all the deleterious factors in the system are analyzed and classified according to their impact on the SAR imaging processing, and approaches of array error estimation and its compensation are presented, respectively. The validity of the proposed method is verified by experimental results of measured Tri-channel SAR data.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Doppler aliasing; Distributed small satellites; Beamforming

1 引言

未来的合成孔径雷达(SAR)要求对大面积区域进行高分辨率实时监控, 这对 SAR 系统提出了更高的要求。传统 SAR(特别是星载 SAR)系统受到最小天线面积条件的限制, 无法同时获得宽测绘带、高分辨率的 SAR 图像。为了获得宽测绘带而不产生距离模糊, 雷达脉冲重复频率不能太高; 而为了不产生多普勒模糊, 天线的方位波束必须较窄, 即天线的方位孔径不能太短, 这就限制了方位分辨率的提高。

针对上述矛盾, 国内外很多文献提出了各种折衷的办法^[1,2], 但这些方法仍然无法突破最小天线条件的限制。将一个传统大天线分割成若干个小孔径子阵进行发射和接收, 再对接收的回波数据进行相干联合处理, 是解决此矛盾的一种可行途径^[3]。即小孔径天线可以覆盖足够宽的观测带和实现高方位分辨率, 而联合多个小孔径天线接收的回波信号可以解决距离/多普勒模糊(多个接收天线接收数据相当于增加了空间采样位置), 可以同时获得大测绘带和高分辨率的 SAR 图像。特别是近年来国内外广泛研究的分布式小卫星 SAR 体制^[3,4], 即将小孔径天线分别放置在编队飞行的小卫星平台

上, 是一种非常有前景的实现系统。

关于解决多通道 SAR 系统的小孔径天线接收模糊问题, 是当前研究的一个重点方向。国内外文献提出了各种抑制多普勒模糊的方法^[4-6]。理想条件下, 以上方法都能够较好地恢复出无模糊的地面场景信息。但在实际系统中不可避免地存在多种误差源, 包括定时误差、波束指向误差、频率同步误差、基线误差、通道误差和偏航(导致各个子孔径天线非沿航向直线排列)等, 这些误差严重制约着上述方法的性能。由于多通道 SAR 实测数据的匮乏, 在以往文献中对这些误差的综合考虑较少。这些误差源对多通道 SAR 成像处理会产生不同的影响。本文将根据误差源导致的不同影响, 对它们进行分析和分类, 进而联合估计并补偿。

我们与某研究所合作, 录取了一批三通道 SAR 的实测数据。本文以这批实测数据作为实验对象, 验证以上误差估计和补偿的方法。

2 多通道 SAR 的信号模型及多普勒模糊

定义多通道 SAR 系统的坐标系: X 轴为雷达速度方向(平行于地面), Z 轴垂直于地面向上, Y 轴垂直于 X 轴与 Z 轴所确定的平面, 构成右手直角坐标系。本实验中的机载 SAR 系统以条带模式录取数据, 正侧视观测; 采用波导缝隙天线, 共有 3 个子阵, 各子阵天线沿航向均匀放置, 相邻子

阵的相位中心相距 0.559m; 采用一发多收体制, 当基线长度不十分长时, 可等效为所有子阵各自收发, 只是相位中心移至原发、收子阵连线的中心(同时需对回波补偿一个常数相位)^[7], 等效后各子阵相距 0.2795m。\$t, \tau\$ 分别表示方位慢时间和距离快时间, 在 \$t = 0\$ 时刻, 第 1 个子阵的坐标为 \$(0, 0, 0)\$ (参考阵元), 第 \$m\$ 个子阵的坐标为 \$(x_m, y_m, z_m)\$ (\$m = 1, 2, \dots, M, M\$ 为通道数)。若参考通道在某一距离单元接收的回波数据为 \$s_1(t, \tau)\$, 无误差情况下, \$m\$ 通道接收的回波数据为 \$s_m(t, \tau) = s_1(t + x_m/v_s, \tau)\$ (\$v_s\$ 为平台运动速度)。将回波数据沿方位慢时间作傅里叶变换至多普勒域, 得到:

$$S_m(f_d, \tau) = e^{j2\pi f_d x_m / v_s} \cdot S_1(f_d, \tau) \quad (1)$$

式中 \$f_d\$ 表示多普勒频率, \$S_1(f_d, \tau)\$ 和 \$S_m(f_d, \tau)\$ 分别为 \$s_1(t, \tau)\$ 和 \$s_m(t, \tau)\$ 的傅里叶变换。

本试验的多通道 SAR 系统工作在 X 波段, 每个子阵的方位孔径大小为 0.552m, 载机的速度为 120m/s, 考虑到各种实际因素主瓣地面场景回波的多普勒谱限制在大约 \$[-300, 300]\$Hz 的范围内。脉冲重复频率 \$f_r = 200\$Hz, 这将导致回波信号在多普勒域模糊 3 次, 模糊多普勒谱的数学描述如下:

$$S_m(f_d, \tau) = \sum_{i=-1}^1 e^{j4\pi x_m \sin \phi_i(f_d) / \lambda} S_1(f_d + if_r, \tau), \quad i = -1, 0, 1 \quad (2)$$

其中

$$\sin \phi_i(f_d) = \lambda(f_d + if_r) / (2v_s) \quad (3)$$

式中 \$f_d\$ 的取值范围为 \$[-f_r/2, f_r/2]\$。由于 \$f_d = 2v_s \sin \phi / \lambda\$ (\$\phi\$ 为雷达至目标射线相对速度向量法平面的斜视角), 式(2)表示对于同一多普勒频率将有来自 3 个方位角 (\$\phi_{-1}(f_d)\$, \$\phi_0(f_d)\$ 和 \$\phi_1(f_d)\$) 回波信号。如果对任一子阵的回波数据作 SAR 成像处理, 每一个 SAR 像素对应 3 个不同方位地面散射单元回波的叠加, 这将导致无法得到清晰的 SAR 图像。

联合各通道的回波数据可以重构完整的无模糊多普勒谱。处理方法的基本思想为: 基于 SAR 回波多普勒谱的缓变性, 每一个多普勒单元输出都与一定的射线方位角相对应, 本文中一个多普勒单元对应多个方位角; 对每个多普勒输出利用多通道阵列作空域滤波处理, 分别取出所有谱分量, 并拼接成无模糊的完整谱; 最后利用传统 SAR 成像处理获得高质量的 SAR 图像。理想条件下, 以上方法能够较好地恢复完整的多普勒谱, 但在误差环境下, 多普勒模糊抑制性能将大大降低。下一节将根据实际系统中存在的各种误差源对多通道 SAR 成像处理的影响对其进行分析和分类。

3 多通道 SAR 系统误差分析

下面分析影响多普勒模糊抑制性能的几种主要因素。首先, 实现空域滤波的权矢量与空域导向矢量联系密切^[3], 当导向矢量存在误差时, 将使增益约束方向无法对准需要取出的谱分量, 导致信噪比损失。其次, 当各通道的地面回波谱沿距离向没有对齐(配准)时, 多通道联合数据矢量将不代表相同的地面单元, 从而无法有效地对消掉模糊分量。另外,

对多通道的数据进行相干联合处理要求各通道数据之间的相干性足够高, 否则将导致多普勒模糊抑制性能下降。综上所述, 误差源的影响可以分成如下 3 大类:

(1) 各通道杂波谱在距离快时间域没有对齐, 即回波包络的时延不同, 称为包络配准误差。这类误差源包括: 时间同步误差(定时误差)、频率同步误差、偏航导致的垂直航向基线分量。

时间同步误差(定时误差)是指多通道 SAR 系统采样触发脉冲的时间不一致性或抖动, 导致各通道回波包络时延不同。频率同步误差指接收本振与发射载频的不一致性。固定频率误差将使目标像的位置产生偏移。偏航指运动平台在各种干扰力矩(例如风速)的影响下, 具有垂直于航向的速度分量, 导致垂直航向基线的存在, 从而引起包络配准误差。

(2) 多普勒谱分量的导向矢量不准确, 称为导向矢量误差。这类误差源包括: 通道之间的幅相误差、基线误差。

幅相误差由通道不一致性引起, 将使空域导向矢量产生幅度和相位的扰动分量。基线误差指各通道的空间坐标与测量值不一致, 可以分为沿航向基线误差(即 \$x_m\$)和垂直航向基线误差(\$y_m\$ 和 \$z_m\$)。将式(2)中的指数项矢量化, 即为第 \$i\$ 个模糊分量的空域导向矢量:

$$\mathbf{p}_i(f_d) = [1, e^{j4\pi x_2 \sin \phi_i(f_d) / \lambda}, \dots, e^{j4\pi x_M \sin \phi_i(f_d) / \lambda}]^T \quad (4)$$

由式(4), 在其它参数固定后空域导向矢量主要由通道间的沿航向基线来决定, 当垂直基线不太大时垂直航向基线误差可以等效为幅相误差^[7]。

(3) 相干性降低导致模糊抑制性能降低, 称为相干性误差。这类误差源包括: 波束同步误差、各通道之间的频率特性误差。

波束同步误差主要是波束指向同步误差, 指各通道波束照射中心未对准参考通道(发射通道)的波束照射中心, 这将会直接影响回波谱的多普勒中心, 减少各通道多普勒谱的公共部分。而且非公共多普勒谱的存在, 会导致多通道数据之间的相干性降低, 称为相干性误差。

频率特性误差是指各通道之间的频率响应特性存在差异, 通道频率响应的差异会导致各通道接收数据的频率特性差异, 从而也降低了相干性。

综上所述, 虽然多通道 SAR 系统中存在多种误差源, 但从影响多普勒模糊抑制性能的角度来看, 它们主要导致包络配准、空域导向矢量和去相干性三大类误差。因此, 我们只需考虑以上三大类误差, 而无须对所有误差源分别进行估计和补偿, 从而便于实际实现。

4 多通道 SAR 系统误差估计及补偿方法

本节具体介绍各种误差的估计和校正方法, 最后给出一种提高导向矢量稳健性的方法。

4.1 包络配准误差

如第 2 节所述, 当各通道的地面回波谱沿距离向没有对

齐(配准)时,多通道联合数据矢量将不代表相同的地面单元,从而无法有效地对消掉模糊分量。

在 InSAR 处理中,可以通过图像配准处理技术完成各通道回波数据的配准。然而,对于本文讨论的小孔径天线发射/接收系统,在抑制多普勒模糊前图像是模糊的(相当于图像信噪比很低),因此无法采用 InSAR 图像配准技术。但单次回波数据却不存在多普勒模糊。因此,我们对各通道的回波数据完成距离压缩处理后(称为一维距离像),再利用相关法估计配准延迟量,从而得到各通道相对于参考通道的包络配准误差。为了提高进行相关处理的各通道的一维距离像的相关性,我们首先将各子阵的回波在慢时间域延时几个脉冲重复周期后等效成一个短阵列,具体做法如下:将第 m 个接收通道的沿航向坐标分解成如下两部分:

$$x_m = k_m v_s T_r + \delta x_m \quad (5)$$

式中 k_m 是一个整数, $0 \leq \delta x_m \leq v_s T_r$ (T_r 为脉冲重复周期)。然后对各通道接收的脉冲回波在慢时间域延时 $k_m T_r$,从而将接收阵列等效压缩成一个最大长度只有 $v_s T_r$ 的短阵列。延时后阵列的沿航向位置为 $[0, \delta x_2, \dots, \delta x_M]$ 。这相当于选取各通道最接近的空间采样位置处的回波进行相关处理。这是因为空间采样位置越接近,回波的相关性越高。

接下来,对每个通道的回波数据进行距离脉冲压缩处理。为了提高估计精度还需要对一维距离像进行插值处理(可以进行几十倍插值),然后再利用相关法估计包络配准偏移量(相对于参考通道)。为了消除包络配准误差随方位的空变性,还可以对回波数据沿方位向分块,对块内多个估计值平均能够提高误差的估计精度。下面是这批机载三通道 SAR 实测数据的包络对齐处理结果。图 1(a) 为 2 号通道与参考通道(即 1 号通道)回波包络的相关函数(插值倍数为 100 倍),图 1(b) 为 3 号通道与参考通道回波包络的相关函数。平均后,两通道相对于参考通道的距离向配准误差分别为 0.43 和 1.12 个距离单元。

4.2 导向矢量误差

如第 2 节所述,实现空域滤波的权矢量与空域导向矢量联系密切,当导向矢量存在误差时,将使增益约束方向无法对准需要取出的谱分量,导致信噪比损失。存在基线误差以及幅相误差时,第 i 个模糊分量的空域导向矢量重新写为下式:

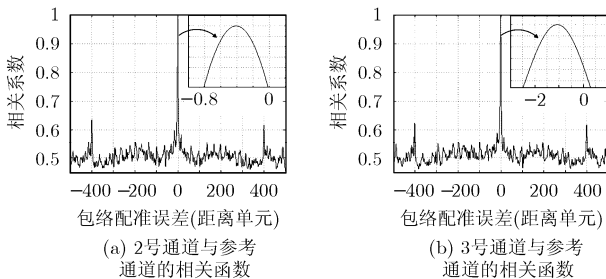


图 1 两通道与参考通道相关后的相关函数(实测数据处理结果)

$$\mathbf{p}_i(f_d) = [1, g_2 e^{j\kappa_2} \cdot e^{j4\pi(x_2 + \Delta x_2) \sin \phi_i(f_d) / \lambda}, \dots, g_M e^{j\kappa_M} e^{j4\pi(x_M + \Delta x_M) \sin \phi_i(f_d) / \lambda}]^T = \mathbf{\Gamma} \mathbf{p}'_i(f_d) \quad (6)$$

其中

$$\mathbf{p}'_i(f_d) = [1, e^{j4\pi(x_2 + \Delta x_2) \sin \phi_i(f_d) / \lambda}, \dots, e^{j4\pi(x_M + \Delta x_M) \sin \phi_i(f_d) / \lambda}]^T \quad (7)$$

其中 $g_m e^{j\kappa_m}$ 包含第 m 个通道自身的幅相误差和由于垂直航向基线误差引起的相位误差, Δx_m 为第 m 个通道相对于参考通道的沿航向基线误差, $\mathbf{\Gamma} = \text{diag}\{1, g_2 e^{j\kappa_2}, \dots, g_M e^{j\kappa_M}\}$, $\text{diag}\{\bullet\}$ 表示将矢量对角化。

本文的目的就是精确估计 $\mathbf{\Gamma}$ 以及 Δx_m 。如第 2 节所述,对于同一多普勒频率将有来自 3 个方位角 ($\phi_{-1}(f_d)$, $\phi_0(f_d)$ 和 $\phi_1(f_d)$) 的杂波谱。由于其方位角是已知的,所以可以把这 3 个杂波谱分量作为校正源,利用阵列自校正方法估计 $\mathbf{\Gamma}$ 和 Δx_m 。具体操作步骤为:用任一距离-多普勒单元的阵列输出矢量形成协方差矩阵 $\mathbf{R} = E\{\mathbf{s}(f_d, \tau) \mathbf{s}^H(f_d, \tau)\}$, $\mathbf{s}(f_d, \tau)$ 为多通道输出矢量, $\mathbf{s}(f_d, \tau) = [S_1(f_d, \tau), S_2(f_d, \tau), \dots, S_M(f_d, \tau)]^T$ 。对协方差矩阵进行特征分解,得到 M 个特征值。假定这 M 个特征值满足 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \gg \dots \lambda_M$, 即 3 个大特征值(这是由于本文中多普勒模糊次数为 3)和 $M-3$ 个小特征值。这 $M-3$ 个小特征值所对应的特征向量 $\mathbf{U}_N = [\mathbf{u}_1 \dots \mathbf{u}_M]$ 构成噪声子空间, 3 个大特征值对应的特征向量 $\mathbf{U}_S = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3]$ 则构成信号子空间,且信号子空间与噪声子空间是正交的。空域导向矢量 $\mathbf{p}_i(f_d)$ 应位于信号子空间内,所以 $\mathbf{p}_i(f_d)$ 正交于噪声子空间。利用该正交性关系,定义代价函数:

$$J_c = \mathbf{p}_i^H(f_d) \mathbf{U}_N \mathbf{U}_N^H \mathbf{p}_i(f_d) \quad (8)$$

当代价函数达到最小时即为空域导向矢量 $\mathbf{p}_i(f_d)$ 的精确估计。

定义沿航向基线误差矢量 $\Delta \mathbf{x} = [\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_M]$ 。估计过程分为如下两步:第一步,固定 $\Delta \mathbf{x}$, 将 $\mathbf{p}_i(f_d)$ 向噪声子空间投影^[8]估计幅相误差矩阵 $\mathbf{\Gamma}$; 第二步,利用第一步的结果,固定 $\mathbf{\Gamma}$ 估计基线误差矢量 $\Delta \mathbf{x}$ 。依次迭代,直到结果收敛。

这里需要说明的是,本试验系统的通道数仅为 3 个,而多普勒模糊数同样为 3 个,这使得噪声子空间的维数为零,而上述方法要求通道数大于模糊数。实验中,参考通道的方位采样率为 400Hz(而其它通道的方位采样率为 200Hz),因此在对参考通道的回波脉冲抽取后得到 1 个附加通道,从而使得通道数变为 4(由于我们的目的只是为了增加一个空间采样点,这里同样可以利用其它通道形成辅助通道)。

最后估计得到的其它两通道相对于参考通道的幅度误差分别为 1.52 和 1.68, 相位误差分别为 11.2° 和 -116.15° , 基线误差分别为 2.3mm 和 1.6mm。

4.3 去相干误差

对于这类误差,由于多普勒谱模糊了多次,我们无法像 InSAR 处理那样截取公共的多普勒谱,也无法在频域直接做通道均衡处理。因此这类误差必须由系统设计初时进行补偿(如由校准信号作自适应通道均衡处理^[9])。庆幸的是,这批

实测数据经过预处理这类误差已经被很好地补偿掉了。

4.4 提高空域导向矢量稳健性

尽管在 4.2 节中, 我们对基线和幅相误差进行了补偿。然而, 在实际中由于样本的非独立同分布特性以及其它一些因素的存在, 仍然无法获得足够精确的导向矢量估计。

值得说明的是, 虽然在理论上自适应权具有更好的误差容忍度, 但是由于协方差矩阵中同时含有希望取出的谱分量以及其它模糊分量, 在导向矢量存在误差情况下, 自适应权矢量将同样自动地在需要取出的谱分量方向形成零陷, 使信噪比损失严重。所以, 只能使空域导向矢量尽可能的精确, 来减少信噪比损失。为了进一步改善导向矢量误差导致的信噪比损失, 利用文献[10]中的子空间投影技术对导向矢量加以改进, 即将含有残余误差的导向矢量向信号子空间投影得到的向量作为新的导向矢量, 表达如下

$$\hat{\mathbf{p}}_i(f_d, \tau) = \mathbf{U}_s(\mathbf{U}_s^H \mathbf{U}_s)^{-1} \mathbf{U}_s^H \mathbf{p}_i(f_d, \tau) = \mathbf{E}_s \mathbf{E}_s^H \mathbf{p}_i(f_d, \tau) \quad (9)$$

由于含有误差的空域导向矢量可以看作是真实导向矢量与一个扰动分量的和矢量, 而信号子空间与噪声子空间是正交的。以上操作可以将导向矢量中位于噪声子空间中的扰动分量去除掉而只保留信号子空间中的分量, 使投影后的导向矢量更加接近真实的导向矢量。

5 实测数据的成像结果

由于多通道 SAR 试验系统的主瓣多普勒带宽为 600Hz, 而脉冲重复频率只有 200Hz, 因此回波信号在多普勒域模糊了 3 次。直接对单个通道的数据进行 SAR 成像处理, 将无法得到清晰的 SAR 图像, 如图 2 所示。可以看出, SAR 图像中的每个像素都包含 3 个不同方位散射单元回波的叠加(注意到, 一个楼房图像模糊了 3 次)。

为了抑制多普勒模糊, 对所有 3 个通道的回波数据联合处理。如图 3 所示, 未补偿任何误差, 直接利用自适应方法进行全孔径 SAR 成像处理的结果。可以看出, 由于各种误差的存在(如第 3 节所述), 多普勒模糊抑制的效果很差, 几乎与单通道 SAR 成像结果相同。为了消除误差的影响, 我们分别将第 3 节中估计的包络配准误差、基线以及幅相误差进行补偿, 然后再利用自适应方法进行全孔径 SAR 成像, 所得结果如图 4 所示。可以看出, 多普勒模糊的影响已经被基本抑制掉了。为了进一步提高图像质量、消除残余误差的影响, 利用 4.4 节中的方法对导向矢量作进一步改进。图 5 为利用改进后的导向矢量对数据进行处理的结果。可以看出, 图像质量得到了进一步的提高。

6 结束语

传统 SAR(特别是星载 SAR)系统受到最小天线面积条件的限制, 无法同时获得宽测绘带、高分辨率的 SAR 图像。多通道 SAR 系统将一个天线分成若干个小孔径天线, 可以突破该条件的限制。但是在实际中, 多通道 SAR 系统将不可避免地引入更多的误差(相对于单通道 SAR)。本文在简

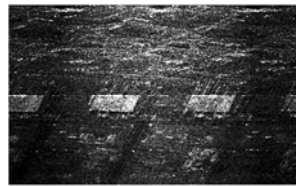


图 2 单通道数据的 SAR 成像结果

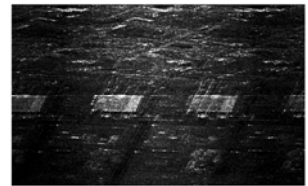


图 3 未补偿误差时 SAR 成像结果



图 4 补偿误差后 SAR 成像结果



图 5 导向矢量改进后 SAR 成像结果

单介绍利用多通道 SAR 系统抑制由小孔径天线引起的多普勒模糊方法的基础上, 以实测数据为实验对象, 以影响多普勒模糊抑制性能的因素为研究目标, 对系统中可能存在的各种误差进行分类并给出了相应补偿方法。实测数据的处理结果验证了本文方法的有效性。

参考文献

- [1] 周非, 范馨月, 黄顺吉. 基于 MNMP 的 ScanSAR 并行成像系统设计[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(2): 391-396.
Zhou Fei, Fan Xin-yue, and Huang Shun-ji. The design of parallel imaging system based on MNMP mode[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(2): 391-396.
- [2] Currie A and Brown M A. Wide-swath SAR[J]. *Proc. IEE. Radar, Sonar & Navigation*, 1992, 139(2): 122-135.
- [3] Li Zhenfang, Wang Hongyang, and Su Tao, et al. Generation of wide-swath and high-resolution SAR images from multichannel small spaceborne SAR systems[J]. *IEEE Letters on GRS*, 2005, 2(1): 82-86.
- [4] Goodman N A, Lin S C, and Rajakrishna D, et al. Processing of multiple-receiver spaceborne arrays for wide-area SAR[J]. *IEEE Trans. on GRS*, 2002, 40(4): 841-852.
- [5] Krieger G, Gebert N, and Moreira A. Unambiguous SAR signal reconstruction from nonuniform displaced phase centre sampling[J]. *IEEE Letters on GRS*, 2004, 1(4): 260-264.
- [6] 郭振永, 袁新哲, 张平. 一种多通道 SAR 高分辨率宽测绘带成像算法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(2): 310-313.
Guo Zhen-yong, Yuan Xin-zhe, and Zhang Ping. An algorithm of multichannel SAR high-resolution and wide-swath imaging[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(2): 310-313.
- [7] Li Zhenfang, Bao Zheng, Wang Hongyang, and Liao Guisheng. Performance improvement for constellation SAR using signal processing techniques[J]. *IEEE Trans. on AES*,

- 2006, 42(2): 436-452.
- [8] Schmidt R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. *IEEE Trans. on AP*, 1986, 34(3): 276-280.
- [9] 彭小亮, 李荣锋, 王永良, 等. 两种修正的自适应通道均衡方法[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(4): 658-662.
- Peng Xiao-Liang, Li Rong-feng, and Wang Yong-liang, *et al.*. Two methods of modified adaptive channel equalization[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(4): 658-662.
- [10] Feldman D D and Griffiths L J. A projection approach for robust adaptive beamforming[J]. *IEEE Trans. on SP*, 1994, 42(4): 867-876.
- 马 仑: 男, 1981年生, 博士生, 从事SAR信号处理研究工作.
- 廖桂生: 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 主要从事信号与信息处理研究工作.
- 李真芳: 男, 1977年生, 副教授, 主要从事SAR和InSAR信号处理工作.