

## 机载 SAR 系统平台运动容差分配方法<sup>1</sup>

白霞 洪文 毛士艺

(北京航空航天大学 203 教研室 北京 100083)

**摘要:** 合成孔径雷达 (SAR) 系统平台运动容差分配是系统要求分配的一个重要方面, 它是系统设计中的必要步骤, 通过考虑误差源、误差影响和性能极限等因素使得最终的设计方案更为合理。该文在分析和仿真平台运动误差对 SAR 成像质量的影响的基础上, 提出了一种机载 SAR 系统平台运动容差分配的方法: 根据实际成像系统和成像环境搭建仿真平台后, 通过仿真实验逐步得到独立运动误差容限、联合运动误差容限和修正运动误差容限, 最后考虑一些相关因素在前面仿真所得的容限区域上合理地做出平台运动容差分配的最后决策。这种方法将系统的平台参数、平台运动误差的类型和方向、测绘宽度以及成像质量要求等因素均作为分配过程的约束条件, 是一种兼具针对性和合理性的 SAR 系统平台运动容差分配方法。

**关键词:** SAR, 相位误差, 运动补偿, 系统设计

**中图分类号:** TN951 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)03-0357-07

## A Method of Allowable Platform Motion Errors Allocation in Airborne SAR System

Bai Xia Hong Wen Mao Shi-yi

(Faculty 203, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract** Allowable platform motion error allocation is an important part of system-wide allocation in SAR system. It is a necessary system design procedure to take into account error effects, error sources, and performance-limiting factors to determine more reasonable design. Based on analysis and simulation of impact of platform motion errors on SAR image quality, a method is proposed of allowable platform motion errors allocations in airborne SAR system. Firstly, according to actual imaging system and environment, simulation mode is built; and then allowable self-existent motion errors, allowable coexistent motion errors, modified allowable motion errors are in turn obtained; finally, considering some associated factor, reasonable project is decided. As the method counts in platform and image parameter values, type and direction of platform motion errors and scene size, it has both pertinence and rationality.

**Key words** SAR, Phase error, Motion compensation, System design

### 1 引言

合成孔径雷达 (SAR) 成像技术以其高分辨率、全天候、全天时、可直接观察等特点成为一种极其重要的现代遥感测绘方式, 在民用遥感和军事侦查领域中均发挥着日益重要的作用。近 20 年来, 国内科研院所和高校在 SAR 领域的研究取得了可喜的成绩, 然而大部分研究的重心放在了 SAR 系统的研制及实时处理机的开发上, 而在系统设计过程中对系统要求的分配方法的研究上着力相对比较小, 往往仅以经验值为设计依据, 对特定系统的针对性不强。基于这种现状, 本文对 SAR 系统平台运动容差的分配方法做了初步探索, 在分析和仿真平台运动误差对 SAR 成像质量影响的基础上提出一种机载 SAR 系统平台运动容差分配方法。

机载 SAR 的理想运动是匀速直线运动, 而实际上由于设备性能、大气湍流等原因, 平台的实际运动与理想运动之间不可避免地存在一定的偏离, 称之为平台运动误差。如果成像处理过

<sup>1</sup> 2002-10-10 收到, 2003-01-27 改回

程中对其不加以考虑则会影响到最后的成像质量,导致 SAR 图像出现几何失真、分辨率损失、对比度下降及假目标等现象,严重的情形下甚至造成无法成像。因此,在 SAR 系统设计中,平台运动误差问题的处理对于确保整个 SAR 系统的成像性能具有重大意义。

机载 SAR 系统对于平台运动误差的补偿大体可以通过两种途径:(1)基于运动传感设备所提供的各种有关平台运动状态的数据来校正回波信号中的各种相位误差;(2)基于从雷达数据中提取的平台状态参数或相位误差的运动补偿方法。一般的处理方法是:以方法(1)去除大部分相位误差,而后的残余误差由方法(2)中的自聚焦方法处理。在分辨率要求比较低或者平台运动比较平稳的情况下,也可以直接用自聚焦方法处理。自聚焦方法的研究是近年来 SAR 运动补偿领域中最活跃的一部分,相继出现了各种算法。然而无论何种算法,它的有效性都是以相位误差在一定的范围内为前提,因此对平台运动的残余误差(对于无运动补偿系统的 SAR 成像系统而言即是平台运动误差,如果装有运动补偿系统,则是经过方法(1)补偿后余下的误差)必须加以约束,以保证系统在实际应用中能够达到期望的成像质量。

本文分析和仿真了机载 SAR 系统平台运动误差对点目标成像质量的影响,通过分析仿真结果,我们可以看到:不同类型、不同方向的平台运动误差所引入的相位误差的类型、大小是不同的,对成像质量的影响也是不同的;同样的成像条件下,目标所在位置影响成像质量;系统设计中,尤其是平台运动容差分配方案的决策中如果充分考虑到这些因素,有助于保证最终的成像质量。因此,本文提出一种平台运动容差分配方案的决策方法:首先根据实际成像系统和成像环境搭建仿真平台,然后由仿真实验逐步得到独立运动误差容限、联合运动误差容限和修正运动误差容限,最后考虑一些相关因素在前面仿真所得的容限区域上合理地做出平台运动容差分配的最后决策。这种方法将系统的平台参数、平台运动误差的类型和方向、测绘宽度以及成像质量要求等因素作为平台运动容差分配的约束条件,对于特定的成像系统来说,据此得到的分配结果是一种较为合理的设计方案。本文以一组机载 SAR 系统的典型平台参数为例,对这种分配方法进行了具体的操作。

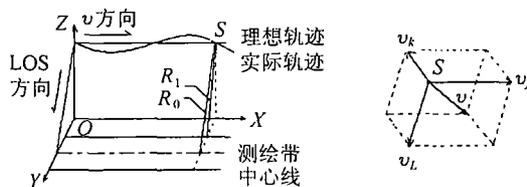
## 2 平台运动误差对 SAR 成像质量的影响

SAR 成像算法中最主要的一类为匹配滤波理论,平台运动误差对 SAR 成像质量的影响可以直观解释为它导致了目标回波信号的畸变(包括幅度误差和相位误差)使得匹配滤波不再完全匹配,故而成像质量下降甚至无法成像。本文讨论的是由于平台位置偏移造成回波距离历程的改变而引入的相位误差,对于波束摆动引入的幅度误差假设其可以忽略或者是对其已经进行了有效的补偿。

### 2.1 理论分析

SAR 领域中,未经补偿的平台运动误差对 SAR 成像的影响是运动补偿方法的先期研究,有时域分析<sup>[1,2]</sup>和频域分析<sup>[4]</sup>两类方法,由于实际中的成像处理通常在频域进行,频域分析便于运动补偿的嵌入,而由于时域分析便于仿真建模,故而本文采用的是时域分析的方法。

为了便于讨论问题,建立如下坐标系(见图 1(a)):以理想平台前向速度方向作为正向  $X$  轴,以竖直向上方向作为正向  $Z$  轴, $Y$  轴是由  $X, Z$  轴右手直角坐标系决定。于是,平台的理想航迹可以描述为一条在  $X, Z$  坐标轴决定的平面内平行于  $X$  轴的直线,而实际航迹则是一条围绕该直线摆动的空间曲线。



(a) 成像系统几何关系 (b) 载机速度向量分解

图 1 平台运动示意图

在上述坐标系下, 实际的前向速度  $v$  是可以分解成相互正交的 3 个矢量 (见图 1(b)), 沿理想航迹方向 (即  $X$  方向) 的速度分量  $v_A$ , 沿瞄准线方向 (即 LOS 方向) 的速度分量  $v_L$ , 第 3 个分量垂直于  $v_L$  和  $v_A$  所决定的平面, 用  $v_K$  表示。在这 3 个分量中,  $v_K$  对回波多普勒信号无影响, 只有  $v_L$  和  $v_A$  对回波多普勒信号产生畸变。基于这种速度分解, 对  $v_A$  和  $v_L$  存在偏差情况下的平台运动建立运动方程, 推导目标回波的距离历程  $r(t)$ , 根据  $4\pi/\lambda \cdot \Delta r(t)$  确定引入相位误差的类型和大小 (见表 1)。

表 1 平台运动误差对 SAR 成像的影响

运动误差	$X$ 向匀速误差	$X$ 向匀加速误差	LOS 向匀速误差	LOS 向匀加速误差
运动方程	$x = (v_A + \Delta v_A)t$	$x = v_A t + \frac{1}{2}at^2$	$\Delta r(t) = \Delta v_L t$	$\Delta r(t) = \frac{1}{2}a_L t^2$
斜距增量	$\Delta r(t) \approx \frac{v_A \Delta v_A}{R_0} t^2$	$\Delta r(t) \approx \frac{a v_A}{2R_0} t^3$	$\Delta r(t) = \Delta v_L t$	$\Delta r(t) = \frac{1}{2}a_L t^2$
相位误差	$\phi_e(t) = \frac{4\pi v_A \Delta v_A}{\lambda R_0} t^2$	$\phi_e(t) = \frac{2\pi a v_A}{\lambda R_0} t^3$	$\phi_e(t) = \frac{4\pi \Delta v_L}{\lambda R_0} t$	$\phi_e(t) = \frac{2\pi a_L}{\lambda R_0} t^2$
误差类型	二次相差	三次相差	一次相差	二次相差

其中  $R_0$  为最近斜距,  $\lambda$  为波长,  $v_A$  为理想的前向速度,  $\Delta v_A$  为  $X$  向匀速误差,  $a$  为  $X$  向匀加速误差,  $\Delta v_L$  为 LOS 向匀速误差,  $a_L$  为 LOS 向匀加速误差,  $\Delta r(t)$  为回波距离历程偏差,  $\phi_e(t)$  为相位误差。

上述的分析结果<sup>[1]</sup>是针对测绘带中心点目标而言的, 而对于非中心点目标来说, 由于成像处理是以中心点目标的回波历程作为匹配滤波的依据, 所以对它的匹配必然与中心点目标的完全匹配有一定的差异, 下面对此加以分析。

假设平台理想运动, 测绘带中心点的最近斜距为  $R_0$ , 非中心点的最近斜距为  $R_1$ , 那么对于中心点目标和非中心点目标的回波距离历程可以分别表示为

$$r_0(t) = R_0 \left[ 1 + \frac{(v_A t)^2}{2R_0^2} \right], \quad r_1(t) = R_1 \left[ 1 + \frac{(v_A t)^2}{2R_1^2} \right] \quad (1)$$

故有

$$\Delta r(t) = r_1(t) - r_0(t) = (R_1 - R_0) + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_0} \right) (v_A t)^2 \quad (2)$$

由  $\phi_e(t) = 4\pi \Delta r(t)/\lambda$  可见, 第一部分为固定相差, 第二部分引入了二次相差, 因此对于非中心点目标来说, 其位置本身引入了一定的二次相差, 这个二次相差将与平台非理想运动所引入的相差发生叠加。

### 2.2 仿真设计与结果分析

首先, 搭建仿真平台, 本仿真所需建立的模型有二: (1) 一定平台参数下的点目标 SAR 成像系统模型, (2) 平台运动误差模型。这两部分就是对实际成像系统和成像环境的模拟。在本文中, 模型 (1) 就是一组典型的机载 SAR 平台参数, 具体如下: 最近斜距  $R$  为 10,000m, 高度  $H$  为 5000m, 正侧视 (即前斜角) 为  $\theta_{ac} = 90^\circ$ , 平台前向速度  $v_A$  为 100m/s, 波长  $\lambda$  为 0.03m, 合成孔径时间  $T_s$  为 1.95s; 模型 (2) 就是表 1 中所列出的  $X$  方向和 LOS 方向的匀速误差和匀加速误差。

然后, 选取 3 个点目标, 它们的位置分别为测绘带中心点和同一方位而距离上相差 30m 的近点和远点, 在定量的平台运动误差条件下, 对这 3 个点目标成像的方位向冲激响应函数 (IRF) 加以分析, 我们发现仿真实验的结果与理论分析基本符合: 对于中心点而言,  $X$  向匀速误差和 LOS 向匀加速误差引入二次相差,  $X$  向匀加速误差引入三次相差, LOS 向匀速误差引入一次相差, 在此不再赘述; 而对于非中心点来说, 由于其位置本身所引入的二次相差的影响, 情形与中心点略有不同, 下面予以具体说明。

平台发生  $X$  向匀速误差和 LOS 向匀加速误差时, 非理想运动所引入的二次相差和目标本身由于其非中心位置所引入的二次相差的叠加是同一类型相差的叠加, 故而运动误差所引起的 IRF 变化是中心点 IRF 变化的一个横向平移。同种类型相差的叠加存在叠加方向的问题, 或是

同向叠加或是反向叠加，于是平台发生同一误差条件下，近点和远点成像的 IRF 的变化是不同的，同向叠加时 IRF 指标更为恶化，而反向叠加时，由于抵消而使 IRF 恶化程度减弱。平台发生 X 向匀加速误差，运动误差引入的三次相差与目标本身由于其非中心位置引入的二次相差叠加，即在二次相差恶化的基础上引入三次相差，IRF 的主要表现是积分旁瓣比 (ISLR) 和峰值旁瓣比 (PSLR) 以一个较中心点低一些的水平随运动误差的增大而恶化。对于 LOS 向匀速误差，平台运动误差引入的一次相差的情况和中心点的情况基本一致，所引起的位置偏移稍有不同，近点成像偏移较中心点小一些，而远点成像偏移较中心点大一些。以上所述的这些与中心点目标成像的差异决定了平台运动容差的分配不能仅以中心点目标成像为依据，因此后文提出的分配方法中包括了以边缘点目标来修正分配的步骤。

### 3 机载 SAR 系统的平台运动容差分配方法

基于上述的分析和仿真，本文提出了一种机载 SAR 系统平台运动容差分配方法：

- (1) 搭建仿真平台；
- (2) 确定独立运动误差容限 (一级分配)；
- (3) 确定联合运动误差容限 (二级分配)；
- (4) 根据测绘带宽度修正运动误差容限 (三级分配)；
- (5) 考虑相关因素确定系统的平台运动容差分配方案 (四级分配)；

在具体阐述这种方法的操作过程之前补充说明一点，系统设计就是根据一系列质量指标进行逆向研究，设计满足要求的参数，因此 SAR 系统平台运动容差分配的前提是确定 SAR 图像质量指标值。本文根据典型平台参数下，系统引入  $\pi/4$  二次相差时的中心点目标成像的 IRF 各项指标值，并加以适当调整确定质量指标值如下：(1) 方位分辨率  $\rho_a$  为 0.7m；(2) 峰值旁瓣比 PSLR 为 -12dB；(3) 积分旁瓣比 ISLR 为 -8dB。

#### 3.1 一级分配——独立运动误差容限

首先，假设平台运动误差模型中的每种误差独立存在，由仿真实验 (流程见图 2) 得到典型平台参数下的系统平台独立运动误差容限：

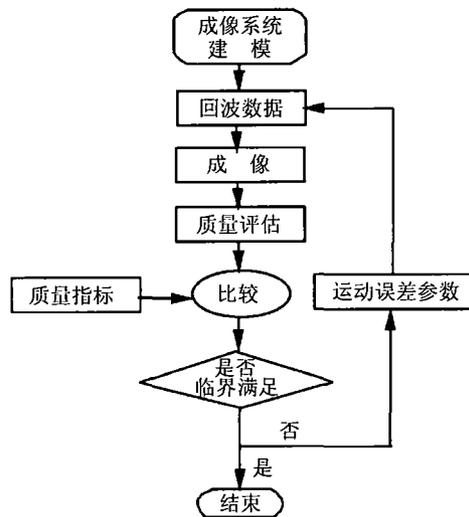


图 2 程序流程

- (1) X 方向匀速误差:  $\Delta v_A < 0.1972\text{m/s}$  ,
- (2) X 方向匀加速误差:  $a < 0.1873\text{m/s}^2$  ,
- (3) LOS 方向匀速误差:  $\Delta v_L < 0.1135\text{m/s}$  ,
- (4) LOS 方向匀加速误差:  $a_L < 0.004\text{m/s}^2$  .

我们看到, LOS 方向匀加速误差容限较  $X$  方向小的多, 在系统设计的时候应该考虑到该因素, 在 LOS 方向的平台运动控制及测量都应该具有较高的精度。上述平台独立运动误差容限就是系统平台运动容差的一级分配, 它可以保证平台运动误差独立存在时的成像质量。

### 3.2 二级分配——联合运动误差容限

实际中平台的运动误差往往不是独立发生的, 下面我们考察  $X$  方向或 LOS 方向上, 平台运动同时发生匀速误差和匀加速误差的联合运动误差容限, 运动模型见表 2。

表 2 平台联合运动误差

平台运动方向	运动方程
前向速度 ( $X$ ) 方向	$x = v_A t + \Delta v_A t + at^2/2$
瞄准线 (LOS) 方向	$\Delta r(t) = \Delta v_L t + a_L t^2/2$

当  $X$  方向或 LOS 方向上, 平台运动同时存在匀速误差和匀加速误差的时候, 两种类型的独立误差对 IRF 指标的恶化水平发生叠加, 成像质量可能不再满足要求。因此, 平台的联合运动误差容限不是独立误差容限的简单组合, 通过仿真实验得到联合运动误差容限是以两种独立运动误差构成的联合误差平面上的一个区域 (见图 3 中的阴影区)。实验流程依然如图 2 所示, 固定其中一种类型的运动误差的同时调节另一种, 以一定的误差间隔描点而得。

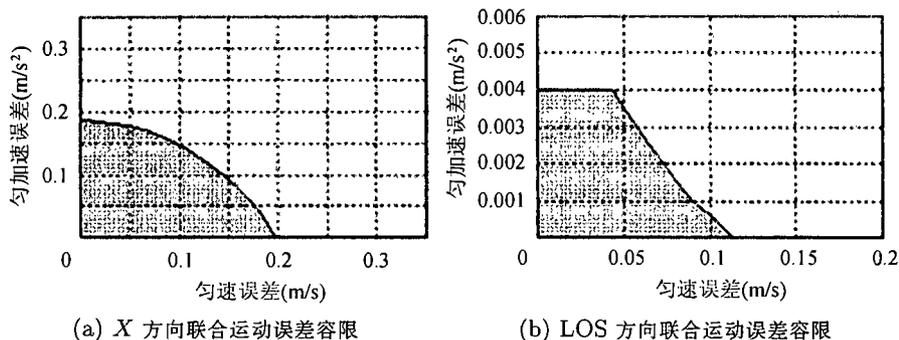


图 3 平台运动容差二级分配

图 3 中的横轴为匀速误差, 纵轴为匀加速误差, 阴影部分为典型平台参数下系统容许的  $X$ , LOS 方向上匀速误差和匀加速误差的联合运动误差。这是系统平台运动容差的二级分配, 可以保证平台运动误差联合存在时的成像质量。

### 3.3 三级分配——修正运动误差容限

实际应用中, 通常是需要保证一定测绘宽度内的图像质量, 因此必须以边缘点目标来修正误差容限。近距点目标、远距点目标与中心点目标各自要求的平台运动误差的容限是不同的, 而系统的平台运动误差容限应该取其交集。

平台联合运动误差的模型见表 2, 考察距离测绘带中心 30m 的近点目标和远点目标成像, 并与中心点比较。假设测绘带是以中心线对称的, 则联合运动误差容限的区域是对称的, 因此我们仅考察第一象限 (见图 4)。

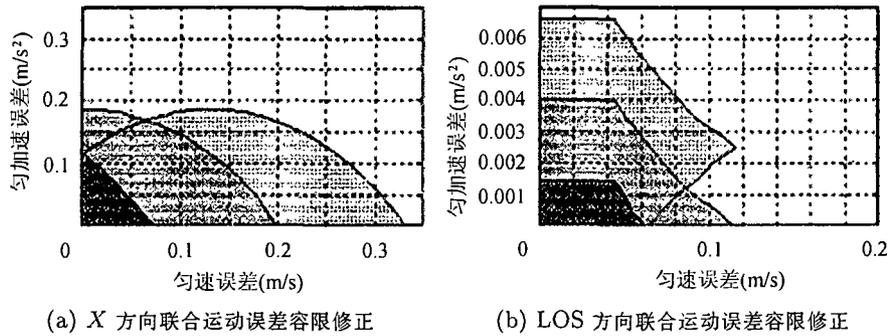


图 4 平台运动容差三级分配

图 4 中最暗阴影区域为近点、远点和中心点的联合运动误差容限之交。这是系统平台运动容差的三级分配，可以保证平台运动误差联合存在时，一定测绘范围内的成像质量。

3.4 四级分配——分配决策

以上的工作都是决策的准备工作，最后需要考虑一些相关因素来确定系统的平台运动容差分配方案。在无运动补偿系统的情况下，主要是基于以下考虑。

首先是 LOS 方向运动误差的分配问题。LOS 方向的匀加速误差是误差分配的焦点，因为它所引入的误差类型是二次相差，二次相差对成像质量的影响较大，导致图像的分辨率和对比度的下降，甚至造成无法成像；此外，该误差的容限较其它误差小 2 个量级，比较小的误差就会严重影响成像质量。因此，误差分配中对 LOS 方向匀加速误差容限有严格倾向。匀速运动误差引入一次相差，而较小一次相差只影响目标成像位置，在误差分配中可以给其相对较大的份额。其次是 X 方向运动误差的分配问题。X 方向的匀速误差引入二次相差，匀加速误差引入三次相差，这两种误差分别影响图像质量的分辨率和假目标，图像的分辨率是图像质量最为重要的指标，比较而言应对匀速误差予以重视。

根据上述分析，本文以 X 向匀速误差和 LOS 向匀加速误差为主要分配对象，对修正的联合误差容限区域切割，将切割所得到的边界上的交点作为平台运动容差的四级分配（见图 5）。

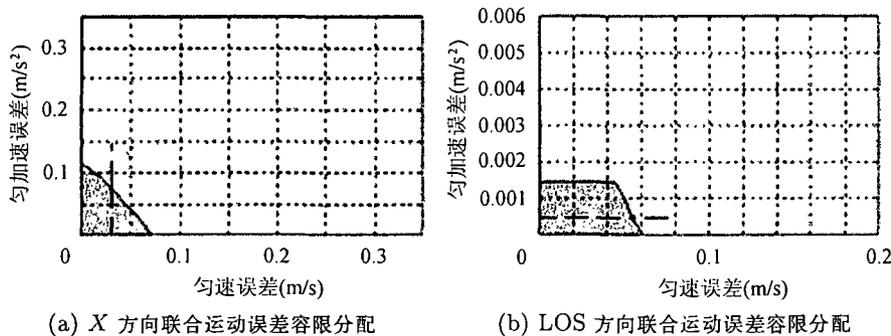


图 5 平台运动容差四级分配

经过仿真验证，得到典型平台的运动容差分配方案如下：

- (1) X 方向匀速误差： $\Delta v_a < 0.03\text{m/s}$ ，
- (2) X 方向匀加速误差： $a < 0.0763\text{m/s}^2$ ，
- (3) LOS 方向匀速误差： $\Delta v_L < 0.0542\text{m/s}$ ，
- (4) LOS 方向匀加速误差： $a_L < 0.0005\text{m/s}^2$ 。

平台运动容差的四级分配可以保证平台运动误差联合存在时，一定测绘范围内的成像质量，三级分配虽然也可以做到这一点，然而实际中难以将匀速误差和匀加速误差联合控制，所以四级分配实际上就是在三级分配所得区域的边界上合理地选择一点，对匀速误差和匀加速误差分别加以限制。

## 4 结束语

本文的主要工作是分析和仿真了平台运动误差对 SAR 成像质量的影响, 特别是对于非测绘带中心点目标与中心点目标的成像差异予以一定的讨论。在此基础上提出了一种机载 SAR 系统平台运动容差分配方案的四级决策方法, 这种方法的仿真实验模型是以实际的平台参数和要求的指标为依据, 并且在各级分配中考虑到了平台运动误差联合存在的情况和目标位置的影响以及误差发生的方向和类型对成像质量恶化程度的不同, 这些特点说明它是一种兼具针对性和合理性的分配方法, 可以应用到 SAR 系统设计中, 以期对系统的成像性能具有一定的保证作用。

最后需要说明两点: 第一, 文中通过四级分配得到的分配方案对平台的稳定性要求非常高, 这说明在高质量的高分辨率 SAR 成像系统的设计中, 运动补偿系统是必不可少的一部分, 否则对平台稳定设计的压力太大, 难以实现。第二, 从 SAR 技术真正走向实用化和推广应用的角度出发, 未考虑运动补偿系统的 SAR 系统只能有条件地应用于粗分辨率民用测绘, 运动补偿系统成为 SAR 系统中必不可少的重要环节将是今后的发展趋势。因此, 嵌入运动补偿模型的平台运动容差分配方法将是本文的后续工作。

## 参 考 文 献

- [1] 张澄波. 综合孔径雷达. 北京: 科学出版社, 1989, 第六章.
- [2] Oliver C, Quegan S. Understanding Synthetic Aperture Radar Images. Boston. London, Artech House, 1998: 45-58.
- [3] Blacknell D, Freeman A, Quegan S, Ward I A. Geometric accuracy in airborne SAR images. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1989, AES-25(2): 253-255.
- [4] Fornaro G. Trajectory Deviations in airborne SAR, analysis and compensation. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, AES-35(3): 998-1003.

白霞: 女, 1978年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达成像。

洪文: 女, 1968年生, 副教授, 研究方向为高分辨率雷达成像。

毛士艺: 男, 1935年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会信号处理专业副主任委员, 中国电子学会会士, 主要研究领域为高分辨率雷达成像、信号建模与谱分析、信号检测与分类、多目标跟踪和数据融合等。