

## 基于 IMU 数据与双星定位系统组合的机载 SAR 运动补偿

郭振永<sup>①②</sup> 邓云凯<sup>①</sup> 涂国防<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要:** 该文主要介绍了机载 SAR 平台运动误差中惯性测量单元(IMU)系统误差的补偿方法。由于双星定位系统误差不会随时间递增,该文利用双星定位系统(GEOSTAR)与 IMU 进行组合,消除随时间递增的 IMU 系统误差,提高 IMU 定位精度,从而减轻 SAR 成像处理器运动补偿的负担。

**关键词:** 合成孔径雷达; 双星定位系统; 运动补偿; 惯性测量单元

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)08-1802-03

## Airborne SAR Motion Compensation Based on IMU Data and GEOSTAR Integrated System

Guo Zhen-yong<sup>①②</sup> Deng Yun-kai<sup>①</sup> Tu Guo-fang<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

<sup>②</sup>(Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** This paper introduces a method to compensate IMU air-borne SAR platform. Because GEOSTAR system error does not increase with time, GEOSTAR system and IMU to cancel IMU system error which increases with time. It can improve precision of IMU positioning and lighten burden of motion compensation of SAR processor.

**Key words:** SAR; GEOSTAR System; Motion compensation; IMU

### 1 引言

合成孔径雷达(SAR)是一个安装在飞机或卫星等运载器上的全天候主动微波成像雷达。它利用信号传播到目标以及从目标返回的时间延迟获得高距离向(垂直航迹)分辨率;利用目标经历雷达波束时的多普勒历程获得高方位向(沿航迹)分辨率。对于机载 SAR 系统而言,我们通常假定载机是以恒定的速度沿直线飞行,并且成像区域是平坦的。然而,实际上,由于大气抖动以及惯性导航系统的系统误差,载机的真实轨迹与理想的直线之间存在偏差,并且成像区域可能存在地形变化,导致回波信号存在一个相位误差,信号的相干特性遭到破坏,从而,几何畸变、较差分辨率、非最优对比度以及假目标等将出现在 SAR 图像中。因此,为获得高质量 SAR 图像,必须对雷达回波进行精确的运动补偿。

存在两类基本的 SAR 运动补偿方法。一类是基于安放在天线相位中心(APC)附近的高精度运动传感器,例如惯性导航单元(INU)和全球定位系统(GPS)接收器等,直接测量出 APC 的运动误差;另一类是基于反射率位移法、自聚焦技术以及相位迭代技术等,直接从雷达回波数据估计运动误差。

然而,一方面由于高精度传感器(如 INU 等)造价昂贵;另一方面由于 INU 与天线相位中心之间存在杠杆臂效应,因

此,目前较为常用的机载 SAR 运动传感器是采用安装在天线相位中心附近的惯性测量单元(IMU),但是其系统误差随时间累加,长期精度难以保证。因此,为了满足 SAR 系统的需要,有必要对 IMU 的系统误差进行补偿。

补偿 IMU 系统误差的方法主要是利用组合导航系统进行,如 IMU 与 GPS 的组合<sup>[1]</sup>等,我国目前自主研发了用于二维平面定位的双星定位系统<sup>[2]</sup>,其定位精度可达 10m,因此,本文探讨了利用双星定位系统对机载 SAR 系统运动传感器 IMU 的系统误差进行补偿。首先简要介绍双星定位原理,然后对机载 SAR 平台的运动误差进行分析,接着介绍双星定位系统与 IMU 模型,并使用最小二乘法对 IMU 的系统误差进行补偿,本文最后提供了仿真实验,仿真结果证实利用双星定位系统与 IMU 组合,消除了 IMU 的系统误差,从而提高其长期定位精度。

### 2 双星定位系统工作原理简述

双星定位系统是地球同步卫星导航系统中的一种,它利用两颗地球同步卫星进行地球部分区域的导航,其定位原理如图 1 所示。和其它卫星导航系统一样,双星定位系统也可分为空间部分、地面中心站和用户接收机 3 个部分。其导航原理有其自身的特点,地面中心站向两颗卫星不断发送询问信号,通过卫星向用户转发;用户接收到询问信号在需要定位时,及时向卫星发射应答信号,通过卫星转发至地面中心

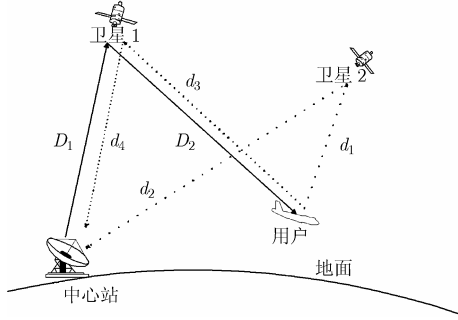


图 1 双星定位原理

站; 地面中心站根据发出和接收信号的时间延迟计算通过两颗卫星的信号传播路径的距离。

$$\begin{cases} S_1 = D_1 + D_2 + d_1 + d_2 \\ S_2 = D_1 + D_2 + d_3 + d_4 \end{cases} \quad (1)$$

其中  $S_1$ 、 $S_2$  为观测量,  $D_1$ 、 $D_2$  为中心站询问信号的信号传播距离,  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ 、 $d_4$  为用户接收机发播的应答信号传播距离。设地面中心站位置为  $(X_0, Y_0, Z_0)$ , 两颗卫星位置分别为  $(X_1, Y_1, Z_1)$ 、 $(X_2, Y_2, Z_2)$ , 接收机位置为  $(X, Y, Z)$ , 则:

$$\begin{cases} D_1 = \sqrt{(X_1 - X_0)^2 + (Y_1 - Y_0)^2 + (Z_1 - Z_0)^2} \\ D_2 = \sqrt{(X_2 - X_0)^2 + (Y_2 - Y_0)^2 + (Z_2 - Z_0)^2} \\ d_1 = \sqrt{(X_2 - X)^2 + (Y_2 - Y)^2 + (Z_2 - Z)^2} \\ d_2 = \sqrt{(X_2 - X_0)^2 + (Y_2 - Y_0)^2 + (Z_2 - Z_0)^2} \\ d_3 = D_2 \\ d_4 = D_1 \end{cases} \quad (2)$$

在三维定位的情况下, 式(2)中有 3 个未知数, 即用户接收机位置  $(X, Y, Z)$ , 而地面中心站和卫星的位置都是已知量。因此, 由式(2)只能求解出两个用户接收机位置的  $X$  和  $Y$  分量, 而用户所在高度必须借助于其它测高装置测量。因此, 双星定位系统只能对接收机位置的  $X$  和  $Y$  分量进行定位。

### 3 机载 SAR 运动误差分析

如图 2 所示为机载 SAR 几何关系示意图。  $A'$  为天线相位中心实际位置,  $A$  为理想天线相位中心位置。  $r'(t)$  和  $r(t)$  分别是  $t$  时刻天线相位中心到点目标  $P$  的实际斜距和理想斜距。

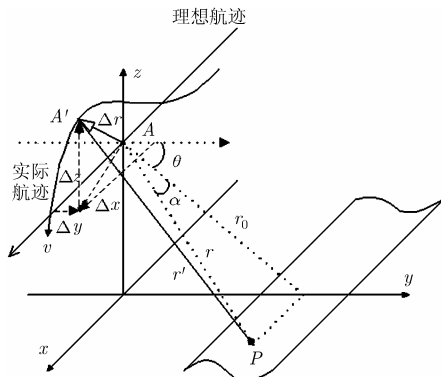


图 2 机载 SAR 几何关系

斜距。则运动误差  $\Delta r(t)$  为

$$\Delta r(t) = r'(t) - r(t) \quad (3)$$

设载机前向速度为  $v$ , 则理想斜距  $r(t)$  为

$$r(t) = \sqrt{(vt)^2 + r_0^2} \approx r_0 + \frac{(vt)^2}{2r_0} \quad (4)$$

式中  $r_0$  为天线相位中心到地面上点的最接近点。

如图 2 所示建立一个地固坐标系。在该坐标系中, 背离标称飞行路径偏差  $\Delta r(t)$  用  $\Delta x(t)$ ,  $\Delta y(t)$  和  $\Delta z(t)$  表示为

$$\Delta r(t) \approx \Delta x(t) \frac{vt}{r_0} + \Delta y(t) \cos \theta + \Delta z(t) \sin \theta \quad (5)$$

式中  $\theta$  表示天线俯角。则由该偏差引起的相位误差为

$$\Delta \varphi = -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta r(t) \quad (6)$$

该相位误差如果不补偿到一定的精度, 将导致最终图像分辨率降低、几何畸变以及对对比度损失等。

如果利用惯性测量单元(IMU)、双星定位系统等精确测量出飞机的实际位置, 则可以补偿这些误差。

### 4 利用 IMU 和双星定位系统进行运动补偿

设由加速度计算出的不正确位置为<sup>[3]</sup>

$$\begin{aligned} p_1(t) = \Delta p_1(t) + \frac{1}{2}(a_0 + \Delta a)t^2 \\ + (v_0 + \Delta v)t + p_0 + \Delta p + p_{n1}(t) \end{aligned} \quad (7)$$

式中  $a_0$ 、 $v_0$ 、 $p_0$  表示实际的恒定加速度、速度和位置。  $\Delta a$ ,  $\Delta v$ ,  $\Delta p$  表示因为 IMU 系统误差所导致的测量误差。  $\Delta p_1(t)$  表示系统误差以外的测量误差。  $p_{n1}(t)$  为随机噪声。

相应地, 双星定位系统测量的位置为

$$p_2(t) = \Delta p_2(t) + \frac{1}{2}a_0 t^2 + v_0 t + p_0 + p_{n2}(t) \quad (8)$$

从双星定位系统位置信号中减去 IMU 位置信号就可以提取出误差, 经最小二乘法拟合即得到 IMU 的系统误差成分为

$$\Delta p(t) = -\left(\frac{\hat{a}_0}{2} t^2 + \hat{v}_0 t + \hat{p}_0\right) \quad (9)$$

假设系统误差分量是完美估计的, 即  $\hat{a}_0 = \Delta a$ ,  $\hat{v}_0 = \Delta v$ ,  $\hat{p}_0 = \Delta p$ 。因此, IMU 测量的位置信号的系统误差在将式(9)加到式(7)上之后就得到了补偿:

$$p(t) = p_1(t) + \Delta p(t) = \Delta p_1(t) + \frac{a_0}{2} t^2 + v_0 t + p_0 \quad (10)$$

从而, 合成的位置不再受 IMU 系统误差的影响。IMU 和双星定位系统组合进行的运动补偿原理图如图 3 所示。

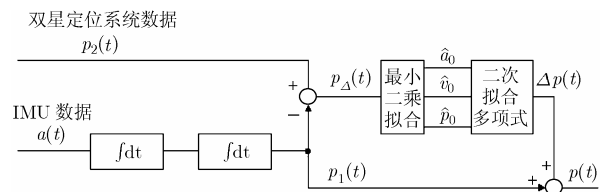


图 3 IMU/双星定位系统运动补偿原理图

### 5 仿真结果

下面以距离方向为例分析双星定位系统校正IMU系统误差的过程。设双星定位系统的定位误差方差为  $10\text{m}^2$ ，飞行时间共计 30s，IMU和双星定位系统的更新频率分别为 50Hz和 5Hz。IMU的系统误差为  $p_{\text{err}}(t) = 0.01t^2 + 0.1t$ ， $\Delta p_1(t)$  的方差为  $0.01\text{m}^2$ 。设飞机平台沿距离方向的实际偏差随时间变化规律为： $p_y(t) = 3\sin(0.2\pi t) + 2\sin(0.8\pi t)$ 。仿真结果如图 4-图 6 所示。

图 4 中实线表示载机平台沿距离向的实际位置偏差规律曲线，虚线表示由加速度计积分两次后测得的载机平台沿距离向的位置偏差曲线。由图可见，随着时间的增加，IMU 测量出的位置偏差越来越大。

图 5 中虚线表示由双星定位系统测得的载机平台沿距离向的位置偏差曲线，其以实际飞行路径上下振荡，误差范围较大，但不随时间增加。

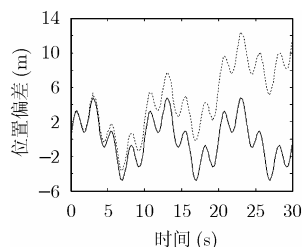


图 4 IMU 测得的随时间变化的距离向偏差曲线

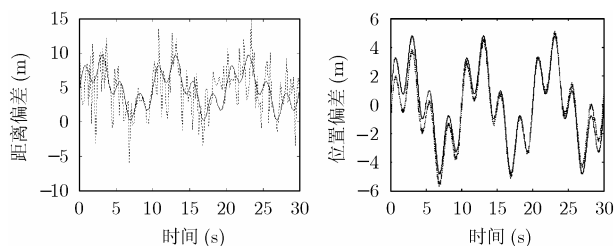


图 5 双星定位系统测得的沿距离向偏差随时间变化曲线

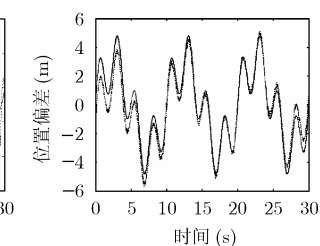


图 6 双星定位系统/IMU 组合测得的沿距离向偏差随时间变化曲线

图 6 中虚线代表由双星定位系统与 IMU 组合测得的载机平台沿距离向位置偏差曲线，其与实际飞行位置偏差曲线(实线)几乎重合。由此可见，双星定位系统与 IMU 组合之后，能消除 IMU 的系统误差，提高 IMU 测量航迹的长期精度。

## 6 结束语

为了提高机载 SAR 系统图像的分辨率，必须对载机平台导致的相位误差进行补偿。载机平台运动误差主要是由 IMU 的系统误差以及大气湍流引起的，而 IMU 的系统误差是随时间递加的，因此在利用机载 SAR 进行成像时，必须对 IMU 的系统误差进行补偿，从而降低对后续雷达回波数据的处理要求。本文利用双星定位系统对 IMU 的系统误差进行了补偿，仿真结果说明利用双星定位系统能够很好的补偿 IMU 的系统误差，取得了较为满意的结果。

## 参考文献

- [1] Difilippo J, Haslam E, and Widnall S. Evaluation of a kalman filter for SAR motion compensation. Position Location and Navigation Symposium, IEEE PLANS, 1988: 259-268.
- [2] 易维勇. 惯性导航及组合导航研究及仿真. [硕士学位论文], 中国人民解放军信息工程大学, 2002.
- [3] Buckreuss S. Motion compensation for airborne SAR based on inertial data. RDM and GPS, Proc. IGARSS'94, California USA, 1994, Vol.4: 1971-1973.

郭振永: 男, 1972 年生, 博士生, 副研究员, 主要研究方向为合成孔径雷达运动补偿及信号处理、传感与测试技术等.

邓云凯: 男, 1962 年生, 研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为微波成像雷达系统及其理论、微波遥感技术、微波通信技术、天线技术等.

涂国防: 男, 1954 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为数字通信、图像编码与传输、数字信号处理等.