

文章编号: 1001-2486(2009)03-0070-06

组合导航中 SAR 匹配位置参数传递过程*

卜彦龙, 潘亮, 胡国昌, 沈林成

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 飞行器 INS/SAR 组合导航中 SAR 匹配位置参数作为组合滤波器的输入之前需经过多个传递环节的转换。研究了从地面 SAR 匹配位置到载体主惯导中心位置所涉及各环节间的相互关系及诸参数在各环节中的传递过程, 包括地面 SAR 匹配位置参数向飞行器上 SAR 相位中心的传递, SAR 相位中心参数向辅助惯导中心的传递以及辅助惯导中心位置参数向主惯导位置中心的传递, 以此为基础建立测量参数传递过程数学模型。基于传递模型惯导修正及传递误差分析实验结果与实际相符, 验证了参数传递模型的正确性与可行性。

关键词: INS/SAR 组合导航; SAR 景象匹配; 辅助惯导; 主惯导; 参数传递; 误差分析

中图分类号: TP79; V241 **文献标识码:** A

Transmission of SAR Matching Position in Integrated Navigation System

BU Yan-long, PAN Liang, HU Guo-chang, SHEN Lin-cheng

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: There are several sub-transmission processes before matching-position parameters are transferred into combination-filter in INS/SAR integrated navigation system. In this paper these processes were studied, and the relations between them were analyzed, including the transmission of position information from ground matching centre to SAR phase centre, the transmission of position information from SAR phase centre to assistant INS centre, and the transmission of position information from assistant INS centre to master INS centre. Based on the analysis, a mathematical model of parameter-transfer was established. Modified inertial navigation parameters based on the model are reasonable, and results of transfer errors are rational, which prove the efficiency and flexibility of the model proposed.

Key words: INS/SAR integrated navigation; SAR-image matching; master INS; assistant INS; parameters transmission; errors analysis

INS/SAR 组合导航是为减小飞行器远距离航行惯导累积误差影响而提出的一种有效导航方式。通过飞行器实时拍摄的 SAR 图像与预先制备装载的基准图进行匹配获得飞行器即时准确位置信息, 然后将匹配信息与惯导量测信息通过卡尔曼滤波器进行信息融合, 以实现惯导误差的修正^[1]。目前该领域研究主要集中于精确匹配算法和组合滤波器设计两部分^[2-3], 但实际应用中由于 SAR 匹配得到的直接参数是 SAR 传感器所拍摄的正侧视实时场景相对于基准图的位置和方向^[4-5], 并不代表载体主惯导中心的位置和方向, 因此 SAR 匹配得到的定位参数不能够直接作为组合滤波器的输入, 这其中主要涉及不同传感器之间信息传递关系, 同时还要考虑参数误差对传递精度的影响。

文献[6]以捷联惯导为研究对象, 在惯导方程误差量中选择与 SAR 有关的状态量, 并结合 SAR 测量信息建立量测方程, 观测量选择为 SAR 的距离与相应惯导估算距离之差, SAR 的距离率与惯导估算的距离率之差, 以及 SAR 的方位角与俯仰角, 但是如何利用匹配位置信息有待于进一步剖析。文献[7]将组合滤波器量测方程的观测量选择为惯导位置估计误差及方位角估计误差, 实现了 SAR 匹配信息的融合, 但是没有对匹配参数传递的具体过程展开讨论。文献[8]对飞机主惯导与 SAR 捷联导航仪的动基座传递对准进行了分析。总体说来, 目前对 SAR 匹配技术的研究与组合导航联合滤波器的研究是分离

* 收稿日期: 2008-11-10

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(07JJ3127); 国防科技大学博士生创新资助项目(B070301)

作者简介: 卜彦龙(1979-), 男, 博士生。

的, 对 SAR 匹配参数向滤波器输入传递过程的研究尚不够深入。本文基于以上背景, 针对 INS/SAR 组合导航中地面 SAR 匹配位置参数传递过程进行研究。

1 测量参数传递过程分析

1.1 问题描述

在使用 SAR 匹配辅助的导航系统中, 需要由 SAR 实测值与相应的惯导输出值共同构成误差向量, 以构建卡尔曼滤波器的量测方程。基于文献[7]中的量测方程, 采用经 SAR 匹配传递来的位置和方向参数与惯导相应测量参数间的误差作为观测量, 量测方程为

$$Z_k = [\delta\varphi, \delta\lambda, \delta\phi_u]^T + V_k \quad (1)$$

其中, $\delta\varphi, \delta\lambda$ 为 INS 位置误差, $\delta\phi_u$ 为 INS 方位误差, $E[V_i, V_j^T] = Q\delta_{ij}$, Q 为量测噪声的方差, 其大小取决于匹配误差、数字基准图误差、雷达图像的分辨率等因素。将观测量 $\delta\varphi, \delta\lambda, \delta\phi_u$ 展开, 表达式为

$$\begin{cases} \delta\varphi = \varphi_{INS} - \varphi_{SAR-trans} \\ \delta\lambda = \lambda_{INS} - \lambda_{SAR-trans} \\ \delta\phi_u = \phi_{u-INS} - \phi_{u-SAR-trans} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\varphi_{INS}, \lambda_{INS}, \phi_{u-INS}$ 为惯导直接测得的位置与方向参数, $\varphi_{SAR-trans}, \lambda_{SAR-trans}, \phi_{u-SAR-trans}$ 为与 $\varphi_{INS}, \lambda_{INS}, \phi_{u-INS}$ 相对应的由 SAR 匹配信息传递来的参数。本文研究关注其中的位置参数 $\varphi_{SAR-trans}$ 与 $\lambda_{SAR-trans}$ 。

在构成位置测量误差时, 测量系统不统一使得测量参数使用前需要进行变换, 换言之, 就是构建惯导误差向量, 首先需要将 SAR 匹配与惯导两套测量量统一在相同的坐标系中相同的点上。SAR 实时图与基准图匹配得到的是实时图在地面基准图上的二维位置, 而惯导系统测得的是相对于载体主惯导中心的一系列参数。地面匹配位置与载体主惯导中心并不只是简单的位置转移, 它经历了从地面到飞行器上 SAR 相位中心, 从 SAR 相位中心到辅助惯导中心, 再从辅助惯导中心到载体主惯导中心等复杂的传递子过程。虽然每一个传递子过程涉及不同坐标系及参数表达, 但是对于所有的景象匹配导航系统, 地面匹配位置与载体主惯导中心都存在物理上的一一对应关系, 因此, 需要通过模型来描述参数传递的复杂过程, 从理论上揭示匹配位置与载体主惯导中心的对应关系。该模型一方面可以直接用来进行惯导误差修正, 另一方面也是 INS/SAR 组合导航各环节精度分析与分配的基础。

1.2 参数传递过程分析

飞行器通过惯导系统给出载体主惯导中心实时位置、速度及姿态等参数, 这些参数将对应时空域中的特定点。SAR 给出的量测参数分为雷达测量参数及匹配位置参数两类:

(1) 雷达测量参数是 SAR 作为雷达传感器获得的直接测量参数^[1]。包括 SAR 相位中心(信号发射点)与目标点的实时距离 R 与距离变化率 \dot{R} ;

(2) 匹配位置参数是指通过 SAR 实时图与基准图匹配后获得的实时图在基准图中的位置信息^[6]。

若暂不考虑系统延迟等因素, 雷达测量参数在任何时间位置都可以实时获得, 它对应的也是时空域中的特定点^[10]; 而匹配位置参数, 则只有在实时图成像与匹配完成之后才能够获得。对于惯导修正系统, 惯导修正需要的是特定点, 因此需要选定匹配区中某点作为组合导航基准点。

无论匹配位置参数还是雷达参数, 其坐标系与惯导坐标系均不同, 因此都不能直接用于修正惯导。需要通过参数传递换算到同一体系下, 首先将匹配位置参数转换到 SAR 相位中心, 再由 SAR 相位中心转换到载体主惯导中心。以正侧视 SAR 为例, 匹配位置参数与 SAR 相位中心的传递关系如图 1 所示。选定实时图成像中心线上某点 T 代表地面匹配位置。经过匹配, 该点在地理坐标系中位置已精确知道, 且已知该处平均飞行方向 $\bar{\eta}$ 。与 T 点对应的 SAR 相位中心为 S , 则 ST 即为该时刻雷达斜距, 距离 $\|R_{ST}\|$ 由雷达直接测出, 若在 SAR

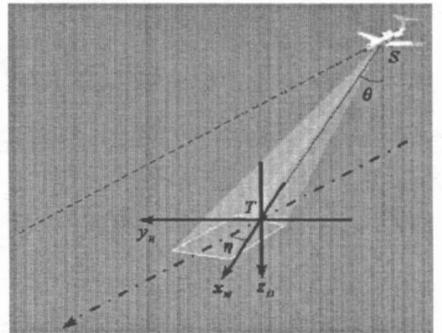


图 1 匹配参数与 SAR 相位中心的传递关系
Fig. 1 Transfer relation between matching point and SAR phase center

天线处安装一小型辅助捷联惯性系统,则可以同时获得雷达视角 θ 与实时方位角 η 。

SAR 相位中心与载体主惯导中心并不重合,但存在固定的位置关系,因此还需要 SAR 相位中心到主惯导中心的参数传递。这个过程要借助辅助捷联惯性系统(简称辅助惯导)。准确地说,辅助惯导中心与 SAR 相位中心也不重合,但距离 d 很小^[6,11],其影响主要体现于 SAR 成像运动补偿中分析相位误差,而在组合导航位置误差分析中可以忽略,因此认为二者重合,即用辅助惯导中心来代替 SAR 相位中心,完整的位置关系示意如图 2(a),简化的关系示意如图 2(b)。图 2 中, A_{MINS} 表示载体主惯导中心, $B_{S/DINS}$ 表示 SAR 天线所在的辅助惯性中心, S 表示 SAR 相位中心,(b)与(a)不同之处在于后者近似认为 S 与 $B_{S/DINS}$ 位置重合。

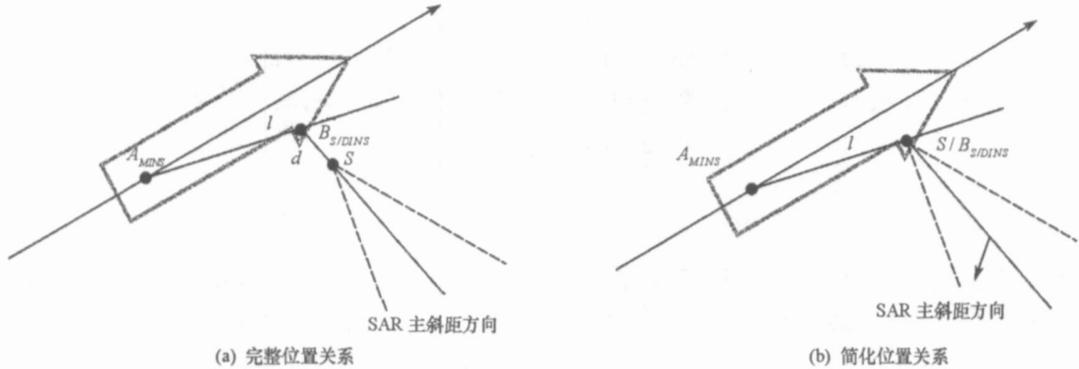


图 2 主惯导中心与辅助惯导中心位置关系

Fig. 2 Position relation between master inertial center and assistant inertial center

2 位置测量参数传递过程建模

2.1 相关坐标系定义

飞行器主惯导系统的输出参数相对于大地坐标系, SAR 匹配后的实时图位置 T 相对大地坐标系的经度和纬度,大地坐标下的参数在转换与计算时需要变换到地球直角坐标系中, SAR 雷达视角与飞行方位角相对于当地地理坐标系,飞行器上 SAR 辅助惯导中心相对于主惯导中心在载体坐标系中相对位置固定。现将相关坐标系定义如下:

当地地理坐标系 $o_T - x_N y_E z_D$ (下简称 g 系),原点 o_T 位于 T 点, $o_T x_N$ 沿子午线向北, $o_T z_D$ 沿引力场垂线向下, $o_T y_E$ 由 $o_T x_N$ 、 $o_T z_D$ 按右手规则确定。地球直角坐标系 $o_e - x_e y_e z_e$ (下简称 e 系),原点 o_e 位于地球中心, $o_e z_e$ 轴沿地轴指向北极方向, $o_e x_e$ 轴位于赤道平面内通过零子午线, $o_e y_e$ 由右手规则确定。飞行器载体坐标系 $o_A - x_b y_b z_b$ (下简称 b 系),原点 o_A 位于载体质心 A 点, $o_A x_b$ 在载体的纵轴方向上, $o_A z_b$ 在载体纵轴的右侧, $o_A y_b$ 由右手规则确定。通常认为载体主惯导中心 A_{MINS} 与载体质心 A 重合,同时,为方便表达,在建模过程中将 $\varphi_{SAR-trans}$ 、 $\lambda_{SAR-trans}$ 另记为 φ_A 、 λ ,高度记为 h_A ,点 $B_{S/DINS}$ 记为 B 。

2.2 位置参数传递建模

通过 1.1 小节对问题的描述,位置测量参数传递建模最终目的是将 SAR 匹配得到的地面信息正确传递到载体主惯导中心处,为式(2)所描述的观测误差提供位置输入量 $\varphi_{SAR-trans}$ 、 $\lambda_{SAR-trans}$,而这正是测量参数传递模型的输出量。依照图 1、图 2 描述的几何关系,将建模过程分为三个步骤,以下依次对各步骤转移关系进行推导:

(1) 在当地地理系下,载体质心 A 相对于地面点 T 的位置转移关系

在当地地理系下,求质心 A 相对于 T 的坐标,但位置转移不能一步完成,要经过 SAR 相位中心 S ,辅助惯导中心 B ,再传递到 A 。

首先,通过雷达视角 θ 和辅助惯导平台瞬时方位角 η ,将 S 点在当地地理系中的坐标表示为

$$\mathbf{S}^g = \begin{bmatrix} R \sin \theta \sin \eta \\ -R \sin \theta \cos \eta \\ -R \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, 雷达斜距 R 可以实时精确测量, 这也是 SAR 组合导航参数传递特有的性质。

由于辅助惯导中心 B 与雷达相位中心 S 重合, 则可将 S^g 直接传递给 B^g :

$$\mathbf{B}^g = \mathbf{S}^g \quad (4)$$

从载体坐标系角度讨论, 通过相对于载体系的俯仰角 θ_l 和方位角 Ψ_l , 将 B 点在体坐标系 b 中坐标表示为

$$\mathbf{B}^b = \begin{bmatrix} l \cos \theta_l \sin \Psi_l \\ l \cos \theta_l \cos \Psi_l \\ l \sin \theta_l \end{bmatrix} \quad (5)$$

由于 b 系原点位于 A , 故有 $\overrightarrow{AB}^b = \mathbf{B}^b$ 。将 \overrightarrow{AB}^b 转换到当地地理系中, 有

$$\overrightarrow{AB}^g = C_b^g \overrightarrow{AB}^b = C_b^g \mathbf{B}^b = (C_g^b)^T \mathbf{B}^b \quad (6)$$

其中, C_g^b 为从当地地理系到载体系的转换矩阵, 其表达式与飞行器姿态角 $\theta_a, \Psi_a, \gamma_a$ 有关, 即

$$C_g^b = \begin{bmatrix} \cos \gamma_a & 0 & -\sin \gamma_a \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma_a & 0 & \cos \gamma_a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_a & \sin \theta_a \\ 0 & -\sin \theta_a & \cos \theta_a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \Psi_a & \sin \Psi_a & 0 \\ -\sin \Psi_a & \cos \Psi_a & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

根据图 2 中的几何关系, 通过矢量合成并结合以上推导, A 点在当地地理系 g 中坐标的最终表示为

$$\mathbf{A}^g = \overrightarrow{TA}^g = \overrightarrow{TB}^g + \overrightarrow{BA}^g = \mathbf{S}^g - (C_g^b)^T \mathbf{B}^b \quad (7)$$

(2) 地面点 T 从大地坐标系到当地地理系 g 的转移关系

实时图与基准图匹配对应于基准图上的某一点坐标, 而经过精确制备的基准图各点坐标是处于大地坐标系下的经度、纬度和高度, 这套参数通过当地地理系 g 进行传递, 因此要将基准图上 T 点位置坐标从大地坐标系转换到当地地理系。

首先, 建立 T 点在大地坐标系与地球直角系间的转换关系 T^e , 其表达与匹配位置经纬度有关^[9]。

然后, 建立地球直角系 g 与当地地理系 e 间的转换关系 C_e^g , 其表达亦与匹配位置经纬度有关, 即

$$C_e^g = \begin{bmatrix} -\sin \varphi_T & 0 & \cos \varphi_T \\ 0 & 1 & 0 \\ -\cos \varphi_T & 0 & -\sin \varphi_T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \lambda_T & \sin \lambda_T & 0 \\ -\sin \lambda_T & \cos \lambda_T & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(3) 载体质心 A 从当地地理系到大地坐标系的转移关系

首先, 将地理系下向量 \overrightarrow{TA} 转换到地球直角系下, 得 \overrightarrow{TA} 在 e 系中的坐标为

$$\overrightarrow{TA}^e = C_e^g \overrightarrow{TA}^g = (C_e^g)^T \overrightarrow{TA}^g \quad (8)$$

其中, C_e^g 为式(2)中求得的 e 系向 g 系的转换矩阵。根据 \overrightarrow{TA} , 通过矢量关系, 可得 A 点在 e 系下的坐标:

$$\mathbf{A}^e = [x_A, y_A, z_A]^T = T^e + (C_e^g)^T \overrightarrow{TA}^g \quad (9)$$

最后, 通过迭代将地球直角系下 A 点坐标换算成惯导测量体制下的经纬高 $[\varphi_A, \lambda_A, h_A]^T$ ^[12]。

至此, 建立测量位置参数传递模型, 该模型完成了将 SAR 匹配所测参数传递到载体主惯导中心的理论推导过程, 以此参数作为精确的观测值, 然后通过其与惯导测量值作差得到误差量, 输入至卡尔曼滤波器进行误差修正。

3 仿真实验与分析

在分析 SAR 匹配参数传递过程并建立传递过程理论模型的基础上, 下面通过惯导误差修正仿真实验对匹配参数传递模型进行验证, 然后通过误差分析实验对传递精度进行分析。

3.1 惯导误差修正实验

实验过程设计: 设存在准确的载体主惯导中心位置 $\varphi_A, \lambda_A, h_A$ 并已知, 将地面匹配位置参数通过传递模型传递到载体主惯导中心, 以匹配位置传递来的位置参数修正经过误差积累的惯导位置和速度参数, 分析多次匹配的惯导位置和速度误差的累积和修正过程。仿真实验通过 Simulink 实现, 图 3 分别给出经过修正和未经修正的位置误差与速度误差曲线。

仿真实验中载体沿纬度方向做速度为 300m/s 的匀速飞行, 飞行高度为 14km, 在 2400s 飞行过程中

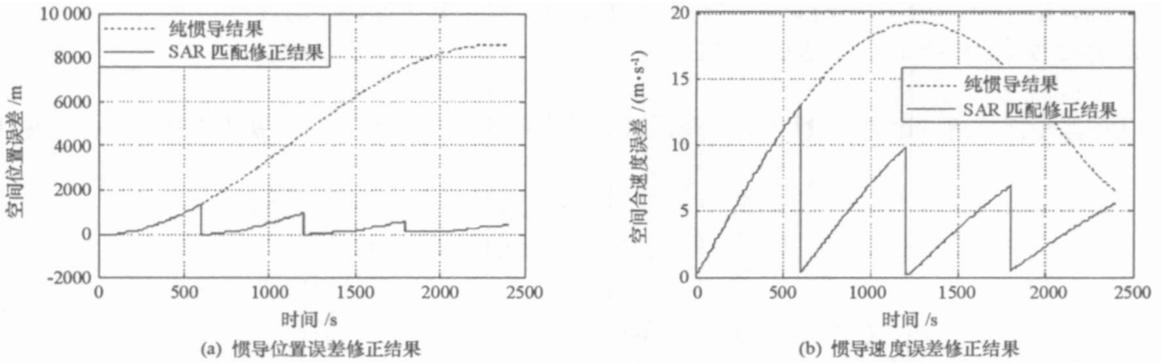


图3 惯导误差修正
Fig.3 Correction results of INS errors

经过4次匹配,每次SAR匹配的空间定位误差为50m。图3(a)、(b)中,如果没有误差修正,惯导的位置误差和速度误差都将快速积累到有效范围之外,而通过传递参数的修正,在2400s飞行过程中,惯导系统最大空间位置积累误差保持在1.2km之内,最大速度积累误差保持在12m/s之内,表明惯导误差得到较好修正;在每次修正后,惯导位置误差降低到65m之内,速度误差降低到0.2m/s之内,表明匹配位置参数得到正确传递。但是,进一步解释惯导残留误差,则需要对传递过程误差进行分析。

3.2 传递误差分析实验

3.2.1 SAR匹配位置误差对传递精度影响

现以北半球某地面点作为匹配点,飞行高度12km,中间参数取为定值,将输入参数以3m为步长进行偏移,分析输入参数误差对传递误差产生的影响。

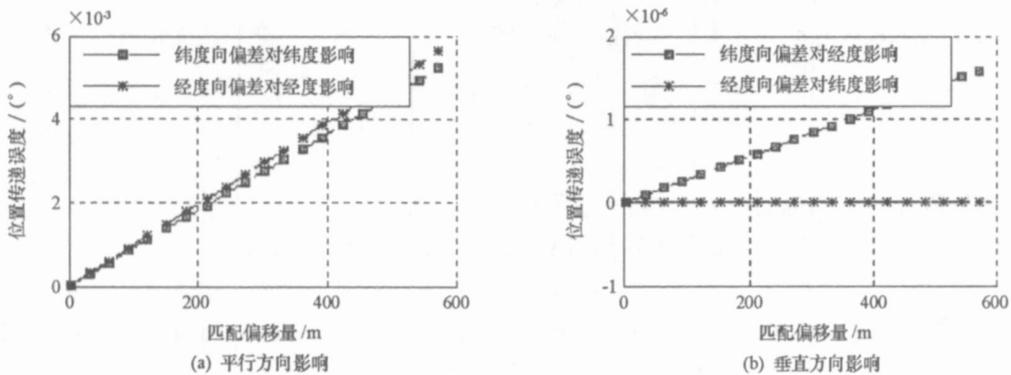


图4 匹配位置测量误差对传递位置的影响
Fig.4 Accuracy effect by measured error from matching position

由图4可知,在允许的匹配误差范围内,地面匹配位置的测量误差与输出参数误差基本呈等值线性关系,但是,经度误差与纬度误差对传递参数的影响是不同的。图4(a)中,将匹配点分别沿经度方向或纬度方向偏移相同距离后,误差以 10^{-3} 为基本量级,经度误差对传递经度参数的影响比纬度误差对传递纬度参数的影响略大。分析其原因,该匹配位置附近同经度线上纬度差 1° 约110km,同纬度线上经度跨 1° 略小于110km,因此匹配点在两个方向同样的偏移造成的传递误差必然不同。图4(b)中,将匹配点分别沿经度方向或纬度方向偏移相同距离后,纬度误差对传递经度参数的影响以 10^{-7} 为基本量级(即厘米级),而经度误差对传递纬度参数的影响为零,这是由地球椭球体形状造成的。

3.2.2 中间参数误差对传递精度影响

按照模型建立过程,中间参数包括SAR传感器参数,辅助惯导参数及主惯导参数。由于不同参数误差对总精度的影响差别很大,因此采用级差单位(dB)进行分析,构造度量表达式如下:

$$N_d = 10 \lg \frac{\Delta y}{\Delta x} = 20 \lg \frac{|\Delta y|}{|\Delta x|} \quad (10)$$

其中, Δy 表示某参数 x 存在误差 Δx 时的传递误差。

依照传递模型, 给出当各中间参数独立变化时对传递精度的误差特性曲线, 如图 5。

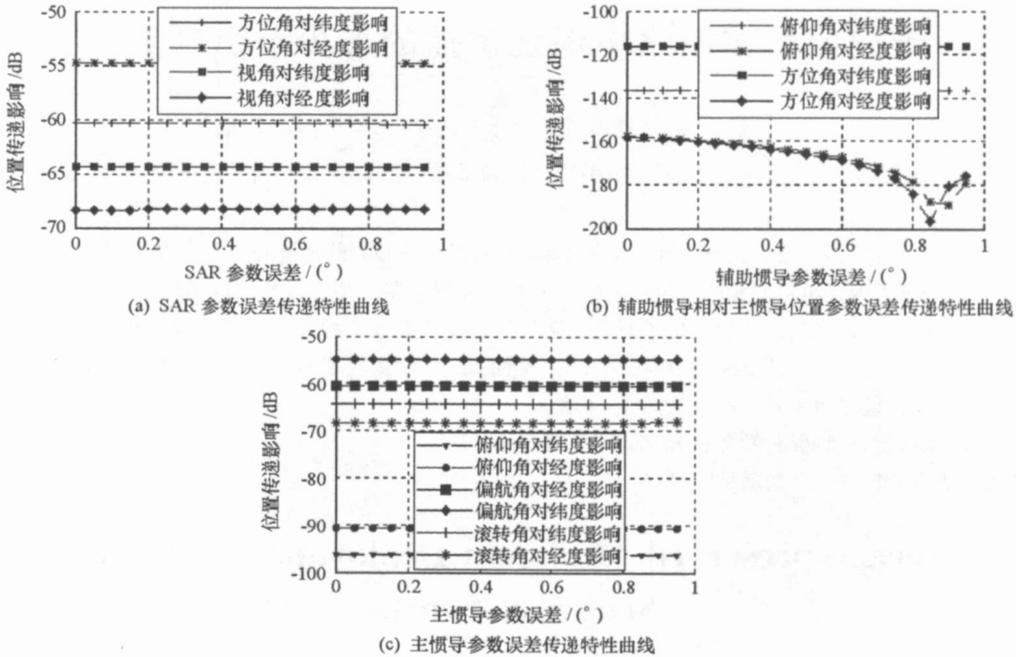


图 5 中间参数误差特性曲线

Fig. 5 Characteristic curve by measured errors of midtem parameters

从图 5 可看出, 不同中间参数误差对传递精度的作用是不同的, 包括两种含义: 其一是特性曲线的变化规律不同, 根据式(10), 某特性曲线与横轴越接近平行, 则传递误差与该曲线对应的参数误差越接近线性关系; 其二是不同参数误差对传递误差影响量级相差很大, 因此对于某些参数, 如图 5(b) 中的辅助惯导参数, 虽然其特性曲线变化复杂, 但其影响量级很小, 则该参数误差对传递误差仍不会有大的影响。通过特性曲线, 可以准确分析各独立参数对传递精度的影响程度, 选择主要误差因素, 加以重点克服。

4 结束语

本文从 INS/SAR 组合导航量测方程的输入需求出发, 分析了 SAR 匹配参数传递的基本过程及中间涉及环节的相互关系。建立了测量参数传递的过程模型, 从理论上揭示地面匹配点, SAR 传感器, 辅助惯导及载体主惯导在参数传递过程中所起的作用。进行基于传递模型的惯导修正实验及精度分析实验并分析了各传递环节参数对最终输出参数的影响规律。所建立的计算模型符合实际情况, 可为设计 INS/SAR 组合导航中高性能的组合滤波器提供依据。

参考文献:

- [1] Gao S S, Feng Z H, Li H X. Random Weighting Estimation of White Noise Error Characteristic in Integrated INS/GPS/SAR System[C]// International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation, 2006.
- [2] 邹维宝, 任思聪, 李志林, 等. SAR 在飞行器组合导航系统中的应用[J]. 火力与指挥控制, 2003, 28(1): 6-14.
- [3] Loga J F M, Van Rossum W, Van Halsema E, et al. The Development of a SAR Dedicated Navigation System: From Scratch to the First Test Flight[C]// Position Location and Navigation Symposium, 2004: 249-258.
- [4] Zitova B, Flusser J. Image Registration Methods: A Survey[J]. Image and Vision Computing, 2003, 21: 977-1000.
- [5] Bentoutou Y, Taleb N, Kpalma K, et al. An Automatic Image Registration for Applications in Remote Sensing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(9): 2127-2137.
- [6] 高社生, 李华星. INS/SAR 组合导航定位技术与应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2004.
- [7] 安东, 董光明, 任思聪. INS/SAR 组合导航系统的原理及其性能研究[J]. 西北工业大学学报, 1997, 15(4): 586-591.
- [8] Cao F X, Bao Z, Yuan J P, et al. Transfer Alignment from Airplane GPS/MINS Integrated System to SAR Strapdown navigator[C]// Proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation, 2000(3): 2088-2091.
- [9] 张景伟. INS/GPS/SAR 组合导航系统关键问题研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2003.
- [10] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [11] 邓正隆. 惯性导航原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1994.
- [12] 杨晓明, 苏新洲. 数字测绘基础[M]. 北京: 测绘出版社, 2005: 40-48.