

# 双星定位 SINS 组合系统的滤波方法及一致性研究

林雪原<sup>1</sup> 孟祥伟<sup>1</sup> 何 友<sup>1</sup>

(1 海军航空工程学院信息融合技术研究所, 烟台市二马路 188 号, 264001)

**摘 要:** 根据北斗双星定位系统(简称双星定位)的特点, 提出了北斗双星与 SINS 组合的最优预测模型。为了验证该滤波方法对状态估计的一致性, 研究了滤波器一致性的准则, 并给出了检验的统计量。试验证明, 本文提出的滤波器与系统是匹配的。

**关键词:** 双星定位; 最优预测; SINS; 新息; 一致性  
**中图法分类号:** P228.41

北斗双星定位系统(简称双星定位系统)是我国自行研制的区域性定位系统, 它采用有源定位体制, 存在位置滞后以及隐蔽性差的特点<sup>[1]</sup>。文献[2]提出了一种基于位置补偿的组合方法, 可有效提高导航系统的精度, 但该系统依赖于高精度组合系统的水平速度, 当水平速度下降(如当双星定位系统不工作时), 则导致组合系统的精度降低。同时, 该滤波方法把位置补偿误差作为有色噪声进行建模, 从而加大了系统的维数, 导致系统的实时性变差。本文充分利用了双星定位系统提供的滞后定位信息, 研究了组合系统的滤波方法, 提出了组合的最优预测模型。

## 1 组合系统滤波方法

### 1.1 最优预测模型的建立

由于对于地面用户以及空中用户, 双星定位系统提供高程的途径不一样, 因此, 在这里忽略高度通道。导航坐标系取当地水平坐标系为“北东地”时, 系统的状态方程为:

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) = A(t) \cdot X(t) + G(t) \cdot W(t) \quad (1) \end{aligned}$$

式中,  $X = [\phi_N \quad \phi_E \quad \phi_D \quad \delta v_N \quad \delta v_E \quad \delta \lambda \quad \delta B \quad \varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \nabla_x \quad \nabla_y]^T$ , 其中,  $\phi_N$ 、 $\phi_E$ 、 $\phi_D$  为平台误差角;  $\delta v_N$ 、 $\delta v_E$  为水平速度误差;  $\delta \lambda$ 、 $\delta B$  为位置误差;  $\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_y$ 、 $\varepsilon_z$  为陀螺漂移的随机

常数;  $\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_y$ 、 $\varepsilon_z$  为陀螺漂移的一阶马尔可夫过程;  $\nabla_x$ 、 $\nabla_y$  为加速度计漂移的一阶马尔可夫过程。其他各参数的定义见文献[3]。

在组合区间, 当第一次组合时, 由于接收机可控制, 因此, 可人为给接收机一个预发射命令, 接收机收到此命令后, 过一段时间发射定位申请, 然后可收到定位信息, 收到定位信息后, 立即发射定位申请命令, 然后再收到定位信息, 依次类推。

设  $t_{k-1}$  时刻为预发射命令,  $t_k$  时刻为发射定位申请信号,  $t_{k+1}$  时刻为收到定位信息, 此时的定位信息其实是用户在时刻  $t_k$  时的位置信息, 则  $t_k$  时刻惯导系统的输出位置信息以及  $t_{k+1}$  时刻双星定位接收机收到的信息(即用户在  $t_k$  时刻所处的定位位置信息)可分别表示为:

$$\begin{aligned} B_I &= B_I + \delta B, \lambda = \lambda + \delta \lambda \\ B_{DS} &= B_I - \frac{N_E}{R^N \cdot \cos \lambda} \lambda_{DS} = \lambda - \frac{N_N}{R^M} \quad (2) \end{aligned}$$

式中,  $(N_E, N_N)$  为双星定位系统的量测噪声。利用式(2)可得系统在  $t_k$  时刻的量测方程为:

$$\begin{aligned} Z(k) &= \begin{bmatrix} (\lambda - \lambda_{DS}) R^M \\ (B_I - B_{DS}) R^N \cos \lambda \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} R^M \cdot \delta \lambda + N_N \\ R^N \cos \lambda \cdot \delta B + N_E \end{bmatrix} = H(k)X(k) + V(k) \quad (3) \end{aligned}$$

由于  $t_{k+1}$  时刻收到的定位信息实际上是  $t_k$  时刻用户所处的位置信息, 则根据  $t_{k-1}$  时刻的各信

息,利用卡尔曼滤波的时间更新方程( $P(k|k-1), X(k|k-1)$ )与状态更新方程( $K(k), X(k|k), P(k|k)$ )对 $t_k$ 时刻进行最优滤波,在此基础上,利用 $t_k$ 时刻的最优滤波值对 $t_{k+1}$ 时刻进行最优预测(即利用时间更新方程( $P(k+1|k), X(k+1|k)$ )),最后利用 $X(k+1|k)$ 校正惯导以及导航结果。以后的滤波过程与上述过程一样。

1.2 量测噪声的建模

影响双星定位精度的因素有星历误差、测距误差(包括电离层、对流层延迟影响、设备时延影响等)、高程误差<sup>[4,5]</sup>。星历误差对双星定位精度的影响较大,但我国的双星定位采用差分技术,经过差分技术修正后,较大的星历误差可以等效于一个较小的测距误差<sup>[5]</sup>,同时,测距误差经过差分修正后,对双星定位精度的影响大为降低,而高程误差对双星定位精度的影响不能通过差分技术予以消除或减弱,因此,经过差分修正后,星历误差与测距误差可以等效于一个综合测距误差。

双星定位系统的量测误差的均方差(单位:m)可表示为:

$$\sigma_{ew}^2 = \sqrt{\sigma_{w0}^2 + \sigma_{ewH}^2}, \sigma_{ns}^2 = \sqrt{\sigma_{ns0}^2 + \sigma_{nsH}^2} \quad (4)$$

式中, $\sigma_{w0}, \sigma_{ns0}$ 代表综合测距误差产生的双星定位系统的东西、南北方向上的量测误差均方差; $\sigma_{ewH}, \sigma_{nsH}$ 代表高程误差产生的双星定位系统的东西、南北方向上的量测误差均方差,它们可根据双星定位系统的定位量测方程以及在空间直角坐标系中用户与卫星之间的位置关系<sup>[4,5]</sup>推算求得。

2 滤波方法的一致性检验

关于滤波的一致性,最常用的准则是:①状态误差应该是零均值(无偏的),并且与滤波产生的协方差一致;②卡尔曼滤波的新息应该有同样的性质;③卡尔曼滤波器的新息应该是白色的(时间上不相关)。在滤波器是一致的假设条件(设该条件为 $H_0$ )下,归一化信息平方<sup>[6]</sup>:

$$\mathfrak{E}(k) = V^T(k)S^{-1}(k)V(k) \quad (5)$$

式(5)服从具有 $nz$ 个自由度的 $\chi^2$ 分布,其中, $nz$ 是量测的维数, $V(k), S(k)$ 分别代表量测参差(或新息)、量测预测方差,可表示为:

$$\begin{aligned} V(k) &= Z(k|k-1) - Z(k) - Z(k|k-1) = \\ &Z(k) - H(k)X(k|k-1) \\ S(k) &= E[Z(k|k-1)Z^T(k|k-1)|Z^{k-1}] = \\ &H(k)P(k|k-1)H^T(k) + R(k) \end{aligned}$$

对于能够实时完成的单次试验检验,采用如下

$$\mathfrak{E} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K V^T(k)S^{-1}(k)V(k) \quad (6)$$

它是时间平均归一化新息平方,在假设为 $H_0$ 的条件下, $K\mathfrak{E}$ 服从具有 $Knz$ 个自由度的 $\chi^2$ 。其中, $K$ 代表样本的数量或单次试验的次数。

在显著性水平为 $\alpha$ (此时,置信概率为 $1-\alpha$ )的条件下,滤波器是一致的假设成立的条件为:

$$P\{\mathfrak{E} \in [r_1, r_2] | H_0\} = 1 - \alpha \quad (7)$$

其中, $[r_1, r_2]$ 为置信区间。

对于能够实时完成的单次试验检验,准则③可通过记录相隔 $l$ 步的新息白色检验统计量作为时间平均自相关进行单次检验:

$$\begin{aligned} \rho(l) &= \sum_{k=1}^K V^T(k)V(k+l) \cdot \\ &[ \sum_{k=1}^K V^T(k)V(k) \sum_{k=1}^K V^T(k+l)V(k+l) ]^{-\frac{1}{2}} \quad (8) \end{aligned}$$

对于足够大的 $K$ ,这个统计量近似是具有零均值、方程为 $1/K$ 的正态分布。假设其 $1-\alpha$ 的置信区域为 $[-r, r]$ ,若估计 $\rho(l)$ 落在该置信区域,则认为滤波器与系统是匹配的;否则,认为是失配的。

3 试验与分析

为验证上述算法,在某地进行了静态试验。经差分校正后,取地球同步卫星位置漂移引起的测距误差为8 m,影响双星定位精度的测距误差为13 m,高程误差为10 m<sup>[7]</sup>,代入式(4),取当地的双星定位系统的定位误差为30 m,IMU初始姿态角误差为30'',初始速度误差为0.1 m/s,初始经纬度误差为100 m,陀螺漂移为1°/h,陀螺一阶马尔可夫过程相关时间为3 600 s。由于篇幅有限,选择位置导航参数变化曲线如图1所示。同时,根据量测参差,取步长为55步(1步约为1.5 s),得图2所示的纬度与经度方向的观测参差曲线。根据式(8)计算相隔 $l(l=1, \dots, 8)$ 步的 $\rho(l)$ 为: $\rho(1)=-0.4054, \rho(2)=-0.0259, \rho(3)=-0.0411, \rho(4)=-0.0881, \rho(5)=0.1637, \rho(6)=-0.1903, \rho(7)=0.0842, \rho(8)=0.1781$ 。

取 $K=50$ ,则在滤波器是正确的假设下,上述估计中的误差是具有零均值和方差为 $1/K$ 的正态分布,即 $\rho \sim N[0, 1/50]$ ,则95%置信区域为 $[-0.2772, 0.2772]$ ,上述估计 $\rho(l)$ 均落在该置信区域内。同理,可算得归一化新息平方为 $\mathfrak{E}=0.893$ ,而基于100个自由度的 $\chi^2$ 分布的95%置信区域为 $[0.74, 1.3]$ ,初步可以断定滤波

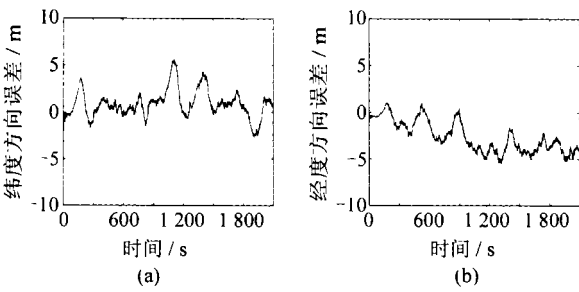


图 1 静态试验下组合导航系统位置定位误差曲线  
Fig. 1 Positioning Error Curve of Integrated Navigation System in Static State

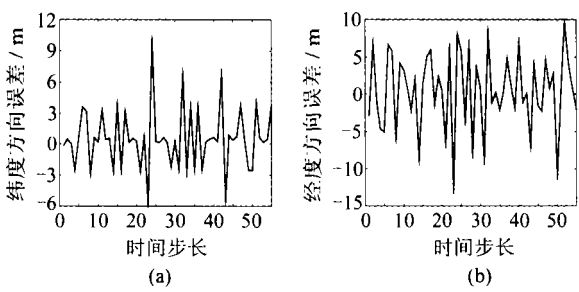


图 2 静态试验下滤波器的观测量参差曲线  
Fig. 2 Observation Irregular Curve of Filter in Static State

器与系统是匹配的。

为了进一步验证动态环境下系统滤波模型的匹配效果,进行了动态试验,时间约 26 min,系统的轨迹曲线如图 3 所示,其中粗线代表双星定位时确定的系统轨迹,与粗线相重叠的细线代表组合系统确定的轨迹,而与粗线不相重叠的细线代表惯导系统独立工作时所确定的轨迹。从试验曲线可以看出,双星定位对惯导系统的最优预测校

正是非常明显的。同样,在双星系统连续定位的情况下,根据量测参差,取步长为 55 步,得如图 4 所示的纬度与经度方向的观测量参差曲线。

取  $K=50$ , 根据式(8) 计算相隔  $l(l=1, \dots, 8)$  步的  $\rho(l)$  也满足:  $\rho \sim N[0, 1/50]$ 。

从以上的动态与静态试验分析可以看出,该滤波方法在保证实时性的条件下,可有效地提高系统的精度,验证了该滤波器与系统是一致的。

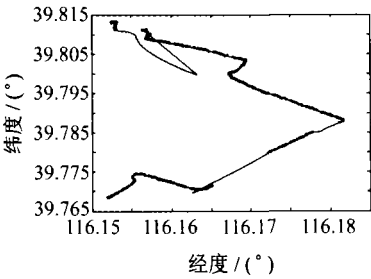


图 3 动态试验下的轨迹曲线  
Fig. 3 Tracking Curve of Dynamic Experiment

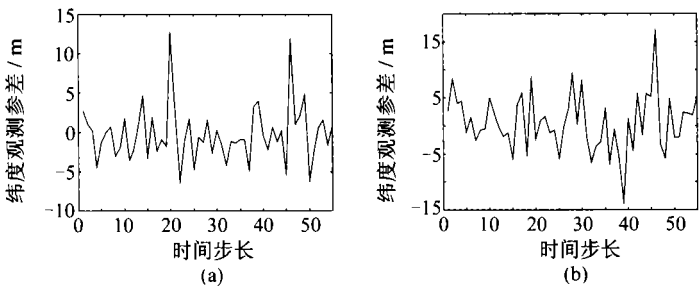


图 4 动态试验下滤波器的观测量参差曲线  
Fig. 4 Observation Irregular Curve of Filter in Dynamic State

参 考 文 献

[ 1 ] 孙国良,丁子明. 双星系统工作方式改进的探讨 [ J ]. 电子学报, 2001, 29(9): 1 217-1 220

[ 2 ] 林雪原,刘建业,汪叔华. RDSS/SINS 组合系统的建模与仿真研究[ J ]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29( 3 ): 210-213

[ 3 ] 袁信,俞济祥,陈哲. 导航系统[ M ]. 北京: 航空工业出版社, 1994

[ 4 ] Ken I, Kazuaki H, Minoru I. Differential Positioning Experiment Using Two Geostationary Satellites [ J ]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35( 3 ): 866-877

[ 5 ] Kozo T. Atmospheric Error in Range and Range-Rate Measurements Between a Ground Station and an Artificial Satellite[ J ]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1970, 6( 6 ): 770-779

[ 6 ] Bar-Shalom Y, Fortmann T E. Tracking and Data Association[ M ]. New York: Academic Press, 1988

[ 7 ] 王正凡,郝岩. 双星定位模型及其试验结果分析 [ J ]. 导航, 1991( 1 ): 25-31

第一作者简介: 林雪原, 博士后, 副教授。现从事数据融合、雷达定位、惯性技术与组合导航系统的研究。  
E-mail: linxy\_ytcn@ 126. com

( 下转第 347 页 )

nal Proc., 1993, 41: 3 445-3 462

[ 6 ] Said A, Pearlman W A. A New Fast and Efficient Image Codec Based on Set Partitioning in Hierarchical Trees [ J ]. IEEE Trans. Circ. Syst. Video Tech., 1996, 6( 3 ):243-250

[ 7 ] Tian J, Wells R O. Embedded Image Coding Using Wavelet-Difference-Reduction [ M ]//Tapiwala P. Wavelet Image and Video Compression. MA, Norwell: Kluwer Academic Publ., 1998:289-301

[ 8 ] Michael D A, Kossentini F. Reversible Integer-to-Integer Wavelet Transforms for Image Compression: Performance Evaluation and Analysis [ J ]. IEEE Transaction on Image Processing, 2000, 9 (6): 1 010-1 024

[ 9 ] 王桥,毋河海. 地图信息的分形描述与自动综合分析[ M ]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1998: 105-107

第一作者简介: 陈仁喜, 博士生。主要研究方向为遥感图像处理、数据压缩技术。

E-mail: sunrcx@163.com

DEM Data Compression Based on Integer Wavelet Transformation

CHEN Renxi<sup>1</sup> ZHAO Zhongming<sup>1</sup> WANG Yinxing<sup>2</sup>

(1 Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Datun Road, Chaoyang District, Beijing 100101, China)  
(2 Department of GeoInformation & Engineering, Shandong University of Science and Technology, Daizong Street, Tai'an 271019, China)

**Abstract:** DEM data is an important component of spatial database in GIS. The data amount is huge and compression is necessary. In view of the simplicity and high efficiency of the compressing system, we apply integer wavelet transforms to DEM data and introduce a simple coding scheme with high efficiency. Experimentations on DEM at different areas are carried out and some rules are deduced in the end.

**Key words:** DEM; wavelet transformation; data compression

About the first author: CHEN Renxi, Ph.D candidate, majors in image processing, data compression

E-mail: sunrcx@163.com

(上接第 303 页)

Filter Method and Its Consistency of Double-Star Position/ SINS Integrated System

LIN Xueyuan<sup>1</sup> MENG Xiangwei<sup>1</sup> HE You<sup>1</sup>

(1 Research Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical Engineering Institute, 188 Erm a Road, Yantai 264001, China)

**Abstract:** According to the characteristic of Beidou double-star positing system (double-star position), this paper puts forward the optimal predication model of double star position/ SINS integrated system. In order to validate the consistency of the filter, this paper also studies the criteria for consistency of a filter, and gives the tested statistic. The experiment based on practical measured data shows that the filtering method is consistent with the integrated system.

**Key words:** double-star position; optimal predication; SINS; innovation; consistency

About the first author: LIN Xueyuan, post-doctor, associate professor. His current research is focused on data-fusion, radar position, inertial technique and integrated navigation system

E-mail: linxy\_ytcn@126.com