

基于 Kalman 滤波的塔康方位精确解算方法

张国祥¹, 郭英¹, 霍文俊¹, 张坤峰¹, 苏令华¹, 梁佳¹, 赵阳²

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安 710077; 2. 68078 部队, 甘肃兰州 730020)

摘要 针对塔康机载设备模拟体制庞大, 现有方位解算方法过程复杂、精度不高等问题, 基于软件无线电思想, 对塔康机载设备进行中频数字化, 提出了一种 Kalman 滤波提取包络信号的方位精确解算方法。首先采用状态空间描述法, 详细推导了塔康包络信号的观测方程和状态方程参量的表达式, 建立了塔康包络信号的观测方程和状态方程。然后设计了提取塔康包络信号的 Kalman 滤波模型, 给出了提取包络信号的流程以及方位求解算法。最后经装备模拟器验证表明: 所设计的方法过程简单, 解算方位精度高, 算法完全适用于实装工程的实现。

关键词 塔康; 中频数字化; 卡尔曼滤波; 方位解算

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.02.017

中图分类号 TN911.7 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2013)02-0076-05

Accurate Calculating Method of TACAN Bearing Signal Based on Kalman Filtering

ZHANG Guo-xiang¹, GUO Ying¹, HUO Wen-jun¹, ZHANG Kun-feng¹, SU Ling-hua¹, LIANG Jia¹, ZHAO Yang²

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

2. Unit 68078, Lanzhou 730020, China)

Abstract: For the problem that TACAN airborne equipment is huge in analog system and that the calculating method of TACAN bearing signal is complex in calculating process and low in precision, this paper presents an accurate method of calculating the bearing settlement using Kalman filtering distill envelope signal based on the ideal of software radio and IF digital processing. Firstly, this paper adopts the method of state space description to derive in detail the expressions of various parameters in the observation equation and state equation of envelope signal, then, designs the Kalman filtering model of distill envelope signal, extracts the envelope signal process and the method of calculating bearing. Finally, the experiment result of equipment simulator shows that the designed method is simple in process, accurate in calculating bearing precision and is applicable to the practical equipment.

Key words: TACAN; IF digital processing; Kalman filtering; calculating bearing

战术空中导航 (Tactical Air Navigation, TACAN) 是美国海军于 1956 年发展的航路导航系统, 工作于 962~1 215 MHz 频段, 以地面台为中心、可为半径 350~370 km 范围内高度 10 km 的飞机提供方位与距离信息^{[1]64-68}。早期的 TACAN 系

统多采用模拟体制, 设备庞大, 调试复杂。机载测位系统多通过三路并行处理实现: 第一路利用峰值检波和包络滤波提取接收信号包络信息^[1-2], 另外两路分别完成主辅基准脉冲群译码, 通过计算包络过零点与基准群点之间的相位差解算方位。此过程提取

收稿日期: 2012-11-14

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2010JM8037); 陕西省电子信息系统综合集成重点实验室基金资助项目(201111Y09)

作者简介: 张国祥(1988-), 男, 山东滨州人, 硕士生, 主要从事通信信号处理研究. E-mail: 2008_xiangzi@sina.cn

包络复杂,解算方位精度不高。随着高速数字信号处理器件(Digital Signal Processor, DSP)和现场可编程逻辑门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)的快速发展,用数字信号处理方法在“FPGA+DSP”架构上实现塔康信号中频数字化处理^[2],可以显著节省设备功耗、体积,同时提高可靠性。文献[3]、[4]给出了基于曲线拟合方法提取包络信号,但自适应滤波实现线性组合器的方法在每一个采样点上都要进行拟合运算,运算量大。

1 塔康系统测位原理

塔康系统由地面信标和机载设备组成,其工作时,地面信标天线在水平面以 15 周/s 的速度顺时针旋转,向其周围辐射方位信号,形成单一心脏形方向图,当方向图的最大值指向地理位置正东方时,地面信标发射主基准信号。此外,地面信标天线在形成的单一心脏方向图上附加一个九瓣调制,每一个小瓣(除最大瓣)旋转到正东位置时,地面信标发射辅基准信号。最终,在机载接收机端接收幅度受到 15 Hz、135 Hz 正弦波的混合调制的方位信号。

塔康系统测位采用全向信标原理。机载设备接收到地面信标天线辐射的方位信号进行处理,通过解算方位信号包络的正斜率过零点滞后于基准定时点之间的相位差来确定方位值。由主基准和 15 Hz 包络解算方位时,其相位差与飞机的地理方位对应关系为 1:1,即相位差的精度为 1°时,对应解算得到误差在 1°范围内的粗测方位;利用辅基准和 135 Hz 包络解算方位时,其相位差与飞机的地理方位对应关系为 9:1,其精度要高于粗测,称为精测。精测存在相位模糊,必须与粗测相结合才能保证最终方位解算的单值性。由于需要利用包络信息获得相位差值,因此包络信号提取的失真度将直接影响到方位解算的精度,本文采用了具有最小均方误差波形估计性能的 Kalman 滤波算法提取包络信号。

2 基于 Kalman 滤波的包络提取模型及方位解算算法

Kalman 滤波是卡尔曼于 1960 年提出用来用以从带噪观测量中提取相关信号的一种时域滤波方法^[5-7]。它利用状态方程描述滤波系统输入输出关系,基于最小均方误差估计准则实时递推滤波,相比于 Wiener 滤波等非递推滤波算法它可以处理多维平稳和非平稳随机信号,同时大大降低了存储空间

需求,在组合导航、目标跟踪中被广泛应用。随机线性离散系统的 Kalman 滤波方程^{[7]12-36}表示为:

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \mathbf{A}_{k,k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1} + \mathbf{H}_k (\mathbf{Y}_k - \mathbf{C}_k \mathbf{A}_{k,k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1}) \quad (1)$$

$$\mathbf{H}_k = \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{C}_k^T (\mathbf{C}_k \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{C}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (2)$$

$$\mathbf{P}_{k,k-1} = \mathbf{A}_{k,k-1} \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{A}_{k,k-1}^T + \mathbf{\Gamma}_{k,k-1} \mathbf{Q}_{k-1} \mathbf{\Gamma}_{k,k-1}^T \quad (3)$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{H}_k \mathbf{C}_k) \mathbf{P}_{k,k-1} \quad (4)$$

式中: \mathbf{H}_k 表示滤波增益矩阵; \mathbf{P}_k 表示误差矩阵; $\mathbf{P}_{k,k-1}$ 表示未校正的误差矩阵。由式(1)~(4)结合给定初值 $\hat{\mathbf{X}}_0$ 和 \mathbf{P}_0 , 根据 k 时刻的观测值 \mathbf{Y}_k 递推计算得到 k 时刻状态估计 $\hat{\mathbf{X}}_k$ 。理想情况下, Kalman 滤波是线性无偏最小方差估计。但在实际情况中,由滤波得到的状态估计可能是有偏的,估计的误差方差可能超出按照公式计算的方差范围,误差有可能趋于无穷大导致滤波发散,从而完全失去了滤波的最优作用,因此模型建立的准确性将直接影响到发生滤波发散的可能性。

塔康精确测位的关键在于主、辅基准定时点以及 15 Hz、135 Hz 包络信号过零点的准确定位。利用 Kalman 滤波提取包络信号模型的关键在于建立 TACAN 信号的观测方程和状态方程。机载塔康接收到的方位包络信号可以表示为:

$$u(t) = u_m + m_1 \sin(2\pi f_1 t + \varphi_1) + m_2 \sin(2\pi f_2 t + \varphi_2) \quad (5)$$

式中: $f_1 = 15$ Hz, $f_2 = 135$ Hz; u_m 表示载波信号幅度; φ_1 、 φ_2 分别表示 15 Hz、135 Hz 包络的初相; m_1 、 m_2 分别表示 15 Hz、135 Hz 包络振幅。若用 α 、 β 分别表示 15 Hz、135 Hz 包络相位,则离散 15 Hz 正弦包络的状态变量可设为: $X_1(k) = m_1 \sin \alpha_k$, 令 $X_2(k) = m_1 \cos \alpha_k$ 则有:

$$\begin{aligned} X_1(k) &= m_1 \sin(\alpha_{k-1} + \Delta\alpha) = \\ &= m_1 \sin \alpha_{k-1} \cos \Delta\alpha + m_1 \cos \alpha_{k-1} \sin \Delta\alpha = \\ X_1(k-1) \cos \Delta\alpha + X_2(k-1) \sin \Delta\alpha, k=1, 2, \dots \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} X_2(k) &= m_1 \cos(\alpha_{k-1} + \Delta\alpha) = \\ &= m_1 \cos \alpha_{k-1} \cos \Delta\alpha - m_1 \sin \alpha_{k-1} \sin \Delta\alpha = \\ X_2(k-1) \cos \Delta\alpha - X_1(k-1) \sin \Delta\alpha, k=1, 2, \dots \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $\Delta\alpha = 2\pi f_{15} \{t(k) - t(k-1)\}$ 表示一个采样周期内 15 Hz 正弦包络信号相位变化量。式(9)、(10)建立了 15 Hz 包络信号的离散递推关系,同理,对于 135 Hz 正弦波包络信号,可以设其状态变量: $X_3(k) = m_2 \sin \beta_k$, 令 $X_4(k) = m_2 \cos \beta_k$, 则有:

$$\begin{aligned} X_3(k) &= X_3(k-1) \cos \Delta\beta + X_4(k-1) \sin \Delta\beta, k=1, 2, \dots \\ X_4(k) &= X_4(k-1) \cos \Delta\beta - X_3(k-1) \sin \Delta\beta, k=1, 2, \dots \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $\Delta\beta = 2\pi f_{135} \{t(k) - t(k-1)\}$ 表示一个采样周期内 135 Hz 正弦包络信号相位变化量。

因此可以建立 Kalman 滤波的状态方程和观测方程:

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{A}_{k,k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{W}_k \quad (9)$$

$$\mathbf{Y}_k = \mathbf{C}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k \quad (10)$$

\mathbf{X}_k 、 \mathbf{W}_k 为状态矢量和噪声矢量,可表示为:

$$\mathbf{X}_k = [X_1(k) \ X_2(k) \ X_3(k) \ X_4(k) \ X_5(k)]^T$$

$$\mathbf{W}_k = [W_1(k) \ W_2(k) \ W_3(k) \ W_4(k) \ W_5(k)]^T \quad (11)$$

式中 $X_5(k) = u_m$ 表示直流分量。根据式(9)~(11),状态转移矩阵 $\mathbf{A}_{k,k-1}$ 可表示为:

$$\mathbf{A}_{k,k-1} = \begin{bmatrix} \cos\Delta\alpha & \sin\Delta\alpha & 0 & 0 & 0 \\ -\sin\Delta\alpha & \cos\Delta\alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\Delta\beta & \sin\Delta\beta & 0 \\ 0 & 0 & -\sin\Delta\beta & \cos\Delta\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

由以上推导,状态方程可表示为:

$$\begin{bmatrix} X_1(k) \\ X_2(k) \\ X_3(k) \\ X_4(k) \\ X_5(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\Delta\alpha & \sin\Delta\alpha & 0 & 0 & 0 \\ -\sin\Delta\alpha & \cos\Delta\alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\Delta\beta & \sin\Delta\beta & 0 \\ 0 & 0 & -\sin\Delta\beta & \cos\Delta\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_1(k-1) \\ X_2(k-1) \\ X_3(k-1) \\ X_4(k-1) \\ X_5(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_1(k) \\ W_2(k) \\ W_3(k) \\ W_4(k) \\ W_5(k) \end{bmatrix} \quad (13)$$

观测方程表示为:

$$\mathbf{Y}_k = X_1(k) + X_3(k) + X_5(k) + \mathbf{V}_k =$$

$$[1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1] \begin{bmatrix} X_1(k) \\ X_2(k) \\ X_3(k) \\ X_4(k) \\ X_5(k) \end{bmatrix} + \mathbf{V}_k \quad (14)$$

结合 Kalman 滤波方程(4)~(7)以及式(13)、(14),可提取出 15 Hz、135 Hz 包络信号 $X_1(k)$ 、 $X_3(k)$,模型的流程见图 1。

Kalman 滤波模型是一个不断进行“预测—修正”的过程。其递推求解的计算方式不要求大的存储数据区,易于计算机实现,便于实时处理。

经过 Kalman 提取出的包络信号被用于方位的解算。TACAN 方位的粗测和精测过程是相同的,以方位精测为例,通过间接计算辅基准滞后过零点后第 1 个脉冲的相位解算方位,见图 2。则粗测方位可表示为:

$$\theta_{15} = \theta_a - \theta_b \quad (15)$$

$$\theta_b = \arctan \left(\frac{\sin\theta_b}{\cos\theta_b} \right) = \arctan \left(\frac{X_3(k)}{X_4(k)} \right) \quad (16)$$

式中: θ_a 表示辅基准定时点滞后过零点后第 1

个脉冲的相位; θ_b 表示过零点滞后于当前脉冲的相位差。同理,也可以根据 135 Hz 正弦包络得到的精测方位值 θ_{135} 。由于塔康方位精测 θ_{135} 具有多值性,必须与 θ_{15} 结合确保最终输出方位值 θ ,既保证高精度又不会有多值模糊性。将 θ_{135} 、 θ_{15} 由弧度制转化为角度制 θ'_{135} 、 θ'_{15} ,粗测和精测结合求得的方位值 θ' 为:

$$\theta' = 40 \left(\left\lfloor \frac{\theta'_{15}}{40} \right\rfloor \right) + \frac{\theta'_{135}}{9} \quad (17)$$

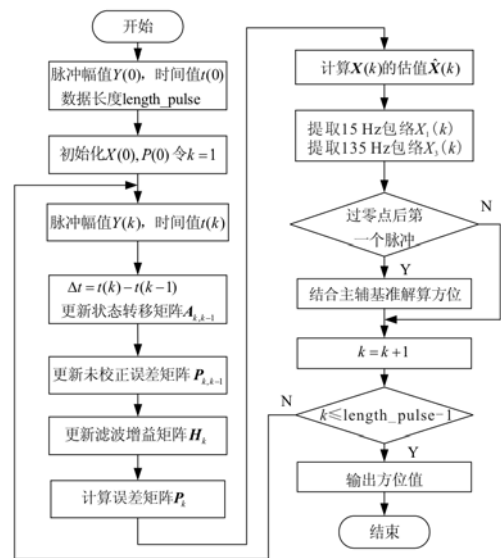


图 1 基于 Kalman 滤波的包络提取模型及方位解算流程

Fig. 1 Flow chart of distilling envelope signal model based on Kalman filtering and calculating bearing

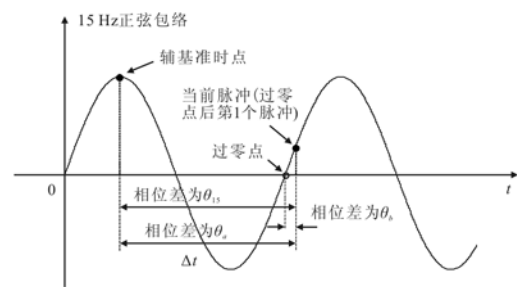


图 2 解算方位示意图

Fig. 2 Calculating bearing sketch map

3 算法验证

为验证本文方法的有效性并测试其解算精度,搭建的硬件测试环境见图 3。在验证平台中信号源采用 TACAN Beacon-Simulator DTS-200 模拟器,产生无噪声塔康模拟信号;采用 R&S SMU200A 矢量信号源产生射频高斯白噪声信号,经功率合成形成混有噪声的塔康模拟信号。塔康模拟信号经过射频模块处理后变为中频调制信号输入到信号处理板。信号处理板采用“FPGA+DSP”架构,FPGA

主要实现中频信号数字化解调及包络峰值搜索, DSP 实现本文所述的方位解算功能。以多通道示波器 Tektronix DPO4054 监测各级信号状态。

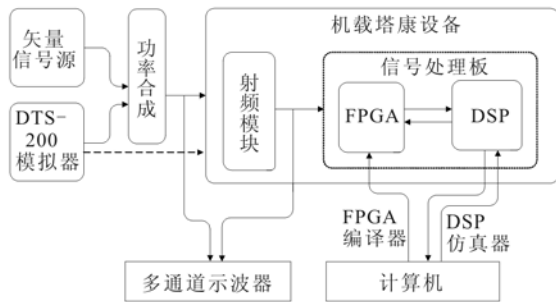


图 3 验证平台图

Fig. 3 Flat roof of validation

TACAN Beacon-Simulator DTS-200 模拟器方位设为 270°, 选用 X 模式 1 波道(载波频率为 962 MHz), 调制度设为 39%, 信号源输出电平设为 -75 dBm, 实验仪器设备连接关系如图 4 所示。待通过示波器观测到射频信号和经过射频模块处理输出中频信号稳定后, 开始运行 FPGA 和 DSP 程序, 从 DSP 中采集 Kalman 滤波前后的数据以及方位解算结果进行分析。

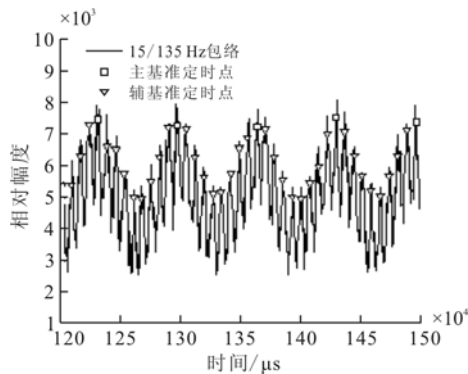


图 4 Kalman 滤波前 15/135 Hz 包络

Fig. 4 Envelope signal of 15/135 Hz before Kalman filtering

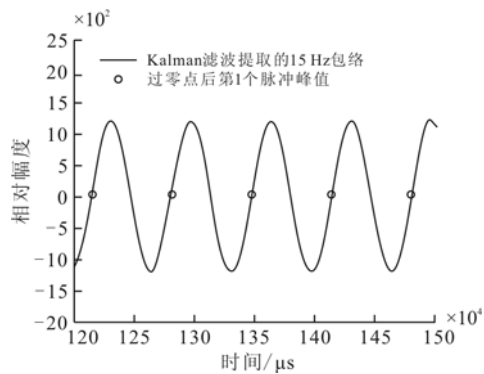


图 5 Kalman 滤波提取 15 Hz 包络

Fig. 5 Distill envelope signal of 15 Hz by Kalman filtering

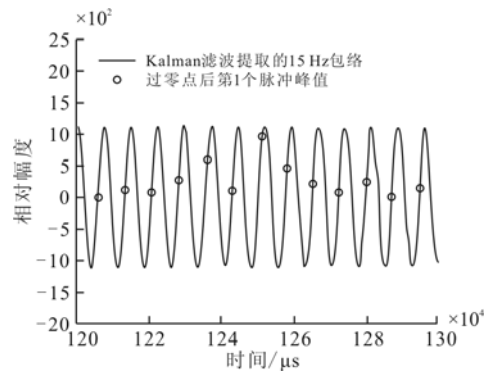


图 6 Kalman 滤波提取 135 Hz 正弦波

Fig. 6 Distill envelope signal of 135 Hz by Kalman filtering

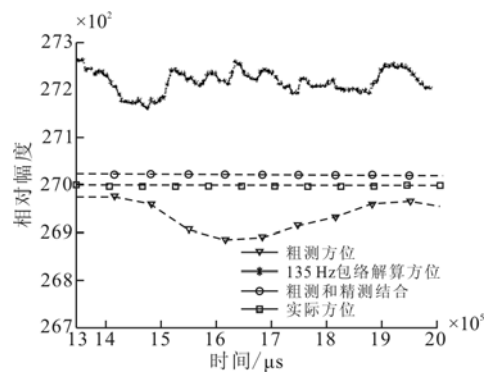


图 7 方位解算

Fig. 7 Calculating bearing

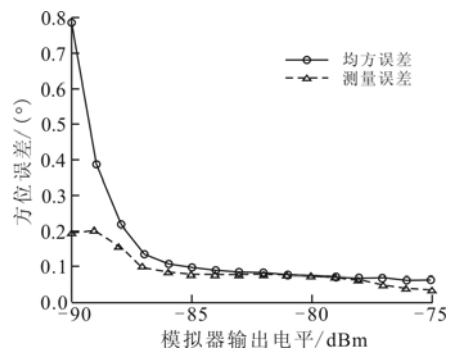


图 8 不同电平时方位解算误差值

Fig. 8 Error of calculating bearing under different output power of simulator

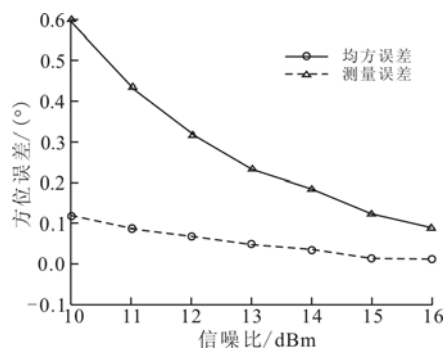


图 9 不同信噪比条件下方位解算误差

Fig. 9 Error of calculating bearing under different SNR

DTS-200 模拟器输出的模拟信号经射频模块下变频变为中频调制信号输入到信号处理板, FP-

GA 通过正交解调、带通滤波将信号搬移到基带,并搜索输出每个脉冲包络的峰值点,这些非等间隔的峰值点构成 15/135 Hz 复合包络,见图 4,其包络波形、主辅基准群脉冲数目、脉冲对的间隔等均符合塔康信号特点。图 5、6 是通过 Kalman 滤波之后提取的 15 Hz、135 Hz 包络波形以及搜索到的过零点后的第一个脉冲,与图 4 相比,包络波形光滑无明显失真,能够比较准确的表达原始信号。图 7 给出了方位解算的结果,粗测和精测结合解算方位值精度高于粗测,其偏差小,解算方位值更加平稳。改变模拟器输出电平值,对方位解算的结果统计如图 8 所示,在模拟器信号达到 -90 dBm 时仍能够正常解算方位,测量误差约为 0.2° 均方误差约为 0.8° 。随着输出电平升高,均方误差和测量误差均减小。

用矢量信号源产生高斯白噪声,并将其调制到与模拟器产生的塔康信号相同的载频上,设置噪声的带宽为 2 MHz,混入塔康模拟器输出信号作为解算信号,用模拟器的输出塔康信号的功率与矢量信号源的产生白噪声的功率之比作为混合信号的信噪比。将 DTS-200 塔康模拟器方位设置在 90° ,此时塔康信号主、辅基准处于复合调制包络的谷底,易受噪声干扰影响致使难以寻找基准点,此时为采用比相法进行方位解算的最恶劣情况。改变矢量信号源输出白噪声的输出电平,其方位解算的统计结果如图 9 所示。在信噪比为 10 dB 时均方误差为 0.61° ,测量误差小于 0.12° ,且 Kalman 滤波未出现发散现象,符合导航精度的要求。

4 结语

塔康信号提取的包络失真程度将直接影响到方位解算的精度,本文提出的基于 Kalman 滤波的塔康方位精确解算方法,通过离散系统的状态方程和观测方程描述塔康信号,建立了 Kalman 滤波提取包络模型,应用具有最小均方误差波形估计性能的 Kalman 滤波算法提取出的包络信号波形光滑且无明显失真。验证结果表明,本文方法过程合理简单,

易于实现,在低信号电平条件下仍具有较高的解算精度,有着较好的实装应用前景。

参考文献(References):

- [1] 李跃,邱致和. 导航与定位[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
LI Yue, QIU Zhihe. Navigation and orientation [M]. Beijing: National defense industry press, 2008. (in Chinese)
- [2] 龚成,郭英,齐子森. 塔康导航系统机载中频信号数字化技术[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2008,9(5):29-31.
GONG Cheng, GUO Ying, QI Zisen. Digital implement technology of TACAN IF signal [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2008,9(5):29-31. (in Chinese)
- [3] 王玉林,李艳娥. 基于线性组合的塔康方位信号处理[J]. 无线电工程,2006,36(11):38-40.
WANG Yulin, LI Yan'e. TACAN bearing signal processing based on the linear combination [J]. Radio engineering, 2006,36(11):38-40. (in Chinese)
- [4] 王维康,张斌,李睿,等. 塔康系统输出参数的精确测量方法研究[J]. 电光与控制,2010,17(7):78-79.
WANG Weikang, ZHANG Bin, LI Rui, et al. Accurate measurement of TACAN output parameters [J]. Electronics optics & control, 2010,17(7):78-79. (in Chinese)
- [5] Kalman R E. A new approach to linear filtering and prediction theory [J]. Journal of basic engineering, 1960,82(D):35-46.
- [6] Kalman R E, Bucy R S. New results in linear filtering and prediction theory [J]. Journal of basic engineering, 1961,83(D):85-108.
- [7] 付梦印,邓志红,闫莉萍. Kalman 滤波理论及其在导航系统中的应用[M]. 北京:科学出版社,2010.
FU Mengyin, DENG Zhihong, YAN Liping. Kalman filter theory and application in navigation systems [M]. Beijing: Science press, 2010. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)