

双线导鱼雷遥测信息辅助机动目标跟踪方法研究

许兆鹏, 武志东, 王顺杰, 王向阳

引用本文:

许兆鹏, 武志东, 王顺杰, 等. 双线导鱼雷遥测信息辅助机动目标跟踪方法研究[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(10): 188-191+227.

您可能感兴趣的其他文章

1. 基于粒子滤波的非线性退化设备剩余寿命自适应预测

引用本文: 王玺, 周薇, 胡昌华, 等. 基于粒子滤波的非线性退化设备剩余寿命自适应预测[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(10): 41-47+57.

2. 一种提高处理器运算能力的控制方法研究

引用本文: 江帆, 张晨洁. 一种提高处理器运算能力的控制方法研究[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(10): 239-243+254.

3. 基于多岛遗传算法的12.7 mm枪管结构优化

引用本文: 王力, 杨臻, 蔡翹楚, 等. 基于多岛遗传算法的12.7 mm枪管结构优化[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(10): 53-57.

4. SylxOS平台下的火控实时解算与实现

引用本文: 程文博, 屈艺, 吴盘龙, 等. SylxOS平台下的火控实时解算与实现[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(10): 29-34.

5. 基于改进R-L算法的运动模糊图像复原方法研究

引用本文: 陈员义, 杨文福, 周祥明, 等. 基于改进R-L算法的运动模糊图像复原方法研究[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(10): 228-232.

双线导鱼雷遥测信息辅助机动目标跟踪方法研究

许兆鹏¹, 武志东¹, 王顺杰¹, 王向阳²

(1. 海军潜艇学院, 山东 青岛 266100; 2. 91352 部队, 山东 威海 264200)

摘要:特殊条件下潜艇可利用双线导鱼雷被动声自导方式对水面目标实施攻击, 双线导鱼雷与艇艏综合声纳就构成了一个三基阵被动探测系统。此时依据探测的方位信息, 首先根据最小二乘法得到目标位置的初步估计, 然后将其作为测量值用于交互多模型算法(IMM)并结合线性卡尔曼滤波(KF), 即可实现对机动目标的跟踪, 从而有效避免应用非线性估计算法直接进行多基阵方位数据处理过程中存在的各种障碍。仿真结果表明这一算法简单有效、收敛速度快、跟踪精度高。

关键词:双线导鱼雷; 机动目标跟踪; 最小二乘法; 交互多模型算法; 卡尔曼滤波

本文引用格式:许兆鹏, 武志东, 王顺杰, 等. 双线导鱼雷遥测信息辅助机动目标跟踪方法研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(10): 188-191, 227.

Citation format: XU Zhaopeng, WU Zhidong, WANG Shunjie, et al. Research on Algorithm for Tracking of Maneuvering Target Assisted by Telemetry Information of Two Wire-Guided Torpedoes[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(10): 188-191, 227.

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2020)10-0188-04

Research on Algorithm for Tracking of Maneuvering Target Assisted by Telemetry Information of Two Wire-Guided Torpedoes

XU Zhaopeng¹, WU Zhidong¹, WANG Shunjie¹, WANG Xiangyang²

(1. Navy Submarine Academy, Qingdao 266100, China;

2. The No. 91352nd Troop of Naval Force, Weihai 264200, China)

Abstract: Surface ship could be attacked by submarine with two wire-guided torpedoes simultaneously under passive acoustic mode in certain condition. A three-array detective system was formed by two wire-guided torpedoes as well as the integrated sonar at the bow of submarine. In this paper, the preliminary estimation of target' position was acquired by the least square method based on real-time bearing data acquired by arrays firstly, then the maneuvering target could be tracked when these estimated position data were applied as measured values to Interactive Multiple Models (IMM) algorithm with Kalman Filter (KF), avoiding some problems brought by applying nonlinear estimation algorithms for data fusion directly. The result of simulation shows that the algorithm mentioned in this paper is simple, the speed of convergence is fast, and the precision of tracking is superior.

Key words: two wire-guided torpedoes; tracking of maneuvering target; least square method; IMM; KF

当潜艇攻击水面舰艇时,在目标噪音特性明显、运动要素稳定等特殊条件下可实施双线导鱼雷被动声自导方式攻击,从而有效提高鱼雷捕获概率和毁伤概率。

目标一旦探测到来袭鱼雷后会进行变向变速机动来规避鱼雷,可否在双线导鱼雷攻击目标的过程中,利用回传的遥测信息进一步辅助机动目标跟踪,对于鱼雷适时转换导引算法、节省航程、精准命中目标至关重要。

当线导鱼雷的自导装置探测到目标噪音时,可通过导线回传目标相对鱼雷的方位。此时,鱼雷的位置可通过遥测坐标实时掌握。这样,两条线导鱼雷与潜艇艇艏综合声纳就构成了一个三基阵探测系统,利用各自探测目标方位信息,即可实现多基阵纯方位目标跟踪。

上述各基阵获得的方位信息与目标的运动状态之间是非线性关系,因而目标跟踪的过程本质上是一个非线性滤波过程^[1]。目前,常用的非线性滤波方法有扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)、无迹卡尔曼滤波(Unscented Kalman Filter, UKF)和粒子滤波(Particle Filter, PF)三种,但均有其明显的缺点^[2]。EKF利用泰勒展开的一次项来对非线性方程作线性化处理,在强非线性和非高斯环境下跟踪性能较差,甚至会出现滤波发散。UKF采用确定的样本点逼近状态向量的后验概率密度函数,当状态的后验概率密度是非高斯时,跟踪性能会大大下降^[3,4]。PF利用一系列带权值的空间随机采样的粒子来逼近后验概率密度函数,计算过程繁琐且存在退化问题^[5-7]。

对于这一由双线导鱼雷和综合声纳组成的三基阵探测系统,可根据各基阵所观测的目标方位信息,应用最小二乘法进行目标位置的初步估计,将估计位置作为观测值用于IMM算法中,这样就可以在滤波环节利用KF算法,从而有效避免了直接应用上述非线性滤波算法对多基阵方位数据进行滤波带来的诸多问题,仿真验证了该算法的可行性。

1 目标位置初步估计

在目标运动要素解算过程中,可将目标与三基阵系统设定在同一平面内,即不考虑垂直方向上的影响,仅在水平面内进行研究^[8]。建立二维笛卡儿坐标系,坐标原点为第一条线导鱼雷出管时潜艇的位置点。在某一时刻,线导鱼雷1的位置为 (x_1, y_1) ,测得的方位为 α_1 ;线导鱼雷2的位置为 (x_2, y_2) ,测得的方位为 α_2 ;综合声纳的位置为 (x_3, y_3) ,测得的方位为 α_3 。则根据基阵的位置和目标方位可以确定3条方位线。在没有观测误差的情况下,这3条方位线应交于一点,交点既为目标的位置,但是在有观测误差的情况下,方位线并不一定交于一点。根据最小二乘法理论,可以认为与3条方位线距离平方和最短的点就是目标的估计位置 $M(x_m, y_m)$,如图1所示, $L_i (i=1, 2, 3)$ 为方位线, A_i 为 M 到 L_i 的垂足。

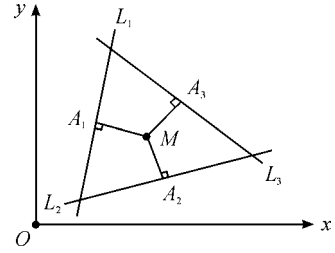


图1 目标的最小二乘估计位置示意图

在所建立的坐标系中,由方位 α_i 可求得方位线的斜率为 k_i ,则根据鱼雷或声纳的位置可求得方位线 L_i 的表达式为:

$$y = k_i(x - x_i) + y_i \quad (1)$$

$\alpha_i = 90^\circ$ 或 $\alpha_i = 270^\circ$ 时, L_i 的表达式为 $x = x_i$ 。

线段 MA_i 的长度为:

$$MA_i = \frac{|y_m - k_i x_m + k_i x_i - y_i|}{\sqrt{1 + k_i^2}} \quad (2)$$

$\alpha_i = 90^\circ$ 或 $\alpha_i = 270^\circ$ 时, $MA_i = |x_m - x_i|$ 。

目标相对于3条方位线的距离平方和为:

$$d = \sum_{i=1}^3 MA_i^2 \quad (3)$$

令 $\frac{\partial d}{\partial x_m} = 0$ 和 $\frac{\partial d}{\partial y_m} = 0$,可得方程组:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)中: $A_{11} = \sum_{i=1}^3 \frac{-2k_i}{1 + k_i^2}$; $A_{12} = \sum_{i=1}^3 \frac{2}{1 + k_i^2}$;

$$A_{21} = \sum_{i=1}^3 \frac{2k_i^2}{1 + k_i^2}; A_{22} = \sum_{i=1}^3 \frac{-2k_i}{1 + k_i^2};$$

$$B_1 = \sum_{i=1}^3 \frac{2(y_i - k_i x_i)}{1 + k_i^2}; B_2 = \sum_{i=1}^3 \frac{2k_i(k_i x_i - y_i)}{1 + k_i^2}。$$

解得目标位置的估计为:

$$\hat{x}_m = \frac{B_1 A_{22} - B_2 A_{12}}{A_{11} A_{22} - A_{12} A_{21}}, \hat{y}_m = \frac{B_2 A_{11} - B_1 A_{21}}{A_{11} A_{22} - A_{12} A_{21}} \quad (5)$$

\hat{x}_m, \hat{y}_m 亦可由 α_i 表示:

$$\hat{x}_m = f_x(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$$

$$\hat{y}_m = f_y(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$$

若基阵 i 的观测误差为 $\pm \sigma_i$,根据误差理论可求得目标位置估计的方差为:

$$\sigma_x^2 = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial f_x}{\partial \alpha_i} \right)^2 \sigma_i^2, \sigma_y^2 = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial f_y}{\partial \alpha_i} \right)^2 \sigma_i^2 \quad (6)$$

2 机动目标跟踪

在获得各时刻的位置初步估计及相应的估计方差后,采用IMM算法可实现对机动目标的有效跟踪。

机动目标跟踪系统通常是非线性而且不完全观测的,因此每一时刻的目标机动性都是高度不确定的。IMM算法是

目前性价比最高的机动目标跟踪算法之一。该方法是一种基于“软切换”的机动目标跟踪算法,对于同一个目标的不同运动状态应用不同的模型滤波。各模型滤波器通过估计状态的组合实现相互作用,模型之间采用马尔科夫链进行切换,各模型滤波器估计的加权作为最后的滤波状态估计。

在 k 时刻的目标运动状态矢量为: $\mathbf{X}(k) = [x(k), vx(k), y(k), vy(k)]^T$, $x(k), y(k)$ 为目标相对坐标原点在 x 方向与 y 方向的距离, $vx(k), vy(k)$ 为目标相对坐标原点在 x 方向与 y 方向的速度。

假定有 r 个模型:

$$\mathbf{X}(k) = \phi_j \mathbf{X}(k-1) + \mathbf{G}_j \mathbf{W}_j(k-1), j = 1, \dots, r \quad (7)$$

式(7)中: ϕ_j 为状态转移矩阵; \mathbf{G}_j 为系统干扰矩阵; $\mathbf{W}_j(k)$ 是均值为零、协方差矩阵为 \mathbf{Q}_j 的白噪声序列。用一个马尔科夫链来控制这些模型之间的转换,马尔科夫链的转移概率矩阵为:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & \dots & p_{1r} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ p_{r1} & \dots & p_{rr} \end{bmatrix}$$

测量模型为:

$$\mathbf{Z}(k) = \begin{bmatrix} \hat{x}_m(k) \\ \hat{y}_m(k) \end{bmatrix} = \mathbf{H}_j \mathbf{X}_j(k) + \mathbf{V}_j(k) \quad (8)$$

式(8)中: $\hat{x}_m(k), \hat{y}_m(k)$ 为 k 时刻初步估计目标位置的分量; $\mathbf{V}_j(k) = [\pm\sigma_x(k), \pm\sigma_y(k)]^T$ 为测量噪声矢量, $\pm\sigma_x(k)$ 和 $\pm\sigma_y(k)$ 为位置估计误差在 x 和 y 方向上的分量。 $\mathbf{E}[\mathbf{V}_j(k)] = 0, \mathbf{E}[\mathbf{V}_j(k)\mathbf{V}_j(k)^T] = \mathbf{R}(k) = \begin{bmatrix} \sigma_x^2(k) & 0 \\ 0 & \sigma_y^2(k) \end{bmatrix}$, $\mathbf{R}(k)$ 为位置估计误差方差阵,是服从高斯分布的白噪声序列,可由式(6)进行计算。

IMM 算法结构如图 2 所示,步骤如下^[9]:

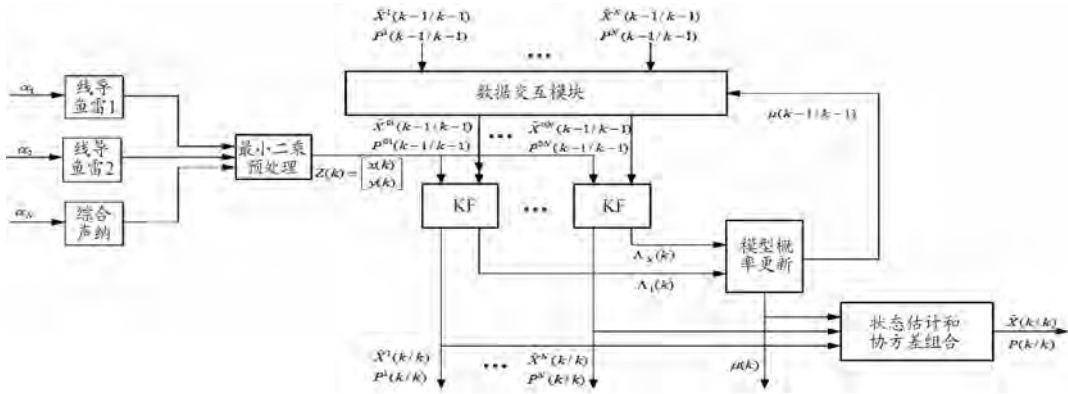


图 2 算法结构框图

步骤 1 输入交互。

$$\hat{\mathbf{X}}^{0j}(k-1/k-1) = \sum_{i=1}^r \hat{\mathbf{X}}^i(k-1/k-1) \mu_{ij}(k-1/k-1) \quad (9)$$

$j = 1, \dots, r$

$$\mathbf{P}^{0j}(k-1/k-1) = \sum_{i=1}^r \mu_{ij}(k-1/k-1) \{ \mathbf{P}^i(k-1/k-1) +$$

$$[\hat{\mathbf{X}}^i(k-1/k-1) - \hat{\mathbf{X}}^{0j}(k-1/k-1)]$$

$$[\hat{\mathbf{X}}^i(k-1/k-1) - \hat{\mathbf{X}}^{0j}(k-1/k-1)]^T \}$$

(10)

$$\mu_{ij}(k-1/k-1) = P\{M_i(k-1)/M_j(k), \mathbf{Z}^{k-1}\} =$$

$$p_{ij} \mu_i(k-1) / \bar{c}_j$$

式(10)中: p_{ij} 是模型 i 转到模型 j 的转移概率; \bar{c}_j 为归一化常数。

$$\bar{c}_j = \sum_{i=1}^r p_{ij} \mu_i(k-1)$$

步骤 2 线性卡尔曼滤波。

以 $\hat{\mathbf{X}}^{0j}(k-1/k-1), \mathbf{P}^{0j}(k-1/k-1)$ 及 $\mathbf{Z}(k)$ 作为输入对应于模型 $M_j(k)$ 进行卡尔曼滤波,即:

$$\hat{\mathbf{X}}^j(k-1/k-1) = \phi_j \hat{\mathbf{X}}^{0j}(k-1/k-1) \quad (11)$$

$$\mathbf{P}^j(k/k-1) = \phi_j \mathbf{P}^{0j}(k-1/k-1) \phi_j^T + \mathbf{G}_j \mathbf{Q}_j \mathbf{G}_j^T \quad (12)$$

$$\mathbf{K}_j(k) = \mathbf{P}^j(k/k-1) \mathbf{H}_j^T [\mathbf{H}_j \mathbf{P}^j(k/k-1) \mathbf{H}_j^T + \mathbf{R}]^{-1} \quad (13)$$

$$\hat{\mathbf{X}}^j(k/k) = \hat{\mathbf{X}}^j(k/k-1) + \mathbf{K}_j(k) [\mathbf{Z}(k) - \mathbf{H}_j \hat{\mathbf{X}}^j(k/k-1)] \quad (14)$$

$$\mathbf{P}^j(k/k) = [I - \mathbf{K}_j(k) \mathbf{H}_j] \mathbf{P}^j(k/k-1) \quad (15)$$

步骤 3 模型概率更新。

$$\mu_j(k) = P\{M_j(k)/\mathbf{Z}^k\} =$$

$$P\{Z(k)/M_j(k), \mathbf{Z}^{k-1}\} P\{M_j(k)/\mathbf{Z}^{k-1}\} = \quad (16)$$

$$\frac{1}{c} A_j(k) \sum_{i=1}^r p_{ij} \mu_i(k-1) = A_j(k) \bar{c}_j / c$$

式(16)中: c 为归一化常数,且 $c = \sum_{j=1}^r A_j(k) \bar{c}_j$; $A_j(k)$ 为观测 $\mathbf{Z}(k)$ 的似然函数。

$$A_j(k) = P\{Z(k)/M_j(k), \mathbf{Z}^{k-1}\} =$$

$$\frac{1}{(2\pi)^{n/2} |S_j(k)|^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \mathbf{v}_j^T S_j^{-1}(k) \mathbf{v}_j\right\} \quad (17)$$

式(17)中: $\mathbf{v}_j(k) = \mathbf{Z}(k) - \mathbf{H}_j \hat{\mathbf{X}}^j(k/k-1)$; $S_j(k) = \mathbf{H}_j \mathbf{P}^j(k/k-1)$

$H_j^T + R。$

步骤4 输出交互。

$$\hat{X}(k/k) = \sum_{j=1}^r \hat{X}^j(k/k)\mu_j(k) \quad (18)$$

$$P(k/k) = \sum_{j=1}^r \mu_j(k) \{P^j(k/k) +$$

$$[\hat{X}^j(k/k) - \hat{X}(k/k)][\hat{X}^j(k/k) - \hat{X}(k/k)]^T\}$$

3 仿真分析

假定两条线导鱼雷出管航行一段时间后,自导装置已开机并能稳定探测目标,此后 2 min 内目标、潜艇以及双线导鱼雷的航迹如图 3 所示。目标转向前速度 16 节,航向 145°,转向后速度 24 节,航向 45°,转向耗时 30 s,转向后继续航行 30 s,起始坐标(-300,5 000);潜艇速度 4 节,航向 270°,起始坐标(-300,0);线导鱼雷 1 速度为 30 节,航向 30°,起始坐标(-1 000,2 500);线导鱼雷 2 速度为 30 节,航向 350°,起始坐标(1 000,2 500)。方位测量精度均为 0.1°,采样间隔 1 s。

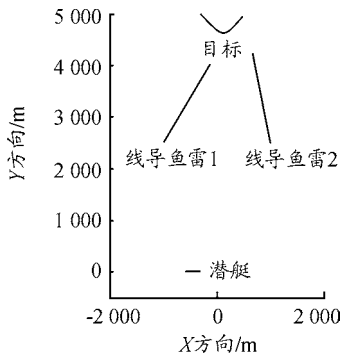


图 3 运动轨迹

这里采用匀速直线运动模型和匀加速运动模型^[10]的组合。

模型转移概率矩阵为 $P = \begin{bmatrix} 0.999 & 0.001 \\ 0.001 & 0.999 \end{bmatrix}$,模型初始概率矩阵 $U = [1, 0]$ 。进行 100 次 Monte Carlo 仿真,结果如图 4~图 6 所示。

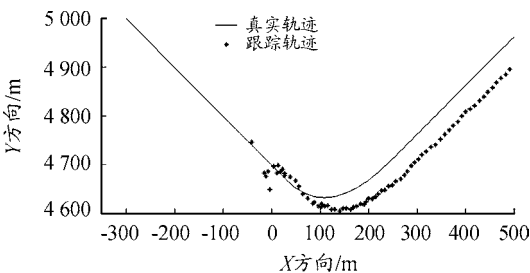


图 4 轨迹曲线

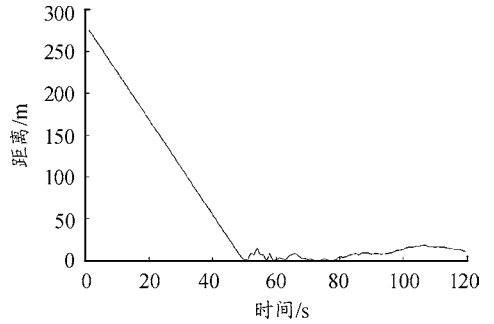


图 5 x 方向均方根误差曲线

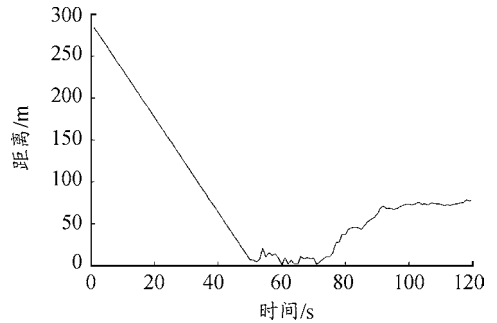


图 6 y 方向均方根误差曲线

图 4 中跟踪轨迹与目标运动轨迹基本吻合。从图 5 和图 6 可以看出,目标转向前跟踪误差大;转向过程中及转向后,x 方向均方根误差不大于 20 m,y 方向均方根误差不大于 60 m。这是因为转向前,滤波系统有一个适应过程,在适应阶段算法的输出精度较低,但随着时间延长,算法精度大幅提高,并可稳定跟踪目标。

从仿真结果看,本文中的算法可对机动目标进行有效的跟踪,滤波收敛速度快,可满足实时跟踪的需要,误差在可接受范围内。需强调的是这里跟踪精度与算法中模型的选择以及初始模型概率、转移概率矩阵等参数初值的给定有关。

4 结论

针对如何利用两条线导鱼雷遥测的信息以及综合声纳探测的方位进行机动目标跟踪的问题,给出了一个简单有效的算法。首先依据此三基阵探测系统探测到的目标方位,通过最小二乘法得到目标位置的初步估计,然后将其作为 IMM 测量值并结合 KF 进行滤波。仿真结果表明该算法收敛速度快、跟踪精度高。在实际应用中,针对鱼雷位置误差影响、鱼雷噪音遮盖、综合声纳分辨出目标噪音与鱼雷噪音等问题需要进一步研究。

(下转第 227 页)

- 场,2017,24(12):210.
- [2] 侯保江,安亚青,水涌涛,等.单晶硅晶片化学机械抛光基本特性研究[J].兵器装备工程学报,2019,40(06):163-166,205.
- [3] 田勇,唐祯安,喻言.基于无线传感器网络的芯片生产环境监测系统[J].传感技术学报,2013,26(10):1414-1419.
- [4] 孙晟.洁净室 AMC 浅析[J].洁净与空调技术,2015(02):106-107.
- [5] 刘根,蒋澄灿,芮晓光,等.工业超洁净环境设计关键技术的研究[J].机械设计与制造工程,2016,45(11):86-91.
- [6] 周金锋.半导体代工厂洁净室的设计、监控和管理案例分析[D].上海:上海交通大学,2008.
- [7] BAMODU O, XIA L, TANG L. An indoor environment monitoring system using low-cost sensor network[J]. Energy Procedia, 2017, 141: 660-666.
- [8] 任勇峰,董琳琳,刘东海.基于 BQ24105 的锂离子电池充电管理模块设计与实现[J/OL].兵器装备工程学报:1-6[2019-09-21].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1213.tj.20190611.1351.002.html>.
- [9] YU X Z, YUAN Z H, HUA W W, BAMODU O. Automatically Adjusting the Transmission Power of ZigBee End-Devices Based on RSSI[J]. Advanced Materials Research, 2013, 803: 423-429.
- [10] 曹惠茹,苑俊英,郭中华,等.障碍物对无线传感器网络信道影响试验[J].传感技术学报,2014,27(08):1107-1111.
- [11] 江长建,陈雯柏,郝翠,等.无线传感器节点信号线的电磁防护实验研究[J].兵器装备工程学报,2019,40(01):163-167.
- [12] 冉君军. ZigBee 网络抗干扰技术的研究与实现[D].绵阳:西南科技大学,2018.
- [13] 陈雯柏,崔晓丽,郝翠,等.一种物联网系统层次型抗毁性拓扑构建方法[J].北京邮电大学学报,2018,41(05):103-109,114.

科学编辑 李京华 博士(西北工业大学教授、博导)
责任编辑 唐定国

(上接第 191 页)

参考文献:

- [1] 党建武.水下多目标跟踪理论[M].西安:西北工业大学出版社,2009:155-156.
- [2] FARINA A, RISTIC B, BENVENUTI D. Tracking A Ballistic Target: Comparison of Several Nonlinear Filters[J]. IEEE Transactions on aerospace and electronic systems, 2002, 38(3): 854-867.
- [3] 张文,孙瑞胜. EKF 与 UKF 的性能比较及应用[J].南京理工大学学报,2015,39(5):614-618.
- [4] 唐哲,王庭军,陈志豪. EKF 与 UKF 的目标跟踪算法应用与对比[J].无线互联科技,2018(8):95-99.
- [5] 李晓花,李亚安,房媛媛,等. EKF 和 PF 算法及其在目标跟踪中的应用[J].声学技术,2012,31(3):296-299.
- [6] 咎孟恩,周航,韩丹,等.粒子滤波目标跟踪算法综述[J].计算机工程与应用,2019,55(5):8-17.
- [7] 王法胜,鲁明羽,赵清杰,袁泽剑.粒子滤波算法[J].计算机学报,2014,37(8):1679-1691.
- [8] 刘忠,周丰,石章松,等.纯方位目标运动分析[M].北京:国防工业出版社,2009:77.
- [9] 杨万海.多传感器数据融合及其应用[M].西安:西安电子科技大学出版社,2004:92-94.
- [10] 周宏仁,敬忠良,王培德.机动目标跟踪[M].北京:国防工业出版社,1991:12-13.

科学编辑 杨继森 博士(重庆理工大学教授)
责任编辑 唐定国