

地心坐标系下基于 UCUT-IMM 的机动目标跟踪算法

易哲¹, 张翔宇², 王国宏², 陈泽元²

(1. 中国人民解放军92932部队, 广东 湛江 524005; 2. 海军航空工程学院, 山东 烟台 264001)

摘要: 针对远距离杂波环境下弹载雷达 NED 坐标系跟踪机动目标精度差的问题, 提出一种 ECEF(地心坐标系)下基于无偏 UCUT-IMM 的机动目标跟踪算法。该方法首先利用无偏转换把弹载雷达极坐标量测值转换到 NED 坐标系下的量测值, 然后通过坐标旋转得到 ECEF 坐标系下的量测值, 在 ECEF 坐标系下跟踪滤波, 避免了远距离 NED 坐标系下跟踪滤波受地球曲率的影响, 同时为了减少坐标非线性转换旋转所带来的误差, 利用 UT(不敏变换)计算出地心坐标系下的量测协方差, 在此基础上采用 IMM(交互多模型)算法来进一步提高目标机动时的跟踪精度。仿真结果表明, 与 NED 坐标系下的跟踪滤波相比, 该算法具有更好的跟踪精度。

关键词: 机动目标跟踪; 无偏转换; 不敏变换; ECEF; IMM

中图分类号: V271.4; TN958.93 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)03-0005-04

A Maneuvering Target Tracking Algorithm Based on UCUT-IMM under ECEF Coordinates

YI Zhe¹, ZHANG Xiang-yu², WANG Guo-hong², CHEN Ze-yuan²

(1. No. 92932 Unit of PLA, Zhanjiang 524005, China; 2. Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: To improve the maneuvering target tracking precision under the clutter background at far distance, a maneuvering target tracking algorithm was proposed based on Unbiased Conversion and Unscented Transformation under the Earth Centered Earth Fixed (ECEF) coordinate system. The measured polar coordinate data of missile-borne radar was transformed into data under NED coordinate system, and then to ECEF coordinate system. The tracking was then implemented under ECEF coordinate system. In this method, the error caused by faraway nonlinear coordinate transformation was reduced by using Unbiased Conversion and Unscented Transformation. Maneuvering target tracking precision was further improved by using IMM algorithm. Simulation results show that the proposed method has higher tracking precision compared with the tracking under NED coordinate system.

Key words: maneuvering target tracking; unbiased conversion; unscented transformation; ECEF; IMM

0 引言

随着传感器技术的不断发展,传感器的探测范围逐渐扩大,如何提高远距离杂波环境下弹载雷达对机动目标的跟踪精度和稳定度,已成为目前的一个研究热点^[1]。在这一问题的研究中,NED坐标系下的数据处理是一种常用的方法,文献[2-5]研究了NED下不同关联滤波算法对目标跟踪精度的影响;文献[6-8]利

用IMM(交互多模型)有效地提高了NED坐标系下机动目标的跟踪精度;文献[9-11]研究了杂波环境下运动平台对目标的跟踪滤波算法。然而,上述文献的研究并没有充分考虑目标与导弹相距较远的情况,且相距较远时,NED坐标系下的跟踪滤波会受到地球曲率的影响,从而影响对目标的跟踪精度。因此,研究杂波环境下远距离机动目标的跟踪具有重要的实际意义。

本文提出了一种地心坐标系(ECEF)下基于UCUT-IMM的机动目标跟踪算法,该算法利用ECEF坐标系不受地球曲率影响的优点,同时利用无偏转换和不敏变换(UT)把弹载雷达极坐标量测值和协方差直接转换到地心坐标系下的量测值和量测协方差来降低远距离坐标非线性转换旋转所带来的误差,再利用

收稿日期:2013-05-13

修回日期:2014-01-13

基金项目:国家自然科学基金(61102167);青年科学基金(61102165)

作者简介:易哲(1988—),男,湖南衡阳人,硕士生,研究方向为多传感器信息融合。

IMM 提高机动目标跟踪精度。

1 杂波环境下基于 UCUT-ECEF 的机动目标跟踪模型

1.1 坐标系的选取

NED 坐标系并不是严格意义上的惯性坐标系,由于导弹平台的运动,NED 坐标系会发生一定的旋转,所录取的回波数据并不是来自同一地理位置的平台坐标系,且在导弹和目标相距较远时,在 NED 坐标系下的跟踪滤波不可避免地会受到地球曲率的影响。因此,本文选择 ECEF 地心坐标系作为跟踪数据处理坐标系,坐标系的转化过程(假设姿态角误差为零)如图 1 所示。

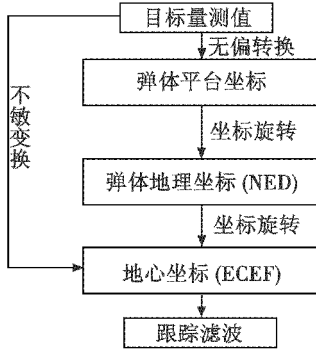


图 1 坐标系转换过程

Fig. 1 Process of coordinate transformation

1.2 基于无偏不敏变换的目标跟踪模型

1.2.1 系统模型

设目标在 ECEF 坐标系下的状态向量为

$$\mathbf{X}(k) = [x(k) \dot{x}(k) \ddot{x}(k) y(k) \dot{y}(k) \ddot{y}(k) z(k) \dot{z}(k) \ddot{z}(k)]^T \quad (1)$$

则目标在 ECEF 下的状态方程为

$$\mathbf{X}(k+1) = \Phi(k) \mathbf{X}(k) + \mathbf{V}(k) \quad (2)$$

式中: $\Phi(k)$ 是状态转移矩阵; $\mathbf{V}(k)$ 为具有协方差 $Q(k)$ 的零均值、白色高斯过程噪声序列。

1.2.2 量测模型

假设 k 时刻导弹的经度、纬度、高度分别为 $L(k)$ 、 $B(k)$ 、 $H(k)$, 弹载雷达对目标的量测值为 $z(k) = (r(k), \theta(k), \varphi(k))$, 维数为 n ($n=3$), 量测协方差为 $\sigma_R, \sigma_\theta, \sigma_\varphi$; 目标在 NED 坐标下的量测值为 $\mathbf{Z}_l(k) = [x_l(k), y_l(k), z_l(k)]^T$, 在 ECEF 坐标系下的量测值为 $\mathbf{Z}_g(k) = [x_g(k), y_g(k), z_g(k)]^T$ 。

1) 由弹载雷达极坐标值计算 ECEF 坐标值的过程。

① 利用无偏转换得到 NED 坐标系的量测值降低坐标转换误差

$$\mathbf{Z}_l(k) = f_1(r(k), \theta(k), \varphi(k)) =$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_\theta^{-1} \lambda_\varphi^{-1} r(k) \sin \eta(k) \cos \varphi(k) \\ \lambda_\theta^{-1} \lambda_\varphi^{-1} r(k) \cos \eta(k) \cos \varphi(k) \\ \lambda_\varphi^{-1} r(k) \sin \varphi(k) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $\lambda_\theta = e^{-\sigma_\theta^2/2}$; $\lambda_\varphi = e^{-\sigma_\varphi^2/2}$; 方位角 $\eta(k) = \pi/2 - \theta(k)$, y 轴指向正北; f_1 表示弹载雷达极坐标到 NED 坐标的转换函数。

② 经坐标旋转得到 ECEF 坐标系下的量测值

$$\mathbf{Z}_g(k) = f_2(\mathbf{Z}_l(k)) = \mathbf{M}(k) \mathbf{Z}_l(k) + \mathbf{Q}_g(k) \quad (4)$$

$\mathbf{M}(k) =$

$$\begin{bmatrix} -\sin(L(k)) & -\sin(B(k)) \cdot \cos(L(k)) & \cos(B(k)) \cdot \cos(L(k)) \\ \cos(L(k)) & -\sin(B(k)) \cdot \sin(L(k)) & \cos(B(k)) \cdot \sin(L(k)) \\ 0 & \cos(B(k)) & \sin(B(k)) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{Q}_g(k) = \begin{bmatrix} (\eta(k) + H(k)) \cos B(k) \cos L(k) \\ (\eta(k) + H(k)) \cos B(k) \sin L(k) \\ [\eta(k) (1 - e_1^2) + H(k)] \sin B(k) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\eta(k) = \frac{a}{\sqrt{1 - e_1^2 \sin^2 B(k)}} \quad (7)$$

式中: f_2 为 NED 坐标到 ECEF 坐标的转换函数; \mathbf{M} 为 NED 坐标到 ECEF 坐标的旋转矩阵^[12]; $\mathbf{Q}_g(k)$ 为 k 时刻导弹的地心坐标^[12]。

因此,弹载雷达极坐标值到 ECEF 坐标值的转换过程为

$$\mathbf{Z}_g(k) = f(r(k), \theta(k), \varphi(k)) = f_2(\mathbf{Z}_l(k)) = f_2(f_1(r(k), \theta(k), \varphi(k))) \quad (8)$$

式中, f 为弹载雷达极坐标到 ECEF 坐标的转换函数。

由式(8)可知,弹载雷达极坐标到 ECEF 坐标的转换函数 f 是非线性函数,传统情况下,通常采用线性化的方法计算 ECEF 坐标系下的量测噪声协方差,且在传递函数 f 非线性很强的情况下会带来较大的模型线性化误差。因此,本文利用 UT 不需要对非线性状态和量测模型进行线性化的优点来计算 ECEF 坐标下的量测噪声协方差,进一步降低非线性传递误差,提高计算量测噪声协方差的精度。

2) ECEF 坐标系下量测噪声协方差计算过程。

① 根据 UT 原理得到极坐标值 $z(k)$ 的 $2n+1$ 个采样点及权值为

$$\begin{cases} (r_0(k), \theta_0(k), \varphi_0(k)) = (r_0(k), \theta_0(k), \varphi_0(k)), \\ i=0 \\ (r_i(k), \theta_i(k), \varphi_i(k)) = (r_0(k), \theta_0(k), \varphi_0(k)) + (\sqrt{(n+\kappa)R})_i, \\ i=1, \dots, n \\ (r_i(k), \theta_i(k), \varphi_i(k)) = (r_0(k), \theta_0(k), \varphi_0(k)) - (\sqrt{(n+\kappa)R})_{i-n}, \\ i=n+1, \dots, 2n \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} w_0 = \frac{\kappa}{(n+\kappa)}, & i=0 \\ w_i = \frac{1}{2(n+\kappa)}, & i=1, \dots, 2n \end{cases} \quad (10)$$

式中: κ 为一个尺度参数, 可以为任意数值, 只要 $(n + \kappa) \neq 0$; R 为弹载雷达极坐标量测协方差, $(\sqrt{(n + \kappa)R})_i$ 表示矩阵 $(n + \kappa)R$ 平方根的第 i 个行向量或列向量, 而矩阵平方根的常见求法就是用 Cholesky 分解来获得。

② 第 i 个极坐标值转换得到 ECEF 坐标值 $Z_g^i(k) = [x_g^i(k), y_g^i(k), z_g^i(k)]^T$,

$$Z_g^i = f(r_i(k), \theta_i(k), \varphi_i(k)) \quad (11)$$

③ 在 ECEF 坐标系下 $2n + 1$ 个采样点的均值和协方差为

$$Z_g(k) = \sum_{i=0}^{2n} w_i Z_g^i(k) \quad (12)$$

$$R_g(k) = \sum_{i=0}^{2n} w_i [Z_g^i(k) - Z_g(k)][Z_g^i(k) - Z_g(k)]' \quad (13)$$

式中, $R_g(k)$ 为利用 UT 求得的 ECEF 坐标系下的量测噪声协方差。

3) 得到目标在 ECEF 坐标系下的状态和量测方程为

$$X(k+1) = \Phi(k)X(k) + V(k) \quad (14)$$

$$Z(k) = HX(k) + W(k) \quad (15)$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: $V(k) \sim N(0, Q(k))$; $W(k) \sim N(0, R_g(k))$; H 为量测矩阵; 其他递推过程同卡尔曼滤波递推公式。本文采用交互多模型算法对机动目标进行跟踪滤波。

1.2.3 交互多模型滤波算法

在利用无偏不敏变换得到 ECEF 量测值的基础上, 采用交互多模型提高对机动目标的跟踪精度, 采用匀速、匀加速(过程噪声小)、匀加速(过程噪声大)3 个模型。假定模型转移概率为

$$\pi = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{13} \\ \pi_{21} & \pi_{22} & \pi_{23} \\ \pi_{31} & \pi_{32} & \pi_{33} \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中, $\pi_{ij}, i, j=1, 2, 3$, 表示模型 i 转移到模型 j 的概率。

假设 $k-1$ 时刻第 $i(i=1, 2, 3)$ 个模型的状态估计、状态协方差、模型概率分别为 $\hat{Y}_i(k-1|k-1)$ 、 $P_i(k-1|k-1)$ 、 $u_i(k-1)$, 从 $k-1$ 时刻到 k 时刻的算法递推过程如下。

1) 交互输入。

设模型 $i(i=1, 2, 3)$ 在 $k-1$ 时刻经过交互作用后的状态估计和状态协方差分别是 $\hat{Y}_{oi}(k-1|k-1)$ 和 $P_{oi}(k-1|k-1)$, 则有

$$\hat{Y}_{oi}(k-1|k-1) = \sum_{j=1}^3 \hat{Y}_j(k-1|k-1)u_{ij}(k-1) \quad (18)$$

$$P_{oi}(k-1|k-1) = \sum_{j=1}^3 [P_j(k-1|k-1) +$$

$$\hat{Y}_{ij}(k-1|k-1) \hat{Y}_{ij}(k-1|k-1)'] u_{ij}(k-1) \quad (19)$$

式中:

$$u_{ij}(k-1) = \pi_{ij} u_j(k-1) / C_i; \quad (20)$$

$$C_i = \sum_{j=1}^3 \pi_{ij} u_j(k-1); \quad (21)$$

$$\hat{Y}_{ij}(k-1|k-1) = \hat{Y}_{oi}(k-1|k-1) - \hat{Y}_j(k-1|k-1) \quad (22)$$

2) 滤波。

将 $\hat{Y}_{oi}(k-1|k-1)$ 、 $P_{oi}(k-1|k-1)$ 作为 k 时刻第 $i(i=1, 2, 3)$ 个模型的输入, 过程同卡尔曼滤波递推公式一样, 得到相应的滤波输出为 $\hat{Y}_i(k|k)$ 、 $P_i(k|k)$ 。

3) 模型可能性及更新。

若模型 i 滤波残差为 $v_i(k)$, 相应的协方差为 $S_i(k)$, 并假定服从高斯分布, 那么模型 i 的可能性为

$$A_i(k) = \frac{1}{\sqrt{|2\pi S_i(k)|}} \exp\left[-\frac{1}{2} v_i(k)' S_i(k) v_i(k)\right] \quad (23)$$

式中:

$$v_i(k) = Z(k) - H_i(k) \hat{Y}_i(k|k-1); \quad (24)$$

$$S_i(k) = H_i(k) P_i(k|k-1) H_i(k)' + R(k) \quad (25)$$

同时模型 i 的概率更新为

$$u_i(k) = A_i(k) C_i / \sum_{j=1}^3 A_j(k) C_j \quad (26)$$

4) 交互输出。

设 $\hat{Y}(k|k)$ 、 $P(k|k)$ 分别为 k 时刻交互式的输出, 则有

$$\hat{Y}(k|k) = \sum_{i=1}^3 \hat{Y}_i(k|k) u_i(k) \quad (27)$$

$$P(k|k) = \sum_{i=1}^3 u_i(k) [P_i(k|k) + \bar{Y}_i(k|k) \bar{Y}_i(k|k)'] \quad (28)$$

式中,

$$\bar{Y}_i(k|k) = \hat{Y}_i(k|k) - \hat{Y}(k|k) \quad (29)$$

2 仿真及分析

杂波环境下, 设导弹的初始地理位置经度、纬度、高度为 $(108^\circ, 37.9^\circ, 1 \text{ km})$, 速度 400 m/s , 沿正南方向做匀速直线运动, 弹载雷达径向测距误差 15 m , 方位角误差 0.3° , 俯仰角误差 0.3° , 采样周期 1 s ; 海面舰艇的初始地理位置为 $(108^\circ, 37.1^\circ, 0 \text{ m})$, 速度为 15 m/s , 沿正北方向 $0 \sim 10 \text{ s}$ 做匀速直线运动, $10 \sim 90 \text{ s}$ 做蛇形机动, $90 \sim 100 \text{ s}$ 做匀速直线运动。对 ECEF-UCUT-IMM、ECEF-UCUT-Singer、ECEF-UCUT-CSM 和 NED-IMM 做 30 次蒙特卡罗仿真, 仿真时间为 100 s 。得到

的误差如图 2 ~ 图 4 所示。

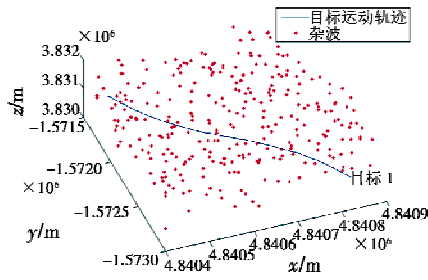


图 2 目标在地心坐标系下运动轨迹

Fig. 2 Target trajectory under the ECEF Coordinate system

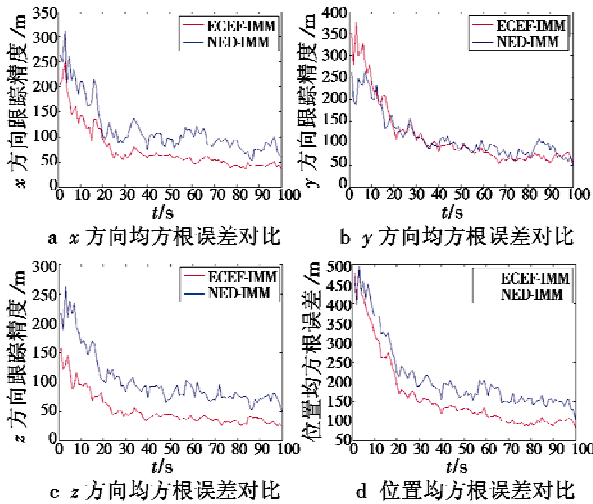


图 3 ECEF-UCUT-IMM 和 NED-IMM 均方根误差对比

Fig. 3 RMS comparison of ECEF-UCUT-IMM and NED-IMM

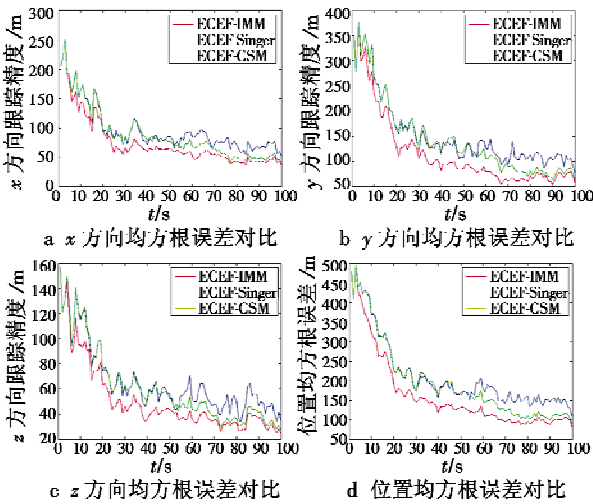


图 4 ECEF 下基于无偏不敏变换的 IMM, CSM 和 Singer 均方根误差

Fig. 4 RMS comparison of IMM, CSM and Singer based on UCUT under the ECEF coordinate system

由图 3 可知,在 x, z 方向 ECEF-UCUT-IMM 算法的跟踪精度明显好于 NED-IMM, y 方向机动阶段相差不大,在 10 s 后的机动阶段位置均方根误差上 ECEF-UCUT-IMM 跟踪精度明显好于 NED-IMM;由图 4 可知,

ECEF 下,在 x, y, z 方向及位置均方根误差上 UCUT-IMM 算法的跟踪精度好于 UCUT-Singer 和 UCUT-CSM 算法。由表 1 可知,相对于 NED-IMM, ECEF-UCUT-IMM 的均方根误差均值降低了 23.47%,对海面机动目标的跟踪精度提高明显,验证了本文所提算法的有效性。

表 1 不同算法的均方根误差均值

Table 1 The RMS mean value of different algorithms

	算 法			
	ECEF-UCUT-IMM	NED-IMM	ECEF-UCUT-CSM	无偏 ECEF-UCUT-Singer
误差均值/m	161.9543	211.6219	194.3874	210.9070

3 结论

本文在 ECEF 坐标系下把无偏转换和 UT 引入到 IMM 机动目标跟踪算法中,提出了 ECEF 下基于无偏 UT-IMM 的机动目标跟踪算法。与 NED-IMM 滤波算法相比, ECEF 下无偏 UT-IMM 方法由于采用了无偏转换和 UT,把极坐标量测值和协方差直接转换到地心坐标系下的量测值和量测协方差,有效地降低了远距离情况下坐标非线性变换旋转所带来的误差及地球曲率的影响,同时利用 IMM 算法提高了目标机动时的跟踪精度,具有很好的实际应用价值。

参考文献

- [1] 叶继坤,雷虎民,薛东风,等.基于几何关系的多导弹协同跟踪算法[J].系统工程理论与实践,2012,32(10):2332-2338.
YE J K, LEI H M, XUE D F, et al. Multiple missiles cooperative tracking algorithm base on geometric relation[J]. Systems Engineering-Theory and Practice, 2012, 32(10): 2332-2338.
- [2] CHEN H M, BAR SHALOM Y. Track association and fusion with heterogeneous local trackers[C]//46th IEEE Conference on Decision and Control, 2007;2675-2680.
- [3] LI W, LEUNG H, ZHOU Y. Space-time registration of radar and ESM using unscented Kalman filter [J]. Aerospace and Electronic Systems. IEEE Transactions on, 2004, 40(3):824-836.
- [4] 李晓波,王晟达,梁娟. ESM 与雷达航迹关联的最大似然估计算法[J].电光与控制,2007,14(1):46-49.
LI X B, WANG S D, LIANG J. ESM-radar track correlation algorithms based on maximum likelihood estimation [J]. Electronics Optics & Control, 2007, 14(1): 46-49.
- [5] 张翔宇,王国宏,王娜,等.系统误差下异地配置的雷达和电子支援测量航迹关联[J].电光与控制,2012,19(3):30-35.

参 考 文 献

- [1] 叶媛媛, 闵春平, 朱华勇, 等. 基于整数规划的多UCAV任务分配问题研究[J]. 信息与控制, 2005, 34(5): 548-552.
YE Y Y, MIN C P, ZHU H Y, et al. Multiple UCAV mission assignment based on integer programming[J]. Information and Control, 2005, 34(5): 548-552.
- [2] AIGHANBARI M. Task assignment algorithms for teams of UAVs in dynamic environments[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [3] 魏瑞轩, 李学仁. 无人机系统及作战使用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
WEI R X, LI X R. UAV systems and operational use[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009.
- [4] 陆琛. 无线数据链指挥下无人机侦察打击一体化系统研究[D]. 南京: 南京航空航天大学自动化学院, 2010.
LU C. Research on the reconnaissance and strike integrated system of UAV based on wireless digital information link[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [5] 丁明跃, 郑昌文, 周成平, 等. 无人飞行器航迹规划[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
DING M Y, ZHENG C W, ZHOU C P, et al. UAV route planning[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.
- [6] 林伟廷. 高空长航时无人机侦察任务规划问题研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2007.
LIN W T. Research on high altitude and long endurance unmanned aerial vehicle reconnaissance mission planning[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.
- [7] 雷厉. 侦察与监视[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
LEI L. Reconnaissance and surveillance[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009.
- (上接第 8 页)
- ZHANG X Y, WANG G H, WANG N, et al. Track association of radar and ESM sensors with systematic errors at different sites[J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(3): 30-35.
- [6] 李世忠, 王国宏, 吴巍, 等. IMM-EKF 雷达与红外序贯滤波跟踪机动目标[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(1): 39-42.
LI S Z, WANG G H, WU W, et al. Research on maneuvering target tracking via infrared sensor and radar sequence filtering based on IMM-EKF[J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(1): 39-42.
- [7] 刘兆磊, 王国宏, 张光义, 等. 机载火控雷达距离拖引目标的交互式多模型跟踪方法[J]. 航空学报, 2005, 26(4): 465-469.
LIU Z L, WANG G H, ZHANG G Y, et al. An IMM tracking algorithm on RGPO target in airborne fire control radar[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2005, 26(4): 465-469.
- [8] 唐尧, 杜自成, 段芳芳, 等. 机载雷达对地动目标跟踪研究[J]. 火控雷达技术, 2012, 41(1): 9-14.
TANG Y, DU Z C, DUAN F F, et al. Research on ground moving target tracking of airborne radar[J]. Fire Control Radar Technology, 2012, 41(1): 9-14.
- [9] 李波, 杜春鹏. 运动平台进行杂波跟踪的方法分析[J]. 电子科技, 2012, 25(2): 48-50.
LI B, DU C P. Analysis of clutter tracking based on the moving platform[J]. Electronics Science and Technology, 2012, 25(2): 48-50.
- [10] 李彬彬, 冯新喜, 王朝英, 等. 杂波环境下多被动传感器单目标跟踪算法[J]. 电光与控制, 2012, 19(18): 11-14.
LI B B, FENG X X, WANG C Y, et al. An algorithm for single target tracking with multiple passive sensors in clutter[J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(18): 11-14.
- [11] 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, 2006.
ZHOU H R, JING Z L, WANG P D. Maneuvering target tracking[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006.
- [12] 何友, 修建娟, 张晶炜, 等. 雷达数据处理及应用[M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2009.
HE Y, XIU J J, ZHANG J W, et al. Radar data processing with application[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.