

文章编号: 2095-4980(2015)01-0035-06

高频地波雷达多目标跟踪系统

罗亚^{a,b}, 廖庆敏^a, 王德生^b

(清华大学 电子工程系 a.深圳研究生院深圳市信息科学与技术重点实验室, 广东 深圳 518055; b.信息终端实验室, 北京 100084)

摘要: 为实现高频地波雷达中的多目标跟踪, 有效利用多普勒量测改善系统性能, 采用多假设数据关联算法的多目标跟踪系统, 提出了多普勒速度优先的二重波门设置和基于扩展卡尔曼滤波(EKF)的多假设算法。基于 EKF 的多假设算法, 直接利用 EKF 过程中得到的参数更新观测向量方差, 计算假设的概率, 实现多假设数据关联。建立仿真场景, 验证了二重波门设置能有效减少杂波干扰, 并将基于 EKF 的多假设算法与独立假设下引入多普勒速度的关联算法比较, 结果表明基于 EKF 的多假设算法在高频地波雷达这种较高杂波密度条件下效率更高, 捕捉航迹和滤除虚假点迹的能力更强。

关键词: 多普勒速度; 数据关联; 二重波门设置; 多假设算法; 扩展卡尔曼滤波

中图分类号: TN953.6

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201501.0035

Multiple targets tracking system of the High Frequency ground-wave radar

LUO Ya^{a,b}, LIAO Qingmin^a, WANG Desheng^b

(a. Shenzhen Key Lab. of Information Sci&Tech, Department of Electronic Engineering, Shenzhen Guangdong 518055, China;

b. Information Terminal Lab, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A double gate setting with priority of Doppler velocity and the Extended Kalman Filter(EKF) based Multiple Hypothesis Tracking(MHT) algorithm are proposed in order to realize Multiple Targets Tracking(MTT) in High Frequency(HF) ground-wave radar, and to effectively improve the performance of MTT by using the Doppler measurement. In the EKF based MHT, parameters obtained in the EKF are adopted directly to calculate the probability of each hypothesis. A simulation scene is built, and the EKF based MHT algorithm is compared with the one which assumes that the Doppler measurement is independent from the radius measurement. Simulation results show that the double gate setting helps induce number of clutter, and the EKF-based MHT algorithm is better than the other one under dense environments of HF ground-wave radar with stronger track-catching and false-alarm-filtering ability and higher efficiency.

Key words: Doppler velocity; data association; double gate setting; Multiple Hypothesis Tracking; Extended Kalman Filter

对于检测跟踪过程, 地波雷达的主要特点有^[1]: a) 多普勒速度量测, 多普勒速度分辨率高, 距离和方位分辨率低; b) 海杂波强, 对海探测虚假目标点迹多; c) 数据率低, 采样周期长。仅依靠目标位置量测的多目标跟踪系统在低距离和方位分辨率的条件下准确度大大降低。理论证明, 一维空间下将多普勒速度加入到观测向量中, 增加了观测矩阵的秩, 能提高跟踪精确度^[2]。扩展到二维平面时, 跟踪精确度与多普勒速度和距离的相关系数有关^[3]。地波雷达的多普勒速度分辨力最高可达到 1 m/s^[4], 可以有效实现对不同速度目标的分辨。怎样利用多普勒速度信息尽可能改善地波雷达多目标跟踪(Multiple Targets Tracking, MTT)系统的性能是研究的重点。国内研发的 OSMAR2000 高频地波雷达系统采用机动目标“当前”统计模型和修正的联合概率数据互联(Modified Joint Probabilistic Data Association, MJPDA)算法在极坐标系中多目标跟踪^[5]。极坐标下多普勒速度的加入不会带来非线性滤波的问题, 但相应滤波和外推过程会比较复杂^[2]。多普勒速度改进的联合概率数据互联(Joint Probabilistic Data Association-DopplerR, JPDA-DR)方法将扩展卡尔曼滤波(EKF)方法和 JPDA 关联算法结合, 能有效实现密集杂波环境下的多目标跟踪^[6]。该算法中采用 EKF 实现局部线性化, 会引入线性化误差, 同时带来计算量的增加。

收稿日期: 2014-03-31; 修回日期: 2014-04-24

对此,一步点航初始化方法和多普勒信息与线性多目标综合概率关联(Linear Multi-target Integrated Probabilistic Data Association, LMIPDA)结合的算法被提出^[7],算法假设多普勒速度与位置相互独立,推导出不需要线性化的跟踪滤波方法,并证明这种方法也能利用多普勒量测提高系统跟踪关联性能。利用多普勒速度提高多目标跟踪系统性能的研究主要集中在采用 JPDA 算法的系统中。与 JPDA 算法相比,多假设跟踪(Multiple Hypothesis Tracking, MHT)算法是理想条件下理论上最优的算法,且能在数据关联的过程中同时实现航迹起始和终结,在国外很多先进的雷达系统中被采用^[2]。加拿大 SWR-503 高频地波雷达就是采用多假设算法实现数据关联^[1]。怎样利用多普勒速度改善采用 MHT 算法的多目标跟踪系统的性能尚未有系统的研究和结论。本文首先简单介绍多假设算法,然后提出多普勒速度优先的二重波门设置,并通过 EKF 和多假设方法结合的方法,利用多普勒速度辅助实现多目标跟踪,最后通过仿真比较了此时的多目标跟踪系统和保持线性滤波系统的基础上引入多普勒速度的多目标跟踪系统的性能。

1 多假设数据关联算法

对二维平面观测系统,记在采样时刻 k 第 i 个目标的状态向量为 $\mathbf{X}_i(k)=[x_i(k),\dot{x}_i(k),y_i(k),\dot{y}_i(k)]^T$,第 j 个观测点迹对应的观测向量为 $\mathbf{Z}_j(k)=[\rho_j(k),\theta_j(k)]^T$, ρ 表示观测距离, θ 表示观测方位角。跟踪滤波可以在不同的坐标系中完成,在极坐标系中跟踪滤波通常会带来“伪加速度”,为了建立更简单的数学模型实现滤波和关联,一般多采用混合坐标系^[2]。将观测向量转化到直角坐标系,转化观测向量为 $\mathbf{Z}_j^c(k)=[z_{j,x}(k),z_{j,y}(k)]^T$,后面的公式中都直接采用转换观测向量作为观测向量,省略上标。时刻 k 观测向量的合集记为 $\mathbf{Z}(k)$,包含 m_k 个点迹,前 k 个采样时刻观测向量的合集记为 $\mathbf{Z}^k=\{\mathbf{Z}(i)\}_{i=1}^k$ 。多假设算法的主要实现过程如下:

- 1) 根据文献[8]中的方法求出所有可能的假设事件。
- 2) 求假设的后验概率。对于时刻 k 的假设事件 θ ,它的后验概率 $P\{\theta/\mathbf{Z}^k\}$ 如式(1)所示:

$$P\{\theta/\mathbf{Z}^k\}=P\{\theta/\mathbf{Z}(k),\mathbf{Z}^{k-1}\}=\frac{1}{C}P\{\mathbf{Z}(k)/\theta,\mathbf{Z}^{k-1}\}P\{\theta/\mathbf{Z}^{k-1}\}=\frac{1}{C}P\{\mathbf{Z}(k)/\theta,\mathbf{Z}^{k-1}\}P\{\theta\} \quad (1)$$

式中 C 是归一化因子,

$$P\{\mathbf{Z}(k)/\theta,\mathbf{Z}^{k-1}\}\propto\prod_{j=1}^{m_k}P(\mathbf{Z}_j(k)/\mathbf{Z}_i(k|k-1),\mathbf{S}_i(k))^{\tau_j(\theta)} \quad (2)$$

$P(\mathbf{Z}_j(k)/\mathbf{Z}_i(k|k-1),\mathbf{S}_i(k))=N[\mathbf{Z}_j(k);\mathbf{Z}_i(k|k-1),\mathbf{S}_i(k)]$ 。 t 表示假设 θ 中和量测 j 关联的航迹号, $\hat{\mathbf{Z}}_i(k|k-1)$ 表示航迹 t 由第 $k-1$ 个采样时刻对第 k 个采样时刻的预测状态, $\mathbf{S}_i(k)$ 表示该航迹在时刻 k 的新息协方差。

对 $j=1,2,\dots,m_k$,

$$\tau_j(\theta)=\begin{cases} 1, & \text{关联} \\ 0, & \text{不关联} \end{cases} \quad (3)$$

详细的假设概率计算公式可参考文献[2]。

- 3) 全局航迹删除。航迹的后验概率为包含该航迹的所有假设的概率之和,设定概率门限删除航迹。

2 多普勒量测辅助的多目标跟踪系统

2.1 多普勒速度优先的二重波门设置

当虚警点多,观测的区域面积大时,因目标的机动性有限,故不需要将某一航迹与所有的观测点迹相关联,波门设置过程能有效地减少数据关联的运算量。对没有多普勒量测的雷达,常常采用椭圆波门设置。

新息 $\Delta\mathbf{Z}_{i,j}(k)=\mathbf{Z}_j(k)-\hat{\mathbf{Z}}_i(k|k-1)$,航迹 i 的新息协方差矩阵为 $\mathbf{S}_i(k)$,第 j 个观测向量与航迹 i 的观测预测向量的距离定义为 $d_{i,j}^2(k)=\Delta\mathbf{Z}_{i,j}(k)^T\mathbf{S}_i(k)^{-1}\Delta\mathbf{Z}_{i,j}(k)$,它服从 $\chi^2(m)$ 分布, m 代表观测向量的维数,对二维平面上的目标探测 $m=2$ 。当 $d_{i,j}^2(k)<\alpha$ 时,第 j 个观测点迹被视为第 i 个目标的候选点迹。 α 决定了设置的波门覆盖第 i 条航迹在当前时刻的实际点迹的概率。当观测向量加入多普勒速度量测,依旧按照此方法设置椭圆波门,观测向量维数变化,但 m 仍取 2。

地波雷达系统中有较高精确度的多普勒速度量测,可以使用多普勒速度量测优先在多普勒速度维预筛选,实现二重波门设置。

首先计算点迹 j 与航迹 i 在多普勒速度上的距离 $d_{i,j}^{\dot{\rho}}(k) = |\dot{\rho}_j(k) - \dot{\rho}_i(k-1)|$, $\dot{\rho}_i(k-1)$ 表示航迹 i 在上一时刻关联的点迹多普勒速度量测值。 $d_{i,j}^{\dot{\rho}}(k) < a_{\max} \cdot T$ 时,点迹 j 是目标 i 的候选点迹。然后按上面方法对可能的候选点迹设置椭圆波门筛选。 a_{\max} 和 T 分别由目标特点和采样周期决定。预筛选能够一定程度上减少椭圆波门设置的计算量。

计算多普勒速度的距离时未采用上一时刻对当前时刻的多普勒速度预测值,直接采用上一时刻关联点迹的多普勒速度观测值,使得距离 $d_{i,j}^{\dot{\rho}}(k)$ 不依赖于滤波精确度,能够忽略滤波带来的影响。

2.2 基于 EKF 的多假设算法

主要考虑 2 种将多普勒速度用于数据关联的方式: a) 假设多普勒速度和距离量测相互独立; b) 则直接将多普勒量测扩展到观测向量中滤波关联,因为 $\dot{\rho}(t)$ 和 $x(t), y(t), \dot{x}(t), \dot{y}(t)$ 是非线性关系,见式(4),把多普勒速度变量直接纳入到观测向量中时需要实现非线性滤波。前者的主要目的在于使多目标跟踪系统中不需要考虑多普勒量测和距离的非线性关系,简化滤波过程。

$$\dot{\rho}(t) = \frac{x(t) \cdot \dot{x}(t) + y(t) \cdot \dot{y}(t)}{\sqrt{x^2(t) + y^2(t)}} \quad (4)$$

记多普勒速度和距离的相关系数为 r ,多普勒雷达的观测向量扩展为 $\mathbf{Z}_j^e(k) = [z_{j,x}(k), z_{j,y}(k), z_{j,\dot{\rho}}(k)]^T$ 。假设多普勒速度量测和距离量测相互独立, $r=0$,在保持线性系统的基础上加入多普勒量测^[7],有:

$$P([z_{j,x}(k), z_{j,y}(k), z_{j,\dot{\rho}}(k)] / \mathbf{Z}^{e,k-1}, \theta) = P([z_{j,x}(k), z_{j,y}(k)] / \mathbf{Z}^{k-1}, \theta) P(z_{j,\dot{\rho}}(k) / \mathbf{Z}^{\dot{\rho},k-1}, \theta) \quad (5)$$

式中 $\mathbf{Z}^{\dot{\rho},k-1}$ 表示前 $k-1$ 个时刻多普勒速度量测的集合。多普勒量测作为一个变量建立状态转移方程和观测方程独立跟踪滤波。关联时用式(5)的结果替代式(2)中的 $P(\mathbf{Z}_j(k) / \mathbf{Z}_i(k) | k-1, \mathbf{S}_i(k))$ 。

根据文献[3],多普勒速度量测和径向距离量测非相互独立,对向上扫描线性调频波, $r=-0.9$;对向下扫描线性调频波, $r=0.9$ 。

从另一个角度, r 可由式(6)求得。

$$r = \frac{\langle \rho(t), \dot{\rho}(t) \rangle}{\|\rho(t)\| \cdot \|\dot{\rho}(t)\|} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \rho(t) \dot{\rho}(t) dt}{\sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} \rho^2(t) dt} \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} \dot{\rho}^2(t) dt}} \quad (6)$$

当目标从初始位置 (x_0, y_0) 以 x, y 方向上的固定速度 v_x, v_y 匀速直线运动时,有:

$$r = \lim_{t_0 \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^{t_0} [x_0 v_x + y_0 v_y + (v_x^2 + v_y^2)t] dt}{\sqrt{\int_0^{t_0} [x_0^2 + y_0^2 + (v_x^2 + v_y^2)t^2] dt} \sqrt{\int_0^{t_0} \frac{[x_0 v_x + y_0 v_y + (v_x^2 + v_y^2)t]^2}{x_0^2 + y_0^2 + (v_x^2 + v_y^2)t^2} dt}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (7)$$

式(7)说明多普勒速度和径向距离非独立。

将多普勒量测扩展到观测向量中实现非线性滤波。采用 EKF 建模方法,对 $\dot{\rho}$ 进行局部线性化,实现跟踪滤波。建立状态转换方程和观测方程,如式(8)所示。

$\mathbf{Z}^e(k+1) = [x(k+1) \ y(k+1) \ \dot{\rho}(k+1)]^T$, $\mathbf{X}(k) = [x(k) \ \dot{x}(k) \ y(k) \ \dot{y}(k)]^T$ 。 $\mathbf{H}(k+1)$ 表示观测矩阵, $\mathbf{W}(k+1)$ 表示观测噪声向量, $\mathbf{F}(k)$ 是状态转移矩阵, $\mathbf{V}(k)$ 是状态转移噪声向量, $\mathbf{R}(k)$ 和 $\mathbf{Q}(k)$ 分别是 $\mathbf{W}(k)$ 和 $\mathbf{V}(k)$ 的协方差矩阵。

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}^e(k+1) &= \mathbf{H}(k+1)\mathbf{X}(k+1) + \mathbf{W}(k+1) \\ \mathbf{X}(k+1) &= \mathbf{F}(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{V}(k) \end{aligned} \quad (8)$$

此时观测矩阵为:

$$\mathbf{H}(k) = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ \frac{\partial \dot{\rho}}{\partial x} & \frac{\partial \dot{\rho}}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial \dot{\rho}}{\partial y} & \frac{\partial \dot{\rho}}{\partial \dot{y}} \end{bmatrix} \mathbf{X}(k/k-1) \quad (9)$$

式中： $\mathbf{X}(k/k-1)$ 表示根据 $k-1$ 时刻的状态对 k 时刻目标状态的估计； T 为采样周期。

在多假设数据关联中，对三维观测向量，在采用公式(1)计算假设的概率时新息协方差矩阵扩展为 3×3 的矩阵，它的计算见式(10)， $\mathbf{R}(k)$ 的取值很重要。 $\mathbf{R}(k)$ 的计算见式(11)。 $\mathbf{P}(k/k-1)$ 是 $k-1$ 时刻对 k 时刻目标状态向量协方差矩阵的估计。

$$\mathbf{S}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{P}(k/k-1)\mathbf{H}(k)^T + \mathbf{R}(k) \quad (10)$$

$$\mathbf{R}(k) = \begin{bmatrix} R_{xx}(k) & R_{xy}(k) & R_{x\rho}(k) \\ R_{xy}(k) & R_{yy}(k) & R_{y\rho}(k) \\ R_{x\rho}(k) & R_{y\rho}(k) & R_{\rho\rho}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & r_{xy}\sigma_x\sigma_y & r_{x\rho}\sigma_x\sigma_\rho \\ r_{xy}\sigma_x\sigma_y & \sigma_y^2 & r_{y\rho}\sigma_y\sigma_\rho \\ r_{x\rho}\sigma_x\sigma_\rho & r_{y\rho}\sigma_y\sigma_\rho & \sigma_\rho^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中： σ_x^2 和 σ_y^2 分别是 x 和 y 的方差； r 表示相关系数。与二维情况相比，需要求出 $r_{x\rho}$ 和 $r_{y\rho}$ 。由式(4)可知 $r_{x\rho}$ 和 $r_{y\rho}$ 的计算较复杂，采用与EKF中相似的方法将 $\rho(t)$ 线性化，如式(12)。 $r_{x\rho}$ 和 $r_{y\rho}$ 从 $\mathbf{H}(k)$ 矩阵中获得。

$$r_{x\rho} = \frac{\partial \rho}{\partial x}, \quad r_{y\rho} = \frac{\partial \rho}{\partial y} \quad (12)$$

采用二重波门设置方法，和基于EKF的MHT算法的多目标跟踪系统，主要实现步骤如下：

- 1) 获得 $\mathbf{X}(k/k-1)$ ，求得 $\mathbf{H}(k)$ 矩阵的值，更新 $\mathbf{R}(k)$ 矩阵，实现扩展卡尔曼滤波；
- 2) 多普勒速度优先的波门设置， $d_{i,j}^\rho(k) < a_{\max} \cdot T$ 且 $d_{i,j}^2(k) < \alpha$ 点迹 j 视为目标 i 的候选点迹；
- 3) 按照第2部分的步骤，结合本部分的公式实现多假设算法。

3 仿真和分析

3.1 场景设计

每个周期空间中的杂波数按参考文献[2]中方法确定，取参数 λ ，产生(0,1)区间上均匀分布的随机数 r ，然后按式(13)：

$$e^{-\lambda} \sum_{j=0}^{J-1} \frac{\lambda^j}{j!} < r \leq e^{-\lambda} \sum_{j=0}^J \frac{\lambda^j}{j!} \quad J=1,2,\dots \quad (13)$$

确定 J 为需要产生的虚假量测的数目。每个周期 J 个虚假量测按均匀分布随机地分布在雷达视线范围内。雷达视线范围是一个扇形区域。仿真中，坐标转换后直接在直角坐标系中显示和观察。

对地波雷达，还要考虑多普勒速度维上的杂波。地波雷达系统同时探测空中目标和海面目标，对2种目标，系统有不同的工作参数和模式，探测空中目标的系统采样周期比探测海上目标的系统采样周期短。检测背景中的噪声和干扰大部分服从高斯分布。飞机目标的检测背景以大气噪声为主，服从高斯分布。舰船目标的检测背景以海杂波为主，海浪的起伏变化随时间的不同而不同，对海探测的难度比对空探测要大。这里对海面目标探测系统进行仿真，海浪在统计特性上可以近似为正态的平稳随机过程^[1]，故场景中多普勒速度上的噪声点数目也可以按照式(13)确定，多普勒速度上的杂波参数记为 λ_b ，杂波点和实际目标点迹的位置量测相同。

对系统设计8个运动目标，采样周期为20s，观测时间为50个周期， $\lambda=50$ ，观测距离的标准差 $\sigma_\rho=0.1$ km，观测方位角的标准差 $\sigma_\theta=1^\circ$ ， $\lambda_b=5$ 。8个目标中1~4号目标作匀速直线运动，5号作匀速圆周运动，6~8号作匀加速运动， x,y 方向的加速度随机生成，在 $[-0.08,0.08](\text{m/s}^2)$ 内均匀分布。目标的运动状态设定见表1。其中，目标1和目标2为航迹交叉，目标3和目标4轨迹相隔700m平行运动。

表1 目标编号及状态设置

Table1 Target state description

target number	initial x,y location/km	initial velocity
1	(30,0)	$v_x=-10$ m/s, $v_y=10$ m/s
2	(25,0)	$v_x=10$ m/s, $v_y=10$ m/s
3	(20,10)	$v_x=20$ m/s, $v_y=0$
4	(20,10.7)	$v_x=20$ m/s, $v_y=0$
5	(5,2)	$v_\theta=0.0013$ rad/s with center (0,2 km)
6	(5,5)	$v_x=13$ m/s, $v_y=7$ m/s
7	(70,15)	$v_x=1$ m/s, $v_y=3$ m/s
8	(70,0)	$v_x=-15$ m/s, $v_y=5$ m/s

3.2 仿真结果和分析

多普勒速度优先的二重波门设置在仿真中有效减少波门内杂波点数目。特别是对多普勒速度维上的杂波，它们和目标点迹有相同的位置坐标，主要依靠多普勒速度区分。EKF结合MHT的多目标跟踪仿真系统中二重波门设置，使波门内点迹的平均虚警数目有所下降。

分别采用假设径向速度独立的多假设算法(Liner Multi-target MHT, LMMHT)和基于 EKF 的多假设算法(EKF-MHT)实现关联跟踪, 2 种算法的实现均采用二重波门设置。对于交叉目标和平行运动目标, 错误关联的概率见表 2。

用平均每帧运行时间、平均每帧的确认真实航迹数目(Number of Conformed True Targets, NCTT)和平均每帧的确认虚假航迹数目(Number of Conformed False Targets, NCFT)来评价关联的性能^[7-9]。蒙特卡洛仿真后得到表 3 中的结果。表 3 显示, 基于 EKF 的多假设算法有更强的航迹捕捉能力、滤除虚假点迹的能力和更高的效率。

改变产生杂波时参数 λ 的值, 平均每帧的运行时间、确认的真实航迹数、确认的虚假航迹数随着杂波密度的变化见图 1~图 3。

图 1 显示在较密集杂波环境下, EKF-MHT 算法能更好地捕捉到正确航迹。2 种算法都有真实航迹数随杂波数的增加而回升的过程, 这是因为密集杂波环境下, 可能存在比观测点迹更接近实际航迹的杂波点迹存在。图 2 中 LMMHT 算法的虚假航迹数随杂波数显著增加, 而 EKF-MHT 算法能较好地控制虚假航迹的数目增加的趋势。图 3 显示 2 种方法的运行时间都随着杂波数以不小于线性的速度上升。这与多假设的计算量随着杂波数增加成指数增长的结论相符。杂波数较小时, 2 种方法平均每帧运行的时间相近, 但杂波数较多时, EKF-MHT 比 LMMHT 能更好地控制运行时间随杂波数的增长, 有更高的效率。这是因为虽然对于每条航迹 EKF 计算量比卡尔曼滤波要大, 但是基于 EKF 的多假设算法得到的虚假航迹数少, 所以平均每帧的运行时间比假设径向速度独立的算法更少。

通过上面的比较可以看出, 采用 EKF-MHT 的多目标跟踪系统比保持线性系统引入多普勒量测的系统有更好的性能和更高的效率, 适用于密集杂波环境。该算法的不足之处在于当系统非线性特别强时, EKF 可能不会收敛, 整个系统不能正确地实现滤波和关联, 此时需要对 EKF 算法做一些改进。

4 结论

本文针对地波雷达的特点, 对采用多假设关联算法的多目标跟踪系统, 提出了多普勒速度优先的二重波门设置。并在多假设算法和独立假设下的多普勒数据关联算法的基础上, 提出了基于 EKF 的多假设算法实现多普勒量测辅助的多目标跟踪系统, 理论证明了其合理性, 并通过仿真比较验证这种引入多普勒速度的方法相对于独立考虑多普勒量测的引入方法, 不仅更能改善系统性能, 并且在较密集杂波的条件下有更高的效率。对于噪声点迹较密集的地波雷达多目标跟踪系统, 采用二重波门设置和基于 EKF 的多假设算法能利用多普勒量测以较高的效率更好地捕获新航迹, 滤除虚假点迹。

表 2 交叉、平行目标错误关联概率对比

	crossing targets	parallel targets
LMMHT	0.307 6	0.045 0
EKF-MHT	0.023 6	0.001 0

表 3 两种算法性能对比

	time/scan(s)	NCTT/scan	NCFT/scan
LMMHT	0.167 3	4.79	2.38
EKF-MHT	0.140 5	4.91	1.14

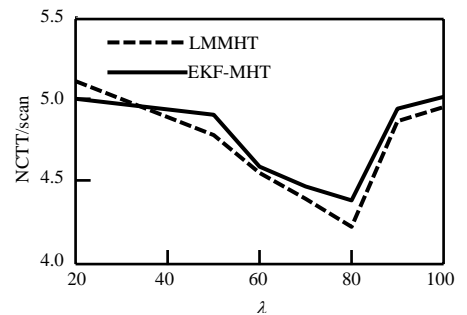


Fig.1 NCTT/scan varies with clutter parameter
图 1 确定真实航迹数/帧随杂波数参数变化图

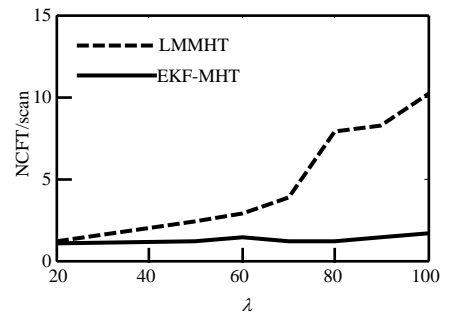


Fig.2 NCFT/scan varies with clutter parameter
图 2 确定虚假航迹数/帧随杂波参数变化图

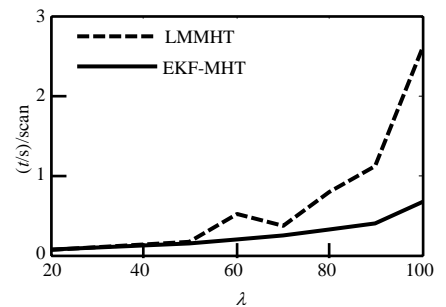


Fig.3 Time/scan varies with clutter parameter
图 3 运行时间/帧随杂波数变化图