

密集杂波环境下基于两点量测和 Viterbi 的 PDA 算法研究*

王海鹏, 丛 瑜, 何 友

(海军航空工程学院, 山东烟台 264001)

摘 要: 为了更好地解决密集杂波环境下的目标跟踪问题, 弥补密集杂波环境下概率数据互联算法(PDA)误关联概率偏高的不足, 在对现有的 Viterbi 数据互联算法进行深入分析的基础上, 给出了一种计算两个量测之间互联概率的表达式, 提出了一种基于两点量测的 Viterbi 数据互联算法(TM-VDA)。仿真验证, TM-VDA 能够很好地完成对目标的跟踪, 特别是在密集杂波环境下误跟踪率较 PDA 大大降低。

关键词: Viterbi; 概率数据互联; 数据互联; 杂波密度; 误关联概率

中图分类号: TN953 文献标志码: A

Research to PDA Algorithm Based on Two Measurements and Viterbi in High-density Clutter

WANG Haipeng, CONG Yu, HE You

(Naval Aeronautical and Astronautical University, Shandong Yantai 264001, China)

Abstract: Aiming at solving the problem of target tracking in high-density clutter, remedying the deficiency of PDA that the correlation error ratio of is high in high-density clutter, based on a deep analysis to the existent Viterbi data association algorithm, an expression which can calculate the association probability between two measurements is given and an Viterbi data association algorithm based on two measurements(TM-VDA) is presented. The simulation results show that TM-VDA can track the target very well. Compared with the correlation error ratio of PDA, that of TM-VDA could be reduced greatly in high-density clutter.

Keywords: Viterbi; PDA; data association; clutter density; correlation error ratio

0 引言

数据互联算法是解决雷达数据处理中目标跟踪的主要方法, 概率数据互联算法(PDAF)^[1]是其中具有代表性的算法, 能够完成杂波环境下的目标跟踪。

PDAF 计算每个量测值与预测值之间的后验概率, 利用这些后验概率对量测值进行加权来获得目标的估计值, 从而实现对目标的跟踪, 在杂波密集环境下, PDA 的跟踪效果要好于最近邻域算法(NNSF)^[1-5], 但如果杂波十分密集时, 目标回波获得的权值可能很小, 导致目标状态更新值偏差较大, 不能对目标进行有效跟踪, 误跟

踪率偏大。

Viterbi 算法^[8-11]在数学上利用向前迭代的方法解决隐 Markov 模型的解码问题, 文中基于 Viterbi 算法的思想, 在其原有框架下加入数据互联的概念, 提出了一种新的密集杂波环境下的目标跟踪算法, 即基于两点量测的 Viterbi 数据互联算法(TM-VDA)。

1 系统模型

离散时间系统的状态方程表示为:

$$\mathbf{X}(k) = \mathbf{F}(k)\mathbf{X}(k-1) + \mathbf{V}(k) \quad (1)$$

其中: $\mathbf{V}(k)$ 为零均值、高斯白噪声, 其协方差为 $\mathbf{Q}(k)$ 。

* 收稿日期: 2008-08-26

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0912); 国家自然科学基金(60672140); 全国优秀博士论文作者专项资金(200237)资助

作者简介: 王海鹏(1985-), 男, 山东滨州市人, 硕士研究生, 研究方向: 多传感器多目标跟踪。

离散时间系统的量测方程为：

$$\mathbf{Z}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{W}(k) \quad (2)$$

其中： $\mathbf{Z}(k)$ 为量测向量， $\mathbf{H}(k)$ 为量测转移矩阵， $\mathbf{W}(k)$ 为零均值、高斯白噪声，其协方差为 $\mathbf{R}(k)$ 。

2 TM-VDA 算法

在 Viterbi 算法^[8-11] 的框架下加入数据互联的概念可实现对目标的跟踪，基于两点和 Viterbi 的数据互联算法(TM-VDA)就是在此理念下提出的，其具体算法如下：

设 $\mathbf{Z}(k)$ 表示落入目标相关波门内的候选回波集合， \mathbf{Z}^k 表示直到 k 时刻确认量测的积累集合，即：

$$\mathbf{Z}^k = \{\mathbf{Z}(j)\}_{j=1}^k \quad (3)$$

其中：

$$\mathbf{Z}(k) = \{z_i(k)\}_{i=1}^{m_k} \quad (4)$$

m_k 为 k 时刻传感器所获取的量测值的个数。

假定对目标进行跟踪的起始时刻为 $k = 3$ ，终止时刻为 $k = N$ ，为了便于说明，设定以下变量：

1) $a_{ij}(k)$ 表示 k 时刻第 j 个量测值与 $k-1$ 时刻第 i 个量测值的互联概率，其中 $k-1$ 时刻只取路径最短的两点进行互联，故 $j = 1, \dots, m_k, i = 1, 2$ ；

2) $d_j(k)$ 表示进入 k 时刻第 j 个量测的最短路径值，且 $d_j(3) = 0$ ，其中 $j = 1, \dots, m_k$ ；

3) $label$ 为两级互联矩阵， $label(j, k) = i$ 表示 $z_i(k-1)$ 与 $z_j(k)$ 关联概率最大，其中 $j = 1, \dots, m_k, i = 1, 2$ ；

4) $\min_d_l(k)$ 表示 k 时刻 m_k 个量测值中路径最短的两个值，其中 $l = 1, 2$ ；

5) $sign_l(k)$ 用于记录 k 时刻路径最短的两个量测值的下标，其中 $l = 1, 2$ ；

(6) $\min_label_l(k)$ 为简化的两级互联矩阵， $\min_label(l, k) = i$ 表示 $z_i(k-1)$ 与 $z_l(k)$ 关联概率最大，其中 $l = 1, 2, i = 1, 2$ ；

7) $label$ 为确认矩阵， $label1(k) = i$ 表示 $z_i(k)$ 是 k 时刻目标的量测值，其中 $i = 1, 2$ 。

TM-VDA 的算法流程图如图 1 所示。

根据流程图可知，TM-VDA 首先利用向前迭代的方法建立互联矩阵 $label$ 和简化的两级互联矩阵 $\min_label_l(k)$ ，更新 $label$ 和 $\min_label_l(k)$ 单

次循环流程图如图 2 所示。

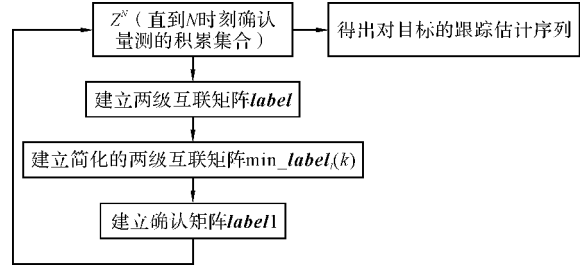


图 1 TM-VDA 算法流程图

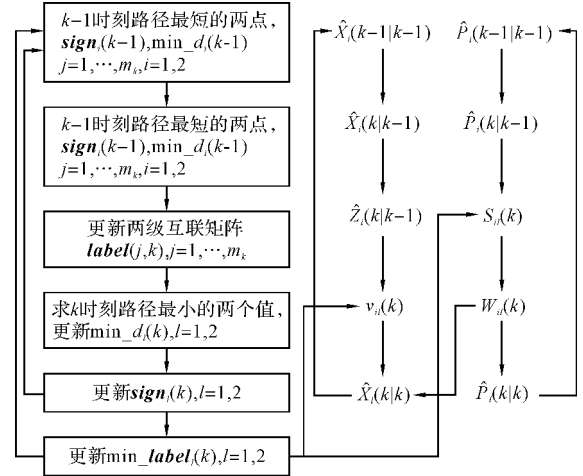


图 2 更新 $label$ 和 $\min_label_l(k)$ 单次循环流程图

其中 $a_{ij}(k)$ 可以通过下式求取：

$$a_{ij}(k) = \frac{1}{2} \mathbf{v}'_{ij}(k) \mathbf{S}_{ij}^{-1}(k) \mathbf{v}_{ij}(k) - \ln\{a \frac{P_D P_G}{1 - P_D}\} + \ln\{2\pi | \mathbf{S}_{ij}(k) |^{0.5}\} \quad (5)$$

$i = 1, 2, j = 1, \dots, m_k$

其中， $\mathbf{v}_{ij}(k) = z_j(k) - \hat{z}_i(k | k-1)$ ，即 k 时刻第 j 个量测值对 $k-1$ 时刻第 i 个量测值的新息， $\mathbf{S}_{ij}(k)$ 为 k 时刻第 j 个量测值对 $k-1$ 时刻第 i 个量测值的 Kalman 滤波新息协方差； a 是由试验所确定的常数，经仿真可知，取 $a = 0.6$ 时跟踪效果较好。

$$d_j(k) = \min_i \{d_i(k-1) + a_{ij}(k)\} \quad (6)$$

$$i^* = \arg \{ \min_i \{d_i(k-1) + a_{ij}(k)\} \} \quad (7)$$

$$label(j, k) = i^* \quad (8)$$

$$\min_d_l(k) = \min_j \{d_j(k)\}, l = 1, 2 \quad (9)$$

$$sign_l(k) = \arg \{ \min_j \{d_j(k)\} \}, l = 1, 2 \quad (10)$$

$j = 1, \dots, m_k$

$$\min_label_l(k) = label(sign_l(k), k), l = 1, 2 \quad (11)$$

当 $k = N$ 时,则:

$$l^* = \arg \{ \min_l \min \underline{d}_l(k) \} \quad (12)$$

$$\min \underline{label}(N+1) = l^* \quad (13)$$

在两级互联矩阵 $label$ 的基础上,可以通过下式建立确认矩阵 $label1$:

$$label1(k) = \begin{cases} l^* & k = N \\ \min \underline{label}(label1(k+1), k+1) & k = 1, \dots, N-1 \end{cases} \quad (14)$$

则目标各个阶段的轨迹点为:

$$\hat{X}(k | k) = \hat{X}_{label1(k)}(k | k) \quad (15)$$

$$\hat{P}(k | k) = \hat{P}_{label1(k)}(k | k) \quad (16)$$

即目标 k 时刻的状态更新值为 k 时刻第 $label1(k)$ 量测的状态更新值。

3 算法性能分析

文中就以下两个方面对 TM-VDA 进行性能分析:

1)跟踪效果。TM-VDA 算法具有自身的优势, TM-VDA 算法是建立在 Viterbi 算法基础之上的,它拥有 Viterbi 算法本身的优点,能够根据输入的序列,自上至下的给出最优的理解,会在最终选择前考虑到所有的观测序列因素,从而一方面避免了突然噪声所产生的不良影响,这种情况在真实数据中经常出现,另一方面屏蔽了中间噪声的干扰,使 TM-VDA 算法在密集杂波环境下对目标进行跟踪保持好的跟踪效果和较低的错误跟踪率;

2)算法实时性。基础的 Viterbi 数据互联算法计算量过大,因为根据 Viterbi 的原理,需要计算并存储各时刻所有量测值的路径长度及相邻时刻不同量测的互联关系,在密集杂波环境下,算法的计算量会很大;为了降低计算量, TM-VDA 对目标从航迹起始开始建立波门,只对落入波门中的有效量测计算路径长度,同时找出路径最短的两个量测,存储这两个量测的路径长度并利用这两个量测建立波门,进行状态更新,依次循环,直到最后时刻。此时对目标在各时刻只需要存储两个量测的路径长度及相邻时刻两个量测的互联关系,大大降低了计算量,提高了算法的计算速度,增强了算法的实时性,使 TM-

VDA 更利于工程实现。

4 仿真与分析

4.1 仿真环境

仿真环境设置如下:跟踪两个交叉运动的目标,初始状态为 $(x, \dot{x}, y, \dot{y}) = [-1700 \ 35 \ 900 \ -35]$;过程噪声分量 $q_1 = q_2 = 0.01$;传感器测距误差和测角误差分别为 $\sigma_r = 30\text{m}$ 、 $\sigma_\theta = 0.1\pi$;参数 $\gamma = 16$;检测概率为 $P_D = 0.997$;门概率 $P_G = 0.997$;泊松分布的参数为 $\lambda = 100, 300$;当 $T = 3\text{s}$,用两点差分法进行初始化,每次仿真跟踪步数 $N = 50$,仿真次数 50 次。

4.2 仿真结果及分析

4.2.1 均方根位置误差

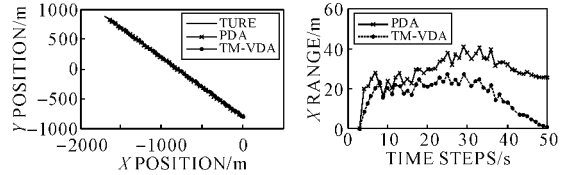


图 3 $\lambda = 100$ 时跟踪效果比较图 图 4 $\lambda = 100$ 时 x 方向位置均方根误差比较图

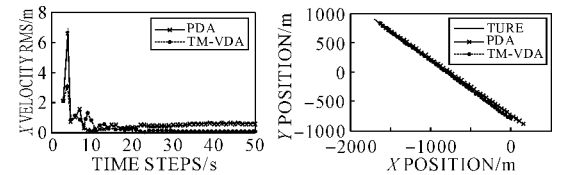


图 5 $\lambda = 100$ 时 x 方向速度均方根误差比较图 图 6 $\lambda = 300$ 时跟踪效果比较图

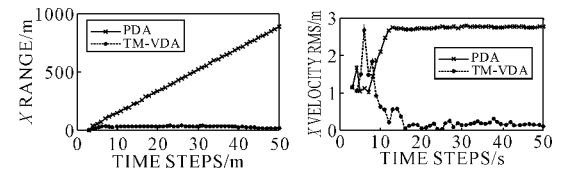


图 7 $\lambda = 300$ 时 x 方向位置均方根误差比较图 图 8 $\lambda = 300$ 时 x 方向速度均方根误差比较图

由图 3 可知,当 $\lambda = 100$ 时 PDA 和 TM-VDA 都能有效跟踪目标,跟踪效果相近;由图 4 和图 5 可知, TM-VDA 在整个过程中的位置均方根误差要略小于 PDA 的位置均方根误差,故前者的跟踪效果要略好于后者;由图 6 到图 8 可知,当 $\lambda = 300$ 时 PDA 跟踪目标过程中出现滤波发散,不能对目标进行有效跟踪,但 TM-VDA 仍能有效

跟踪目标,在 x,y 两方向上,其位置均方根误差都稳定在 50 以下,其 x 方向的速度均方根误差稳定在 1 以下, y 方向的速度均方根误差稳定在 0.5 以下,相比而言,各项参数均小于 PDA,在这种仿真条件下,TM-VDA 的跟踪效果要远好于 PDA。

4.2.2 错误关联概率和算法循环平均周期耗时

表 1 PDA 与 TM-VDA 的耗时与误跟踪率随 λ 的变化表

		λ			
		2	10	50	100
耗时 /s	PDA	0.0300	0.0581	0.1994	0.3941
	TM-VDA	0.1147	0.2798	1.1159	2.1774
误跟踪率 /%	PDA	0	0	0	4
	TM-VDA	0	0	0	0

		λ			
		200	300	400	500
耗时 /s	PDA	1.1034	1.7229	2.5450	3.0940
	TM-VDA	4.4356	6.3778	8.5772	10.628
误跟踪率 /%	PDA	48	68	82	90
	TM-VDA	0	2	4	10

由表 1 可知,当 $\lambda \leq 100$ 时,PDA 和 TM-VDA 的错误关联概率均在 5% 以下,但 PDA 在 $\lambda=200$ 时错误关联概率突变为 48%,并随着 λ 的增大不断变大,当 $\lambda=500$ 时其误跟踪率已高达 90%;相比而言,直到 $\lambda=400$ TM-VDA 的错误关联概率一直保持在 5% 以下,即使 λ 高达 500 时,其误跟踪率也只有 10%,远远小于 PDA 的 90%。由此可见,从错误关联概率这方面而言,TM-VDA 的跟踪效果要好于 PDA。由表 1 还可知随着 λ 的增大 PDA 和 TM-VDA 的耗时都有所增加,两者耗时都能满足工程上的要求,但总体而言 PDA 要略小于 TM-VDA,PDA 的实时性略好于 TM-VDA。

总之,在杂波密度较小的情况下,PDA 和 TM-VDA 都能够对目标进行有效的跟踪,两者的跟踪效果相差不大,但在密集杂波环境下,

PDA 不能较好地完成对目标的跟踪,而 TM-VDA 仍能保持较好的跟踪效果,后者与前者相比,错误关联概率大大降低,充分体现了 TM-VDA 在密集杂波环境下跟踪目标的良好性能。

5 总结

文中在 Viterbi 的原框架内加入数据互联的概念,提出了一种基于两点量测的 Viterbi 数据互联算法(TM-VDA),经仿真验证,TM-VDA 的跟踪性能要优于 PDA,杂波密度较小时,两者跟踪效果非常接近,但在密集杂波环境下,TM-VDA 的跟踪效果要明显优于 PDA,故对其进行研究具有较强的实际意义。

参考文献:

[1] Y Bar-Shalom. Multitarget-multisensor tracking: Advanced applications[M]. Artech House, 1990.

[2] Y Bar-shalom. Multitarget-multisensor tracking: Applications and advances[M]. Artech House,1992.

[3] 何友,王国宏. 多传感器信息融合及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2000.

[4] 张晶炜. 多传感器多目标跟踪算法性能分析、评估及研究[D]. 山东烟台:海军航空工程学院,2003: 10-11,22-24.

[5] 何友,修建娟,张晶炜. 雷达数据处理及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2006:111-118.

[6] 熊伟,张晶炜,何友. 修正的概率数据互联算法[J]. 海军航空工程学院学报,2004,19(3):309-311.

[7] 郭晶,罗鹏飞,汪浩. 密集杂波环境下的数据关联算法[J]. 航空学报,1998(3):305-319.

[8] 韩腊萍,陈立潮. 改进 Viterbi 算法在机动目标跟踪中的应用[J]. 微电子学与计算机,2004,21(8): 111-114.

[9] T Quach, M Farooq. Maximum likelihood track formation with the viterbi algorithm[C]// Proc. Of the 33rd CDC, Dec. 1994:271-276.

[10] 刘慧霞,梁彦,潘泉,等. 天波超视距雷达多路径 Viterbi 数据关联跟踪算法[J]. 电子学报,2006,34(9):1640-1644.

[11] Arnold J, Shaw S, Pasternack H. Efferent target tracking using dynamic programming[J]. IEEE AES, 1993:44-46.