

# 基于动态规划的多目标检测前跟踪算法

曲长文, 黄 勇, 苏 峰

(海军航空工程学院电子工程系, 山东烟台 264001)

**摘 要:** 本文针对低信杂比条件下的多目标检测与跟踪问题, 提出了一种基于动态规划的多目标检测前跟踪算法. 该算法能够比较准确地估计搜索空间中潜在的目标数量, 并且最佳地分离出每个目标的航迹, 从而较好地解决了以往检测前跟踪算法在目标数量未知的条件下容易出现漏警和虚警较多的问题.

**关键词:** 检测前跟踪; 动态规划; 多目标; 弱目标

**中图分类号:** TN957. 51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 12-2138-04

## Radar Track-Before-Detect Algorithm of Multitarget Based on the Dynamic Programming

QU Chang wen, HUANG Yong, SU Feng

(Department of Electronic Engineering, NAEI, Yantai, Shandong 264001, China)

**Abstract:** For detecting and tracking multitarget under the background of low signal clutter ratio (SCR), a radar track before detect (TBD) algorithm of multitarget based on the dynamic programming (DP) is presented. This algorithm can correctively estimate the number of targets in the observed area, and optimally separate the tracks of these targets. Therefore it can solve the problems of missed alarm and much false alarm, which usually arise, when the pervious track before detect algorithm are used to detect multitarget on the condition of unknown number of targets.

**Key words:** track before detect (TBD); dynamic programming (DP); multitarget; weak target

### 1 引言

目前, 强杂波环境下的目标检测与跟踪正引起人们的极大关注. 传统的跟踪技术<sup>[1]</sup>要求每获得一帧数据就进行检测, 而且通常是一经检测就将没有关联上的数据当作杂波点丢掉. 由于丢掉的数据中可能含有目标信息, 所以这种做法难以提高对低可观测目标的检测性能. 而“检测前跟踪<sup>[2,3]</sup>”方法(简称 TBD 方法)能有效地避免这个问题, 它将多次扫描得到的数据一起进行处理, 对可能来自同一个目标的回波能量进行非相干积累, 从而增强了低可观测目标的信噪比, 而且它在得到检测结果的同时, 可以获得目标航迹. 这种方法包括基于动态规划<sup>[4-7]</sup>的方法、基于极大似然的方法以及基于 Hough 变换的方法<sup>[8]</sup>. 其中基于 Hough 变换的 TBD 算法适用于检测低信噪比条件下, 具有“特征航迹”的目标. 而基于动态规划的 TBD 算法可以部分地避免速度不匹配的问题, 从而能处理慢机动目标. 当前动态规划算法的发展呈现如下几个特点: 一是加快运算速度, 如并行的动态规划<sup>[9]</sup>. 二是与其他算法相结合构成更复杂的新方法, 如神经网络—动态规划算法<sup>[10]</sup>. 三是积极拓展新的应用领域, 例如, 应用于超视距雷达跟踪<sup>[11]</sup>.

在利用 TBD 算法进行多目标检测与跟踪时, 问题将变得更加复杂. 这是因为以往的 TBD 算法是建立在单目标假设基础之上的, 在潜在目标数未知的情况下, 这些算法很容易丢失部分目标或者产生较多的虚警. 针对这种情况, 本文提出了基于动态规划的多目标 TBD 算法, 该算法能在目标数先验未知的条件下, 准确地确定目标数, 并检测出各个目标以及分离出各目标的航迹. 该算法的思想来源于文献[12], 本文将此思想融入到 TBD 算法中, 并对其进行了修正, 克服了该文献中所提到的不能有“丢失检测”的缺陷, 允许在不连续的扫描帧中出现目标数据不存在的现象.

本文讨论的多目标系统模型考虑了量测误差和虚警, 但没有考虑共同量测的影响, 即各目标的航迹是“完全分离”的, 任何两条航迹都不拥有同一个量测.

### 2 算法原理

#### 2.1 目标模型及量测

假设搜索区域中包含  $K$  个匀速直线运动的目标, 并假设第  $m$  次扫描得到的量测数为  $N_m$ , 其中  $N_m \geq K$ , 这些量测中包含目标、杂波和接收机噪声. 目标的运动模型为:

$$X_k(m+1) = F \times X_k(m) + G \times V_k(m) \quad (1)$$

其中,  $k=1, \dots, K; m=1, \dots, M, F=$

$$\begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

表示状态

转移矩阵,  $G=$

$$\begin{bmatrix} 0.5T^2 & 0 \\ T & 0 \\ 0 & 0.5T^2 \\ 0 & T \end{bmatrix}$$

表示过程噪声分布矩阵,  $K$

表示目标数,  $M$  表示扫描的总次数,  $X_k(m)$  表示第  $k$  个目标在第  $m$  次扫描时的状态矢量, 即,  $X_k(m) = [x_k(m) \quad vx_k(m) \quad y_k(m) \quad vy_k(m)]$ ,  $x_k(m), y_k(m)$  分别表示  $x$  方向和  $y$  方向的位置信息,  $vx_k(m), vy_k(m)$  分别表示  $x$  方向和  $y$  方向的速度信息.

目标量测方程为:

$$Z_k(m) = H \cdot X_k(m) + W_k(m) \quad (2)$$

其中,  $Z_k(m)$  表示第  $k$  个目标在第  $m$  次扫描时得到的量测,  $H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$  表示量测矩阵, 测量噪声  $W_k(m)$  与过程噪声  $V_k(m)$  相互独立, 且均为零均值的高斯过程.

多次扫描所得到的目标、杂波和噪声量测的集合用  $Z$  表示,  $Z$  中的每个量测都包含位置信息和功率信息, 表示如下:  $Z = \{Z_m | m = 1, 2, \dots, M\}$ , 其中,  $Z_m = \{(x_{m,i}, y_{m,i}, p_{m,i}) | i = 1, 2, \dots, N_m\}$ ,  $p_{m,i}$  表示第  $m$  次扫描得到的第  $i$  个回波的功率.

### 2.2 算法的基本过程

一般来说, 动态规划是搜索单条最佳路径的递推方法, 而本文需要搜索的是  $K$  个目标形成的最佳  $K$  条路径集. 因此在使用一般的动态规划搜索过程之前, 必须将  $M$  次扫描得到的量测集  $Z$  所形成的搜索网络转化成  $M$  次扫描、每次扫描  $C_N^K$  个数据所形成的“扩展网络”, 其量测集用  $EZ$  来表示. 从而在“扩展网络”中, 第  $m$  次扫描处的第  $j(j=1, \dots, C_N^K)$  个元素包含  $K$  个量测数据, 而此元素的功率值用它所包含的  $K$  个量测功率之和来表示. 表示如下:  $EZ = \{EZ_m | m = 1, 2, \dots, M\}$ , 其

$$EZ_m = \{EZ_{mxy}, EZ_{mp}\} = \left\{ \begin{bmatrix} x_{m,1}, y_{m,1} \\ \vdots \\ x_{m,K}, y_{m,K} \end{bmatrix}, \sum_{j=1}^K p_{m,j} \right\}, \text{ 且 } i = 1, 2, \dots, N_m.$$

这样一来, 在“扩展网络”中应用动态规划算法得到的单条最佳路径必然就是包含  $K$  条路径的路径集. 然而这解决了算法的第一部分.

算法的第二部分是, 如何在“扩展网络”中确定属于不同扫描次数的两元素是否互联及其互联模式. 由于每个元素包含  $K$  个量测数据, 从而使得两元素之间的互联有  $K!$  种模式. 图 1 以  $K=3$  为例, 列举了其所包含的六种互联模式.

下面对算法中判断两元素是否互联以及确定互联模式的方法进行了描述:

(1) 当只需判断两元素是否互联时

(a) 当两元素之间的互联是为了起始新航迹时, 采用的是速度规则, 只要存在一种互联模式, 由其中的两两相连的

量测所确定的速度处在设定的最大速度与最小速度之间时, 则认为两元素互联.

(b) 当两元素之间的互联是为了维持原有的航迹时, 则需判断后一个元素是否落在到前一元素为止所形成的航迹的预测区域内, 同时还需存在一种互联模式与之对应. 这样才可认为两元素互联.

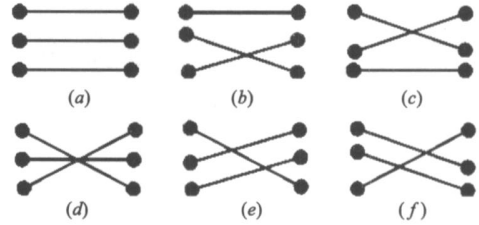


图 1  $K=3$  时的六种互联模式

(2) 当需要确定两元素之间的互联模式时, 则需要判断两元素互联的基础上, 采用最小距离原则来确定它们之间的互联模式. 也就是说, 当两元素之间存在多种互联模式时, 取两量测之间距离之和最小的模式作为此两元素之间的互联模式.

根据上述对“扩展网络”和“互联模式”的描述, 下面给出基于动态规划的多目标 TBD 算法的基本过程:

(1) 将  $M$  次扫描得到的量测集  $Z$  所形成的搜索网络转变成“扩展网络”, 并将“扩展网络”中的每一次扫描对应的数据帧称之为“扩展帧”.

(2) 对“扩展网络”进行一般的动态规划搜索处理. 初始化: 对于第  $m=1$ “扩展帧”中的第  $i$  个元素:

$$I_1(i) = EZ_{1p}(i), \Psi_{0,1}(i) = 0 \quad (3)$$

(3) 递推:  $2 \leq m \leq M$ , 对于第  $m$ “扩展帧”中的第  $i$  个元素:

$$I_m(i) = \max_{j \in D} [I_{m-1}(j)] + EZ_{mp}(i) \quad (4)$$

$$\Psi_{m-1,m}(i) = \arg \max_{j \in D} [I_{m-1}(j)] \quad (5)$$

其中,  $i$  是第  $m$ “扩展帧”中的元素的序号,  $I_m(i)$  表示第  $m$ “扩展帧”第  $i$  个元素上积累的功率值.  $\Psi_{m-1,m}(i)$  表示第  $m-1$ “扩展帧”中与第  $m$ “扩展帧”第  $i$  个元素互联的元素的序号.  $j$  是第  $m-1$ “扩展帧”中的元素的序号.  $D$  表示能与第  $m$ “扩展帧”中的第  $i$  个元素互联的第  $m-1$ “扩展帧”中的元素组成的集合.  $D$  的求法分两种情况: 当两元素的互联是为了起始航迹时(例如, 第  $1, 2$ “扩展帧”中的两元素互联), 则采用最大速度与最小速度的原则来确定集合  $D$  中的元素; 当两元素的互联是为了维持航迹时, 则采用以此航迹在当前“扩展帧”中的预测值为中心的 9 个单元作为集合  $D$ .

(4) 终点: 找到满足

$$\hat{i}_M = \{i = I_M(i) > Th\} \quad (6)$$

的第  $M$ “扩展帧”中的元素的序号  $\hat{i}_M$ . 其中,  $Th$  是门限.

(5) 回溯: 对于每一个  $\hat{i}_m$ , 其中  $m = M, M-1, \dots, 2$ :

$$\hat{i}_{m-1} = \Psi_{m-1,m}(\hat{i}_m) \quad (7)$$

从而得到估计航迹的序号向量  $\{\hat{i}_1, \dots, \hat{i}_M\}$ .

(6) 提取估计航迹的序号向量  $\{\hat{i}_1, \dots, \hat{i}_M\}$  所对应的  $K \times M$  个量测数据, 并按照前面所叙述的确定互联模式的方法得

出相互分离的  $K$  条最佳路径.

### 2.3 关于算法基本过程的几点补充说明

(1) 算法允许在不连续的“扩展帧”中出现已经起始的航迹没有元素与之互联的现象存在. 当出现这种情况时, 可用该航迹直线外推得到的预测元素作为该航迹在当前“扩展帧”中的互联元素. 如果连续几个“扩展帧”中都出现目标元素不存在的现象, 那么算法的性能将会变差.

(2) 每一“扩展帧”中剩余的孤立元素, 可以按照上述的基本步骤, 重新开始以得到新的航迹.

(3) 算法在第(6)步可以采用角度限制, 将一些明显的虚假航迹剔除.

## 3 算法仿真

下面以检测两个匀速直线运动的目标为例, 比较了  $K=1, K=2$  和  $K=3$  时算法的检测结果. 扫描次数 20 次, 每次扫描的平均杂波数为  $\lambda=30$ , 信号干扰功率比 SIR= 2dB. 图 2 给出了 20 次扫描得到的态势图.

(1) 取  $K=1$  时

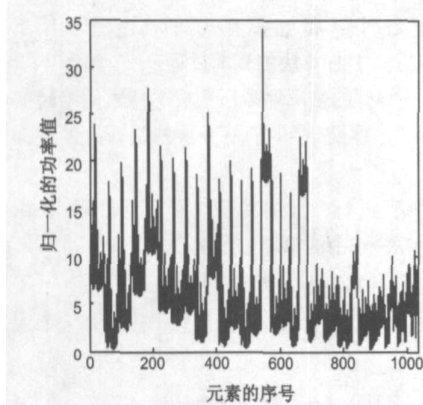


图 4 归一化功率变化分布图 (其中, 目标元素在第 1 扩展帧中的序号为 195)

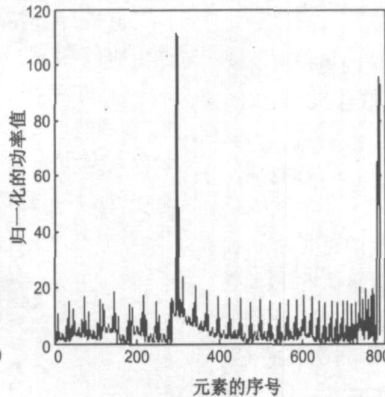


图 5 归一化功率变化分布图 (其中, 目标元素在第 10 扩展帧中的序号为 295)

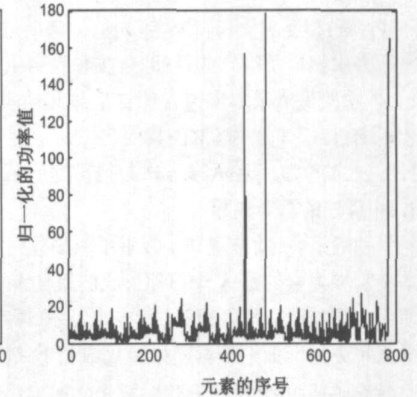


图 6 归一化功率变化分布图 (其中, 目标元素在第 20 扩展帧中的序号为 481)

从图 4 中可以看出, 在第 1 扩展帧中, 目标元素完全被背景所淹没. 随着积累帧数的增加, 目标元素所对应的序号逐渐显现出来. 图 5 所表示的第 10 扩展帧中, 可以明显看到目标元素所对应的尖峰(当然还有虚警对应的尖峰). 积累到第 20 扩展帧(图 6)时, 目标元素所对应的尖峰更加明显.

从图 5 和图 6 还可以看到, 除了目标元素对应的序号处有高的峰值以外, 还有一些非目标元素也具有较高的峰值. 产生这些假峰值的原因, 有时是由杂波航迹造成的, 但更多的是由于目标航迹分叉造成的. 这些假航迹在平滑性、长度和积累的功率值上与目标航迹存在区别, 算法可以将其剔除.

图 7 给出了检测结果. 两个目标及其航迹均被正确地检测到.

(3) 取  $K=3$  时

当采用  $K=3$  时的基于动态规划的 TBD 算法来检测两个目标的情况时, 两“扩展帧”之间的任两元素起始航迹都很困难, 即使是起始了航迹, 该航迹也仅能维持 1~ 2 次扫描时间, 极易中断, 故  $K=3$  时的算法不能从态势图中检测出两个目

图 3 给出了归一化功率门限  $Th=110$  的检测结果. 从该图可以看出, 当采用  $K=1$  时的基于动态规划的 TBD 算法来检测两个目标的情况时, 容易丢失目标. 若降低门限则会带来较多的虚警, 即便如此, 也不一定将两个目标都检测到, 这是因为由大目标航迹分叉导致的虚警可能会掩盖小目标.

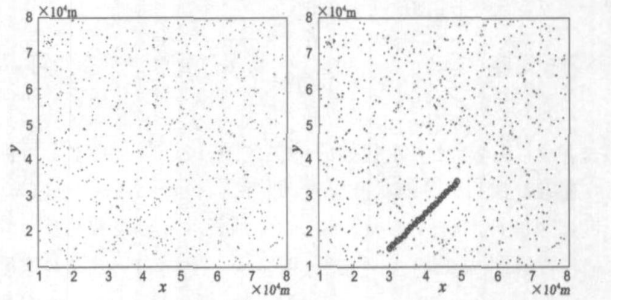


图 2 20 次扫描得到的态势图 图 3  $K=1$ , 归一化功率门限  $Th=110$  的检测结果

(2) 取  $K=2$  时

图 4、图 5 和图 6 分别给出了第 1、第 10、第 20“扩展帧”中元素的归一化功率变化分布图.

标及其航迹. 究其原因, 是因为对于两目标的检测情况而言, 对任意三个量测构成的组合元素进行处理, 将永远不可能在“扩展网络”中找到只包含目标元素的最佳路径, 其所包含的

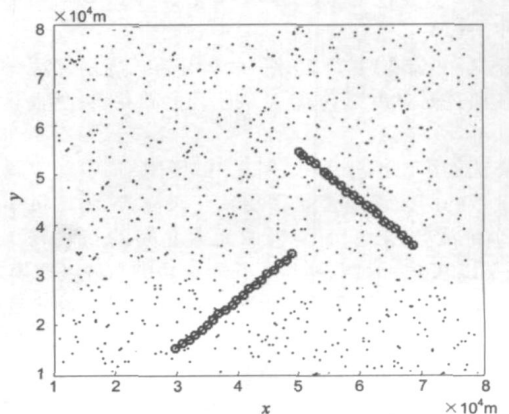


图 7  $K=2$  时的检测结果

杂波位置的任意性将会破坏航迹的连续性。

从这里我们可以看到, 当基于动态规划的多目标 TBD 算法采用的  $K$  值与搜索区域中实际存在的目标数量不一致时, 算法性能下降。尤其是当  $K$  大于实际存在的目标数时, 算法的性能急剧下降。正因为如此, 我们可以利用算法的这个特点来估计搜索区域中实际存在的目标数。即, 当  $K = K_1$  时, 算法首次出现难以检测到目标的情况, 则可估计实际的目标数为  $K_1 - 1$ 。

#### 4 结论

在多目标条件下, 以往的 TBD 算法难于确定实际的目标数, 从而不能准确的检测和跟踪所有的目标, 而本文提出的基于动态规划的多目标 TBD 算法能够较好地解决这一问题, 不但能比较准确地估计出目标数量, 而且还能最佳地分离出每个目标的航迹。

#### 参考文献:

- [1] Bar shalom Y, Fortmann T E. Tracking and Data Association [M]. New York: Academic Press, 1988. 123- 272.
- [2] Reed I, Gagliardi R, Stotts L. Optical moving target detection with 3 D matched filtering[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1988, 24( 4): 327- 336.
- [3] Kramer J D, Reid W S. Track before detect processing for a range ambiguous radar [ A ]. IEEE National Radar Conference [ C ]. New York: IEEE, 1993. 113- 116.
- [4] Arnold J, Shaw S, Pastemack H. Efficient target tracking using dynamic programming [ J ]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1993, 29(1): 44- 56.
- [5] Tomissen S M, Evans R J. Performance of dynamic programming techniques for track before detect [ J ]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32( 4): 1440 - 1451.
- [6] 强勇, 焦李成, 保铮. 动态规划算法进行弱目标检测的机理研究 [ J ]. 电子与信息学报, 2003, 25(6) : 721- 727.  
Qiang Yong, Jiao Li cheng, Bao Zheng. Study on mechanism of dynamic programming algorithm for dim target detection [ J ]. Journal of Electronics & Information Technology, 2003, 25( 6) : 721- 727. ( in Chinese)
- [7] 王新余, 黄林梅, 张桂林. 基于动态规划的红外弱小运动目标的实时检测方法研究 [ J ]. 计算机工程与应用, 2003, 39(23) : 24- 26.  
Wang Xir yu, Huang Lir mei, Zhang Gu lin. Study on real

time detection method for the moving infrared small dim target based on dynamic programming [ J ]. Computer Engineering and Applications, 2003, 39( 23) : 24 26. ( in Chinese)

- [8] Carlson B D, Evans E D, Wilson S L. Search radar detection and track with the Hough transform, Part 1: System concept [ J ]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1994, 30(1) : 102- 108.
- [9] Sebastian Dormido Canto, Angel P de Madrid, Sebastian Domir do Bencomo. Parallel dynamic programming on clusters of workstations [ J ]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2005, 16(9) : 785- 798.
- [10] Peter Marbach, Oliver M hatsch, John N Tsitsiklis. Call admission control and routing in integrated services networks using neuro dynamic programming [ J ]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18( 2) : 197- 208.
- [11] Graham Pulford, Barbara La Scala. Over the horizon radar tracking using the Viterbi algorithm [ R ]. Melbourne, Australia: Australia and the Cooperative Research Centre for Sensor Signal and Information Processing, Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Melbourne, 1995. 7 - 19.
- [12] Wolf J K, Viterbi A M, Dixon G S. Finding the best set of K paths through a trellis with application to multitarget tracking [ J ]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1989, 25(2) : 287- 295.

#### 作者简介:



曲长文 男, 1963 年生于山东济南, 海军航空工程学院教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号处理、电子对抗等。



黄勇 男, 1979 年生于湖南汨罗, 海军航空工程学院博士生, 研究方向为雷达信号检测与处理。E mail: huangyong\_2003@163.com