

# 基于动态规划的雷达检测前跟踪新算法

李 涛<sup>1,2</sup>, 吴嗣亮<sup>1</sup>, 曾海彬<sup>3</sup>, 侯舒娟<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学电子工程系, 北京 100081; 2. 空军装备研究院, 北京 100085; 3. 北京跟踪与通信技术研究所北京 100094)

**摘 要:** 为解决低信杂比下雷达检测前跟踪技术存在末级检测门限设置困难和动态规划算法对运动目标跟踪能力弱的问题, 本文首先分析了两级检测门限的雷达检测前跟踪算法自身特点. 在瑞利杂波条件下, 对经过动态优化后的信号进行杂波置信检验和航迹检测和校正. 该算法末级检测门限设置简单并且提高了跟踪概率. 仿真验证了新方法的有效性.

**关键词:** 检测前跟踪; 门限; 动态规划; 置信检验; 低信杂比

**中图分类号:** TN957. 51      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2008) 09-1824-05

## A New Radar Track-Before-Detect Algorithm Based on Dynamic Programming

LI Tao<sup>1,2</sup>, WU Si-liang<sup>1</sup>, ZENG Hai-bin<sup>3</sup>, HOU Shu-juan<sup>1</sup>

(1. Department of Electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Equipment Research Academy of PLA Air Force, Beijing 100085, China;

3. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** In low signal-to-clutter ratio, in order to solve the problem of the terminal threshold setting and poor capability in tracking with the moving target based on dynamic programming (DP) algorithm, the characteristic with two-steps detection thresholds in radar track-before-detect (TBD) is analysed. In the background of Rayleigh clutter, signals after optimizing are confidence tested and trajectory calibrated. This algorithm makes terminal threshold setting easy and improves the track probability. Simulations testify the validity of the new algorithm.

**Key words:** track-before-detect; threshold; dynamic programming; confidence test; low signal-to-clutter ratio

### 1 引言

检测前跟踪技术(TBD)是一种低信噪比下信号检测和跟踪技术,最初基于动态规划(DP)的TBD(DP-TBD)检测算法主要针对红外弱目标<sup>[1-4]</sup>,近来DP-TBD检测算法也应用到雷达系统中<sup>[5-7]</sup>.红外目标帧间移动速度较小,搜索范围小,信号能量容易集中,在每一帧的信号处理时不设门限,实现100%的发现和接近100%的虚警,而雷达目标相对速度较大,扫描间可能的转换状态更多,能量分散,数据量更大.因此在雷达TBD算法中,为降低信号处理的复杂性,减少数据存储量提高处理速度,通常采用采用两级门限检测<sup>[6,7]</sup>,第一级设置了低的恒虚警门限,然后利用DP算法对超过门限的信号进行优化,信号幅度累加和超过第二级门限认为是目标.但是上述文献没有对末级门限的设定和基于DP的两级门限检测雷达TBD算法特点做出解释说明.Tonissen和Barniv提供的检测方法<sup>[1-3]</sup>也不能直接应用

于雷达信号检测中.首先这些文献中的下列假设条件在雷达中已不再成立:

由于每一时刻的不同状态点可能由前一刻的同一个状态点转换而来,即可能共有一条航迹,因而这些航迹是相关的,独立同分布的(IID)的假设不能成立,其检测性能推导的基础不再成立;

服从 $N(0, \sigma^2)$ 高斯分布的噪声和杂波,经过平方检波后服从 $\chi^2$ 分布,不再服从高斯分布,这些文献使用的迭代算法估计性能也不能成立;

过第一门限的点数不定,雷达目标下一时刻转换状态数目不确定,虚警、检测、跟踪概率无法用解析表达式表示.

本文以目标直线运动为例,针对两级门限检测的雷达TBD算法自身特点,提出了新的检测算法.对超过第一级恒虚警门限的信号进行DP优化,利用瑞利杂波的分布特点,确定置信区间上限,作为末级门限,抑制绝大部分杂波航迹.根据目标运动特性的约束条件,滤除目

标信号加杂波航迹,得到目标航迹,改善基于 DP 的 TBD 算法跟踪能力比较弱的缺点,提高了跟踪概率,仿真验证了这种方法的有效性.

### 2 基于 DP 的两级门限检测的雷达 TBD 算法自身特点

本文采用和文献[3,5]相同的发现概率和跟踪概率定义\*. 基于 DP 的两级门限检测的雷达 TBD 算法自身有 3 个特点.

(1) 第一级门限虽然可以抑制部分噪声和杂波,但对微弱目标信号也有抑制作用,经过 DP 运算后无法恢复,在转换状态多时,还可能导导致目标处在后续可能的转换状态之外,使得发现概率和跟踪概率同时下降.因此基于此方法的 TBD 检测方法要目标经过第一级门限后要有很高的发现概率.

(2) DP 算法的制约,DP 算法的每一个阶段的各个状态点,仅保留一条最佳的历史航迹,而其它与这个状态相联系的前面航迹被丢弃.因此,在每一个阶段都有可能因为杂波或其它目标幅度值比检测目标幅度值大而发生选择错误的情况.如果这样的错误在某个阶段发生,在这个阶段以前的目标的真实航迹不可能被恢复.即使在最后阶段目标可能被检测到,也不一定能够恢复目标的真实航迹.所以基于 DP 的 TBD 算法的跟踪性能比较弱.

(3) 图 1 是经过 DP 优化后形成的航迹,实心黑点代表目标信号,空心点代表杂波,实线代表真正航迹,虚线代表虚假航迹.信号经过第一级门限后,运用 DP 优化的航迹可能是杂波如“1-2-7-10-14”,目标信号“1-4-8-12-16”和目标信号加杂波“1-4-8-12-17”三种情况,其累加后的分布函数复杂,不能用解析形式表达,因而无法直接计算其检测门限.经过仿真发现,在信杂比较低的情况下,目标信号和目标信号加杂波航迹最后幅度累加和相差不大,不能简单的用门限来区分了.表 1 给出了图 1 中经过 DP 优化后的一次仿真数据.从表 1 可以看出,航迹 3-5 在前 4 个状态有相同的航迹,只是最后一点不同,而且幅度和很接近,仅通过门限进行判决很困难,尤其在实际工作中各种偶然因素会使幅度信息更难以判断.表 1 所列举的情况在仿真中出现概率很高,再增加扫描帧数还会出现同样的情形.

表 1 DP 优化后各航迹状态点及幅度和信息

状态 航迹	K=1	K=2	K=3	K=4	K=5	航迹上各点幅度和
1	1	2	7	10	14	70.454
2	1	4	8	11	15	88.119
3	1	4	8	12	16	92.442
4	1	4	8	12	17	92.251
5	1	4	8	12	18	92.103
6	1	5	9	13	19	61.369

### 3 基于 DP 的雷达 TBD 检测新算法

本文提出的检测方法采用两级门限,首先第一级设置较低的恒虚警检测门限,对雷达波束扫描过程中每一个波位上的回波进行检测,抑制大部分杂波和噪声,利用目标的最大运动信息,确定信号的最大转换状态,对超过门限的信号进行动态规划.然后利用杂波分布特点,对累加后的杂波设置置信检验区间上限,即末级门限,滤除大部分杂波航迹,以此作为末级检测门限.最后,根据目标运动特性的约束条件,删除虚假航迹,得到目标航迹.

#### 3.1 基于 DP 的首级低恒虚警门限的雷达 TBD 检测方法

雷达波束在指定的空域范围内搜索,每一个波位上的回波信号应用常规雷达系统中的广义极大似然比检验准则(CLRT)检测.杂波包络服从瑞利分布,采用单元平均恒虚警率处理(CA-CFAR)方法估计杂波方差,杂波方差采用二维平均估计方法得到的  $\hat{\sigma}_w^2$  就是  $N \hat{\sigma}_w^2$  的估计值<sup>[8]</sup>,  $\hat{\sigma}_w^2$  输入杂波方差,这里假设杂波功率远大于系统内部噪声功率.根据预设的虚警概率,超过第一级门限  $\text{th. } \hat{\sigma}_w^2$  的回波检验统计量  $C_k^R(m_k, n_k(m_k))$  保留,

$$C_k^R(m_k, n_k(m_k)) = \max_{v_k \in \{0, \dots, N-1\}} | (r_k(m_k, n_k(m_k)), v_k(m_k)) |^2 \text{th. } \hat{\sigma}_w^2 \quad (1)$$

$| (r_k(m_k, n_k(m_k)), v_k(m_k)) |^2$  是回波经动目标检测(MTD)处理后在各频率通道的输出,  $k=1, \dots, K$ ,  $K$  表示波束在指定空域内扫描的次数,  $m_k$  表示搜索空域内的波束位置序号,  $n_k(m_k)$  表示在第  $m_k$  个波束位置时目标所在的距离单元,  $v_k(m_k) = 0, \dots, N-1$ , 频率通道数目,  $N$  在一个波位驻留时间内发射的脉冲个数,满足目标在波束驻留期间内没有飞出一个距离单元.以方位角度-距离为例,雷达搜索完一次指定空域,形成一帧二维回波历史数据矩阵  $P(i, j)$ ,  $i=1, \dots, N_c$ ,  $N_c$  为搜索距离范围;  $j=1, \dots, N$ ,  $N$  为搜索角度范围.数据矩阵列代表在给定的角度上不同距离的回波数据;矩阵的行代表给定距离不同角度的回波数据.没有目标运动的先验信息,由系统允许目标最大径向速度分量  $V_{Tmax}$  为,最大切向速度分量为  $V_{Qmax}$  确定下一帧扫描最大状态转换量  $Q_{max}$ .对超过第一门限的回波数据进行 DP 优化,到最终状态时,得到与最终各状态点对应的累积航迹  $\max_{(i,j)} P(i, j)$  具体的步骤可见文献[5].

\* 检测概率:最终检测到的目标距离满足在两个实际目标距离单元之内,角度单元和实际目标角度单元一致的概率.虚警概率:杂波幅度累加和超过末级检测门限的概率.跟踪概率:做目标检测后,恢复的航迹在整个航迹段中与真实的目标距离单元相差不超过 2 个单元,角度单元一致的概率.

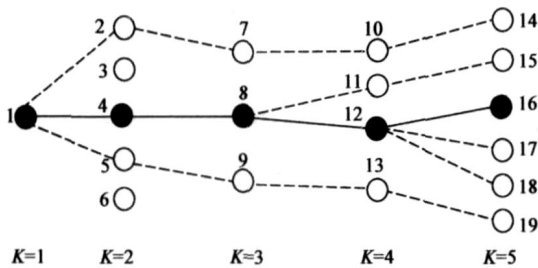


图 1 DP 优化航迹示意图

### 3.2 杂波置信检验

对这些累积航迹进行杂波置信度检验, 滤除大部分杂波航迹. 第  $m_k$  个波束内, 杂波经过 MID 处理后在各频率通道的输出是独立同分布 (IID) 的,  $|r_k(m_k, n_k(m_k)), v_k(m_k)|^2 \sim \chi^2(0, N^2 w/2)^{[8]}$ . 在不同扫描期间内, 即  $k$  从 1 变化到  $K$ ,  $|r_k(m_k, n_k(m_k)), v_k(m_k)|^2$  也是 IID 的. 对  $|r_k(m_k, n_k(m_k)), v_k(m_k)|^2$  进行归一化得到:

$$\frac{|r_k(m_k, n_k(m_k)), v_k(m_k)|^2}{N^2 w/2} \sim \chi^2(2), \quad k=1, \dots, K \quad (2)$$

由  $\chi^2$  分布的随机变量的性质可知, 两个统计独立的  $\chi^2$  随机变量之和仍是  $\chi^2$  随机变量, 其自由度为两个  $\chi^2$  分布随机变量的自由度之和. 因此,

$$\sum_{k=1}^K \chi^2(2) \sim \chi^2(2K) \quad (3)$$

对所有超过第一门限的检验统计量  $C_k^R(m_k, n_k(m_k))$  作归一化处理, 上节采用二维平均估计方法得到的杂波方差  $\hat{\sigma}_w^2$  就是  $N^2 w$  的估计值, 用  $\hat{\sigma}_w^2/2$  代替  $N^2 w/2$ , 带入式 (1) 完成归一化. DP 算法是按照幅度和最大化的原则进行航迹选取的, 可以根据  $\chi^2$  分布表查单侧置信区间的上限以后, 再乘以一个系数  $b$  作为补偿, 得到杂波航迹检测近似门限, 满足:

$$P(\chi^2(2K) > \lambda) = \alpha \quad (4)$$

取上分位点  $\alpha = 0.99999$ ,  $K=5$  时,  $\chi^2$  分布的自由度为 10, 查表得  $\lambda = 41.3$ , 通过仿真确定系数  $b=2$ , 置信度上界为  $b \cdot \lambda = 82.5$  时杂波虚警概率可以达到  $1 \times 10^{-6}$ . 虚警概率除了与门限有关外, 还与杂波功率估计的准确性和系数有关. 将经过 DP 优化得到的最终可能状态点的对应累积航迹  $\max_{(i,j)} P(i, j)$  除以  $\hat{\sigma}_w^2/2$  后与  $b \cdot \lambda$  比较, 若满足下式, 则该航迹认为是杂波航迹.

$$\max_{(i,j)} P(i, j) / \hat{\sigma}_w^2/2 < b \cdot \lambda \quad (5)$$

在杂波置信检验门限设置时, 只考虑杂波幅度的分布特点, 与目标信号无关. 在其它场合下, 只要了解杂波分布, 也可以应用此方法设置置信门限.

### 3.3 直线航迹检测和校正

以目标直线运动,  $K=5$  为例说明航迹检测和校准的步骤. 采用上节设定的门限滤除杂波航迹后, 剩下少量目标加杂波航迹和目标航迹. 在各航迹中可以发现一

条主要航迹, 它的累积和值最大; 还有次要航迹, 它们的幅度和小于主要航迹, 与主要航迹有除起点和终点外有 2 个以上相同状态点迹, 它们在信杂比低的情况下很难通过幅度比较来区分. 图 1 中“1-4-8-12-16”航迹是主要航迹, 它的幅度和最大, 而且和“1-4-8-11-15”, “1-4-8-12-18”有着相同的航迹“1-4-8”. 次要航迹数目不多, 航迹检测和校正将在它们和主要航迹之间进行, 步骤如下:

(1) 设航迹上各点的量测值为  $z_l(k) = [z_l(1), \dots, z_l(5)]$ ,  $k=1, \dots, K$ ,  $l=1, \dots, L$ ,  $L$  为经过 DP 优化后形成的航迹数目, 采用文献 [10] 中航迹起始算法中直观法可以抑制部分虚假航迹. 假设主要航迹上除  $z_l(1)$  外,  $z_l(2), z_l(3)$  点也在其它次要航迹上, 验证  $z_l(5)$  是否位于这条直线上. 若满足, 这条航迹就是目标航迹; 若不满足, 这次检测终止, 重新开始下一轮的搜索.

(2) 若  $z_l(1), z_l(2), z_l(3)$  这三点不共线, 可能是由于算法特点 1 或 2 造成的, 需要进行校正. 这时需要利用航迹上的  $z_l(4)$  作判断, 若  $z_l(4)$  在  $z_l(3)$  和起点  $z_l(1)$  确定的直线上, 则  $z_l(2)$  杂波产生的量测值, 它的幅度大于目标回波. 同理, 若  $z_l(4)$  在  $z_l(2)$  和起点  $z_l(1)$  确定的直线上, 则  $z_l(3)$  是杂波产生的量测值. 这时可以将该点置零, 对历史数据重新进行 DP 优化, 产生一组新的航迹, 重复步骤 1, 这样做的目的可以提高跟踪概率和发现概率. 若  $z_l(4)$  均不在这两条直线上, 这次检测终止, 重新开始下一轮的搜索.

(3) 若只存在主要航迹, 没有次要航迹, 主要航迹认为是信号支路, 这种情况经常出现在高信杂比条件下.

这种方法只适用于航迹上有一点被优化掉的情形, 超过一个点, 就很难恢复目标航迹, 只能重新进行累积检测. 从上面的分析中, 对直线航迹检测只需要 5 次扫描即可, 增加扫描帧数, 只能增加运算量, 检测效果变化不大, 原因见算法特点分析 3.

本文方法的运算量主要取决于 DP 优化算法的运算量, 从  $P(i, j)$  的每一个元素出发, 它的最大搜索路径为  $\mathcal{O}(KN^2N)$ , 相对于直接搜索路径  $\mathcal{O}[(N^2N)^K]$  减少了很多. 不同于常规的雷达航迹起始, 经过 DP 优化后已经形成航迹, 只要检测航迹是否符合直线规律即可, 不需要对航迹进行预测. 从同一起点出发的航迹数目取决于最后一帧超过第一级门限的点数, 数目一般要少于  $Q_{\max}$ , 经过第二级门限检测后, 航迹数目就更少了. 因此航迹检测和校正的运算量远小于基于 Hough 变换的航迹起始方法<sup>[9]</sup>, 而且不需要考虑距离和角度量化参数, 的选取问题, 可以满足实际需要.

#### 4 仿真验证

为验证新方法的有效性,通过比较新方法和常规直接积累检测方法的检测性能进行分析。

仿真参数设置:雷达脉冲重复频率 820Hz,雷达波长 1.5m,脉冲宽度 1 $\mu$ s,3dB 波束宽度 2°,搜索角度范围 60°,一个波位驻留时间为 16 个脉冲重复周期,系统允许最大速度为 8 倍音速,若仅考虑目标距离-方位二维数据,设导弹运动方向与雷达视线的夹角为 45°,实际飞行速度 2000m/s,设第一级恒虚警率为  $4 \times 10^{-2}$ ,经过 5 帧扫描,杂波置信度上限取 82,经过  $10^7$  次的蒙特卡洛仿真,此时杂波路径的虚警概率为  $1 \times 10^{-6}$ 。图 2 是在虚警概率分别  $4 \times 10^{-2}$  和  $1 \times 10^{-6}$  时仅利用 16 个脉冲直接积累后的检测结果和采用 TBD 新算法后,系统虚警率达到  $1 \times 10^{-6}$  时的发现概率比较图。图 3 是虚警概率为  $1 \times 10^{-6}$  时采用新方法校正前后跟踪概率与单个脉冲信杂比之间的关系曲线。

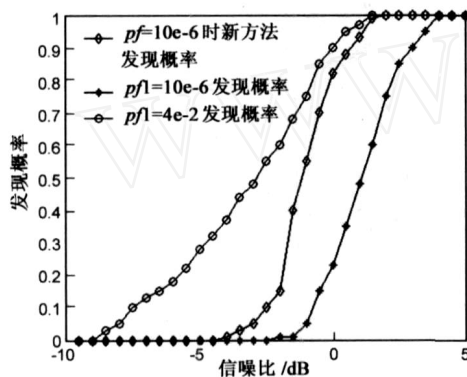


图 2 检测性能曲线

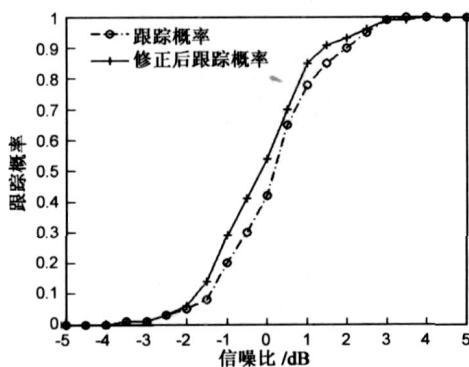


图 3 跟踪性能曲线

从图 2 的比较中可以看出,新算法的发现概率在信杂比 -10 到 3dB 之间低于虚警概率为  $4 \times 10^{-2}$  直接积累检测的发现概率。系统虚警概率为  $1 \times 10^{-6}$ ,发现概率为 50%,新方法单个脉冲所需信杂比为 -1.1dB,对应虚警概率为  $4 \times 10^{-2}$  的曲线发现概率已经达到了 80%,验证了算法特点 1 的分析。在发现概率为 50%时,虚警概率为  $1 \times 10^{-6}$  情况下,单级直接积累所需单个脉冲信杂比为 1dB。而要达到同样的检测性能,采用新方

法单个脉冲信杂比增益为 2.1dB。检测性能的提升验证了杂波门限设置和直线航迹检测和校正的正确性。从图 3 的仿真结果可以看出,采用修正方法后,跟踪性能确实有所改善,这验证了直线航迹检测中修正方法的正确性。

#### 5 结论

本文分析了两级门限检测的雷达 TBD 算法特点,在瑞利杂波背景下,提出了新的基于 DP-TBD 检测方法,较好地解决了末级检测门限设置困难和动态规划算法跟踪能力比较弱的问题。这种方法可以归结为:保留通过常规方法实现门限检测的时间历史数据,利用目标直线运动的特点,在众多的虚假轨迹中选择正确的目标信号航迹,帮助确定跟踪初始航迹。当目标轨迹未知时,检测就需要更高的信杂比。此外多目标雷达 TBD 检测技术<sup>[10]</sup>,已经做了很多工作,但转换状态彼此重叠的多目标雷达 TBD 检测技术将是今后努力的方向。

#### 参考文献:

- [1] Johnston L A, Krishnamurthy V. Performance analysis of a dynamic programming track before detect algorithm[J]. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, 2002, 38 (1): 228 - 242.
- [2] Barniv Y, Kella O. Dynamic programming solution for detecting dim moving targets Part II: Analysis[J]. Aerospace and Electronic Systems IEEE Transactions on, 1987, AES-23 (6): 776 - 788.
- [3] Tonissen S M, Evans R J. Performance of dynamic programming techniques for Track-Before-Detect [J]. Aerospace and Electronic Systems IEEE Transactions on, 1996, 32 (4): 1440 - 1451.
- [4] 刘志刚,卢焕章,陈辉煌.一种低信噪比下点目标检测新算法[J].系统工程与电子技术.2004,26(11):1588-1591. LIU Zhi-gang, LU Huanzhang, CHEN Huihuang. New point target detection algorithm in low SNR[J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(11): 1588-1591. (in Chinese)
- [5] Buzzi S, Lops M, Venturino L., et, al. Detection of an unknown number of targets via track-before-detect procedures[A]. Radar Conference, 2007 IEEE[C]. Boston, USA: IEEE, 2007.
- [6] Buzzi S, Lops M, Venturino L. Track-before-detect procedures for early detection of moving target from airborne radars[J]. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, 2005, 41(3): 937 - 954.
- [7] 强勇,焦李成,保铮.一种有效的用于雷达弱目标检测的算法[J].电子学报,2003,31(03):440-443. QIANG Yong, JIAO Licleng, BAO Zheng. An effective track-before-detect algorithm for dim target detection[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(3): 440 - 443. (in Chinese)

- [8] 罗鹏飞,张文明,刘忠,等. 统计信号处理基础-估计与检测理论[M]. 北京:电子工业出版社,2006. 7.
- [9] 何友,修建娟,张晶炜,等. 雷达数据处理及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2006. 1  
HE You, XIU Jian-juan, ZHANG Jing-wei, et, al. Radar Data Processing With Application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,2006,1. (in Chinese)
- [10] 曲长文,黄勇,苏峰. 基于动态规划的多目标检测前跟踪算法[J]. 电子学报. 2006,34(12):2138 - 2141.  
QU Chang-wen, HUANG Yong, SU Feng. Radar track-before-detect algorithm of multitarget based on the dynamic programming[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(12):2142-2145. (in Chinese)

**作者简介:**

李涛 男,1973年3月生于辽宁,博士生,主要研究方向为雷达信号积累检测.

E-mail:limaster1973@163.com

吴嗣亮 男,1964年生于安徽,1995年12月在哈尔滨工业大学无线电工程系获得工学博士学位,1996年1月到北京理工大学雷达技术研究所做博士后研究,现为北京理工大学博士生导师,信号与信息处理学科首席教授. 入选2002年教育部跨世纪优秀人才,博士点基金、博士后基金和国防预研基金评审专家. 研究方向:信号处理理论与技术,目标探测与识别理论与技术,电子系统仿真与信号模拟.

E-mail:siliang@bit.edu.cn

曾海彬 女,1976年生于陕西,博士,主要研究方向为雷达信号处理,航天测控技术.

E-mail:zeng.angel@163.com

www.cnki.net