

文章编号: 1001-0920(2006)08-0885-04

## 一种提高雷达作用距离的有效方法

刘延峰<sup>1</sup>, 潘 泉<sup>1</sup>, 张冠杰<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学 自动化学院, 西安 710072; 2 西安 206 研究所, 西安 710100)

**摘 要:** 雷达的作用距离与雷达对目标的最低可检测信噪比直接相关, 现代雷达要达到对目标的可靠检测, 一般要求单个脉冲的信噪比为 13 dB 左右. 为此, 将低门限检测、卡尔曼滤波与动态规划算法相结合, 以在雷达中实现检测前跟踪, 并给出了检测前跟踪与检测后跟踪相衔接的方法. 该方法使雷达将可靠检测的信噪比降到 7 dB 左右, 相当于将雷达的最大作用距离提高了近 40%. 仿真结果表明, 所提出的方法是可行而有效的.

**关键词:** 检测前跟踪; 非相参积累; 动态规划; 卡尔曼滤波

中图分类号: TN 011

文献标识码: A

## Efficient Approach to Enhance Maximum Radar Range

L IU Yan-feng<sup>1</sup>, PAN Quan<sup>1</sup>, ZHANG Guan-jie<sup>2</sup>

(1. Automation School, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2 Xi'an 206th Research Institute, Xi'an 710100, China Correspondent: L IU Yan-feng, E-mail: Lucky\_lyf@yahoo.com.cn)

**Abstract:** The maximum radar range is related closely with radar minimum detectable signal-to-noise ratio (SNR). To achieve reliable radar detection, the SNR of a single pulse is usually required to be about 13dB. A method combining low threshold detection, Kalman filtering and dynamic programming algorithm is firstly employed to realize track-before-detect. By applying this method, reliable detectable SNR of the radar can be decreased to about 7 dB, which means that the maximum radar range is increased by around 40%. Link-up process between track-before-detect and track-after-detect as well as simulation results show the effectiveness of the method.

**Key words:** Track-before-detect; Noncoherent integration; Dynamic programming; Kalman filtering

### 1 引 言

雷达的作用距离是雷达最关键的性能指标之一. 提高雷达作用距离的途径有: 增大发射机功率, 发射长的脉冲串, 提高天线增益和降低损耗等方法. 然而, 这些方法对雷达系统的硬件部分要求太高, 在实际应用中难以实现. 雷达的作用距离与雷达对目标的最小可检测信噪比直接相关, 通常目标越接近雷达, 信噪比越高. 如果能在较低的信噪比情况下检测到目标, 就可以在更远的距离上发现目标. 为此本文运用检测前跟踪的方法在低信噪比下检测目标, 以提高雷达最大作用距离.

检测前跟踪最早应用于红外图像序列对弱小目标的检测. 20 世纪 70 年代末以来, 许多学者致力于

该方法的应用研究, 提出了基于红外图像的运动小目标检测与跟踪<sup>[1]</sup>. 1990 年后, David 等提出将检测前跟踪用于空载搜索雷达对地面目标检测中, 但只针对测视低分辨率雷达, 检测概率为  $0.5^{[2]}$ ; Wallace 于 2002 年将该方法应用于脉冲多普勒雷达目标检测, 利用脉冲多普勒雷达的相参性, 明显改善了雷达对弱小目标的检测能力, 但并未引入航迹滤波过程, 也未与检测后跟踪相结合<sup>[3]</sup>. 国内的一些学者将该方法用于雷达对弱目标检测中, 但同样未与跟踪相结合<sup>[4]</sup>. 近年来, 一些学者针对动态模型强非线性和非高斯噪声情况, 将粒子滤波器应用于检测前跟踪, 性能较好, 但计算量较大<sup>[5]</sup>.

总之, 检测前跟踪的实现方法很多, 主要包括动

收稿日期: 2005-06-15; 修回日期: 2005-08-03

基金项目: “十五”国防预研基金项目(YJ0267070).

作者简介: 刘延峰(1972—), 男, 陕西澄城人, 博士生, 从事雷达信号处理、数据处理的研究; 潘泉(1961—), 男, 重庆人, 教授, 博士生导师, 从事多目标跟踪、信息融合等研究.

态规划法<sup>[6]</sup>, Hough 变换法<sup>[7]</sup>和粒子滤波器方法 Hough 变换法一般对沿径向作匀速直线运动的目标具有良好的检测性能, 但计算量较大, 而动态规划法对目标检测的信噪比要求较低, 可以检测各种运动形式的目标。另外, 还有基于人工智能的方法, 包括神经网络方法<sup>[8]</sup>和遗传算法等。

本文将卡尔曼滤波与动态规划算法相结合, 以实现检测前跟踪, 并给出了检测前跟踪与检测后跟踪相衔接的方法。

## 2 检测前跟踪的主要思想

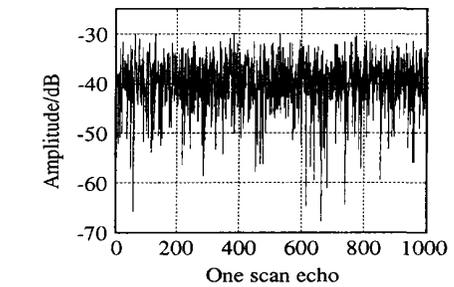
现代雷达对目标检测和跟踪大多采取检测后跟踪的方法<sup>[9]</sup>。

检测阶段首先根据恒虚警要求(如虚警率  $p_{fa} = 10^{-6}$ ) 确定一个检测门限, 使在给定的虚警概率下发现概率最大(如检测概率  $p_d = 90\%$ )。为提高雷达对目标的检测能力, 通过脉冲串进行相参或非相参积累, 而对于动目标还可通过动目标显示(MTD)或动目标检测(MTD)以及滑窗式二进制积累的方法提高信噪比、信杂比。通过这些处理, 一般可得到大于 30 dB 的增益。经过恒虚警检测, 信噪比达到 13 dB 时的点迹为目标回波。点迹凝聚后可提取到目标参数。

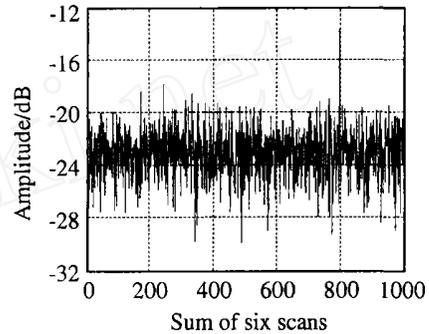
跟踪阶段是在可靠检测的基础上对目标点迹进行数据处理, 包括点迹预处理、航迹起始、外推滤波、点迹和航迹相关、航迹质量管理等, 从而得到目标的可靠航迹, 删除虚假航迹。而检测前跟踪则是在目标的检测阶段引入数据处理的方法, 目标检测与航迹起始同时进行, 降低雷达对目标可靠检测的最低信噪比, 如由 13 dB 降低到 7 dB。从能量利用的观点出发, 检测后跟踪采用脉冲串相参积累和非相参积累, 都只是解决单次扫描脉冲串之间的能量积累。检测前跟踪不但利用单次扫描脉冲串进行积累, 而且进行扫描间信息积累, 从而提高了雷达能量的利用率。

利用雷达扫描间信息积累, 对于提高雷达对低信噪比目标的探测具有显著作用。一般认为, 雷达系统的噪声是高斯白噪声, 经包络检波后噪声幅度服从瑞利分布。假设在第 800 号距离单元有一个静止弱目标, 信噪比为 6 dB, 并假设目标散射面积在扫描间不变。单次扫描时无法检测到目标, 但经 6 次扫描间积累后, 可以检测到目标, 如图 1 所示。原因在于目标回波在扫描间相关, 而噪声信号呈随机特点, 在扫描间不相关, 信噪比改善大约在  $\sqrt{n}$  ( $n$  为扫描次数) 倍。

检测后跟踪在单次扫描中为降低虚警和保持对目标的可靠检测, 采用的门限较高, 使弱小目标被抑制掉。而检测前跟踪通过预先设置一个低门限或不



(a) 单次扫描回波



(b) 6 次扫描回波

图 1 单次扫描回波和连续 6 次扫描回波累积

设门限, 使得低信噪比目标回波信息保留下来, 它在单次扫描结束时并不宣布检测结果, 而是将多次扫描结果存储起来, 利用目标回波和噪声信号在扫描间的不同特性, 实现非相参积累。对于静止目标, 幅度相加很容易实现, 而对于运动目标, 则在扫描间目标的位置发生了移动。所以, 对于运动目标, 检测前跟踪的关键在于沿目标运动路径积累能量, 而数据处理是搜索目标运动路径的有效方法。

## 3 检测前跟踪具体实现方法

如前所述, 检测前跟踪检测运动目标的关键是沿目标扫描间的运动路径积累能量, 而寻找目标运动路径最直接的方法是穷举法, 但其计算量呈指数上升, 无法实现。动态规划法作为一种数据关联算法, 它与概率关联算法的区别在于在回波信噪比低的情况下, 前者具有更好的关联性能, 而与多假设跟踪方法的区别则在于动态规划运算量小, 但跟踪性能相当<sup>[10]</sup>。

检测前跟踪一般设置两级门限, 包括初始的低门限和判定门限。初始低门限主要是为了降低计算量, 判定门限用来宣布检测结果和航迹起始。本文取经过 10 帧处理, 目标沿运动路径的回波信噪比非相参积累达到 13 dB 作为判定门限, 宣告目标检测结果和起始航迹。当单次检测信噪比低于判定门限时, 采用检测前跟踪的处理方法, 每 10 次扫描进行一次检测前跟踪处理。单次检测信噪比达到 13dB 时, 采

用常规检测后跟踪处理方法 针对目标在二维平面内运动的情况给出如下实现过程:

**Step1 产生网格**

按各个时刻得到的目标量测值, 将目标的量测值按时刻排成网格, 如图 2 所示

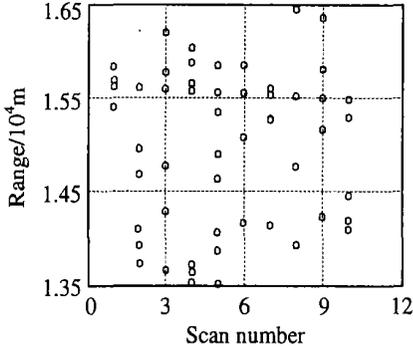


图 2 低门限检测连续 10 帧距离网格图

**Step2 前向和后向算法**

经典的滤波算法要求在惯性坐标系下建立目标的运动模型, 而目标的量测值通常是在球坐标系得到的 因为降低门限后, 参与处理的可能点迹较多, 如果进行坐标转换, 将大大增加计算量 本文为减小计算量, 采用在球坐标下建模以及相关的方法 当目标距离远, 雷达扫描周期短, 而且目标运动速度较慢时, 在相邻扫描周期内发生跨越不同方位的可能性很小, 因此其径向近似服从匀速直线运动 实践证明, 这种近似是合理的 选状态变量为  $X = (r_T, \dot{r}_T, \theta_r, \dot{\theta}_r)^T$ , 状态方程为

$$X_k = F_{k-1} X_{k-1} + W_k, \tag{1}$$

状态转移矩阵为

$$F_k = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{2}$$

量测方程为

$$z_k = H_k X_k + v_k, \tag{3}$$

观测矩阵为

$$H_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \tag{4}$$

其中:  $r, \theta$  分别为目标的距离和方位值;  $W_k$  为系统噪声, 是均值为 0 的高斯白噪声; 协方差阵为  $Q_k$ ;  $v_k$  代表量测噪声;  $R_k$  为量测噪声协方差

$$R_n = E(V_n V_n^T) = \begin{bmatrix} \sigma_R^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_R^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\theta^2 \end{bmatrix},$$

$k$  代表采样时刻

(1) 前向算法

1) 初始化  $k = 1$  起始, 给出初始状态、方差, 初始的信噪比  $Score_i(1) = S/N$ .

2) 当  $k = 2, \dots, N$  ( $N$  取 5~10) 时循环以下各步:

由  $k-1$  时刻网格得到各点  $i = 1, \dots, m_k$  的估计值, 计算一步预测值:

预测估值

$$\hat{X}_{k|k-1} = F_{k-1} \hat{X}_{k-1}, \tag{5}$$

量测估值

$$Z_{k|k-1} = H_k \hat{X}_{k|k-1}. \tag{6}$$

波门和相关 设定相关波门, 按位置、速度、幅度最近邻方法对量测值进行分派<sup>[9]</sup>.

用卡尔曼滤波方法为各状态进行状态更新 增益矩阵为

$$K_k = P_k H_k^T [H_k P_k H_k^T + R_k]^{-1}, \tag{7}$$

预测估值协方差阵为

$$P_{k|k-1} = F_k P_{k-1} F_k^T + Q_k, \tag{8}$$

滤波估值协方差阵为

$$P_k = [I - K_k H_k] P_{k|k-1}, \tag{9}$$

滤波估值为

$$\hat{X}_{k|k} = \hat{X}_{k|k-1} + K_k [Z_k - \hat{Z}_{k|k-1}], \tag{10}$$

信噪比累积为

$$Score_i(k) = Score_i(k-1) + S/N_i(k). \tag{11}$$

(2) 后向算法

累积信噪比达到  $Score = 13$  dB, 倒推得到目标的运动路径

**Step3 与检测后跟踪的接口**

当  $S/N$  低于 13 dB 时, 以每 6~10 帧为单元(本文选 10 帧) 进行检测前跟踪处理, 只保留满足两级门限要求的目标信息进行递推处理 当单次扫描  $S/N$  达到 13 dB 时, 采用检测后跟踪方法

**4 仿真研究**

下面给出雷达对地面慢速目标检测的仿真结果 对于地面慢速运动目标, 雷达扫描周期为 1 s, 假设目标沿  $x$  方向以 15 m/s,  $y$  方向以 6 m/s 的速度靠近雷达, 当距雷达 16 km 时, 目标回波信噪比为 7 dB, 采用低门限之后前 10 帧的检测结果如图 2 和图 3 所示 雷达扫描范围为方位  $-65^\circ \sim 65^\circ$ ; PPI 显示结果如图 3 所示

单个慢速目标检测前跟踪与检测后跟踪的处理结果对比如图 4 所示 图 4(a) 运用检测前跟踪, 目标从 15.8 km 形成稳定的航迹, 而图 4(b) 运用检测后跟踪方法, 同一目标从 12.5 km 才形成稳定的航迹, 而且虚警率比图 4(a) 高

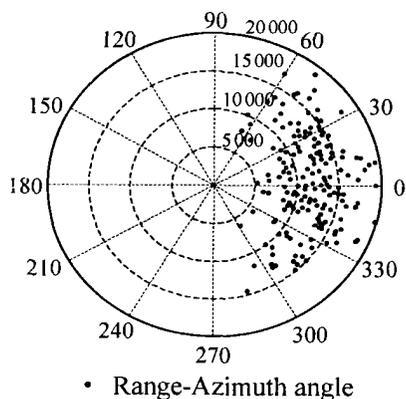
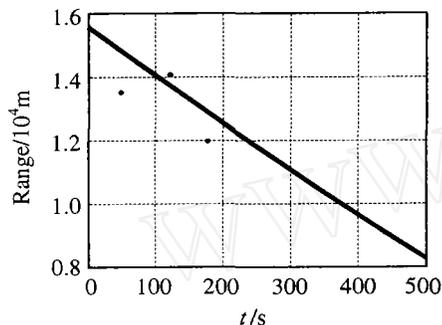
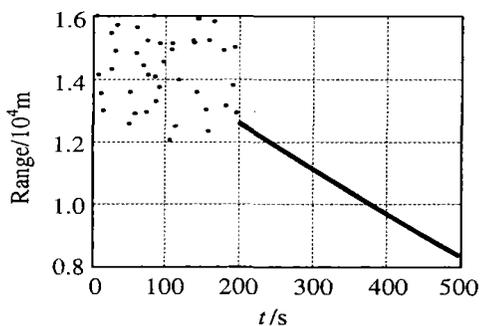


图3 低门限检测连续10帧距离-方位角回波图



(a) 检测前跟踪



(b) 检测后跟踪

图4 检测前跟踪与检测后跟踪的目标航迹

## 5 结论

由理论分析和仿真结果可以看出, 实现上检测前跟踪是通过增加软件处理的复杂性, 以大的计算量来提高对回波能量的有效利用。由于现代战争对雷达低截获率的要求和计算机技术的飞速发展, 在不增大雷达的发射功率情况下, 通过检测前跟踪的

方法来提高雷达的作用距离具有广阔的应用前景

本文所采用的方法, 两级门限只由信号和噪声的幅度来决定, 并不涉及信号和噪声的具体统计特性, 所以对雷达系统噪声为高斯或非高斯情形均适用

## 参考文献 (References)

- [1] Succary R, Kalmanovitch H, Shumik Y, et al. Point Target Detection [A]. *Conf on Infrared Technology and Applications* [C]. Washington, 2002: 671-675.
- [2] David J, Kramer R, Jr Wallace, et al. Track-before-detect Processing for an Airborne Type Radar [A]. *IEEE 1990 Int Radar Conf* [C]. New York, 1990: 422-427.
- [3] Wallace W R. The Use of Track-before-detect in Pulse-doppler Radar [A]. *Radar Int Conf* [C]. Edinburgh, 2002: 315-319.
- [4] 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(3): 440-443.  
(Qiang Y, Jiao L C, Bao Z. An Effective Track-before-detect Algorithm for Dim Target Detection [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(3): 440-443.)
- [5] Salmond D J, Birch H. A Particle Filter for Track-before-detect [A]. *2001 American Control Conf* [C]. Washington, 2001: 3755-3760.
- [6] Leigh A Johnston. Performance Analysis of a Track Before Detect Dynamic Programming Algorithm [A]. *Proc IEEE ICASSP 2000* [C]. Brighton, UK: IEEE Press, 2000: 49-52.
- [7] Richards G A. Application of the Hough Transform as a Track-before-detect Method [A]. *Target Tracking and Data Fusion IEE Colloquium* [C]. London: Printed and Published by the IEE, 1996: 1-3.
- [8] Perlovsky L I. MLANS Neural Network for Track Before Detect [A]. *Aerospace and Electronics Conf* [C]. Boston, 1993: 377-382.
- [9] Samuel S Blackman. *Multiple-target Tracking with Radar Applications* [M]. Washington: Artech House, 1986: 1-11.
- [10] Gad A, Farooq M. Viterbi-based Data Association Techniques for Target Tracking [A]. *Signal Processing, SPIE* [C]. Orlando, 2003: 21-25.