

# 一种基于动态规划法的雷达微弱多目标检测方法

宋慧波, 高梅国, 田黎育, 毛二可, 顾文彬  
(北京理工大学信息科学技术学院雷达技术研究所, 北京 100081)

摘 要: 在雷达微弱信号检测领域中, 动态规划法是一种有效的能量积累方法. 本文首先分析了应用动态规划法对多个微弱目标信号积累后数据图像的特点, 在此基础上通过求极值实现了对多目标的检测. 然后对算法的虚警概率和检测概率做了理论分析, 同时进行了仿真实验. 仿真结果表明, 与传统的只作相参积累的检测方法相比, 基于动态规划的极值法带来了 4~ 5dB 的非相参积累增益.

关键词: 动态规划; 检测前跟踪; 极值法; 微弱多目标检测

中图分类号: TP393.04 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2006) 12 2142-04

## An Algorithm Based on DP for Radar Dim Multi-Target Detection

SONG Hui-bo, GAO Mei-guo, TIAN Li-yu, MAO Er-ke, GU Wen-bin

(Laboratory of Radar Research, Department of Electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In the application of radar dim target detection, dynamic programming (DP) is an effective method in integrating target energy. This paper analyzed the characters of images of dim radar multi-target with DP, and achieved multi-target detection by using extreme value theory. The probability of false alarm and the probability of detection have been analyzed theoretically. The results of the simulation show that the method brings 4~ 5dB gain of noncoherent integration compared with traditional detection method.

Key words: dynamic programming; track before detect; extremum; dim multi-target detection

### 1 引言

对于远距离的微弱目标, 雷达接收到的回波信号的能量相当弱, 用传统的雷达积累与检测方法不能可靠地检测目标. 为了检测这类微弱目标, 必须得到更多的信号能量. 检测前跟踪技术(TBD, Track Before Detect)是一种多帧信号积累技术, 它最早应用于红外和光学图像处理, 其基本思想是对多帧信号进行处理, 先进行目标预检测, 在此基础上对检测出的目标进行多目标跟踪, 利用目标的运动特征沿各种可能轨迹积累能量. 然后对各个能量积累值进行检测判断, 从而检测出真实目标, 同时提取出目标的轨迹. 1985年, Yair Bamiv提出了TBD的动态规划实现算法(TBD-DP, Dynamic Programming Track Before Detect)<sup>[1, 6]</sup>, 大大减少了算法的计算量. 随后 S. M. Tonisson等人进一步发展了该算法并进行了详细的性能分析<sup>[2, 3, 7]</sup>. 近年来 TBD-DP 算法已经被应用到雷达的微弱信号检测领域中<sup>[4, 5, 8]</sup>.

TBD-DP 算法虽然能得到目标轨迹能量的有效积累, 但是在目标轨迹能量积累的每个阶段, 目标能量都会扩散. 这样就使得在  $K$  帧图像序列中, 前  $K-1$  帧的目标轨迹能量积累值会扩散到第  $K$  帧领域窗的所有点, 从而在每一个目标所在

的区域都累积成一个棱锥形状的凸起, 造成算法最后设置判决门限极其困难. 因此在用动态规划算法进行雷达微弱目标的检测领域里, 研究工作多是针对于单目标进行检测的. 本文利用积累后的图像中每一个棱锥形状凸起的峰尖位置即是每个目标点当前所在的位置这一特点, 把积累后的图像数据先经过恒虚警检测, 然后通过求极值的方法提取出每个目标所在的位置, 从而有效地将动态规划算法应用于雷达微弱多目标的检测中.

### 2 基于动态规划的极值法

(1) 动态规划积累: 对雷达接收机的回波数据作 FFT, 得到以距离单元和多普勒分辨单元为轴的二维图像帧, 实现了雷达回波数据的成像. 其中每一帧图像共有  $L \times M$  个分辨单元(包括  $L$  个距离单元,  $M$  个多普勒单元). 在此基础上, TBD-DP 算法共进行  $K$  帧非相参积累, 非相参积累之后图像各分辨单元的像素值, 即各分辨单元的能量积累值用损失函数  $I(x_K)$  来表示<sup>[8]</sup>.

(2) 门限检测: 对  $I(x_K)$  做恒虚警门限检测, 如果  $I(x_K) \geq V_{far}$ , 将该图像中状态  $x_K^{[8]}$  对应的分辨单元的像素值  $I(x_K)$  保存, 其中  $V_{far}$  是设定的门限值. 否则将该分辨单元的像素

值置零, 从而得到待极值法处理的图像, 图像中的所有像素单元(总共有  $L \times M$  个)组成了备选目标集合  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_{L \times M}\}$ . 每一个备选目标的参数都由该目标所在的距离单元、频率单元以及该单元的像素值组成:  $X_i = \{l, m, I(x_K)\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, L \times M$ . 其中元素  $X_i$  的位置参数  $1 \leq l \leq L, 1 \leq m \leq M$ , 分别是该目标在图像中的距离单元和频率单元的坐标值.  $I(x_K)$  是目标在单元  $(l, m)$  的状态的能量积累值.

(3) 极值法提取目标: 对恒虚警处理之后的图像像素值求极值从而提取出目标点的位置. 选取备选目标集中的任一元素值  $X_i$  作为索引元素值. 如果该元素所在分辨单元  $(l, m)$  的能量积累值  $I(x_K)$  比它周围一定范围内的分辨单元的  $I(x_K)$  都大, 则将该元素作为一个极值点即目标点的位置, 存入目标集合中  $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}$ , 其中  $n$  是提取到的极值点的个数, 也就是目标的个数.

当信噪比较低时, 非相参积累后图像中的棱锥表面就变得不再光滑, 一些原本不是极值点的像素叠加上噪声后变得突起, 会被错误地当作极值点而提取出来, 从而产生虚警. 观察发现, 这类噪声通常只会在较小的范围内产生影响, 通过扩大极值法的比较范围, 能够有效地消减噪声的影响. 但比较范围扩大的同时, 算法对多目标的分辨能力势必会受到影响.

(a) 周围 8 点区域内求最大

从集合  $X$  中选取元素  $X_i$  作为索引元素, 其在图像中的位置为  $(l, m)$ . 与其进行比较的区域元素设为  $X_j, X_j = \{l', m', I(x_K)\}, j = 1, 2, \dots, 8$ . 同时  $X_j \in X$ , 其中  $j \neq i$ , 其坐标  $(l', m')$  满足公式:  $l-1 \leq l' \leq l+1$  与  $m-1 \leq m' \leq m+1$ . 如果  $I(x_K) > I(x_K)$ , 就认为索引元素  $X_i$  是一个极值点, 将其存入目标集合  $Y$  中. 否则认为该元素不是极值点, 继续选择集合  $X$  中的另一个元素作为索引元素值, 直到遍历  $X$  中的所有元素为止.

(b) 周围 24 点区域内求最大

为了消减噪声的影响, 增加极值法比较区域的元素个数到 24 个. 设进行比较的区域元素为  $X_j, X_j = \{l', m', I(x_K)\}, j = 1, 2, \dots, 24$ . 同时  $X_j \in X$ , 其中  $j \neq i$ , 其坐标  $(l', m')$  满足公式:  $l-2 \leq l' \leq l+2$  与  $m-2 \leq m' \leq m+2$ . 如果  $I(x_K) > I(x_K)$ , 就认为索引元素  $X_i$  是一个极值点, 将其存入目标集合  $Y$  中. 否则继续选择索引元素值, 直到遍历  $X$  中的所有元素为止.

(c) 极值法的分辨力分析

在用极值法进行多目标检测的过程中, 要想同时提取出两个距离或速度很接近的目标, 必须满足一定的目标分辨条件. 而且选取的极值法比较区域越大, 目标分辨条件越严格. 设有两个目标, 它们在距离一多普勒图像中有着相同的频率坐标, 坐标值分别是  $(l1, m1), (l2, m1)$ . 当极值法的比较区域范围选择周围 8 点时, 如图 1(a) 所示, 最后要想将这两个目标同时检测出来, 需要满足下面的条件:

$$\text{距离维: } |l2 - l1| \geq 2 \tag{1a}$$

同理, 如果两目标有着相同的距离坐标而频率坐标不同时, 则它们的频率坐标要满足同样的分辨条件:

$$\text{频率维: } |m2 - m1| \geq 2 \tag{1b}$$

当极值法的比较区域范围选择周围 24 点时, 如图 1(b) 所示, 要想将两个目标同时提取出来, 需要至少满足下面的条件之一:

$$\text{距离维: } |l2 - l1| \geq 3 \text{ 或 频率维 } |m2 - m1| \geq 3 \tag{2}$$

由上述(a)、(b)、(c)三个步骤的分析可知, 极值法的比较区域选取得越大, 噪声的影响就越小, 但同时对于距离或速度参数很接近的多个目标的分辨力就会下降. 因此在选取比较区域范围时, 要综合考虑两个方面的影响, 本文中极值法选取的比较区域是周围 24 点的方法.

### 3 性能分析

#### 3.1 虚警率分析

在只有复白噪声的情况下, 按照上述方法所成的图像中, 每个距离一多普勒单元的噪声测量值是同分布的瑞利随机变量, 其概率密度分布为

$$p_w(x) = \left[ \frac{x}{\sigma_0^2} \right] \exp \left[ -\frac{x^2}{2\sigma_0^2} \right] \tag{3}$$

其中噪声的均值和方差分别为  $\mu_w = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma_0, \sigma_w^2 = \frac{4-\pi}{2} \sigma_0^2$ . 代价函数  $I(x_k)$  的密度函数为  $p_{I_k}(x)$ , 分布函数为  $P_{I_k}(x)$ .  $I(x_{k+1})$  为  $q$  个  $I(x_k)$  的最大值与测量值  $z_{k+1}$  之和<sup>[8]</sup>, 这两个变量相互独立, 则:

$$p_{I_{k+1}}(x) = f_{I_k}(x) * p_w(x) \tag{4}$$

其中,  $q$  个随机变量  $I(x_k)$  的最大值的概率密度分布为

$$f_{I_k}(x) = q P_{I_k}(x) P_{I_k}^{q-1}(x).$$

为了得到数值解, 需要做两个假设: (1) 代价函数的概率密度函数都服从高斯分布. (2) 每一帧的代价函数都是独立分布的. 这样, 在只有噪声的状态下,  $p_{I_k}(x)$  近似服从高斯分布, 它的均值为  $\mu_k$ , 方差为  $\sigma_k^2$ , 第  $k+1$  帧的代价函数可由  $I(x_k) = \max [I(x_{k-1})] + z(x_k)$  得出<sup>[8]</sup>. 仅仅有噪声的状态测量值  $z_{k+1}$  服从均值和方差为  $(\mu_w, \sigma_w^2)$  的瑞利分布. 根据文献[2], 可得出  $I(x_{k+1})$  的均值和方差为

$$\begin{aligned} \mu_{k+1} &= \mu_{m1} + \mu_w = \mu_k + \sigma_k \mu_{\max}(q) + \mu_w \\ \sigma_{k+1}^2 &= \sigma_{m1}^2 + \sigma_w^2 = \sigma_k^2 \sigma_{\max}^2(q) + \sigma_w^2 \end{aligned} \tag{5}$$

其中,

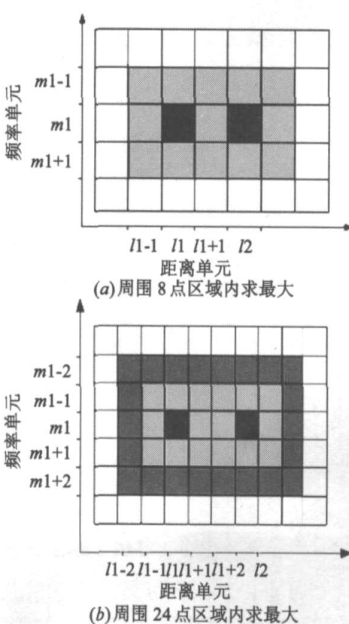


图 1 极值法的分辨力分析

$$\mu_{\max}(q) = \int_{-\infty}^{\infty} qx\phi(x) \Phi^{q-1}(x) dx \tag{6}$$

$$\sigma_{\max}^2(q) + \mu_{\max}^2(q) = \int_{-\infty}^{\infty} qx^2\phi(x) \Phi^{q-1}(x) dx$$

$\phi(x)$ 和  $\Phi(x)$  是标准正态变量的密度函数和分布函数. 这样虚警率就为

$$P_{FA} = 1 - \Pr\left[\max_{k,i} |x_{k,i}| \leq V_T\right] = 1 - \Phi^q\left[\frac{V_T - \mu_k}{\sigma_k}\right] \tag{7}$$

这里  $n = L \times M$ , 是图像中距离一多普勒单元的个数.

### 3.2 检测概率分析

信号中含有复白噪声的情况下, 信号单元的测量值是广义瑞利分布的随机变量, 其概率密度分布为

$$p_s(x) = \left(\frac{x}{\sigma_0^2}\right) \exp\left[-\frac{x^2 + A^2}{2\sigma_0^2}\right] I\left(\frac{xA}{\sigma_0^2}\right) \tag{8}$$

式中:  $I$  为零阶贝塞尔函数,  $A$  为信号幅度. 均值和方差分别设为  $\mu_s, \sigma_s^2$ . 代价函数的密度函数为  $\bar{p}_{I_k}(x)$ , 分布函数为  $\bar{P}_{I_k}(x)$ .

$$\bar{p}_{I_{k+1}}(x) = \bar{f}_{I_k}(x) * p_s(x) \tag{9}$$

这里  $\bar{f}_{I_k}(x) = (q-1)p_{I_k}(x)P_{I_k}^{q-2}(x)\bar{P}_{I_k}(x) + \bar{p}_{I_k}(x)P_{I_k}^{q-1}(x)$  是  $q-1$  个噪声代价函数和信号状态代价函数中的最大值的概率密度函数. 同样可得单一目标检测概率的数值解为

$$p_d = 1 - \Phi\left[\frac{V_T - \mu_k}{\sigma_k}\right] \Phi^{q-1}\left[\frac{V_T - \mu_k}{\sigma_k}\right] \tag{10}$$

针对多目标的情况进行检测, 以两个目标为例, 检测概率是两个目标同时被检测到的概率, 用  $p_D$  来表示.  $P_L$  是漏检的概率,  $p_D = 1 - P_L$ . {目标漏检的集合} = {两目标都没被检测到} + {目标一被检测到, 目标二被漏检} + {目标一被漏检, 目标二被检测到}. 由此可求得

$$p_D = p_d^2 \tag{11}$$

## 4 仿真结果

以两个目标为例进行仿真实验, 对多个目标的检测与之一相同. 已知某雷达的波长  $\lambda = 1.5\text{m}$ , 脉冲重复周期  $\text{PRT} = 3\text{ms}$ , 距离分辨单元  $0.375\text{km}$ , 输入信号信噪比  $\text{SNR} = -12\text{dB}$ , FFT 相参积累点数为 256 点, 共积累 15 帧. 目标运动参数: 目标 1: 初始速度  $90\text{m/s}$ , 初始距离  $7\text{km}$ , 加速度  $0.8\text{m/s}$ , 目标幅度 1. 目标 2: 初始速度  $70\text{m/s}$ , 初始距离  $6\text{km}$ , 加速度  $0.8\text{m/s}$ , 目标幅度 1.2. 图 2 是用极值法检测目标及对目标在 15 帧图像中距离和频率单元运动的回溯情况. 由于图像离散化的影响, 检测到的轨迹会在一些点上与真实轨迹有误差. 我们将误差在一个分辨单元之内的检测点都视为真实的目标位置, 可以看出算法的检测和跟踪效果很好.

基于动态规划的极值法存在着能量积累扩散的问题, 在积累后的图像数据中, 每个目标所在的区域都累积成一个棱锥形状的凸起. 这使得参数接近的两个目标中, 幅度小的目标的棱锥峰尖会被大目标的棱锥体所淹没. 同时在极值法的分辨能力性能分析中曾经指出要想分辨出两个靠得很近的目标, 必须满足式(2). 因此算法的检测概率在噪声能量一定的情况下, 随着待检测的两目标之间的距离(目标在距离一多普

勒二维图像中相隔的单元数)和两目标之间的幅值比的变化而变化. 使目标运动参数中的两目标的幅度比值从 0.5 变化到 2, 两目标之间相隔的多普勒单元数从 1 个单元变化到 20 个单元, 仿真极值法对于两个目标的分辨能力. 图 3 是仿真结果, 可以看出目标 2 和目标 1 的幅值比低于 0.7 时, 检测概率低于 50%, 这是因为幅值小的目标会被噪声淹没, 从而不能被检测到. 当目标幅值比大于 0.8, 两目标在距离一多普勒平面上的坐标相差 5 个单元以上时, 检测概率  $\geq 80\%$ . 仿真结果中的 5 个分辨单元要大于式(2)中的 3 个分辨单元, 这主要是受图像离散化和噪声对检测概率的影响.

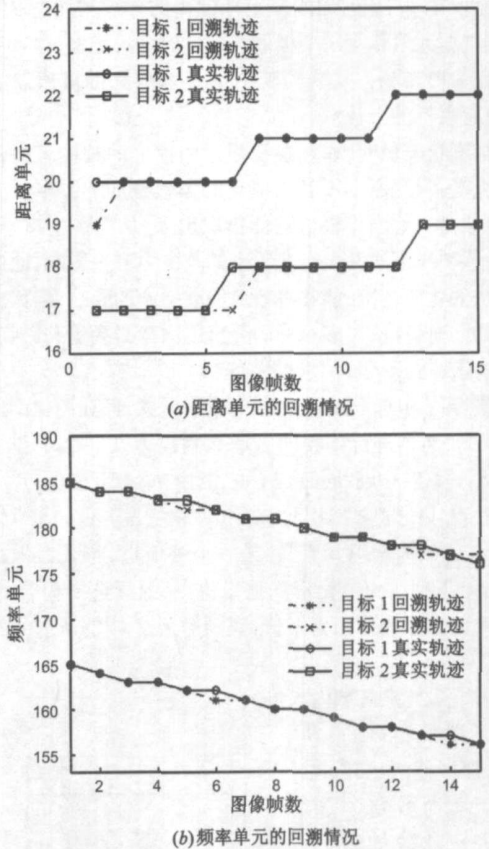


图 2 基于 DP 的极值法对目标轨迹回溯的结果

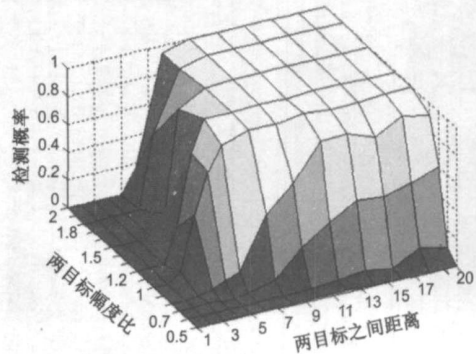


图 3 算法分辨能力的仿真结果

通过 1000 次的仿真实验, 统计极值法的检测性能. 图 4 比较了虚警率的理论曲线和仿真曲线. 图 5 是在  $P_{fa} = 10^{-3}$  的条件下, 检测概率理论曲线与仿真曲线的比较. 图中实线表示

由式(11)推导出来的检测概率曲线,虚线代表的是基于动态规划的极值算法的仿真曲线,点画线代表的是传统的仅做 256 点 FFT 的检测方法的检测概率的仿真曲线.从中可以看出理论的推导值和实际的仿真存在一定的偏差,这说明为了简化分析而作的两点假设并不能很好地符合实际情况.更精确的分析在文献[3]中有论述.由图中极值法的仿真曲线可以读出当信噪比大于  $-15\text{dB}$  时,算法对于目标的检测概率  $\geq 80\%$ .比较图中两条仿真曲线可知,在对多目标进行检测的情况下,与传统的相参积累的检测方法相比,基于 DP 的极值法带来了  $4\sim 5\text{dB}$  的非相参积累增益.

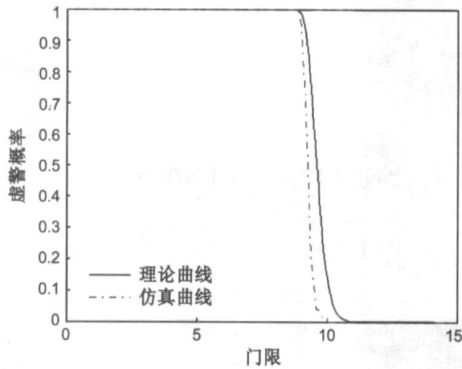


图 4 虚警率理论曲线和仿真曲线的比较

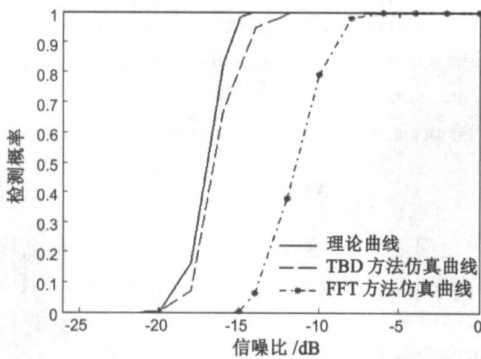


图 5 检测概率理论与仿真的比较

## 5 结论

动态规划算法是雷达微弱目标信号检测中一种非常有效的能量积累方法.为了将其应用于实际的雷达信号检测工程,本文结合有多个微弱目标存在的条件下雷达回波积累后数据图像的特点,改进了动态规划检测前跟踪算法,通过求极值的方法对多目标进行检测.通过大量的计算机仿真试验,验证了该算法对于多个弱小目标具有良好的检测和跟踪性能.

## 参考文献:

- [1] Barniv Y. Dynamic programming solution for detecting dim moving targets[J]. IEEE Trans Aerospace and Electronic Systems, 1985, 21(1): 144-156.
- [2] S M Tonissen, R J Evans. Performance of dynamic programming techniques for track before detect [J]. IEEE Trans Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32(4): 1440-1450.
- [3] Leigh A Johnston, Vikram Krishnamurthy. Performance analysis of a track before detect dynamic programming algorithm [A]. 2000 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing [C]. IEEE, 2000. 49-52.
- [4] 莫力. 雷达微弱目标长时间积累检测算法的研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2004.  
Mo Li. Researches on radar weak target detection through long term integration [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2004. (in Chinese)
- [5] 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 Licheng, Bao Zheng. Study on mechanism of dynamic programming algorithm for dim target detection [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2003, 25(6): 721-727. (in Chinese)
- [6] Barniv Y, Kella O. Dynamic programming solution for detecting dim moving targets, Part II: Analysis [J]. IEEE Trans Aerospace and Electronic Systems, 1987, 23(11): 776-788.
- [7] James Arnold. Efficient target tracking using dynamic programming [J]. IEEE Trans Aerospace and Electronic Systems, 1993, 29(1): 44-56.
- [8] Mo Li, Wu Siliang, Mao Erke. Radar detection for dim moving target using DP algorithm [J]. Chinese Journal of Electronics, 2004, 13(3): 486-490.

## 作者简介:

宋慧波 女, 1976年7月生于吉林辉南, 北京理工大学博士研究生, 主要研究方向为微弱信号检测、高速信号处理等。

E-mail: freezellare@bit.edu.cn

高梅国 男, 1965年生于湖南, 北京理工大学博士生导师, 主要研究方向为雷达及电子对抗信号与信息处理、高速实时信号处理技术等。

田黎育 男, 1975年7月生于重庆涪陵, 北京理工大学讲师, 主要研究方向为雷达信号与信息处理、嵌入式系统及 DSP 软件开发等。