

一种有效的用于雷达弱目标检测的算法

强 勇,焦李成,保 铮

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室,陕西西安 710071)

摘 要: 低信噪比的环境中对弱小目标的检测和跟踪已经在雷达信号处理领域中引起人们的广泛关注. 检测前跟踪(TBD)方法对弱小目标的检测非常有效,其基本思想是为避免恒虚警率(CFAR)处理带来的信噪比损失,而直接对原始数据进行处理. 但这样做运算量是很大的,多数场合难以接受. 本文提出了 CFAR 和 TBD 联合检测的思想,即加入低门限 CFAR 检测和求秩过程对数据进行预处理,引进平滑度的概念以消除一些为伪航迹. 仿真结果表明此算法的运算量较小而比一般的检测方法 SNR 性能上约提高 2~3dB.

关键词: 检测前跟踪; 动态规划算法; 弱目标检测

中图分类号: TN957. 51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 03-0440-04

An Effective Track-Before-Detect Algorithm for Dim Target Detection

QIANG Yong, JIAO Li-cheng, BAO Zheng

(Key Lab for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: An important problem in the field of radar signal processing which arouses people's attention widely is the detection and tracking dim moving targets in very low signal-to-noise ratio (SNR) environment. Track-Before-Detect (TBD) approaches are quite effective on the detection of dim targets, and the basic thought of this method is avoiding of the loss of CFAR by processing the raw data directly. An idea of detecting targets by combining CFAR with TBD methods is presented. In other words, low-threshold CFAR and process of ranking before TBD are added, and the conception of smoothness is introduced in order to get rid of false trails. Simulation results show this approach has small amount of computation, and achieves 2~3dB SNR gains comparable to those from other TBD algorithms.

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

1 引言

为了防止信号处理器的饱和,通常采用恒虚警率(CFAR)处理检测目标,但这样难以避免恒虚警损失,而在低信噪比和信杂比的情况下的弱目标无法检测出来. 随着专用计算机性能的提高,能够满足预选目标增多情况下的实时处理的要求,人们希望去掉 CFAR 检测来提高系统对弱目标的检测能力. 检测前跟踪(TBD)就是这样一种技术,从理论上可以有效提高系统的检测性能,但在实际应用中仍存在很多亟待解决的问题.

目前 TBD 主要应用于红外图象序列检测的例子中^[1~3],用于雷达目标的检测和跟踪的例子很少,因为相对于图象序列的 TBD 处理,雷达目标的 TBD 处理过程所考虑的因素要复杂的多. 最近,有人提出基于动态规划算法(DPA)的 TBD 算法^[1,2,3,6,7]用于低信噪比情况下红外图象序列的检测和跟踪. 但是文章中也同样指出基于 DPA 的 TBD 算法虽然有好的检

测性能,但其跟踪性能比较弱. 本文在改进了文献[2,3]中的 DPA 算法的基础上,提出了低门限 CFAR 与 TBD 联合检测的方案,并应用到雷达目标的检测和跟踪,提高了在高斯噪声下的检测性能的同时,也提高了跟踪性能.

2 TBD 的概念

TBD 是在低信噪比的情况下对目标进行检测和跟踪的一种技术. 不同于一般的检测方法,它在每一次扫描时刻内并不宣布检测结果,并且不设检测门限,只是将其数字化、并存储起来. 然后在扫描与扫描之间对假设航迹包含的点作没有信息损失的相干处理. 经过数次扫描的积累,在目标的航迹被估计出来后检测结果与目标的航迹同时宣布. TBD 的这个特点使其更适合于低信噪比背景下的弱小目标的检测.

对上述 TBD 概念可以作如下简单的数学描述:假设 $S(x_k)$ 是 N 个扫描时刻的回波所构成的某条假设路径的目标函数, x_k 为各个扫描时刻的回波,如果

收稿日期:2001-11-30;修回日期:2002-07-30

基金项目:国防十五预研基金:(No. 413070504);国防科技预研跨行业基金(No. 51407020801DZ0119);国防科技重点实验室基金(No. 51431050201ZS0104)

$$\hat{x}_K = \{ x_K \mid S(x_K) > V_T \} \quad (1)$$

则 $S(x_k)$ 中所包含的点 $\{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ 是我们所要宣布的一条目标轨迹。

当然,解此类问题可以用穷举法,这种方法看起来简单,但实现起来却非常困难,因为计算量大得惊人,即使使用最先进的计算机,所花费的时间也会使这种方法失去使用价值。为了减少运算量,通过动态规划算法实现,对每一个距离-方位-多普勒的分辨单元限制只能有一条“最佳”路径,至此问题转化为选择进入每个单元的最佳路径。另外,采用低门限的 CFAR 对数据进行预处理,使运算量又可以减少几个数量级。

3 用 TBD 方法进行雷达目标检测

3.1 考虑的问题

TBD 用于雷达目标检测首先需要解决好下面两个问题:低门限 CFAR 预处理和求秩过程。

(1) 低门限 CFAR 预处理

我们已经注意到,在文献[1]、[2]提到 TBD 检测不设门限的思想,这在宣布检测和跟踪结果之前虽然保存了所有的信息,但由此造成了庞大的数据处理量和 100% 的虚警率,虽然在后面的处理过程可以消除一些虚警,但很难完全消除,从而可能产生更多的伪航迹。

本文提出了 CFAR 和 TBD 联合检测的思想。CFAR 的思想是在虚警概率一定的条件下,设定门限,进行目标检测,这样难以避免恒虚警损失,一些低 SNR 的弱小目标无法检测出来。一般来说,CFAR 方法对于检测 SNR 高于 10dB 的目标有很好的检测性能,SNR 低于 5dB 的目标很难通过 CFAR 的方法检测出来。TBD 方法最初的思想是不设门限,以牺牲虚警率为代价,提高弱小目标的检测概率,但由此造成了庞大的数据处理对实时性检测提出了更高的要求,另外会产生大量的伪航迹,虽然在后面的处理过程中可以消除一部分,但很难完全消除,影响了跟踪性能。本文采用了一种折衷方案,即 CFAR 和 TBD 联合检测,利用了两种方法各自的优点,在第一个阶段采用低门限的 CFAR,除去那些成为目标的可能性极小的点,大大减少的下一个阶段的运算量,也消除了一些伪目标,这个阶段以增加虚警率为代价,提高了雷达的灵敏度,由于有下一个阶段 TBD 的保证,将虚警率降低。这样既保证了检测的灵敏度,又使处理的运算量减少。用本文的方法可以 50% 的概率检测出 SNR 为 4dB 以上的目标。

(2) 求秩过程

TBD 算法实际上是搜索一条路径,将这条路径上的各个扫描时刻的点的幅度值累加起来,通过一个给定的门限进行检测,在检测宣布的同时也确定了前 N 个扫描时刻的路径。但是,随机外噪声的谱沿多普勒分布

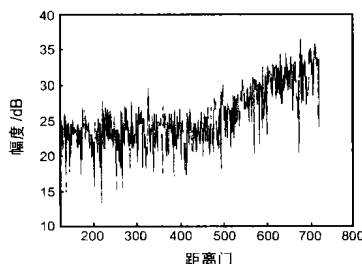


图 1 某方位-多普勒单元在距离门上的各次回波

是非均匀的,而沿距离分布也是随机的,但具有短时平稳性。

如图 1 所示。如果不进行处理,在整个距离-多普勒-方位范围内进行 TBD 处理结果将会不够准确。通过求秩,将目标信号在整个距离域中突出出来,如图 2 所示,可以更精确的检测到目标。

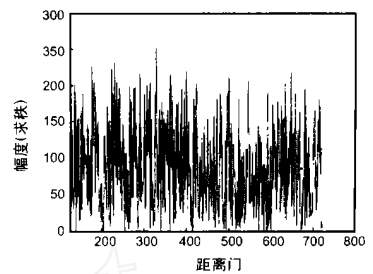


图 2 经过求秩平滑后的结果

求秩过程使用一

个距离上的滑窗进行的,当接收到了每一个新的多普勒值,我们相同的多普勒值的距离单元幅度与前后 N 个距离样本相比较来进行求秩。

关于秩可以这样定义:每个采样数据 $v_i(t), i = 1, \dots, N$ 的幅度按以下顺序排序:

$$|v_{(1)}| < |v_{(2)}| < \dots < |v_{(N)}| \quad (2)$$

令 p_i 表示 v_i 的秩,则有

$$p_i = \begin{cases} j, & v_{(j-1)} < v_i < v_{(j)} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

3.2 基于 DPA 的 TBD 算法

这里算法要求选择最后的阶段目标函数 $S(x_k)$ 超过一个门限的状态序列为航迹。算法如下:

(1) 初始化:对于第一次扫描中的某分辨单元的回波 $x_1 = (r, \dots, v_d)$,其中 r 和 v_d 分别代表距离、方位和多普勒。

$$S(x_1) = z_{r,v_d}(1) \quad (4)$$

$$x_k(1) = 0 \quad (5)$$

(2) 循环递归:当 $2 \leq k \leq n$ 时,对于所有的假设目标 x_k

$$S(x_k) = \max_{x_{k-1}} [Q(x_k | x_{k-1}) + S(x_{k-1})] + z_{r,v_d} \quad (6)$$

$$x_k(k) = \arg \max_{x_{k-1}} [S(x_{k-1})] \quad (7)$$

其中 $Q(x_k | x_{k-1})$ 是通过相应于扫描时刻间目标幅度的变化概率设计一个惩罚,增强目标运动的连贯性,我们定义 $Q(x_k | x_{k-1})$ 有如下形式:

$$Q(x_k | x_{k-1}) = \alpha \exp(-\beta |x_k - x_{k-1}|) \quad (8)$$

其中 α 和 β 均是系数。

(3) 停机准则:按照下面的停机准则公式,将第 k 个扫描时刻超过门限 V_T 的所有目标函数 $S(x_k)$ 找出,并确定 $S(x_k)$ 在这一时刻对应的假设目标的位置。

$$\hat{x}_K = \{ x_K \mid S(x_K) > V_T \} \quad (9)$$

(4) 航迹估计:对于超过门限的每条路径,由终点 \hat{x}_K 开始,利用下面的公式,逐步导向起点,通过逆序递推的方法,求出目标的航迹估计为 $\hat{x}_K = \{ \hat{x}_1, \dots, \hat{x}_K \}$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k+1}(k+1) \quad (10)$$

3.3 性能分析

下面我们对这种基于 DPA 的 TBD 算法进行简单的性能分析。我们将目标的检测概率定义为最终态的某个目标函数 $I(x)$ 超过门限的概率,用下式表示

$$P_d = Pr\left(\max_{x_k} I(x_k) > V_T\right), x_k \text{ \{目标 + 噪声\}} \quad (11)$$

航迹的一般检测概率用 P_d 表示,它被定义为检测到目标并且在恢复航迹过程中至少有两个以上的单元是真实目标单元的概率.目标的虚警概率 P_{fa} 定义为至少检测出一个伪航迹的概率,用下式表示

$$P_{fa} = Pr\left(\max_{x_k} I(x_k) > V_T\right), x_k \text{ \{噪声\}} \quad (12)$$

利用极值理论,将式[11],[12]变形为:^[1]

$$P_d = 1 - Pr\left(\max_{x_k} I(x_k) \leq V_T\right) = 1 - F_n(V_T), \quad x_k \text{ \{目标 + 噪声\}} \quad (13)$$

$$P_{fa} = 1 - Pr\left(\max_{x_k} I(x_k) \leq V_T\right) = 1 - F_n(V_T), \quad x_k \text{ \{噪声\}} \quad (14)$$

其中有如下形式

$$F_n(V_T) = \exp[-\exp[-(V_T - a)/b]] \quad (15)$$

图3给出了检测概率和虚警概率与门限 V_T 的关系.

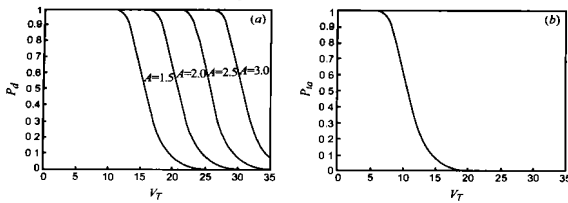


图3 检测概率和虚警概率与门限 V_T 的关系

下面我们进一步分析一下这个算法的跟踪性能.在DPA的每一个阶段,仅保留“最佳”的路径,而其它与这个态相联系的路径被丢弃.因此,在每一个阶段都有可能因为噪声伪航迹目标函数值比目标航迹的目标函数值大而发生选择错误.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.因此即使在DPA的最后阶段目标可能被检测到,但是不一定能够恢复目标的真实航迹.所以基于DPA的TBD算法的跟踪性能比较弱.为了进一步提高算法的跟踪和检测性能,我们除了利用一些先验知识,对目标函数加以限制,还可以利用航迹的平滑性这一条件对目标函数的进行控制,具体过程如下:

如果则 smoothness = 1, 则

$$S(x_k) = \max_{x_{k-1}} [Q(x_k | x_{k-1}) + S(x_{k-1})] + z_r r_d$$

如果则 smoothness = 0, 则

$$S(x_k) = \max_{x_{k-1}} [Q(x_k | x_{k-1}) + S(x_{k-1})]$$

关于平滑度的确定可以按照下面的方法进行:对于相邻的两次扫描,要对每条候选的路径计算两点方向.对于后继的扫描,如果当前两点方向与沿候选路径平滑的方向之间的偏差小于一个参数 PT ,这条路径的平滑为 smoothness = 1.如果这个偏差大于方向容差参数, smoothness = 0.

3.4 动态规划算法实时处理负载的估算

动态规划算法显然要比一般的穷举法要有效得多,因为它将一个 N 维的优化问题分解成为 N 个二维问题.用于几何和动态研究的每个距离-方位-多普勒单元的搜索区域,一般

由约3个方位单元、3个距离单元、3个多普勒单元合计约27个搜索单元组成,假设扫描次数为10.对于一个700个距离单元、41个角度单元和66个多普勒单元的搜索,用穷举法搜索超过门限的路径运算量约为 3.9×10^{20} 次,而使用动态规划算法,运算量约为 1.38×10^{10} 次,二者相差约10个数量级,经过低门限CFAR预处理,运算量又能降低2到3个数量级.

4 TBD处理的仿真结果

为了检验TBD方法的有效性,对仿真的数据进行处理.假设距离分辨率40m,扫描周期=5s.假设目标的速度 $v = 60 \text{ km/h} = 16.7 \text{ m/s}$,每次扫描目标的极限距离为3个距离分辨率单元.

按照本文提出的方法进行目标检测,先在距离门上使用低门限的CFAR,将检测后的距离-方位-多普勒三维数据压缩成距离-方位二维数据,然后在距离-方位平面上利用TBD方法检测.图4是20次扫描累积的目标和噪声的原始数据,在SNR = 6dB时,目标的轨迹无法看清.用TBD方法对第1次扫描到第20次扫描的数据进行处理的结果如图5所示,图5可以清楚的看到目标的轨迹.

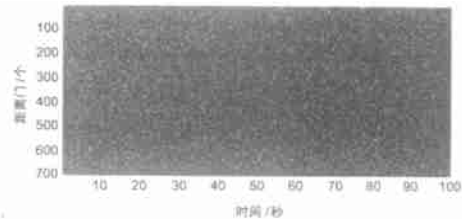


图4 未检测前的原始数据 SNR = 6dB

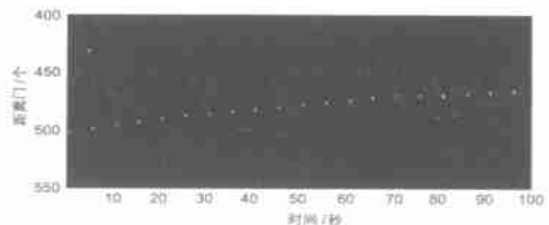


图5 检测前跟踪算法模拟结果 SNR = 5.0dB

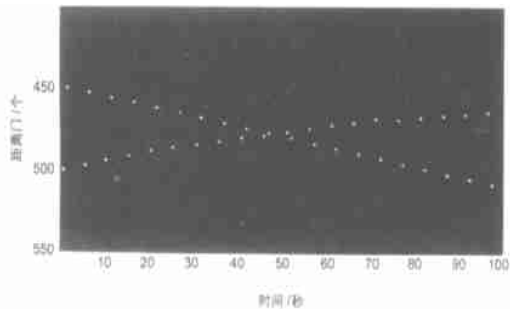


图6 两个目标的检测前跟踪算法模拟结果 SNR = 6dB

以上我们假设单个目标的情形,实际上TBD方法可以同时多个目标进行跟踪检测,包括两条路径交叉的情况.下面对存在两目标的20次扫描数据进行TBD处理,检测到两条目标航迹结果如图6所示.

5 结论

检测前跟踪的算法非常适用于强杂波、噪声背景下的弱小目标的检测,它是以加大运算量为代价,提高对弱小目标的检测能力,在通过检测前跟踪过程的目标函数值的积累,在最后的门限检测中消除大部分的虚警目标,宣布检测和跟踪结果.通过仿真分析表明,本文提出的改进 TBD 方法大大降低了运算量,具有很好的检测性能,可以检测到信噪比在 4dB 左右的目标,但是跟踪效果较差,若要实现对目标高精度的实时跟踪,还要在后面设计跟踪器.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Yair Barniv. Dynamic Programming solution for detecting dim moving target [J]. IEEE Trans on AES,1985,21(1):144 - 155.
- [3] James Arnold. Efficient target tracking using dynamic programming [J]. IEEE Trans on AES,1993,29(1):44 - 56.
- [4] D A Wynn. Coherent track-before-detection processing in a ship-based multifunction radar [A]. Radar 92 International Conference [C]. UK: RIC,1992. 206 - 209.
- [5] J david. Track-before-detect processing for an airborne type radar [A]. IEEE international radar conference [C]. Virginia:IEEE Press,1990. 422 - 427.
- [6] J david. Track-before-detect processing for a range-ambiguous radar [A]. IEEE International Radar Conference [C]. Boston Ma: IEEE Press,1993. 113 - 116.
- [7] Jennifer L Harmon. Track-before-detect performance for a high PRF search mode [A]. IEEE International Radar Conference [C]. California:IEEE Press,1991. 11 - 15
- [8] 张润琦. 动态规划 [M]. 北京:北京理工大学出版社,1989.

作者简介:



强 勇 男,1973 年生于陕西,西安电子科技大学在读博士生,研究方向包括:雷达信号处理、神经网络、进化算法、智能信号处理等.



焦李成 男,1959 年生于陕西,现为西安电子科技大学教授、博士生导师,主要研究领域包括:非线性理论,人工神经网络,子波理论和应用,进化算法,数据挖掘和智能信号处理等.

保 铮 男,1927 年生于江苏,现为中国科学院院士,中国电子学会会士,西安电子科技大学教授,博士生导师,主要研究领域为雷达信号处理及现代信号处理等.