文章编号：2095-4980(2015)03-0450-04

检测前跟踪技术在机载雷达数据处理中的实现

倪世道，马　娟

(中国电子科技集团公司 第 38 研究所，安徽 合肥 230031)

摘　要：现代雷达需要有较好的低截获特性，同时在大量低雷达有效截面(RCS)目标出现后，为了增强雷达对这些目标的探测能力，通过降低信号处理的检测门限，然后采用数据处理的方法，沿目标的运动路径将回波幅度进行非相参积累，提高目标探测能力。机载雷达由于载机载重量、体积以及功耗的限制原因，采用复杂的数据处理技术提高探测距离尤为重要，进而也需要系统具备更高的数据运算能力。本文采用检测前跟踪技术(TBD)提高目标探测距离，并采用适当的并行处理体系来实现系统的高性能运算，对某机载雷达的实际飞行试验数据进行处理，结果表明该方法明显提高了系统探测性能。

关键词：检测前跟踪；非相参积累；并行处理

中图分类号：TN219　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.11805/TKYDA201503.0450

Technology implementation of Track-Before-Detect based on airborne phased array radar data processing

NI Shidao，MA Juan

(The 38th Institute，China Electronics Technology Group Corporation，Hefei Anhui 230031，China)

Abstract：Modern radar requires good performance of low intercept. In the presence of ever-increasing number of low Radar Cross-Section(RCS) targets，modern radar must decrease the detection threshold for signal processing in order to improve its detection capability of these kinds of targets. Then it can undertake data processing by incoherent integration of echo amplitude along the contrail of target movements to obtain lower false alarm rate. Because of the limitation of volume，weight and power consumption in air radar，the application of finer data processing method is much important for the increase of detection range，which brings forward better processing ability for the radar system. This work makes use of Track-Before-Detect(TBD) for improving detect range，and gives parallel processing architecture for performance computation. The results of processing on the real data of a certain air radar using the prposed method indicate that TBD can improve system detection performance greatly.

Key words：Track-Before-Detect；incoherent integration；parallel processing

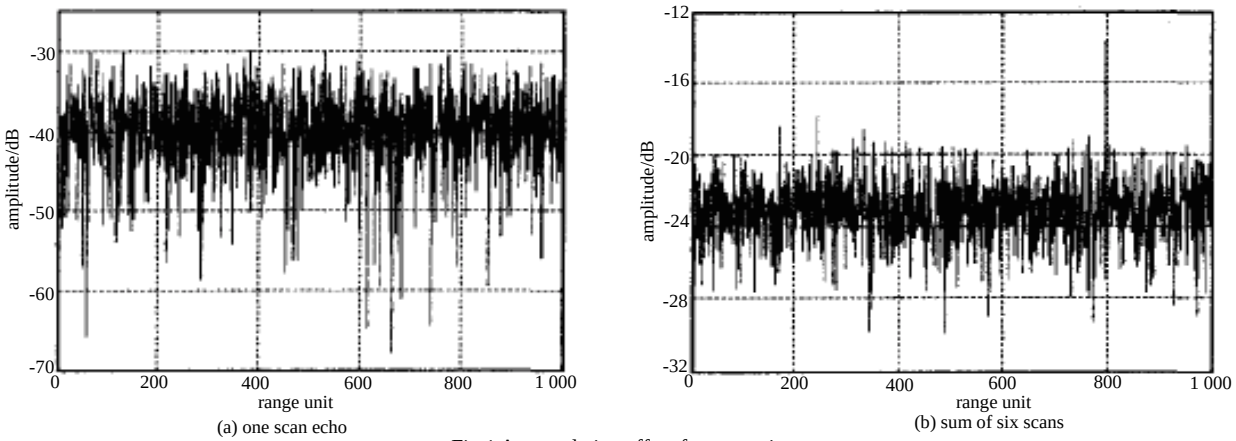
雷达的作用距离与雷达对目标的最小可检测信噪比直接相关，通常目标越接近雷达，信噪比越高。如果能在较低的信噪比情况下检测到目标，就可以在更远的距离上发现目标[1]。机载预警雷达由于受到载机载重量、体积以及功耗的约束限制了雷达的设备量，采用检测前跟踪(TBD)技术进行目标检测提高目标探测距离尤为重要[2]，也对系统提出了采用高性能的并行技术提高系统数据处理能力的要求。

1　检测前跟踪的主要原理

现代雷达对目标检测和跟踪大多采取检测后跟踪的方法。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，降低雷达对目标可靠检测的最低信噪比[3-4]。

收稿日期：2014-11-24；修回日期：2015-01-02

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，而且进行多次扫描信息积累，包括同帧和帧间的信息积累，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[4]，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，信噪比改善大约为 n(n 为扫描次数)倍，如图 1 所示。



(a) one scan echo　　(b) sum of six scans

Fig.1 Accumulation effect for many times

图 1 多次信息积累效果示例

2　检测前跟踪的应用实现

2.1 基本思想

检测前跟踪通过预先设置一个低门限或不设门限，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，则在扫描过程中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。图 2 给出 TBD 技术的应用对于目标探测的得益，首先采用高门限获得常规方法的可靠检测点(含少量虚警点)，采用 TBD 的好处是从高低门限之间的原始数据中得到尽可能多的可靠检测点。

对于单帧相邻波束，采用波束间的凝聚对某个距离区域进行积累并在此基础上进行初步的置信度检测。对于帧帧之间，由于时间间隔太长，尤其是运动(如机载)平台下很难从距离单元上找出目标出现在两帧(可能不连续)上的直接匹配位置，因此对于帧帧之间的积累不能简单采用常规的距离单元匹配来进行，而是要充分考虑目标的运动特性，通过目标运动轨迹相关的方式进行匹配。在该项目上的检测前跟踪采用数据处理的跟踪方法检测原始点的相关性，并对原始点幅度、信噪比、多普勒等特性进行分析，综合多种因素完成探测数据的初步检测。

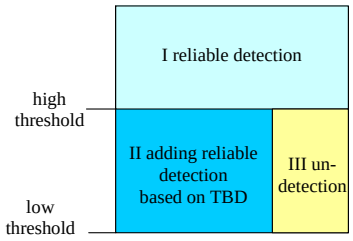


Fig.2 Benefit from Track-Before-Detect

图 2 检测前跟踪得益示意图

2.2 主要算法步骤

本文采用的检测前跟踪算法是源自动态规划的工程应用改进算法，本质上是一个多阶段决策优化问题。检测前跟踪算法以有效的方式对所有可能的目标航迹进行搜索，并对这些可能航迹上的量测进行积累，当航迹上的量测积累值超过门限时，就称检测到目标，并回溯航迹。针对雷达强杂波区域的微弱目标，通过对非相参积累多帧后的多因子加权进行统计实现。算法主要包括以下 5 个步骤：

1)　初始化：对于第 1 帧数据的每个状态 x_1，定义置信度函数 $C(x_1)$ 的初始值为该状态的测量值。

$$C(x_1) = Z(x_1) \tag{1}$$

2) 多帧积累：对第 k 帧状态($2 \leqslant k \leqslant M$)中的每一个状态 x_k 叠加多帧关联值。

$$C(x_k) = \underset{X_{k-1}}{S}[C(x_{k-1})] + Z(x_k) \tag{2}$$

由此可以得出置信度检测值。

3) 潜在目标检测：对于统计的自适应门限 V_S，潜在目标为：

$$\{\hat{X}_K\} = \{X_k : C(X_k) > V_S\} \tag{3}$$

4) 潜在轨迹回溯：对 $k = K-1, K-2, \cdots, 1$

$$\hat{X}_K = \psi_{x_{k+1}}(k+1) \tag{4}$$

由此可以得到潜在目标轨迹的估计值 $\hat{X}_K = \{\hat{x}_1, \hat{x}_2, \cdots, \hat{x}_k\}$，便于下一帧的相关积累。

5) 后处理：通过适当的目标鉴别方法来减少虚警，便于后端航迹处理。

2.3 软件并行架构设计

由于信号处理采用低门限的雷达信号恒虚警(Constant False-Alarm Rate，CFAR)预处理，其输入数据较常规雷达数据处理的数据量呈几何级数增加，对数据处理性能要求大大提高，在该项目的数据处理上采用了并行机制来提高系统的数据处理能力，实现多个任务的并行处理，在广义上构成了一个超标量超流水的体系结构，其处理时空图类似标准超标量超流水的执行过程。

由于该项目数据处理过程前后具有较强的耦合性，不适合采用常规的并行计算方式，如采用消息传递接口(Message Passing Interface，MPI)的并行计算[5]。针对该雷达系统的数据处理特点，这里给出了与之适应的并行体系。

如图 3 所示，采用多阵面单元原始数据并行处理，在航迹融合跟踪部分进行融合处理。在单个 TBD 上，依据输入数据特性(如径向频率、幅度、距离、方位等)将数据分配到不同进程进行并行处理，并将最终结果整合后送航迹跟踪进行下一步数据处理。

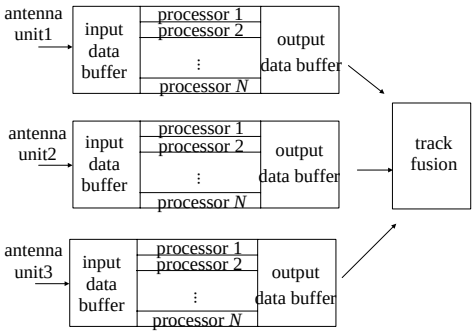


Fig.3 Parallel system design

图 3 并行体系设计

3 试验结果

为了考察检测前跟踪技术应用效果，利用某机载雷达的实际飞行试验记录数据，对 10 批目标数据在采用传统检测方法与本文 TBD 技术后的发现概率进行比较，如图 4 所示，可以看出，使用本文检测方法的发现概率明显优于传统检测方法，采用 50%发现概率的探测距离较传统方法提高约 20 km。因此，采用检测前跟踪技术对于探测距离的提高有明显作用。

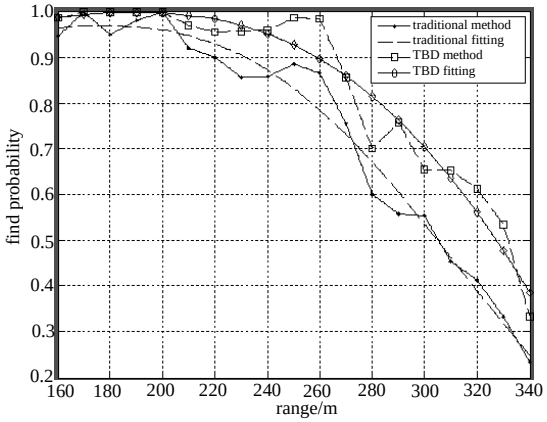


Fig.4 Detection probability comparison

图 4 检测前跟踪得益比较

该项目采用一个曙光刀片服务器(2CPUx4 核)来完成一个阵面单元的 TBD 处理，同时利用软件多进程并行技术提高单个 TBD 模块的处理能力，实现距离速度解模糊、点迹凝聚和坐标变换等数据预处理功能，将处理结果发送给后端数据处理模块，通过这种算法和体系上的并行机制，提高系统的数据处理性能。实验环境为 Linux 2.6.32 操作系统。在实验中，仿真了 2 000 帧数据，每帧模拟 2 000 个目标，随机产生 20 000 个杂波点。

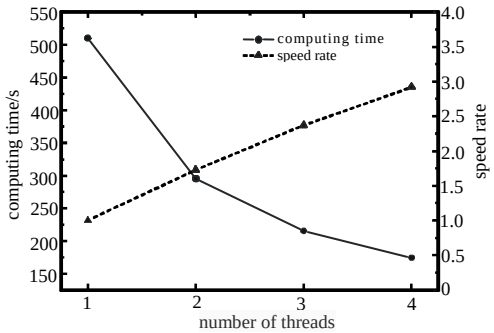


Fig.5 Computing time and speed rate

图 5 并行运算时间和加速比

图 5 是并行数据处理系统执行时间以及加速比统计，从图

中可以看出，随着线程个数增加，执行时间逐渐缩短。单线程串行程序执行时间为 510 s，4 线程并行程序执行时间缩短到 174 s，加速比接近 3，数据处理系统性能得到了明显提升。

4　结论

由理论分析和试验结果可以看出，检测前跟踪通过增加软件处理的复杂性，以大量的计算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，通过检测前跟踪方法来提高雷达的作用距离具有广阔的应用前景。随着软件在雷达系统中的作用日益重要，采用高性能的并行算法提高系统数据处理能力非常必要。

参考文献：

[1] 林再平,周一宇,安玮. 改进的概率假设密度滤波多目标检测前跟踪算法[J]. 红外与毫米波学报, 2012,31(5):475–480. (LIN Zaiping,ZHOU Yiyu,AN We. Improved multi-object track-before-detect filter algorithm based on probability hypothesis density [J]. Journal of Infrared and Millimeter Wave, 2012,31(5):475–480.)

[2] LONG Yunli,XU Hui,AN Wei,et al. Track-before-detect for infrared maneuvering dim multitarget via MM-PHD[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012,25(20):252–261.

[3] 张海英,张田文,温玄. 基于对比度积累的弱点目标检测[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007,30(3):448–451. (ZHANG Haiying,ZHANG Tianwen,WEN Xuan. Target detection based on accumulated contrast of weaknesses[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007,30(3):448–451.)

[4] 刘延峰. 数据处理在提高雷达作用距离中的应用[J]. 火控雷达技术, 2006,35(2):29–33. (LIU Yanfeng. The application of the data processing in improving radar range[J]. The Fire Control Radar Technology, 2006,35(2):29–33.)

[5] 张林波,迟学斌,莫则尧,等. 并行计算导论[M]. 北京:清华大学出版社, 2006. (ZHANG Linbo,CHI Xuebin,MO Zeyao,et al. An Introduction to Parallel Computing [M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2006.)

作者简介：

倪世道(1973–)，男，安徽省肥西市人，硕士，高级工程师，主要研究方向为雷达软件系统设计及雷达数据处理，获中国电子科技集团特等奖2项，发表学术论文多篇.email:18110916586@189.cn.

马　娟(1982–)，女，安徽省凤台县人，硕士，工程师，主要研究方向为雷达数据处理，发表学术论文多篇.

(上接第 440 页)

作者简介：

宋青平(1984–)，男，北京市人，在读博士研究生，主要研究方向为无线通信、深空通信、遥测遥控.email:robert_nwpu@126.com.

牟伟清(1986–)，男，山东省烟台市人，在读博士研究生，主要研究方向为遥测遥控、无线通信.

刘荣科(1973–)，男，西安市人，博士，博士生导师，主要研究方向为空天信息传输与处理、无线宽带多媒体通信、网络信息论与编码和专用集成电路设计.

段瑞枫(1985–)，女，包头市人，在读博士研究生，主要研究方向为通信与测控、编码调制.

李彦融(1991–)，男，福建省漳平市人，在读硕士研究生，主要研究方向为遥测遥控、无线通信.