



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 108828552 B

(45) 授权公告日 2020.12.15

(21) 申请号 201810264327.8

(22) 申请日 2018.03.28

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 108828552 A

(43) 申请公布日 2018.11.16

(73) 专利权人 郑州航空工业管理学院
地址 450015 河南省郑州市大学中路2号

(72) 发明人 孙俊灵 马鹏阁 张永红 范远璋
陶然

(74) 专利代理机构 北京正阳理工知识产权代理
事务所(普通合伙) 11639
代理人 鲍文娟

(51) Int. Cl.
G01S 7/48 (2006.01)

(56) 对比文件

- CN 104062651 A, 2014.09.24
- CN 103439697 A, 2013.12.11
- CN 104536009 A, 2015.04.22
- CN 107436434 A, 2017.12.05
- CN 104076354 A, 2014.10.01
- JP 2004219300 A, 2004.08.05
- CN 102608590 A, 2012.07.25
- CN 102313884 A, 2012.01.11

审查员 郝霏霏

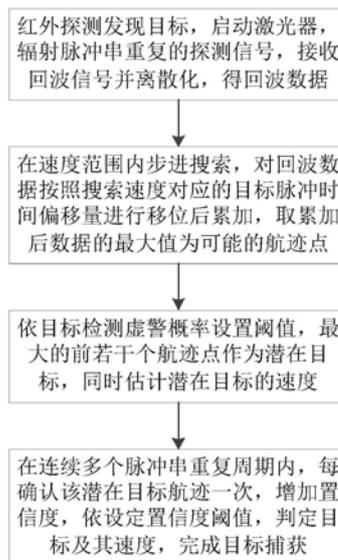
权利要求书3页 说明书6页 附图5页

(54) 发明名称

一种机载脉冲激光雷达的目标检测及航迹搜索方法

(57) 摘要

本发明提出了一种机载脉冲激光雷达的目标检测及航迹搜索方法,属激光雷达的信号处理和目标检测技术领域。在一个观测周期内,利用目标的运动特性,按照目标可能的速度方向进行有针对性的搜索,以减少大量的无效搜索;同时,根据具体搜索速度所对应的时间偏移量对回波数据移位,再累加,其中的最大值作为可能的航迹点,对全部可能的速度范围步进搜索,取若干可能的航迹点作为潜在目标,在连续多个观测周期内,满足设定的置信阈值,即可判断目标的航迹及其速度,完成目标捕获。本发明只需要用到数据移位和累加两种运算,特别适合DSP或FPGA进行高速并行数字处理,具有运算量小、目标检测和航迹搜索实时处理速度快、改善信噪比、提高检测性能的优点。



1. 一种机载脉冲激光雷达的目标检测及航迹搜索方法,包括步骤:

S1,机载脉冲激光雷达的红外探测单元对探测区域执行搜索任务,发现存在目标后控制伺服工作平台瞄准目标,启动激光器,向目标辐射激光脉冲串重复周期为 T_p 的探测信号,所述探测信号在一个脉冲串重复周期内,脉冲间隔为 T_s 、脉冲宽度为 τ 、脉冲串数量为 N ,所述机载脉冲激光雷达接收回波信号,并对所述回波信号离散化处理,在一个观测周期 T 内,获得帧数为 N_f 、每帧采样点数为 K 的回波数据,第 n 帧的第 k 个采样点的回波数据用 E_n^k 表示,其中, $n=1,2,\dots,N_f,k=1,2,\dots,K$;

S2,设目标相对机载脉冲激光雷达的径向速度为 V_r ,选择远离机载脉冲激光雷达的方向为正方向,在一个观测周期 T 内,每次步进搜索时,对各帧回波数据按照此次搜索速度对应的目标脉冲时间偏移量进行移位,然后将移位后的所有 N_f 帧回波数据以采样点 k 为基准进行累加,取累加后数据的最大值作为可能的航迹点;以 ΔV_r 为搜索步进的步长,对目标速度

搜索范围为 $V_r \in [V_{\min}, V_{\max}]$ 的整个范围进行搜索,共得到 $M = \left\lfloor \frac{V_{\max} - V_{\min}}{\Delta V_r} \right\rfloor$ 个最大值 E_m ,其

中, $\lfloor x \rfloor$ 表示对 x 向下取整运算, $m=1,2,\dots,M$;

S3,对 M 个最大值从大到小排序,按照目标检测虚警概率设置阈值,取其中排序在前的若干个航迹点作为潜在目标,同时估计潜在目标的速度,给每个潜在目标一个置信度初始值;

S4,在连续多个脉冲串重复周期内,每确认该潜在目标航迹一次,增加置信度,直至达到设定置信度阈值,即可判定目标及其速度,完成目标捕获。

2. 如权利要求1所述的机载脉冲激光雷达的目标检测及航迹搜索方法,其特征在于,所述步骤S3中所述的排序在前的若干个航迹点是排序在前的第一个航迹点。

3. 如权利要求1所述的机载脉冲激光雷达的目标检测及航迹搜索方法,其特征在于,所述步骤S2具体包括:

S201,在一个观测周期 T 内,设定目标速度搜索的起始点为 $V_r = V_{\min}$,搜索步进的次数记为 $m=1$,当 $m \leq M$ 时执行下述步骤;

S202,对第 n 帧回波数据所有 K 个样本点按照此次搜索速度对应的目标脉冲时间偏移量进行移位,移位点数为 $k' = \left\lfloor \frac{m' \times n}{L} \right\rfloor$,其中, $m' = \left\lfloor \frac{|V_{\min}|}{\Delta V_r} \right\rfloor - m$, L 为常数,其取值与脉冲串数量 N 、脉冲间隔 T_s 有关,即以 $E_n^{k+k'}$ 代替 E_n^k ;

S203,将移位后的所有 N_f 帧回波数据以采样点 k 为基准进行累加,得到积累量 $E^k = \sum_{n=1}^{N_f} E_n^k$,取累加后积累量的最大值 $\max E^k$ 作为第 m 次搜索步进时可能的航迹点,并计算第 m 次搜索步进时的目标速度 $V_r = V_{\min} + m \Delta V_r$;

S204,步进的次数 $m+1$ 代替 m ;

S205,重复步骤S202~S204,直至不满足步骤S201条件时结束该观测周期 T 内的搜索,

得到最大值集合 $E_m = \{\max E^{k_m}, m=1, 2, \dots, M\}$ 。

4. 如权利要求1所述的机载脉冲激光雷达的目标检测及航迹搜索方法,其特征在于,当 V_{\min} 为负值, V_{\max} 为正值时,所述步骤S2具体包括:

S211, 在一个观测周期T内,设定目标速度搜索的起始点为 $V_r=0$, 搜索步进的次数记为 $q=1$, 当 $q \leq \left\lfloor \frac{V_{\max}}{\Delta V_r} \right\rfloor$ 时执行下述正向搜索步骤;

S212, 对第n帧回波数据所有K个样本点按照此次搜索速度对应的目标脉冲时间偏移量进行移位, 移位点数为 $k' = \left\lfloor \frac{q \times n}{L} \right\rfloor$, L为常数, 其取值与脉冲串数量N、脉冲间隔 T_s 有关, 即以 $E_n^{k+k'}$ 代替 E_n^k ;

S213, 将移位后的所有 N_f 帧回波数据以采样点k为基准进行累加, 得到积累量 $E^k = \sum_{n=1}^{N_f} E_n^k$, 取累加后积累量 E^k 的最大值 $\max E^{k_q}$ 作为第q次搜索步进时可能的航迹点, 并计算第q次搜索步进时的目标速度 $V_{r'} = q \Delta V_r$;

S214, 步进的次数 $q+1$ 代替 q ;

S215, 重复步骤S212~S214, 直至不满足步骤S211条件;

S216, 在一个观测周期T内,设定目标速度搜索的起始点为 $V_r=0$, 搜索步进的次数记为 $p=1$, 当 $p \leq M - \left\lfloor \frac{V_{\max}}{\Delta V_r} \right\rfloor$ 时执行下述负向搜索步骤;

S217, 对第n帧回波数据所有K个样本点按照此次搜索速度对应的目标脉冲时间偏移量进行移位, 移位点数为 $k' = \left\lfloor \frac{p \times n}{L} \right\rfloor$, L为常数, 其取值与脉冲串数量N、脉冲间隔 T_s 有关, 即以 $E_n^{k+k'}$ 代替 E_n^k ;

S218, 将移位后的所有 N_f 帧回波数据以采样点k为基准进行累加, 得到积累量 $E^k = \sum_{n=1}^{N_f} E_n^k$, 取累加后积累量的最大值 $\max E^{k_p}$ 作为第p次搜索步进时可能的航迹点, 并计算第p次搜索步进时的目标速度 $V_{r'} = -p \Delta V_r$;

S219, 步进的次数 $p+1$ 代替 p ;

S220, 重复步骤S216~S219直至不满足步骤S216条件时结束;

经过上述步骤, 从而完成该观测周期T内的全部的目标速度搜索范围搜索, 得到最大值集合: $E_m = \left\{ \max E^{k_q}, \max E^{k_p} \right\}, q=1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{V_{\max}}{\Delta V_r} \right\rfloor; p=1, 2, \dots, M - \left\lfloor \frac{V_{\max}}{\Delta V_r} \right\rfloor$ 。

5. 如权利要求4所述的机载脉冲激光雷达的目标检测及航迹搜索方法,其特征在于,所述步骤S211~S215和S216~S220进行并行处理。

6. 如权利要求1~5中任一权利要求所述的机载脉冲激光雷达的目标检测及航迹搜索方法,其特征在于,所述步骤S1中还包括对回波数据 E_n^k 压缩处理的过程:按照每 c 个采样点累加后作为一个采样点的原则,将每帧 K 个采样点压缩为每帧 $\frac{K}{c}$ 个采样点,压缩采样后第 n

帧的第 k_c 个采样点的回波数据 $E_n^{k_c} = E_n^{k/c} = \sum_{a=k-c+1}^k E_n^a$, 其中, $k_c = \frac{k}{c}$, $k_c = 1, 2, \dots, \frac{K}{c}$ 。

7. 如权利要求6所述的机载脉冲激光雷达的目标检测及航迹搜索方法,其特征在于,所述压缩处理的过程在ADC采样之后、在累加的数据存储于外部存储器之前完成,以减少存储所需的硬件空间和数据处理时的运算花销。

8. 如权利要求6所述的机载脉冲激光雷达的目标检测及航迹搜索方法,其特征在于,所述 c 的取值为4, 5或6。

9. 如权利要求1~5中任一权利要求所述的机载脉冲激光雷达的目标检测及航迹搜索方法,其特征在于,所述 $\Delta V_r = 0.02Ma$ 。

10. 如权利要求3~5中任一权利要求所述的机载脉冲激光雷达的目标检测及航迹搜索方法,其特征在于,所述步骤S202, S212及S217中, $L = 100$ 。

一种机载脉冲激光雷达的目标检测及航迹搜索方法

技术领域

[0001] 本发明涉及激光雷达的信号处理和目标检测技术领域,尤其是一种脉冲激光雷达的目标检测及航迹搜索方法,特别适合于在强杂波、低信噪比环境下对低可观测性目标的检测。

背景技术

[0002] 在强杂波、低信噪比环境下,低可观测性目标的检测是雷达及光电探测领域的重要研究方向。机载光电探测系统中,红外因其作用距离远,可用于搜索探测空域目标的热辐射,从而判断目标的有无并锁定目标的方位;激光(红外波段)照射探测距离近,可用于获取目标的径向距离等信息;二者结合实现对特定空域目标在三维空间的定位。在机载脉冲激光雷达探测远程高速飞机目标时,“探得到”是首要前提,“探得准”是激光测距的关键指标。通常,目标的回波信号由于非常微弱,对于低可观测性目标的检测与跟踪,传统方法是通过门限处理后发送至独立的跟踪滤波器进行跟踪,即检测后跟踪(track-after-detect, TAD)方法。对于低可观测性目标, TAD方法处理的检测能力可以通过降低检测门限或提高传感器灵敏度来加强。但是,这两种途径都需要处理更多的虚警和无效回波信号,若提高检测门限又将造成目标漏检。过多的虚警及目标的漏检都将导致跟踪滤波的失败。

[0003] 在此背景下,许多目标检测算法相继提出,如比较典型的非相参积累方法——检测前跟踪(Track Before Detect, TBD)方法,就是一种重要直接采用传感器原始观测数据的目标检测与跟踪方法。与常规DBT检测方法进行门限硬判决不同,基于TBD的目标检测对一段时间内每一帧的数据进行存储和处理,而并不对每帧数据提供检测,经过多帧的积累,在目标的运动轨迹被估计出来后,检测结果与目标初始航迹同时被确认。

[0004] 但新的问题是多帧的积累造成的数据量巨大的运算困难。机载脉冲激光雷达在工作的时候,一般首先由其红外探测单元对探测区域执行搜索任务,发现存在目标后,控制伺服工作平台瞄准目标,接通激光激励电源,复位系统,启动激光器,向目标辐射激光脉冲探测信号;在接收端,机载脉冲激光雷达的光电探测器接收包含目标信息和噪声的回波信号,对回波信号进行放大、整形和离散化等信号处理后,存储进行数据处理。设在一个观测周期内,获得帧数为 N 、每帧采样点数为 K 的回波数据,第 n 帧的第 k 个采样点的回波数据用 E_n^k 表示,其中, $n=1, 2, \dots, N, k=1, 2, \dots, K$,回波数据存储的示意图如附图2所示。例如,在采样时间 0.8ms 内,按照 1GSPS (Gigabit Samples Per Second,每秒千兆次采样)采集数据,每帧回波信号将采集 8×10^5 个样本点,对于多脉冲激光雷达,如果一个脉冲串重复周期内包含 200 个脉冲,则在一个脉冲串重复周期内,会产生 $200z$ 帧回波数据,共 1.6×10^8 个样本点。图中,目标航迹由 E_1^1, E_2^2, E_3^3 等样本点组成,按照经典的TBD检测方法,直接对这原始 200 帧多脉冲激光回波观测数据的 1.6×10^8 个样本点进行穷举搜索或动态规划等TBD检测处理,需从每帧 8×10^5 个样本点、共 200 帧的回波观测数据的所有可能的方向进行遍历搜索,找到目标的航迹路线,其运算量将十分巨大,难以实时处理。

发明内容

[0005] 针对以上问题,本发明提出了一种机载脉冲激光雷达的目标检测及航迹搜索方法,在一个观测周期内,利用目标的运动特性,按照目标可能的速度方向进行有针对性的搜索,以减少大量的无效搜索;同时,根据具体搜索速度所对应的时间偏移量对回波数据移位,之后再累加,其中的最大值作为可能的航迹点,对全部可能的速度范围步进搜索,取若干可能的航迹点作为潜在目标,在连续多个观测周期内,满足设定的置信阈值,即可判断目标的航迹及其速度,完成目标捕获。具体包括步骤:

[0006] S1,机载脉冲激光雷达的红外探测单元对探测区域执行搜索任务,发现存在目标后控制伺服工作平台瞄准目标,启动激光器,向目标辐射激光脉冲串重复周期为 T 的探测信号,所述探测信号在一个脉冲串重复周期内,脉冲间隔为 T_s 、脉冲宽度为 τ 、脉冲串数量为 N ,所述机载脉冲激光雷达接收回波信号,并对所述回波信号离散化处理,在一个观测周期 T 内,获得帧数为 N 、每帧采样点数为 K 的回波数据,第 n 帧的第 k 个采样点的回波数据用 E_n^k 表示,其中, $n=1,2,\dots,N,k=1,2,\dots,K$;

[0007] S2,设目标相对机载脉冲激光雷达的径向速度为 V_r ,选择远离机载脉冲激光雷达的方向为正方向,在一个观测周期 T 内,每次步进搜索时,对各帧回波数据按照此次搜索速度对应的目标脉冲时间偏移量进行移位,然后将移位后的所有 N 帧回波数据以采样点 k 为基准进行累加,取累加后数据的最大值作为可能的航迹点;以 ΔV_r 为搜索步进的步长,对目标速度搜索范围为 $V_r \in [V_{\min}, V_{\max}]$ 的整个范围进行搜索,共得到 $M = \left\lfloor \frac{|V_{\max} - V_{\min}|}{\Delta V_r} \right\rfloor$ 个最大值

E_m ,其中, $\lfloor x \rfloor$ 表示对 x 向下取整运算, $m=1,2,\dots,M$;

[0008] S3,对 M 个最大值由大到小排序,按照目标检测虚警概率设置阈值,取其中排序在前的若干个航迹点作为潜在目标,同时估计潜在目标的速度,给每个潜在目标一个置信度初始值;

[0009] S4,在连续多个脉冲串重复周期内,每确认该潜在目标航迹一次,增加置信度,直至达到设定置信度阈值,即可判定目标及其速度,完成目标捕获。

[0010] 进一步地,步骤S2具体包括:

[0011] S201,在一个观测周期 T 内,设定目标速度搜索的起始点为 $V_r = V_{\min}$,搜索步进的次数记为 $m=1$,当 $m \leq M$ 时执行下述步骤;

[0012] S202,对第 n 帧回波数据所有 K 个样本点按照此次搜索速度对应的目标脉冲时间偏移量进行移位,移位点数为 $k' = \left\lfloor \frac{m' \times n}{L} \right\rfloor$,其中, $m' = \left\lfloor \frac{|V_{\min}|}{\Delta V_r} \right\rfloor - m$, L 为常数,其取值与脉

冲串数量 N 、脉冲间隔 T_s 有关,即以 $E_n^{k+k'}$ 代替 E_n^k ;

[0013] S203,将移位后的所有 N 帧回波数据以采样点 k 为基准进行累加,得到积累量

$E^k = \sum_{n=1}^N E_n^k$,取累加后积累量的最大值 $\max E^k$ 作为第 m 次搜索步进时可能的航迹点,并计

算第 m 次搜索步进时的目标速度 $V_r' = V_{\min} + m \Delta V_r$;

[0014] S204, 步进的次数 $m+1$ 代替 m ;

[0015] S205, 重复S202~S204, 直至不满足S201条件时结束该观测周期 T 内的搜索, 得到最大值集合 $E_m = \left\{ \max E^{k_m}, m = 1, 2, \dots, M \right\}$ 。

[0016] 或者, 进一步地, 当 V_{\min} 为负值, V_{\max} 为正值时, 步骤S2具体包括:

[0017] S211, 在一个观测周期 T 内, 设定目标速度搜索的起始点为 $V_r = 0$, 搜索步进的次数

记为 $q=1$, 当 $q \leq \left\lfloor \frac{V_{\max}}{\Delta V_r} \right\rfloor$ 时执行下述正向搜索步骤;

[0018] S212, 对第 n 帧回波数据所有 K 个样本点按照此次搜索速度对应的目标脉冲时间偏

移量进行移位, 移位点数为 $k' = \left\lfloor \frac{q \times n}{L} \right\rfloor$, L 为常数, 其取值与脉冲串数量 N 、脉冲间隔 T_s 有

关, 即以 $E_n^{k+k'}$ 代替 E_n^k ;

[0019] S213, 将移位后的所有 N 帧回波数据以采样点 k 为基准进行累加, 得到积累量

$E^k = \sum_{n=1}^N E_n^k$, 取累加后积累量 E^k 的最大值 $\max E^{k_q}$ 作为第 q 次搜索步进时可能的航迹点, 并

计算第 q 次搜索步进时的目标速度 $V_r = q \Delta V_r$;

[0020] S214, 步进的次数 $q+1$ 代替 q ;

[0021] S215, 重复S212~S214, 直至不满足S211条件;

[0022] S216, 在一个观测周期 T 内, 设定目标速度搜索的起始点为 $V_r = 0$, 搜索步进的次数

记为 $p=1$, 当 $p \leq M - \left\lfloor \frac{V_{\max}}{\Delta V_r} \right\rfloor$ 时执行下述负向搜索步骤;

[0023] S217, 对第 n 帧回波数据所有 K 个样本点按照此次搜索速度对应的目标脉冲时间偏

移量进行移位, 移位点数为 $k' = \left\lfloor \frac{p \times n}{L} \right\rfloor$, L 为常数, 其取值与脉冲串数量 N 、脉冲间隔 T_s 有

关, 即以 $E_n^{k+k'}$ 代替 E_n^k ;

[0024] S218, 将移位后的所有 N 帧回波数据以采样点 k 为基准进行累加, 得到积累量

$E^k = \sum_{n=1}^N E_n^k$, 取累加后积累量的最大值 $\max E^{k_p}$ 作为第 p 次搜索步进时可能的航迹点, 并计

算第 p 次搜索步进时的目标速度 $V_r = -p \Delta V_r$;

[0025] S219, 步进的次数 $p+1$ 代替 p ;

[0026] S220, 重复S216~S219直至不满足S216条件时结束。

[0027] 经过上述步骤, 从而完成该观测周期 T 内的全部的目标速度搜索范围搜索, 得到最大值集合:

[0028] $E_m = \left\{ \max E^{k_q}, \max E^{k_p} \right\}, q = 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{V_{\max}}{\Delta V_r} \right\rfloor; p = 1, 2, \dots, M - \left\lfloor \frac{V_{\max}}{\Delta V_r} \right\rfloor$ 。

[0029] 再进一步地,所述步骤S211~S215和S216~S220进行并行处理。

[0030] 进一步地,步骤S1中还包括对回波数据 E_n^k 压缩处理的过程:按照每c个采样点累加后作为一个采样点的原则,将每帧K个采样点压缩为每帧 $\frac{K}{c}$ 个采样点,压缩采样后第n帧

的第 k_c 个采样点的回波数据 $E_n^{k_c} = E_n^{k/c} = \sum_{a=k-c+1}^k E_n^a$, 其中, $k_c = \frac{k}{c}$, $k_c = 1, 2, \dots, \frac{K}{c}$ 。

[0031] 进一步地,所述压缩处理的过程在ADC采样之后、在累加的数据存储于外部存储器之前完成,以减少存储所需的硬件空间和数据处理时的运算花销。

[0032] 再进一步地,c的取值为4,5或6。

[0033] 进一步地,步骤S3中所述的排序在前的若干个航迹点是排序在前的第一个航迹点。

[0034] 本发明只需要用到数据移位和累加两种运算,特别适合DSP或FPGA进行高速并行数字处理,具有运算量小、目标检测和航迹搜索实时处理速度快、改善信噪比、提高检测性能的优点。

附图说明

[0035] 下面结合附图和实施例对本发明进一步说明。

[0036] 图1为本发明的流程图;

[0037] 图2为机载脉冲激光雷达多帧回波数据示意图;

[0038] 图3为按目标速度移位后的多帧回波数据示意图;

[0039] 图4为本发明速度步进搜索实施例1的流程图;

[0040] 图5本发明速度步进搜索实施例2的流程图;

[0041] 图6为本发明速度步进搜索实施例3的流程图;

[0042] 图7为本发明不同速度目标检测输出的积累信号;

具体实施方式

[0043] 在附图1的流程图中,一个观测周期内机载脉冲激光雷达接收到的回波数据 E_n^k 的示意图如附图2所示,其中, $n=1, 2, \dots, N$, $k=1, 2, \dots, K$ 。假设目标的航迹点由 E_1^1, E_2^2, E_3^3 等样本点组成,在高速机载情景下,由于目标运动造成的目标脉冲时间发生偏移不能被忽略,因而一般不能直接进行累加获得能量积累增益。但是按照目标可能的速度方向进行有针对性的搜索,不仅可以减少无效搜索,还能通过移位补偿该目标速度对应的脉冲时间偏移,从而可以再进行能量上信噪比的积累。如附图3所示是将附图2按假设目标速度移位对齐后的多帧回波数据示意图。累加之后得到最大值就认为是目标可能的航迹点。

[0044] 若定义远离机载脉冲激光雷达的方向为正方向,假设目标相对机载脉冲激光雷达的径向速度为 V_r ,以马赫(Ma)为单位的 V_r 可能的范围在 $-2Ma \sim 1Ma$,速度搜索步进的步长为 $0.02Ma$,则搜索次数 $M=150$ 。目标检测按照2Hz脉冲串重复周期进行,在一个观测周期0.5s内,对目标照射一串200个激光脉冲,获得200帧回波观测数据,按照1GSPS采集数据,每帧回

波信号将采集 8×10^5 个样本点。压缩处理时,每5个样本点累加后作为一个样本点,这样每帧得到 1.6×10^5 个样本点。

[0045] 图4是本发明在一个观测周期内速度步进搜索实施例1的流程图。针对上述参数情况,具体为:

[0046] S201,设定目标速度搜索的起始点为 $V_r = -2Ma$,搜索步进的次数记为 $m = 1$,当 $m \leq 150$ 时执行下述步骤;

[0047] S202,对第 n 帧回波数据所有 1.6×10^5 个样本点按照此次搜索速度对应的目标脉冲时间偏移量进行移位,移位点数为 $k' = \left\lfloor \frac{m' \times n}{L} \right\rfloor$,其中, $m' = |100 - m|$, L 为常数,优选地,

$L = 100$,即以 $E_n^{k+k'}$ 代替 E_n^k ;

[0048] S203,将移位后的所有200帧回波数据以采样点 k 为基准进行累加,得到积累量

$E^k = \sum_{n=1}^{200} E_n^k$,取累加后积累量 E^k 的最大值 $\max E^{k_m}$ 作为第 m 次搜索步进时可能的航迹点,并

计算第 m 次搜索步进时的目标速度 $V_r = 0.02m - 2$ (Ma);

[0049] S204,步进的次数 $m+1$ 代替 m ;

[0050] S205,重复S202~S204,直至不满足S201条件时结束该观测周期 T 内的搜索,得到最大值集合 $E_m = \{\max E^{k_m}, m = 1, 2, \dots, 150\}$ 。

[0051] 图5是本发明在一个观测周期内速度步进搜索实施例2的流程图。针对上述参数情况,具体分为正向搜索(S211~S215)和负向搜索(S216~S220):

[0052] S211,设定目标速度搜索的起始点为 $V_r = 0$,搜索步进的次数记为 $q = 1$,当 $q \leq 50$ 时执行下述正向搜索步骤;

[0053] S212,对第 n 帧回波数据所有 1.6×10^5 个样本点按照此次搜索速度对应的目标脉冲时间偏移量进行移位,移位点数为 $k' = \left\lfloor \frac{q \times n}{L} \right\rfloor$, L 为常数,优选地, $L = 100$,即以 $E_n^{k+k'}$ 代

替 E_n^k ;

[0054] S213,将移位后的所有200帧回波数据以采样点 k 为基准进行累加,得到积累量

$E^k = \sum_{n=1}^{200} E_n^k$,取累加后积累量的最大值 $\max E^{k_q}$ 作为第 q 次搜索步进时可能的航迹点,并计

算第 q 次搜索步进时的目标速度 $V_r = 0.02q$ (Ma);

[0055] S214,步进的次数 $q+1$ 代替 q ;

[0056] S215,重复S212~S214,直至不满足S211条件;

[0057] S216,在一个观测周期 T 内,设定目标速度搜索的起始点为 $V_r = 0$,搜索步进的次数记为 $p = 1$,当 $p \leq 100$ 时执行下述负向搜索步骤;

[0058] S217,对第 n 帧回波数据所有 1.6×10^5 个样本点按照此次搜索速度对应的目标脉

冲时间偏移量进行移位,移位点数为 $k' = \left\lfloor \frac{p \times n}{L} \right\rfloor$, L为常数,优选地, L=100,即以 $E_n^{k+k'}$ 代替 E_n^k ;

[0059] S218,将移位后的所有200帧回波数据以采样点k为基准进行累加,得到积累量

$E^k = \sum_{n=1}^{200} E_n^k$,取累加后积累量 E^k 的最大值 $\max E^{k_p}$ 作为第p次搜索步进时可能的航迹点,并

计算第p次搜索步进时的目标速度 $V_r = -0.02p$ (Ma);

[0060] S219,步进的次数p+1代替p;

[0061] S220,重复S216~S219,直至不满足S216条件时结束。

[0062] 图6为本发明在一个观测周期内速度步进搜索实施例3的流程图。与实施例2相似,不同之处在于正向搜索(S211~S215)和负向搜索(S216~S220)进行并行处理。

[0063] 图7为本发明在信噪比(这里说的“信噪比”(SNR)均是指光电探测目标电压信号幅度峰值与噪声均方根的直接比值,非对数信噪比,与以dB为单位的对数信噪比的换算关系为 $20 \log \text{SNR}$)为0.7时,不同速度(a为-2Ma,b为0Ma)目标的检测输出的积累信号,横轴为压缩为272点后的样本点值,纵轴为幅度,单位为100mV,由图可见,经过积累后信噪比约为12,信噪比增益为17.2,说明本发明方法可以改善信噪比,有效提高检测性能。

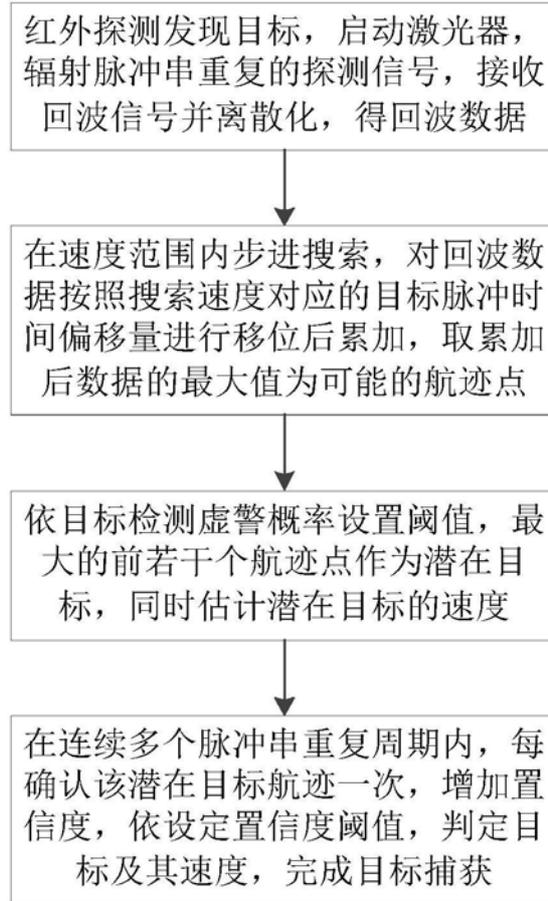


图1

E_1^1	E_1^2	E_1^3	...	E_1^k	...	E_1^K
E_2^1	E_2^2	E_2^3	...	E_2^k	...	E_2^K
E_3^1	E_3^2	E_3^3	...	E_3^k	...	E_3^K
\vdots						
E_n^1	E_n^2	E_n^3	...	E_n^k	...	E_n^K
\vdots						
E_N^1	E_N^2	E_N^3	...	E_N^k	...	E_N^K

图2

			E_1^1	E_1^2	E_1^3	...
		E_2^1	E_2^2	E_2^3	E_2^4	...
	E_3^1	E_3^2	E_3^3	E_3^4	E_3^5	...
E_4^1	E_4^2	E_4^3	E_4^4	E_4^5	E_4^6	...
\vdots						

图3

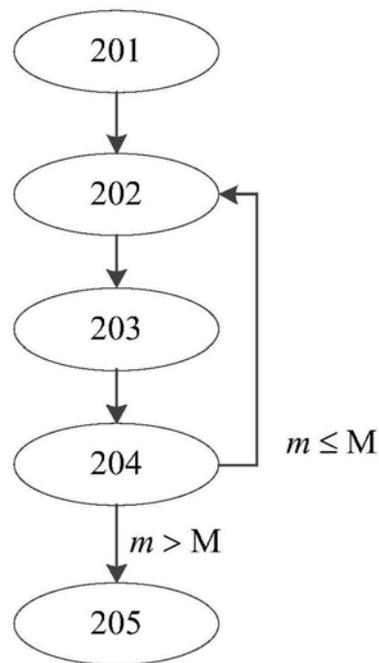


图4

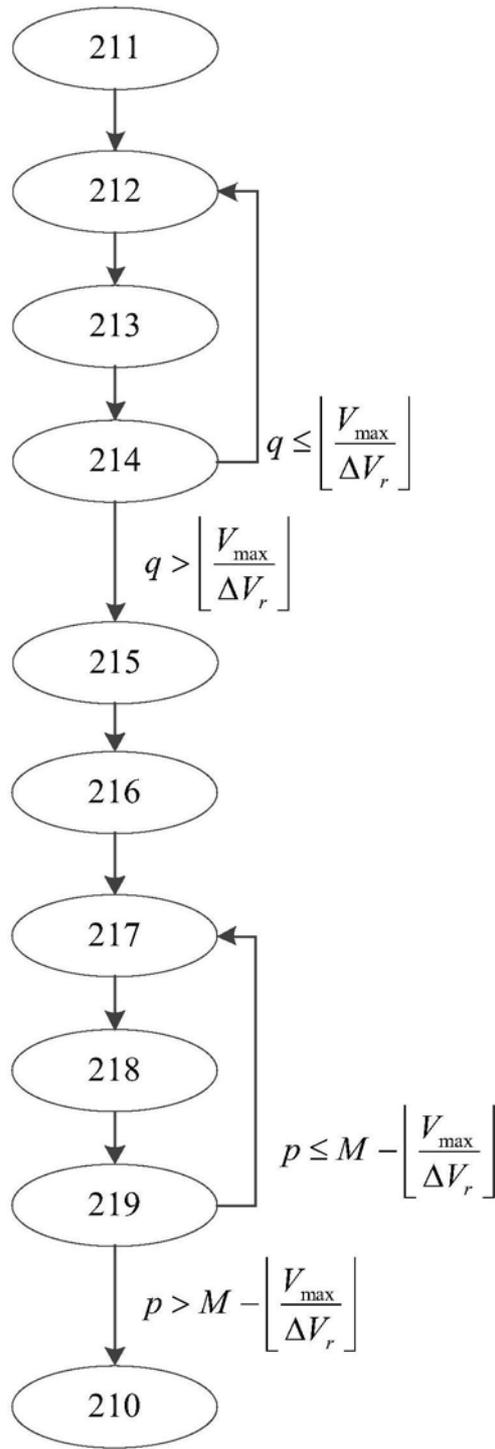


图5

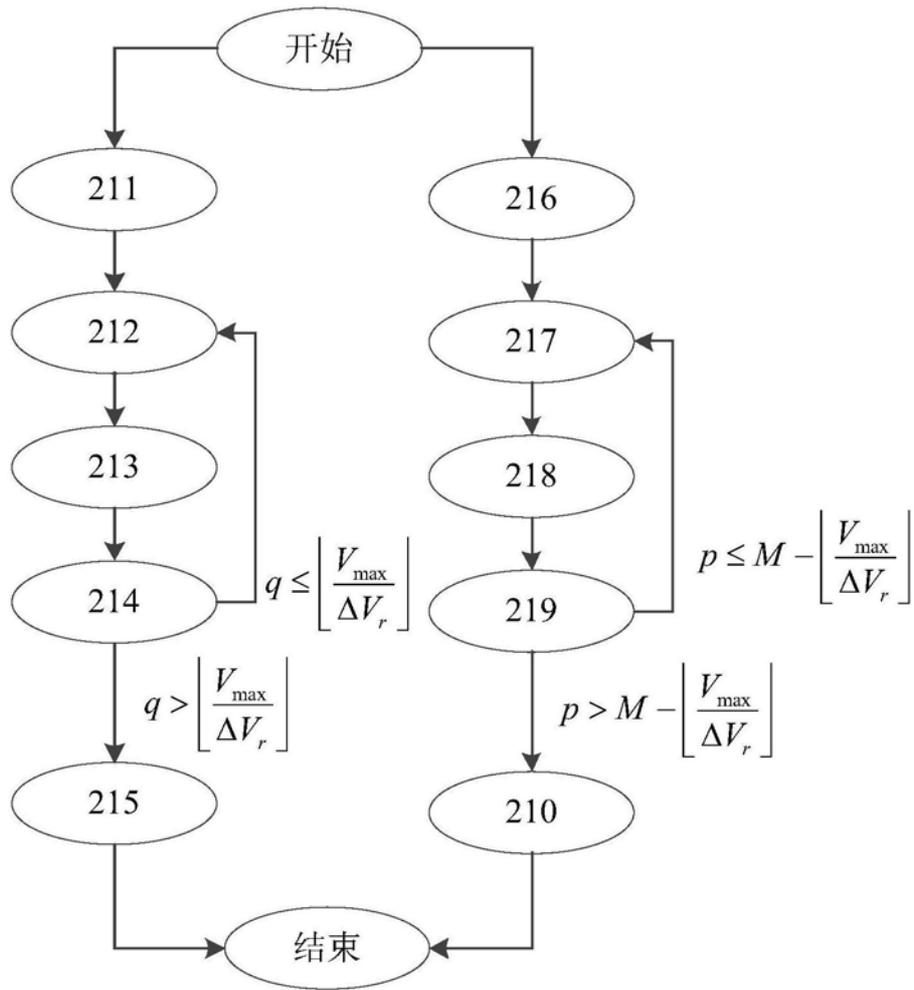
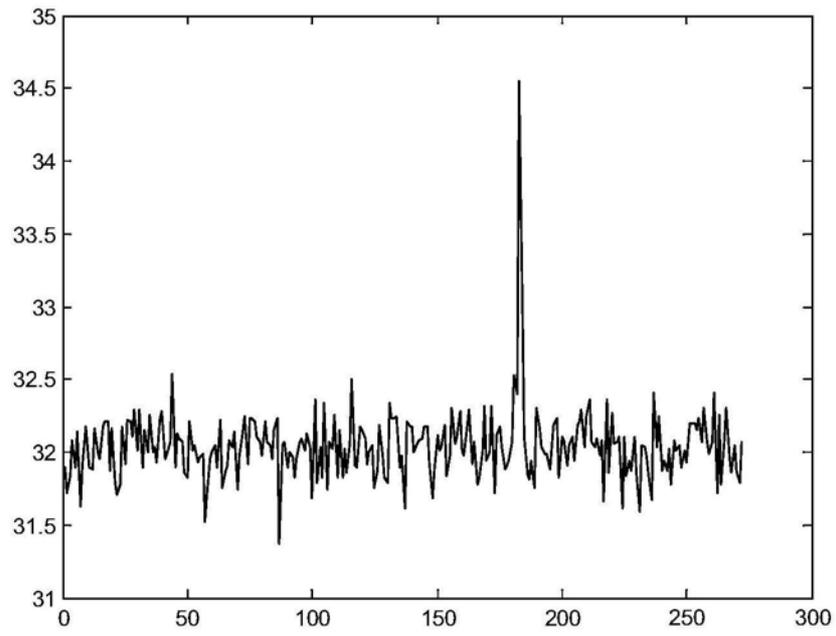
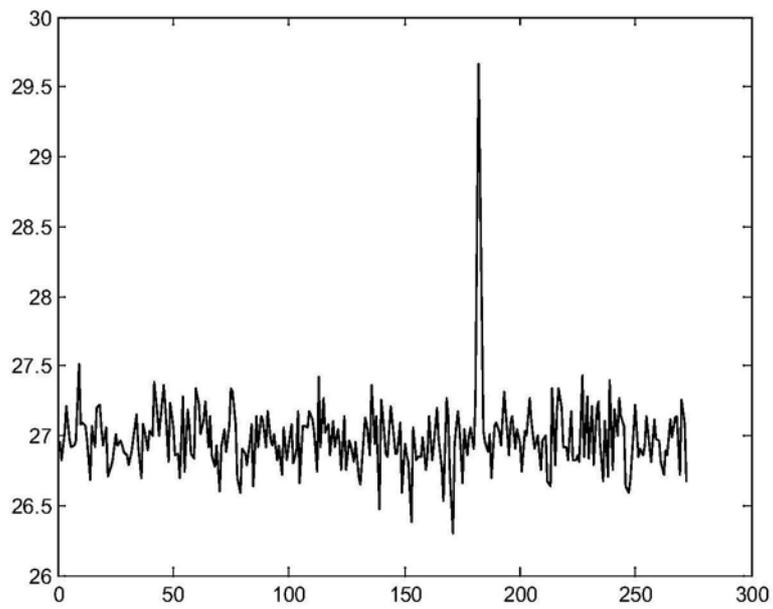


图6



(a)



(b)

图7