



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 117590353 A

(43) 申请公布日 2024. 02. 23

(21) 申请号 202410076698.9

(22) 申请日 2024.01.19

(71) 申请人 山东省科学院海洋仪器仪表研究所  
地址 266200 山东省青岛市即墨区鳌山卫  
街道青岛蓝色硅谷核心区蓝色硅谷创  
业中心一期2号楼

(72) 发明人 臧文静 于洋 王章军 于长新  
姜云耀 王国兴 李辉 王秀芬  
陈超 李先欣

(74) 专利代理机构 青岛华慧泽专利代理事务所  
(普通合伙) 37247  
专利代理师 付秀颖

(51) Int. Cl.

G01S 7/48 (2006.01)

G01S 17/89 (2020.01)

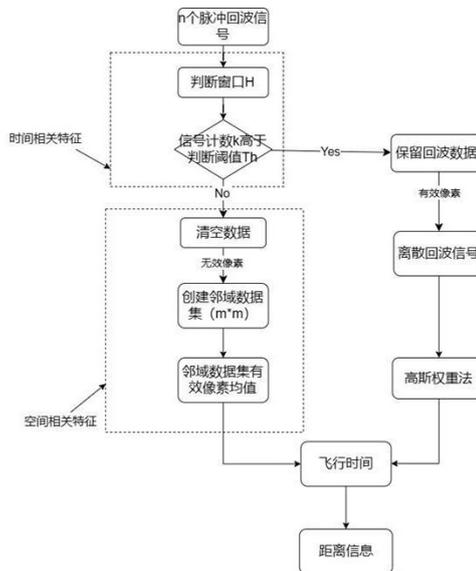
权利要求书2页 说明书5页 附图1页

(54) 发明名称

一种光子计数激光雷达的弱回波信号快速  
提取及成像方法

(57) 摘要

本申请属于光子计数激光雷达技术领域,具体涉及一种光子计数激光雷达的弱回波信号快速提取及成像方法,首先,基于时间相关性自适应阈值方法对采集到的点云数据进行信号的粗提取;随后,基于光子飞行时间的分布特性,对有效像素的离散回波信号赋予高斯函数积分权重,解算其飞行时间,无效像素则利用目标表面连续的特点,基于空间相关性以邻域像素的均值作为其飞行时间;本发明突破传统构建光子分布直方图在弱回波信号场景下数据量大的问题,较质心法、互关法等传统算法成像精度进一步提升,可实现对水下目标的完整、快速、高精度成像。



1. 一种光子计数激光雷达的弱回波信号快速提取方法,其特征在於,包括以下步骤:

S1. 在激光器关闭状态下,统计系统的噪声水平,包括背景光噪声及暗计数噪声;

S2. 控制光子计数激光雷达进行二维扫描,获得目标 $N \times M$ 个像素的回波数据,每个像素包含 $n$ 个脉冲周期的回波信号,将采集到 $N \times M \times n$ 个周期的目标回波点云数据;

S3. 基于时间相关性自适应阈值方法对采集到的点云数据进行信号的粗提取,设置判断窗口 $H$ ,利用滑窗阈值 $Th$ 滤除噪声,确定每个像素目标回波信号的位置。

2. 根据权利要求1所述的一种光子计数激光雷达的弱回波信号快速提取方法,其特征在於,发射的脉冲激光服从高斯分布,单光子探测器对目标回波信号的响应集中在激光脉宽时间内,具有高度的时间相关性;而噪声光子服从均匀分布,单光子探测器对噪声光子的响应则随机分布在整个脉冲周期内。

3. 根据权利要求1所述的一种光子计数激光雷达的弱回波信号快速提取方法,其特征在於,将每个像素取  $n$  个脉冲周期的回波信号作为一组判断单元,将一组回波信号平铺在时间轴上并进行升序排列,定义高斯脉冲函数 $\pm \sigma_1$  时间宽度所包含光子计数采集卡时间门的个数为判断窗口  $H$ ,通过激光脉冲半高全宽计算判断窗口  $H$ ,计算公式如下:

$$H = \left\lceil \frac{2\sigma_1}{\Delta t} \right\rceil = \left\lceil \frac{2 \cdot \text{FWHM}}{2.355 \cdot \Delta t} \right\rceil ;$$

式中, $\sigma_1$  为高斯脉冲函数标准差, $\text{FWHM}$ 为激光脉冲半高全宽, $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整函数, $\Delta t$ 为光子计数采集卡的时间门;

根据噪声光子、判断窗口 $H$ 及每个像素脉冲周期数确定滑窗阈值 $Th$ ,滑窗阈值 $Th$ ,计算公式如下:

$$Th = \lceil n \cdot (1 - e^{(-N_n \cdot H)}) \rceil ;$$

其中, $N_n$ 为噪声平均光电子数, $N_n = N_b + N_d$ ,其中 $N_b$ 为平均背景噪声光电子数, $N_d$ 为单光子探测器的暗计数光电子数。

4. 根据权利要求1所述的一种光子计数激光雷达的弱回波信号快速提取方法,其特征在於,基于时间相关性自适应阈值实现信号的粗提取的过程具体可以描述为:利用判断窗口  $H$ 对每个像素的一组回波数据沿时间轴依次进行滑窗判断;统计判断窗口 $H$ 内回波计数的个数 $k$ ,当 $k > Th$ ,保留判断窗口 $H$ 内的回波数据,当 $k \leq Th$ 时,删除判断窗口 $H$ 内的数据,被保留的回波数据称之为窗口信号;当该像素中没有窗口信号时该像素为空像素,认定该像素为无效像素;反之则为有效像素。

5. 一种光子计数激光雷达的弱回波信号高精度成像方法,其特征在於,对离散信号赋予高斯函数积分权重,靠近中间位置的回波脉冲赋予更高的权重,两边的回波脉冲赋予较小的权重,从而使回波信号飞行时间更集中于回波脉冲的中间位置,进而提升系统测距精度;若原始信号通过时间相关性自适应阈值法去噪后窗口信号内包含回波计数的总个数为 $L$ ,此时对窗口信号内包含回波计数的飞行时间取中值,作为积分权重上下限,

$$V_l = \frac{(t_{l+1} + t_l)}{2} \quad l \in [2, L - 1];$$

$L$  为窗口信号内包含回波计数的总个数, $L > 3$ ;  $V_l$ 为窗口信号第  $l$  个回波计数的飞行

时间的中值;  $t_l$  为窗口信号内第  $l$  个回波计数的飞行时间;

通过积分高斯函数对第  $l$  ( $1 < l < L$ ) 个数据赋予权重  $\omega(l)$ , 对于初始与结束数据, 分别赋予  $-\infty$  与  $+\infty$  作为积分上下限, 权重计算公式如下:

$$\omega(l) = \int_{v_{l-1}}^{v_l} \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t_l - \alpha)^2}{2\sigma_2^2}};$$

式中,  $\omega(l)$  为第  $l$  个信号高斯权重,  $\sigma_2$  为回波光子探测概率密度高斯分布函数标准差,  $\alpha$  为高斯函数峰值中心, 则脉冲累加后的最终飞行时间为:

$$t = \sum_{l=1}^L \omega(l) \cdot t(l);$$

其中,  $t(l)$  为窗口信号内第  $l$  个回波计数的飞行时间。

6. 根据权利要求5所述的光子计数激光雷达的弱回波信号高精度成像方法, 其特征在于, 根据目标表面连续的特点, 利用邻域信息对无效像素进行补全提高图像的探测性能, 具体方法如下: 假设  $(i, j)$  为无效像素 ( $0 < i \leq N, 0 < j \leq M$ ), 将  $(i, j)$  像素的  $m \times m$  邻域像素的均值作为其最终的飞行时间, 计算公式为:

$$t_{i,j} = \frac{\sum_{a=i-\lfloor \frac{m}{2} \rfloor, b=j-\lfloor \frac{m}{2} \rfloor}^{a=i+\lfloor \frac{m}{2} \rfloor, b=j+\lfloor \frac{m}{2} \rfloor} (t_{a,b})}{c};$$

其中,  $m$  为奇数且小于  $N$  和  $M$ ,  $c$  为  $(i, j)$  像素的  $m \times m$  邻域内有效像素的个数, 对有效像素的离散回波信号赋予高斯函数积分权重, 解算其飞行时间, 无效像素则以邻域像素的均值作为其飞行时间。

## 一种光子计数激光雷达的弱回波信号快速提取及成像方法

### 技术领域

[0001] 本申请属于光子计数激光雷达技术领域,具体涉及一种光子计数激光雷达的弱回波信号快速提取及成像方法。

### 背景技术

[0002] 水下光学技术相对于声呐等技术的优势在于,可以以更高的分辨率准确辨别出水下目标的大小及纹理,可以较为容易的进行目标识别。相对于传统的激光雷达,将光子计数激光雷达应用到水下目标探测拥有多种优势。首先,由于水对光的衰减作用很强,传统的激光雷达在水下的探测距离受到极大限制,使用光子计数激光雷达有利于提升水下探测距离;其次,水下成像的某些任务场景如水下线缆或管道成像等需要重建出较高精度的三维图像作为检修的依据,光子计数激光雷达的时间分辨率极高有利于提升三维图像的质量。

[0003] 但是,将光子计数激光雷达应用到水下目标探测会遇到一系列新的问题:水对光有较强的后向散射,该后向散射对于系统而言是强噪声光,并且该噪声光和传统的背景噪声光不相同,传统的背景噪声光一般认为是恒定的而后向散射噪声是随着距离和出射光强度发生变化的。水下目标的探测就是要在后向散射噪声的干扰中重建出目标距离信息。由复杂水体引起的噪声强、信号弱的现象仍然不可避免;且光子计数探测体制,其输出信号为离散型稀疏光子数据,基于光子分布直方图的成像方式需要长时间的累积探测得到目标距离值,随着探测距离、探测时间和探测分辨率的增长,需要处理的数据量更是呈几何倍数增长。这无法满足系统高精度快速三维成像的需求。因此,如何有效的提高光子计数激光雷达的空间分辨率并保障系统的测量效率,是光子计数激光雷达亟待解决的关键问题。

### 发明内容

[0004] 为实现光子计数激光雷达的弱回波信号快速提取、高精度成像,本发明提供一种光子计数激光雷达的弱回波信号快速探测及高精度成像方法,其技术方案为,

一种光子计数激光雷达的弱回波信号快速提取方法,包括以下步骤:

S1. 在激光器关闭状态下,统计系统的噪声水平,包括背景光噪声及暗计数噪声;

S2. 控制光子计数激光雷达进行二维扫描,获得目标 $N \times M$ 个像素的回波数据,每个像素包含 $n$ 个脉冲周期的回波信号,将采集到 $N \times M \times n$ 个周期的目标回波点云数据;

S3. 基于时间相关性自适应阈值方法对采集到的点云数据进行信号的粗提取,设置判断窗口 $H$ ,利用滑窗阈值 $Th$ 滤除噪声,确定每个像素目标回波信号的位置。

[0005] 优选的,发射的脉冲激光服从高斯分布,单光子探测器对目标回波信号的响应集中在激光脉宽时间内,具有高度的时间相关性;而噪声光子服从均匀分布,单光子探测器对噪声光子的响应则随机分布在整个脉冲周期内。

[0006] 优选的,将每个像素取  $n$  个脉冲周期的回波信号作为一组判断单元,将一组回波信号平铺在时间轴上并进行升序排列,定义高斯脉冲函数 $\pm \sigma_1$  时间宽度所包含光子计数采集卡时间门的个数为判断窗口  $H$ ,通过激光脉冲半高全宽计算判断窗口  $H$ ,计算公式如下:

$$H = \left\lceil \frac{2\sigma_1}{\Delta t} \right\rceil = \left\lceil \frac{2 \cdot \text{FWHM}}{2.355 \cdot \Delta t} \right\rceil;$$

式中,  $\sigma_1$  为高斯脉冲函数标准差,  $\text{FWHM}$  为激光脉冲半高全宽,  $\lceil \cdot \rceil$  为向上取整函数,  $\Delta t$  为光子计数采集卡的时间门;

根据噪声光子、判断窗口  $H$  及每个像素脉冲周期数确定滑窗阈值  $Th$ , 滑窗阈值  $Th$ , 计算公式如下:

$$Th = \lceil n \cdot (1 - e^{(-N_n \cdot H)}) \rceil;$$

其中,  $N_n$  为噪声平均光电子数,  $N_n = N_b + N_d$ , 其中  $N_b$  为平均背景噪声光电子数,  $N_d$  为单光子探测器的暗计数光电子数。

[0007] 优选的, 基于时间相关性自适应阈值实现信号的粗提取的过程具体可以描述为: 利用判断窗口  $H$  对每个像素的一组回波数据沿时间轴依次进行滑窗判断 (沿时间轴以  $H$  的长度进行移动); 统计判断窗口  $H$  内回波计数的个数  $k$ , 当  $k > Th$  时, 保留判断窗口  $H$  内的回波数据, 当  $k \leq Th$  时, 删除判断窗口  $H$  内的数据, 被保留的回波数据称之为窗口信号; 当该像素中没有窗口信号时该像素为空像素, 认定该像素为无效像素; 反之则为有效像素。

[0008] 一种光子计数激光雷达的弱回波信号高精度成像方法, 对离散信号赋予高斯函数积分权重, 靠近中间位置的回波脉冲赋予更高的权重, 两边的回波脉冲赋予较小的权重, 从而使回波信号飞行时间更集中于回波脉冲的中间位置, 进而提升系统测距精度; 若原始信号通过时间相关性自适应阈值法去噪后窗口信号内包含回波计数的总个数为  $L$ , 此时对窗口信号内包含回波计数的飞行时间取中值, 作为积分权重上下限,

$$V_l = \frac{(t_{l+1} + t_l)}{2} \quad l \in [2, L - 1];$$

式中,  $L$  为窗口信号内包含回波计数的总个数,  $L > 3$ ;  $V_l$  为窗口信号第  $l$  个回波计数的飞行时间的中值;  $t_l$  为窗口信号内第  $l$  个回波计数的飞行时间。

[0009] 通过积分高斯函数对第  $l$  ( $1 < l < L$ ) 个数据赋予权重  $\omega(l)$ , 对于初始与结束数据, 分别赋予  $-\infty$  与  $+\infty$  作为积分上下限, 权重计算公式如下:

$$\omega(l) = \int_{V_{l-1}}^{V_l} \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t_l - \alpha)^2}{2\sigma_2^2}};$$

式中,  $\omega(l)$  为第  $l$  个信号高斯权重,  $\sigma_2$  为回波光子探测概率密度高斯分布函数标准差,  $\alpha$  为高斯函数峰值中心, 则脉冲累加后的最终飞行时间为:

$$t = \sum_{l=1}^L \omega(l) \cdot t(l);$$

其中,  $t(l)$  为窗口信号内第  $l$  个回波计数的飞行时间。

[0010] 优选的,根据目标表面连续的特点,利用邻域信息对无效像素进行补全提高图像的探测性能,具体方法如下:

假设  $(i, j)$  为无效像素  $(0 < i \leq N, 0 < j \leq M)$ , 将  $(i, j)$  像素的  $m \times m$  邻域像素的均值作为其最终的飞行时间, 计算公式为:

$$t_{i,j} = \frac{\sum_{a=i-\lfloor \frac{m}{2} \rfloor, b=j-\lfloor \frac{m}{2} \rfloor}^{a=i+\lfloor \frac{m}{2} \rfloor, b=j+\lfloor \frac{m}{2} \rfloor} (t_{a,b})}{c};$$

其中,  $m$  为奇数 (若  $m$  为偶数则无法构成以  $i, j$  为中心的邻域) 且小于  $N$  和  $M$ ,  $c$  为  $(i, j)$  像素的  $m \times m$  邻域内有效像素的个数, 对有效像素的离散回波信号赋予高斯函数积分权重, 解算其飞行时间, 无效像素则以邻域像素的均值作为其飞行时间。

[0011] 与现有技术相比, 本申请有益效果如下:

1. 本发明基于时间相关性自适应阈值实现信号的粗提取, 无需构建光子分布直方图, 通过比较回波信号差与判断窗口时间进行信号提取, 这大大缩短了信号处理速度。

[0012] 2. 为了提高系统的测距的精度, 基于光子飞行时间的分布特性, 阈值信号经高斯函数赋予权重, 可以有效的对噪声信号进行去除, 提升了系统成像精度。

[0013] 3. 利用空间相关性, 使用大小窗口加权填补空像素的方式进一步补充信号集, 得到的目标更加完整、清晰。

## 附图说明

[0014] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案, 下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍。

[0015] 图1为本发明实施例所公开的一种光子计数激光雷达的弱回波信号快速提取及高精度成像方法总体流程示意图。

[0016] 图2为以  $(i, j)$  像素为中心的  $3 \times 3$  邻域。

## 具体实施方式

[0017] 为了使本技术领域的人员更好地理解本发明方案, 下面将对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述, 显然, 所描述的实施例仅仅是本发明一部分的实施例, 而不是全部的实施例。

[0018] 本发明实施例的方法, 如下:

步骤1, 在激光器关闭状态下, 统计系统的噪声水平, 包括背景光噪声及暗计数噪声;  $N_b$  为平均背景噪声光电子数 ( $N_n = N_b + N_d$ )  $N_b$  为平均背景噪声光电子数,  $N_d$  为SPAD的暗计数光电子数;

步骤2, 控制光子计数激光雷达进行二维扫描, 获得目标  $N \times M$  个像素的回波数据, 每个像素包含  $n$  个脉冲周期的回波信号, 最终, 将采集到  $N \times M \times n$  个周期的目标回波点云数据。

[0019] 步骤3,每个像素取  $n$  个脉冲周期的回波信号作为一组判断单元,将一组回波信号平铺在时间轴上并进行升序排列,定义高斯脉冲函数  $\pm\sigma$  时间宽度所包含光子计数采集卡时间门的个数为判断窗口  $H$ ,该判断窗口包含 68.2%的高斯函数能量。首先通过激光脉冲半高全宽计算判断窗口  $H$ ,计算公式如下:

$$H = \left\lceil \frac{2\sigma_1}{\Delta t} \right\rceil = \left\lceil \frac{2 \cdot \text{FWHM}}{2.355 \cdot \Delta t} \right\rceil;$$

式中, $\sigma_1$  为高斯脉冲函数标准差, $\text{FWHM}$ 为激光脉冲半高全宽, $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整函数, $\Delta t$ 为光子计数采集卡的时间门。

[0020] 根据噪声光子、判断窗口及每个像素脉冲周期数确定滑窗阈值 $Th$ ,滑窗阈值 $Th$ 计算公式如下:

$$Th = \lceil n \cdot (1 - e^{(-N_n \cdot H)}) \rceil;$$

其中, $N_n$ 为噪声平均光电子数( $N_n = N_b + N_d$ ) ( $N_b$ 为平均背景噪声光电子数, $N_d$ 为单光子探测器SPAD的暗计数光电子数)。

[0021] 利用判断窗口  $H$ 对每个像素的一组回波数据沿时间轴依次进行滑窗判断(沿时间轴以 $H$ 的长度进行移动);统计判断窗口 $H$ 内回波计数的个数 $k$ ,当 $k > Th$ 时,保留判断窗口 $H$ 内的回波数据,当 $k \leq Th$ 时,删除判断窗口 $H$ 内的数据,被保留的回波数据称之为窗口信号。当该像素中没有窗口信号时该像素为空像素,认定该像素为无效像素;反之则为有效像素。

[0022] 一种光子计数激光雷达的弱回波信号高精度成像方法,步骤如下:

步骤4,对有效像素离散信号赋予高斯函数积分权重,使回波信号飞行时间更集中于回波脉冲的中间位置,进而提升系统测距精度,具体方法如下:

回波光子的探测概率密度与它的光子数分布形状近似相同,在时间相关性自适应阈值法获得离散信号基础上,对离散信号赋予高斯函数积分权重,靠近中间位置的回波脉冲赋予更高的权重,两边的回波脉冲赋予较小的权重,从而使回波信号飞行时间更集中于回波脉冲的中间位置,进而提升系统测距精度。若原始信号通过时间相关性自适应阈值法去噪后窗口信号内包含回波计数的总个数为  $L$ ,此时对窗口信号内包含回波计数的飞行时间取中值,作为积分权重上下限;

$$V_l = \frac{(t_{l+1} + t_l)}{2} \quad l \in [2, L - 1];$$

式中, $L$  为窗口信号内包含回波计数的总个数, $L > 3$ ;  $V_l$ 为窗口信号第  $l$  个回波计数的飞行时间的中值; $t_l$ 为窗口信号内第  $l$  个回波计数的飞行时间。

[0023] 通过积分高斯函数对第  $l$  ( $1 < l < L$ ) 个数据赋予权重 $\omega(l)$ ,对于初始与结束数据,我们分别赋予 $-\infty$ 与 $+\infty$ 作为积分上下限,权重计算公式如下:

$$\omega(l) = \int_{V_{l-1}}^{V_l} \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t_l - \alpha)^2}{2\sigma_2^2}};$$

式中, $\omega(l)$ 为第  $l$  个信号高斯权重, $\sigma_2$ 为回波光子探测概率密度高斯分布函数标准差, $\alpha$  为高斯函数峰值中心,则脉冲累加后的最终飞行时间为:

$$t = \sum_{l=1}^L \omega(l) \cdot t(l);$$

其中,  $t(l)$  为窗口信号内第  $l$  个回波计数的飞行时间。

[0024] 步骤5, 根据目标表面连续的特点, 利用邻域信息对无效像素进行补全提高图像的探测性能, 具体方法如下:

以  $(i, j)$  无效像素为例 ( $0 < i \leq N, 0 < j \leq M$ ), 将  $(i, j)$  像素的  $m \times m$  邻域像素的均值作为其最终的飞行时间, 计算公式为:

$$t_{i,j} = \frac{\sum_{a=i-\lfloor \frac{m}{2} \rfloor, b=j-\lfloor \frac{m}{2} \rfloor}^{a=i+\lfloor \frac{m}{2} \rfloor, b=j+\lfloor \frac{m}{2} \rfloor} (t_{a,b})}{c};$$

其中,  $m$  为奇数 (如下图2, 若  $m$  为偶数则无法构成以  $i, j$  为中心的邻域) 且小于  $N$  和  $M$ ,  $c$  为  $(i, j)$  像素的  $m \times m$  邻域内有效像素的个数。

[0025] 基于该像素  $3 \times 3$  邻域 (假设该邻域有效像素个数为8) 像素的飞行时间均值进行替代。

[0026]  $t_{i,j} = \frac{1}{8} (t_{i-1, j+1} + t_{i, j+1} + t_{i+1, j+1} + t_{i-1, j} + t_{i+1, j} + t_{i-1, j-1} + t_{i+1, j-1})$ 。

[0027] 步骤6, 根据飞行时间解算得到像素距离信息, 最终拼接出一副完整扫描三维图像。

[0028] 对所公开的实施例的上述说明, 使本领域专业技术人员能够实现或使用本发明。对这些实施例的多种修改对本领域的专业技术人员来说将是显而易见的, 本文中所定义的一般原理可以在不脱离本发明的精神或范围的情况下, 在其它实施例中实现。因此, 本发明将不会被限制于本文所示的这些实施例, 而是要符合与本文所公开的原理和新颖特点相一致的最宽的范围。

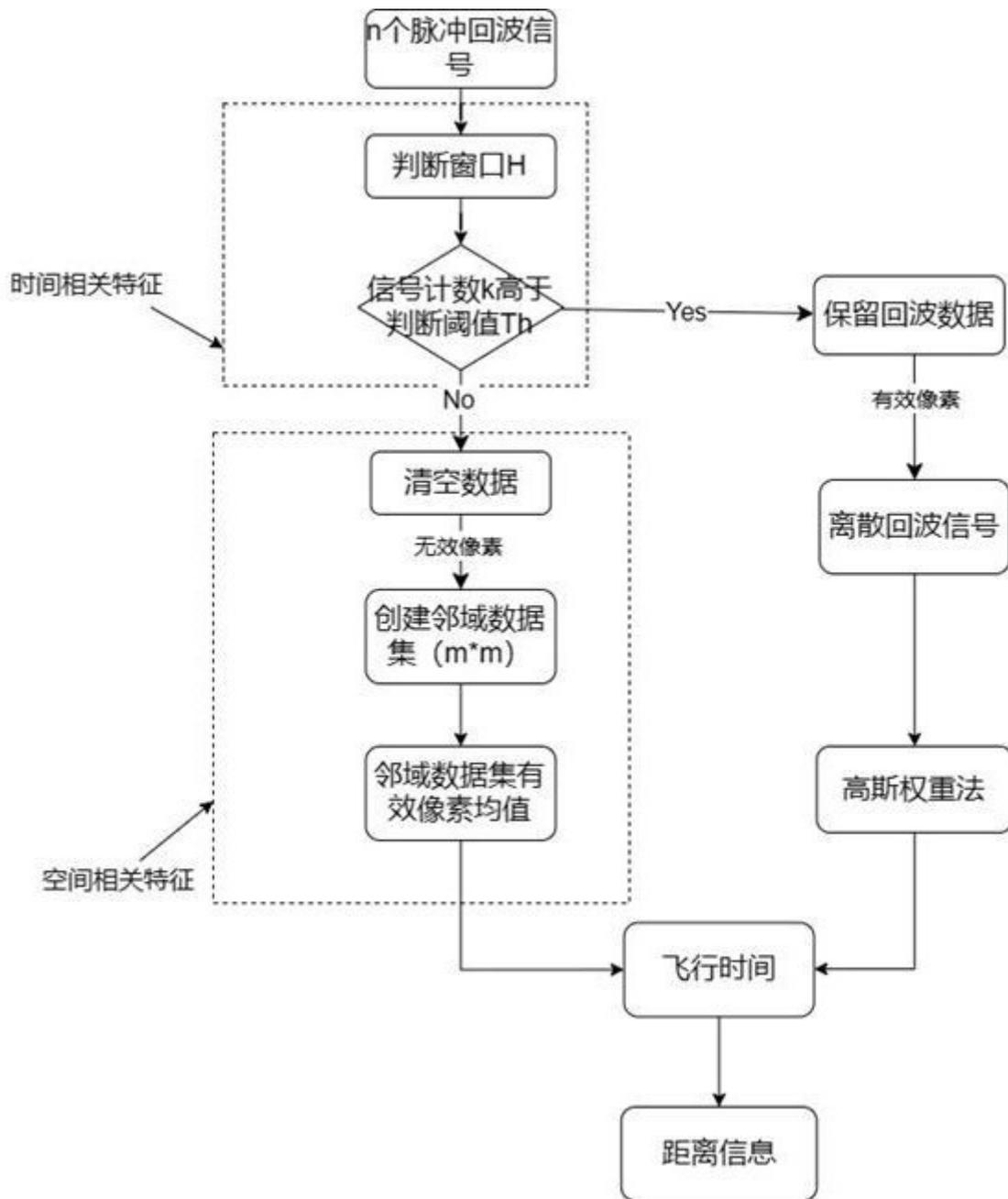


图 1

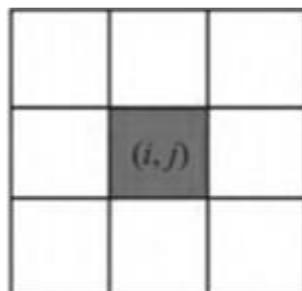


图 2