



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 109709552 B

(45) 授权公告日 2022. 04. 05

(21) 申请号 201910066747.X

(22) 申请日 2019.01.24

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 109709552 A

(43) 申请公布日 2019.05.03

(73) 专利权人 南京信息职业技术学院  
地址 210023 江苏省南京市栖霞区仙林大  
学城文澜路99号

(72) 发明人 罗文茂 陈雪娇 顾艳华 姜敏敏  
闫之烨

(74) 专利代理机构 南京纵横知识产权代理有限  
公司 32224

代理人 董建林

(51) Int. Cl.

G01S 13/90 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 105301590 A, 2016.02.03

CN 109085590 A, 2018.12.25

CN 108196241 A, 2018.06.22

CN 108627831 A, 2018.10.09

陈文驰等. 基于Keystone变换的低信噪比  
ISAR成像.《西安电子科技大学学报(自然科学  
版)》.2003, 全文.

杨磊等. 应用联合自聚焦实现低信噪比 ISAR  
成像平动补偿.《西安电子科技大学学报(自然科  
学版)》.2012, 全文.

审查员 杨牧

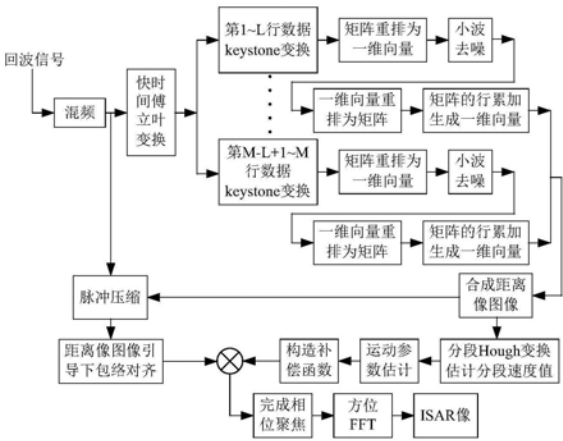
权利要求书2页 说明书6页 附图4页

(54) 发明名称

一种低信噪比ISAR成像运动补偿方法

(57) 摘要

本发明提供了一种低信噪比ISAR成像运动补偿方法,属于雷达信号处理领域。对于逆合成孔径雷达(ISAR)来说,在低信噪比情况下,其包络对齐、相位聚焦、目标运动参数估计等关键问题都无法解决。本发明方法将keystone变换应用于信号相干累积,并采用极大似然小波阈值去噪对雷达距离像去噪,可以达到较为精确的目标运动参数估计,获得了更好的运动补偿结果,可以在低信噪比下有效成像,具有推广应用的价值。



1. 一种低信噪比ISAR成像运动补偿方法,其特征在于,包括如下步骤:

步骤1. 对目标回波信号的M\*N维基带频域信号矩阵的前L行数据进行keystone变换,其中L为设定的整数值,M为回波脉冲数,N为每个回波脉冲的离散采样点数;

步骤2. 对keystone变换后的L\*N维数据矩阵按行逆傅里叶变换得到对齐的L\*N维目标距离像矩阵;

步骤3. 将上一步得到的L\*N维距离像矩阵排列为一维向量;

步骤4. 将上一步生成的一维向量求模后进行极大似然阈值小波去噪;

步骤5. 将去噪后的一维向量重新恢复为L\*N维的矩阵;将恢复后的L\*N维矩阵的所有行相加,得到一个一维向量,并将该一维向量作为一个新的(M-L+1)\*N维观测图像的第一行;

步骤6. 对基带频域信号矩阵的第2至第L+1行重复步骤1~5,直到得到完整的(M-L+1)\*N维观测图像;

步骤7. 由上一步得到的(M-L+1)\*N维观测图像通过相关法对齐,将观测图像的移位对齐量作为移位依据,将回波信号移位对齐;

步骤8. 在上一步得到的对齐的(M-L+1)\*N维观测图像中,利用Hough变换分段检测目标的速度,通过不同段目标速度的估计值拟合出目标的初始速度估计值 $\tilde{v}$ 加速度估计值 $\tilde{a}$ ;利用初始速度估计值 $\tilde{v}$ 加速度估计值 $\tilde{a}$ 构造补偿函数补偿第7步包络对齐后的回波信号相位,即完成了相位聚焦;至此,完成了低信噪比ISAR成像运动补偿过程。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于步骤2极大似然阈值小波去噪的方法具体包括:

1) 选取小波基函数对雷达距离像信号向量进行小波分解;

2) 根据雷达距离像信号的特征,选取基于极大似然估计阈值条件对分解后的小波系数进行收缩,所述雷达距离像信号向量小波去噪的阈值条件的表达式如下:

$$g(u) = \text{sign}(u) \cdot \max \left( 0, \frac{|u| - ad + \sqrt{(|u| + ad)^2 - 4\sigma^2(\alpha + 3)}}{2} \right)$$

其中:u是阈值函数的自变量,sign(.)为符号函数,max(.)为求取最大值函数, $a = \sqrt{\alpha(\alpha + 1)}/2$ , $\alpha$ 为稀疏度控制参数,d是待处理信号的均方差, $\sigma$ 为噪声标准差;

3) 根据收缩后的小波系数进行信号重构。

3. 根据权利要求2所述的方法,其特征在于所述噪声标准差 $\sigma$ 的取值为MAD/0.6745,其中MAD为前分解层噪声的中位差,d=0.068, $\alpha=0.01$ 。

4. 根据权利要求2所述的方法,其特征在于选择的小波为db4小波。

5. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于所述补偿函数的表达式如下:

$$\tilde{s}(t_m) = \sum_m \exp \left[ j \frac{4\pi f_c}{c} \left( \tilde{v}t_m + \frac{1}{2} \tilde{a}t_m^2 \right) \right]$$

其中,j为虚数符号, $t_m$ 为慢时间,m表示第m个脉冲,c为光速, $f_c$ 为雷达载波频率, $\tilde{v}$ 为目标的初始速度估计值, $\tilde{a}$ 为加速度估计值。

6. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,目标回波信号的基带频域信号的获得方法如下:

当ISAR发射宽带线性调频LFM脉冲串信号时,将ISAR接收到的目标回波信号混频并去除载频;混频后的信号对快时间进行傅里叶变换,得到目标回波信号的基带频域信号。

7.根据权利要求1所述的方法,其特征在于,具体的排列方法为:将得到的 $L*N$ 维距离像矩阵排列为一维向量的方法为将该矩阵的每一列取出首尾相接,形成一个一维向量。

8.根据权利要求7所述的方法,其特征在于,将去噪后的一维向量重新恢复为 $L*N$ 维的矩阵的恢复方法是步骤3的反向过程。

9.根据权利要求1所述的方法,其特征在于, $L$ 的取值在30至100之间。

## 一种低信噪比ISAR成像运动补偿方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种低信噪比ISAR成像运动补偿方法,该方法可以应用于雷达信号处理的工程领域。

### 背景技术

[0002] 随着隐身技术、无人机等新技术的应用,逆合成孔径雷达 (ISAR) 将不可避免需要在低信噪比下成像,这将大大增加ISAR成像的难度。

[0003] 在高信噪比条件下,对平稳目标的运动补偿方法已经非常成熟了,常用包络对齐、相位自聚焦技术来实现。对于机动目标,由于回波相位具有高次项,运动补偿较为复杂,可以采用的方法有:高阶相位项参数估计实现运动补偿、修正的Keystone变换方法完成包络对齐、图像熵法实现相位自聚焦、联合自聚焦等。在低信噪比条件下机动目标的ISAR运动补偿问题更为复杂,现有的参数估计方法在低信噪比下性能有限,而基于熵的自聚焦方法会失效。

[0004] Keystone变换是通过时间坐标线性变换的方法来实现包络对齐的一种常用方法,其优点在于其变换与噪声无关,缺点是插值运算量较大。keystone变换只能应用于匀速的情况,如果目标做机动飞行,可以认为目标在较短的时间内近似为匀速运动,所以可以在成像时间的不同分段中采用keystone变换来实现包络对齐。由于keystone不能消除相位中的高次项的影响,所以在keystone变换后还需相位聚焦。在信噪比不是很低的情况下,一种典型的方法是在keystone变换后,利用相邻几个距离像相干积累提高信噪比,然后利用包络相关法进行包络对齐,校正高次项的影响,最后利用自聚焦算法完成运动补偿。但是在信噪比较低的情况下,该方法无法进行相位自聚焦,所以需要提出新的方法来解决该问题。

### 发明内容

[0005] 本发明旨在解决以上至少一个方面的技术问题,提供一种基于较为精确的ISAR成像运动补偿方法,得到了很好的补偿效果,在低信噪比ISAR成像等方面具有很好的应用前景。

[0006] 为达到上述技术目的,本发明采用以下技术方案:

[0007] 本发明提供的一种低信噪比ISAR成像运动补偿方法,包括如下步骤:

[0008] 步骤1.对目标回波信号的 $M \times N$ 维基带频域信号矩阵的前 $L$ 行数据进行keystone变换,其中 $L$ 为设定的整数值, $M$ 为回波脉冲数, $N$ 为每个回波脉冲的离散采样点数;

[0009] 步骤2.对keystone变换后的 $L \times N$ 维数据矩阵按行逆傅里叶变换得到对齐的 $L \times N$ 维目标距离像矩阵;

[0010] 步骤3.将上一步得到的 $L \times N$ 维距离像矩阵排列为一维向量;

[0011] 步骤4.将上一步生成的一维向量求模后进行极大似然阈值小波去噪;

[0012] 步骤5.将去噪后的一维向量重新恢复为 $L \times N$ 维的矩阵,将恢复后的 $L \times N$ 维矩阵的所有行相加,得到一个一维向量,并将该一维向量作为一个新的 $(M-L+1) \times N$ 维观测图像的第一

行；

[0013] 步骤6.对基带频域信号矩阵的第2至第L+1行重复步骤1~5,直到得到完整的 (M-L+1)\*N维观测图像；

[0014] 步骤7.由上一步得到的 (M-L+1)\*N维观测图像通过相关法对齐,将观测图像的移位对齐量作为移位依据,将回波信号移位对齐。

[0015] 步骤8.在上一步得到的对齐的 (M-L+1)\*N维观测图像中,利用Hough变换分段检测目标的速度,通过不同段目标速度的估计值拟合出目标的初始速度估计值 $\tilde{v}$ 加速度估计值 $\tilde{a}$ 。利用初始速度估计值 $\tilde{v}$ 加速度估计值 $\tilde{a}$ 构造补偿函数补偿第7步包络对齐后的回波信号相位,即完成了相位聚焦。至此,完成了低信噪比ISAR成像运动补偿过程；

[0016] 在以上技术方案中,步骤2极大似然阈值小波去噪的方法具体包括：

[0017] 1)选取小波基函数对雷达距离像信号向量进行小波分解；

[0018] 2)根据雷达距离像信号的特征,选取基于极大似然估计阈值条件对分解后的小波系数进行收缩,所述雷达距离像信号向量小波去噪的阈值条件的表达式如下：

$$[0019] \quad g(u) = \text{sign}(u) \cdot \max \left( 0, \frac{|u| - ad + \sqrt{(|u| + ad)^2 - 4\sigma^2(\alpha + 3)}}{2} \right)$$

[0020] 其中：u是阈值函数的自变量,sign(.)为符号函数,max(.)为求取最大值函数, $a = \sqrt{\alpha(\alpha + 1)/2}$ , $\alpha$ 为稀疏度控制参数,d是待处理信号的均方差, $\sigma$ 为噪声标准差。

[0021] 3)根据收缩后的小波系数进行信号重构。

[0022] 在以上技术方案中,步骤8所述补偿函数的表达式如下：

$$[0023] \quad \tilde{s}(t_m) = \sum_m \exp \left[ j \frac{4\pi f_c}{c} \left( \tilde{v}t_m + \frac{1}{2} \tilde{a}t_m^2 \right) \right]$$

[0024] 其中,j为虚数符号, $t_m$ 为慢时间,m表示第m个脉冲,c为光速, $f_c$ 为雷达载波频率, $\tilde{v}$ 为目标的初始速度估计值, $\tilde{a}$ 为加速度估计值。

[0025] 本发明所取得的有益技术效果：

[0026] 1、本发明将keystone变换应用于信号相干累积,采用极大似然小波阈值去噪对雷达距离像去噪,可以获得较为精确的目标运动参数估计,能够达到更好的运动补偿效果；

[0027] 2、本发明采用极大似然小波阈值去噪方法对雷达距离像去噪,然后用包络相关法对数据进行包络对齐,对齐的精度较高,解决了传统包络相关法在低信噪比下无法对齐的问题；

[0028] 3、本发明对目标距离像执行了相干积累和去噪,比普通的相干积累法目标运动参数估计抗噪性能更好,目标运动参数估计更精确；

[0029] 4、本发明利用目标运动参数估计值构造出相位补偿函数,能进行精确相位补偿,进而解决了低信噪比下无法精确相位补偿的问题。

## 附图说明

[0030] 图1为本发明具体实施例的方法流程图；

[0031] 图2为本发明具体实施例涉及的雷达距离像的概率密度函数和Hyvarinen稀疏分

布概率密度函数的作图对比；

[0032] 图3为本发明具体实施例的方法验证时的仿真飞机模型；

[0033] 图4为仿真飞机模型在没有噪声时经过脉冲压缩后的距离像；

[0034] 图5为仿真飞机模型在有噪声时经过脉冲压缩后的距离像；

[0035] 图6为仿真飞机模型在有噪声时经过本发明方法去噪后的距离像；

[0036] 图7为仿真飞机模型根据本发明方法包络对齐后的距离像；

[0037] 图8为仿真飞机模型根据本发明方法的ISAR成像结果。

## 具体实施方式

[0038] 下面结合附图对本发明作进一步描述。以下实施例仅用于更加清楚地说明本发明的技术方案,而不能以此来限制本发明的保护范围。

[0039] 图1为本发明具体实施例的方法流程图；

[0040] 图1示出了本发明的具体实施例,提供了一种低信噪比ISAR成像运动补偿的方法,包括以下步骤:

[0041] 步骤1.对目标回波信号的M\*N维(其中M为回波脉冲数,N为每个回波脉冲的离散采样点数)基带频域信号矩阵的前L行数据进行keystone变换。其中L为设定的整数值,L的取值建议在30至100之间。L的取值主要考虑的因素在于:L值太小,则相干累积信噪比增益较低;L值太大,则目标的运动不能近似为匀速运动;

[0042] 具体实施时,可以包括以下环节:

[0043] 1)当ISAR发射宽带线性调频(Linear Frequency Modulated,LFM)脉冲串信号时,将ISAR接收到的目标回波信号混频,去除载频;

[0044] 2)混频后的信号对快时间进行傅里叶变换,得到基带频域信号。假设成像时间内接收了M个回波,每个回波采样点数为N点,则形成M\*N维的基带频域信号矩阵。根据需求,选择基带频域信号矩阵的前L行,对该L行的数据进行keystone变换,则前L个回波包络走动被校正。

[0045] 步骤2.对keystone变换后的L\*N维数据矩阵按行逆傅里叶变换得到对齐的L\*N维目标距离像矩阵;

[0046] 步骤3.将上一步得到的L\*N维距离像矩阵排列为一维向量,具体的排列方法为:将该矩阵的每一列取出首尾相接,形成一个一维向量;

[0047] 步骤4.将上一步生成的一维向量求模后进行极大似然阈值小波去噪;

[0048] Hyvarinen在1999年提出了一种基于极大似然估计(Maximum Likelihood Estimate,MLE)原理的“稀疏码收缩”方法来估计噪声条件下的非高斯数据,它要求非高斯变量服从稀疏分布,而稀疏分布的概率密度函数(probability density function,PDF)的特征是在零点有一个尖峰。该文献提出采用下式来表示稀疏分布的概率密度函数:

$$p(s) = \frac{1}{2d} \frac{(\alpha+2)[\alpha(\alpha+1)/2]^{(\alpha/2+1)}}{[\sqrt{\alpha(\alpha+1)/2} + |s/d|]^{(\alpha+3)}} \quad (1),$$

[0050] 其中:s是概率密度函数的自变量,其范围为-0.5~0.5,d是待处理信号的均方差, $\alpha$ 为稀疏度控制参数, $\alpha$ 越大信号越稀疏。

[0051] 对于ISAR而言,雷达目标通常呈现点目标特性,所以ISAR距离像可以由脉冲型信

号来模拟。为了比较公式(1)所表示的稀疏分布与ISAR距离像信号分布,附图2画出了一个典型ISAR距离像信号分布以及当 $d=0.068$ , $a=0.01$ 时的概率密度。从该图中可以看出雷达距离像信号的PDF是满足稀疏分布特点的,可以利用Hyvarinen提出的阈值准则去噪。

[0052] Hyvarinen提出的阈值准则为:

$$[0053] \quad g(u) = \text{sign}(u) \cdot \max \left( 0, \frac{|u| - ad + \sqrt{(|u| + ad)^2 - 4\sigma^2(\alpha + 3)}}{2} \right) \quad (2),$$

[0054] 其中: $u$ 是阈值函数的自变量, $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数, $\max(\cdot)$ 为求取最大值函数, $a = \sqrt{\alpha(\alpha+1)/2}$ , $\sigma$ 为噪声标准差。

[0055] 本步骤中将公式(2)作为雷达距离像信号小波去噪的阈值条件,并采用以下步骤对雷达距离像信号去噪。

[0056] 1) 选取小波基函数对雷达距离像信号进行小波分解。

[0057] 2) 根据公式(1)的阈值准则对分解后的小波系数进行收缩, $\sigma = \text{MAD}/0.6745$ ,MAD为前分解层噪声的中位差。

[0058] 3) 根据收缩后的小波系数进行信号重构。

[0059] 这里优选地,采用db4小波对雷达距离像信号进行小波分解,其是现有技术在此不做赘述。

[0060] 步骤5.将去噪后的一维向量重新恢复为 $L \times N$ 维的矩阵,其恢复方法是步骤3的反向过程。将恢复后的 $L \times N$ 维矩阵的所有行相加,得到一个一维向量,并将该一维向量作为一个新的 $(M-L+1) \times N$ 维观测图像的第一行;

[0061] 步骤6.对基带频域信号矩阵的第2至第 $L+1$ 行重复步骤1~5,直到得到完整的 $(M-L+1) \times N$ 维观测图像。需要特别说明的是,可以根据实际情况选择相邻两次keystone变换之间的回波间隔,不一定间隔一个回波;

[0062] 步骤7.由上一步得到的 $(M-L+1) \times N$ 维观测图像通过相关法对齐,将观测图像的移位对齐量作为移位依据,将回波信号移位对齐。由于相关法包络对齐是现有技术,在此不做赘述。本发明方法通过先采用极大似然小波对雷达距离像去噪,然后用包络相关法对数据进行包络对齐,解决了在距离像被噪声淹没的情况下无法通过相关法实现包络对齐的问题。

[0063] 步骤8.在上一步得到的对齐的 $(M-L+1) \times N$ 维观测图像中,利用Hough变换分段检测目标的速度,通过不同段目标速度的估计值拟合出目标的初始速度估计值 $\tilde{v}$ 加速度估计值 $\tilde{a}$ 。利用初始速度估计值 $\tilde{v}$ 加速度估计值 $\tilde{a}$ 构造补偿函数补偿第7步包络对齐后的回波信号相位,即完成了相位聚焦。至此,完成了低信噪比ISAR成像运动补偿过程;

[0064] 在构造补偿函数时,如果ISAR发射线性调频(LFM)脉冲串信号,目标回波信号经过相干检波后的基带信号可以写为:

$$[0065] \quad s_r(\hat{t}, t_m) = \sum_m \sum_i A_i \exp \left[ -j\pi\mu \left( \hat{t} - \frac{2R_i(t_m)}{c} \right)^2 \right] \cdot \exp \left[ -j \frac{4\pi f_c}{c} R_i(t_m) \right] \quad (3),$$

[0066] (3)式中, $j$ 为虚数符号, $\hat{t}$ 为快时间, $t_m$ 为慢时间, $m$ 表示第 $m$ 个脉冲, $i$ 表示第 $i$ 个目标散射点, $A_i$ 为目标第 $i$ 个散射点的散射强度, $\mu$ 为LFM信号的调频率, $R_i(t_m)$ 为目标第 $i$ 个散

射点离雷达的距离,  $c$  为光速,  $f_c$  为雷达载波频率。

[0067] 仅考虑二次项的目标距离为:

$$[0068] \quad R_i(t_m) = R_{i0} + v_i t_m + \frac{1}{2} a_i t_m^2 \quad (4),$$

[0069] (4) 式中,  $R_{i0}$  为第  $i$  个散射点的初始距离,  $v_i$  为第  $i$  个散射点的初始速度,  $a_i$  为第  $i$  个散射点的加速度。

[0070] 将 (4) 式代入 (3) 式, 可得:

$$[0071] \quad s_r(\hat{t}, t_m) = \sum_m \sum_i A_i \cdot \exp \left\{ -j\pi\mu \left[ \hat{t} - \frac{2}{c} \left( R_{i0} + v_i t_m + \frac{1}{2} a_i t_m^2 \right) \right]^2 \right\} \cdot \exp \left[ -j \frac{4\pi f_c}{c} \left( R_{i0} + v_i t_m + \frac{1}{2} a_i t_m^2 \right) \right] \quad (5),$$

[0072] 将 (5) 式展开, 保留二次项, 并忽略一些小项, (5) 式可以近似为 (6) 式:

$$[0073] \quad s_r(\hat{t}, t_m) \approx \sum_m \sum_i A_i \exp(-j\pi\mu \hat{t}^2) \cdot \exp \left[ j \frac{4\pi\mu}{c} \left( R_{i0} + v_i t_m + \frac{1}{2} a_i t_m^2 \right) \hat{t} \right] \cdot \exp \left[ -j \frac{4\pi f_c}{c} \left( R_{i0} + v_i t_m + \frac{1}{2} a_i t_m^2 \right) \right] \quad (6),$$

[0074] 从慢时间维度考察 (6) 式, 第一个指数项经过脉冲压缩后, 反映的是目标的距离像的包络随时间的走动, 该走动由步骤6的包络对齐已经校正。第二个指数项是距离像的初始相位随慢时间的变化, 在高信噪比下一般可以通过相位聚焦进行校正, 在低信噪比下根据本文算法步骤7得出的目标运动参数估计值  $\tilde{v}$ 、 $\tilde{a}$ , 构造如 (7) 式的相位补偿函数与包络对齐后的信号相乘完成相位聚焦。

$$[0075] \quad \tilde{s}(t_m) = \sum_m \exp \left[ j \frac{4\pi f_c}{c} \left( \tilde{v} t_m + \frac{1}{2} \tilde{a} t_m^2 \right) \right] \quad (7),$$

[0076] 在具体实施例中, 对运动补偿后的距离像信号, 进行方位向傅立叶变换就可以最终得到ISAR像。

[0077] 附图3为仿真算例的飞机目标几何结构。该仿真为一个距离雷达50公里的飞机目标, 飞机的运动参数为: 径向初始速度-300m/s (朝向雷达运动)、加速度150m/s<sup>2</sup>、绕几何中心的转动速度为4°/s。雷达参数为: 雷达发射LFM脉冲串, 脉冲宽度为5μs, 带宽500MHz, 载频为10GHz, 快时间采样点数2000点, 脉冲重复周期500μs, 成像时间为1s, 共2000个回波, 回波信噪比设置为-23dB。

[0078] 附图4为没有噪声的情况下脉冲压缩后的距离像, 该图是从2000个回波中等间隔抽取200个生成的, 从中可以看出目标运动引起的距离像走动和弯曲。

[0079] 附图5为混入噪声后的距离像, 该图也是从2000个回波中等间隔抽取200个生成的, 可以看出距离像很模糊。

[0080] 附图6为本发明方法去噪后的距离像, 该图也是从2000个回波中等间隔抽取200个生成的, 可以看出距离像变清晰了。在该仿真中, 算法步骤3中的L取的是50。

[0081] 附图7为仿真飞机模型根据本发明方法包络对齐后的距离像;

[0082] 附图8为仿真飞机模型根据本发明方法的ISAR成像结果。

[0083] 以上所述, 仅为本发明的具体实施方式, 但本发明的保护范围并不局限于此, 任何熟悉该技术的人在本发明所揭露的技术范围内, 将该方法的修改、变化或延伸到其它应用

场景,都应涵盖在本发明的包含范围之内。

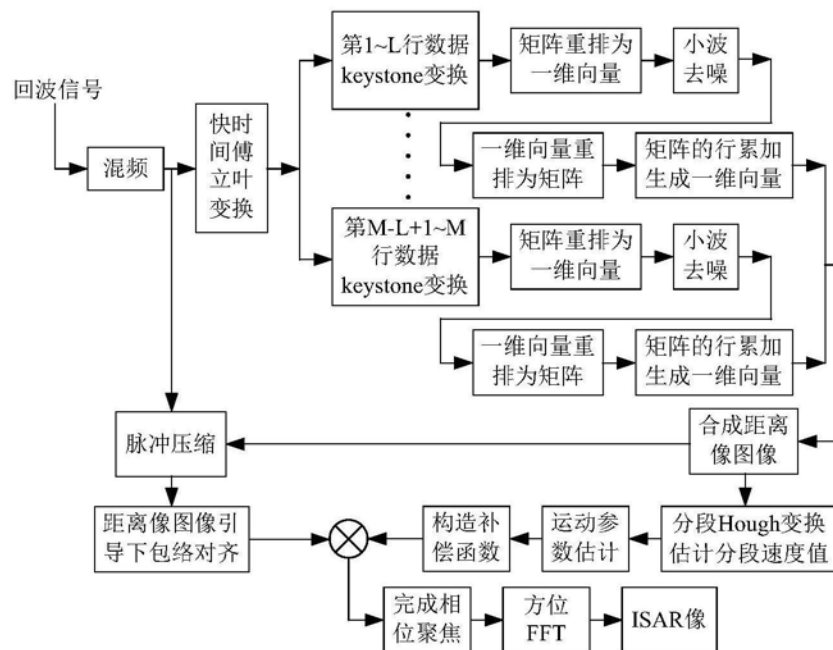


图1

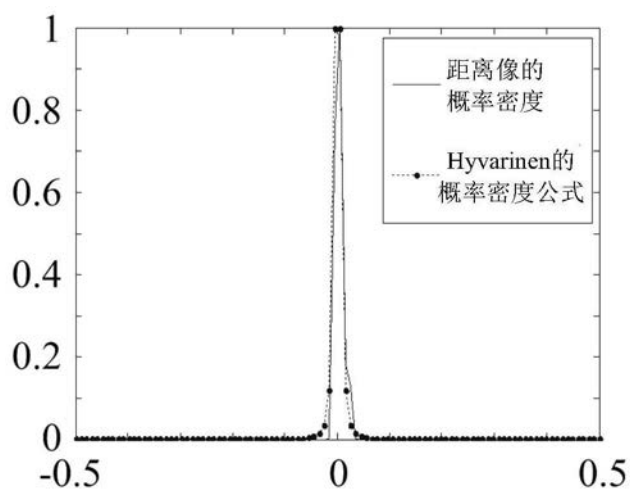


图2

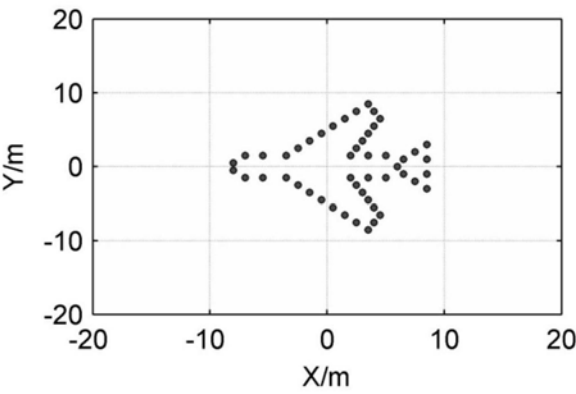


图3

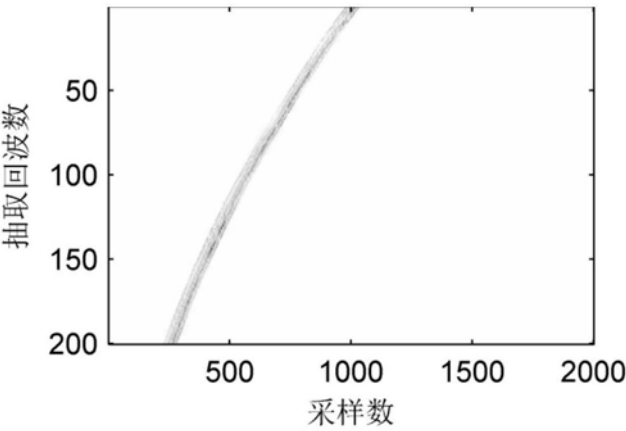


图4

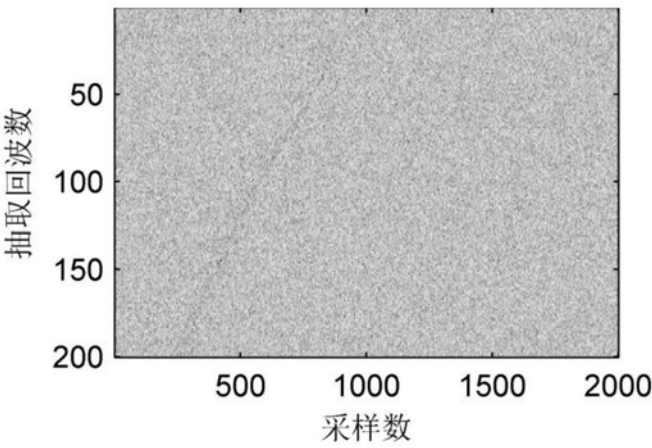


图5

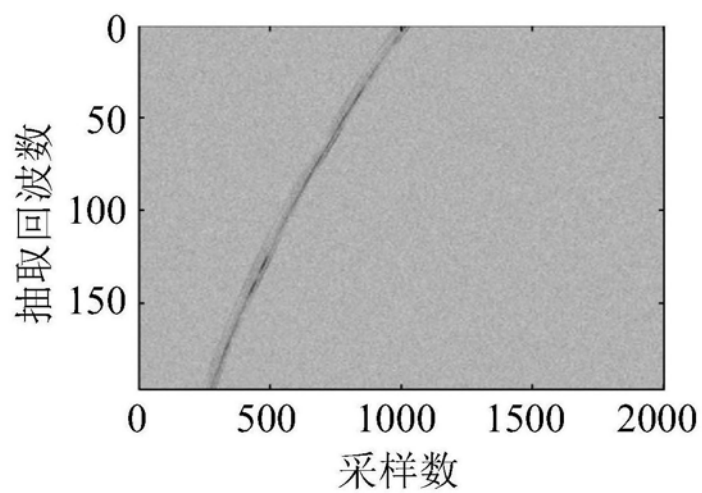


图6

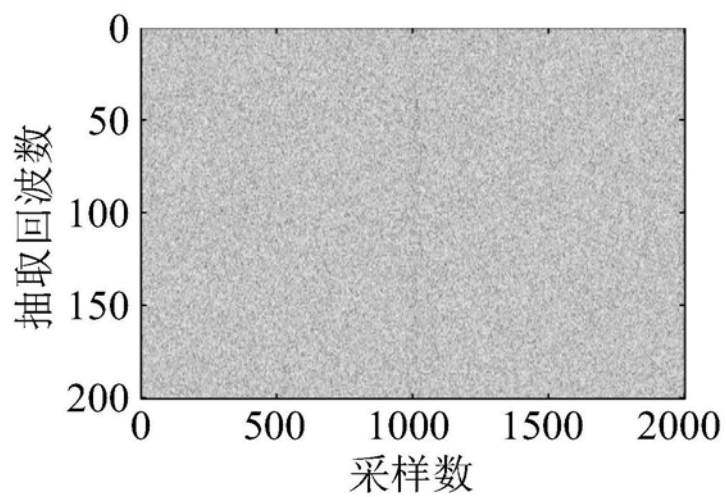


图7

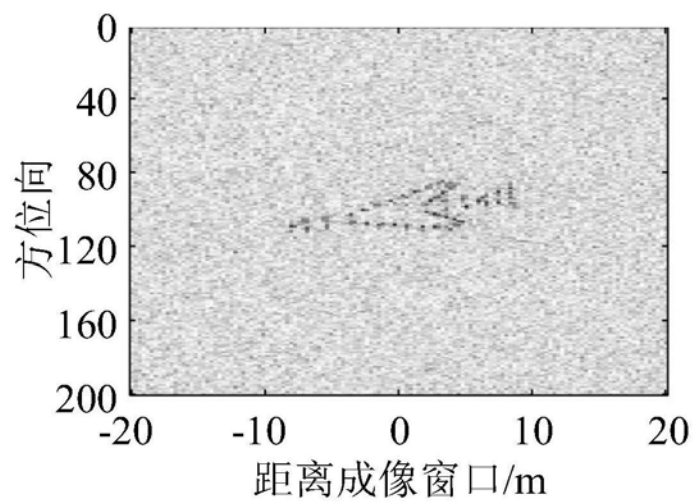


图8