



(10) 授权公告号 CN 118884397 B

(45) 授权公告日 2024.12.13

(21) 申请号 202411366568.5

G01S 7/288 (2006.01)

(22) 申请日 2024.09.29

G01S 7/292 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

G01S 7/295 (2006.01)

申请公布号 CN 118884397 A

G01S 13/88 (2006.01)

(43) 申请公布日 2024.11.01

(56) 对比文件

(73) 专利权人 电子科技大学

CN 106093932 A, 2016.11.09

地址 611731 四川省成都市高新区(西区)

CN 110244296 A, 2019.09.17

西源大道2006号

审查员 苏娜娜

(72) 发明人 王子曦 胡进峰

(74) 专利代理机构 电子科技大学专利中心

51203

专利代理师 邹裕蓉

(51) Int. Cl.

G01S 7/41 (2006.01)

G01S 7/282 (2006.01)

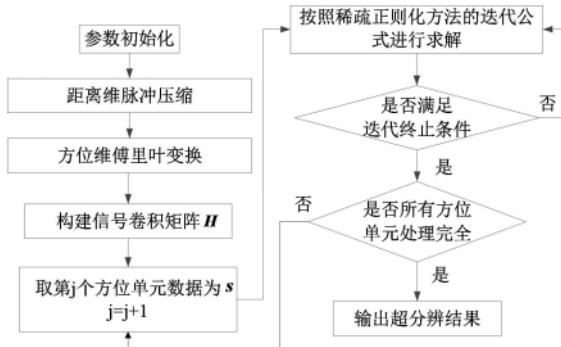
权利要求书2页 说明书8页 附图5页

(54) 发明名称

一种针对低小慢集群目标的雷达超分辨率方法

(57) 摘要

本发明公开了一种针对低小慢集群目标的雷达超分辨率方法,针对传统雷达对空探测技术中距离分辨率受限的问题,引入一种基于距离-多普勒平面的稀疏超分辨率方法,首先构建一种集群目标距离-多普勒平面的卷积回波信号模型,然后采用稀疏正则化方法完成目标估计,包括初始化步骤、距离维脉冲压缩步骤、集群目标回波模型构建步骤、稀疏超分辨率的目标函数建立步骤和超分辨率成像结果输出步骤。此方法能够在常规信噪比情况下突破雷达系统固有距离分辨率限制,在集群目标超分辨率场景中有广阔应用前景。



1. 一种针对低小慢集群目标的雷达超分辨方法,其特征在于,包括步骤:

初始化步骤:

设置发射信号带宽B、雷达发射信号脉冲宽度T和调频斜率 K_r ;对距离维回波进行采样,得到方位维和距离维的二维回波信号;

距离维脉冲压缩步骤:

将回波沿距离维做傅里叶变换得到二维回波矩阵;利用调频斜率、雷达发射信号脉冲宽度构造距离维脉冲压缩参考函数,再进行傅里叶变换后得到参考函数频谱;将二维回波矩阵与参考函数频谱相乘,再对相乘结果进行傅里叶逆变换得到距离维脉冲压缩后时域结果;

集群目标回波模型构建步骤:

对距离维脉冲压缩后时域结果的方位维做快速傅里叶变换得到距离-多普勒域回波数据矩阵;将集群目标在雷达系统距离-多普勒空间上的散射系数与距离-多普勒域回波数据矩阵的二维卷积再加上距离-多普勒空间上的随机噪声构成集群目标回波模型;

稀疏超分辨的目标函数建立步骤:

对幅度从集群目标回波模型中提取出距离维信号幅度,并利用距离维卷积核函数构建信号卷积矩阵H对距离维信号幅度进行离散化得到距离维超分辨模型s;采用稀疏正则化方法对距离维超分辨模型s进行描述得到稀疏超分辨的目标函数;

超分辨率成像结果输出步骤:迭代求解计算目标函数的梯度,输出集群目标的距离维散射系数向量x形成的超分辨率成像结果;

集群目标回波模型 $S_{ddf}(f_\eta, \tau)$ 具体为:

$$S_{ddf}(f_\eta, \tau) = x(f_\eta, \tau) \otimes S_{2df}(f_\eta, \tau) + n(f_\eta, \tau);$$

其中, $\otimes$ 代表卷积操作, f_η 为方位维频率域变量, τ 为距离维时间变量, $x(f_\eta, \tau)$ 为集群目标在雷达系统距离-多普勒空间上的散射系数, $S_{2df}(f_\eta, \tau)$ 为距离-多普勒域回波数据矩阵, $n(f_\eta, \tau)$ 为距离-多普勒空间上的随机噪声;

距离-多普勒域回波数据矩阵 $S_{2df}(f_\eta, \tau)$ 具体为:

$$\begin{aligned} S_{2df}(f_\eta, \tau) &= \text{FFT}_{\eta} \{s_{rc}(\eta, \tau)\} \\ &= \sin c[K_r T(\tau - \frac{2R_0}{c})] W_a(f_\eta - f_0 \frac{2v}{c}) \times \exp\{-j \frac{4\pi f_0 R_0}{c}\} \exp\{-j 2\pi f_\eta \eta_c\}^i \end{aligned}$$

其中, η 为方位维时间变量, FFT_{η} 表示对方位维做快速傅里叶变换, $s_{rc}(\eta, \tau)$ 为距离维脉冲压缩后时域结果, c 为光速, v 为目标运动的径向速度, $\exp$ 为指数函数, R_0 表示目标离雷达的距离, W_a 为方位矩形窗函数的频谱形式, f_0 为雷达发射信号中心频率, η_c 为波束中心扫过目标的时间, j 为虚数单位。

2. 如权利要求1所述方法,其特征在于,迭代求解计算目标函数的梯度的具体表示为:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{x}_{k-1} \frac{\mathbf{H}^T \mathbf{s}}{\mathbf{H}^T \mathbf{H} \mathbf{x}_{k-1} + \lambda \text{diag} \left\{ \left((x_i)_{k-1}^2 + \epsilon \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \mathbf{x}_{k-1}}$$

其中, $\mathbf{x}_k$ 是集群目标的距离维散射系数向量x第k次迭代结果, $\mathbf{x}_{k-1}$ 是向量x第k-1次迭代结果,T代表转置, λ 是正则化参数, $\text{diag}\{\cdot\}$ 为对角矩阵, x_i 为向量x的第i个元素, $(x_i)_{k-1}$ 为

x_{k-1} 的第 i 个元素, ϵ 是一个用于解决L1范数不可微问题引入的常数。

3.如权利要求1所述方法,其特征在于,距离维卷积核函数 $h_{\text{imp}}(\tau)$ 具体为:

$$h_{\text{imp}}(\tau) = \sin c[K_r T(\tau - \frac{2R_0}{c})];$$

其中, R_0 表示目标离雷达的距离, τ 为距离维时间变量。

4.如权利要求1所述方法,其特征在于,距离维脉冲压缩参考函数 $\text{refer}(\tau)$ 具体为:

$$\text{refer}(\tau) = \text{rect}(\frac{\tau}{T}) \exp(j\pi K_r \tau^2);$$

其中, rect 为矩形包络函数, $\exp$ 为指数函数, τ 为距离维时间变量。

5.如权利要求4所述方法,其特征在于,参考函数频谱 $H(f_\tau)$ 具体为:

$$H(f_\tau) = \text{rect}\{\frac{f_\tau}{|K_r|T}\} \exp\left\{j\pi \frac{f_\tau^2}{K_r}\right\};$$

其中, f_τ 表示距离维频率域变量。

6.如权利要求1所述方法,其特征在于,距离维脉冲压缩后时域结果 $s_{\text{rc}}(\eta, \tau)$ 具体为:

$$\begin{aligned} s_{\text{rc}}(\eta, \tau) &= \text{IFFT}_\tau \{S_{\text{out}}(\eta, f_\tau)\} \\ &= \sin c[K_r T(\tau - \frac{2R_0}{c})] w_a(\eta - \eta_c) \exp\left\{-j \frac{4\pi f_0 R_0}{c}\right\} \exp\left\{\frac{j4\pi f_0 v \eta}{c}\right\}; \end{aligned}$$

其中, IFFT_τ 表示在距离维进行傅里叶逆变换, $S_{\text{out}}(\eta, f_\tau)$ 为二维回波矩阵与参考函数频谱相乘结果, w_a 为方位矩形窗函数。

一种针对低小慢集群目标的雷达超分辨方法

技术领域

[0001] 本发明属于雷达技术领域,主要涉及集群无人机超分辨技术。

背景技术

[0002] 近年来,无人机技术的飞速发展不仅体现在功能多样性与数量规模的显著增长上,更催生了“无人机群”这一新兴概念,其应用范畴日益广泛。然而,伴随着这一趋势,利用蜂群无人机实施攻击或窥探的活动也屡见不鲜,对公共安全与隐私保护构成了严峻挑战。各类“低慢小”飞行器成为管制对象。“低慢小”飞行器指飞行高度低于500米、速度小于200公里/小时、雷达反射面积小于2平方米的飞行目标。低空飞行的消费级和小型无人机属于典型的“低慢小”目标。为有效应对集群无人机目标带来的复杂威胁,无人机探测雷达系统需具备精准估算无人机群规模(即个体数量)、精确描绘群体轮廓等关键信息的能力,以实现了对集群目标的全面监控与评估。但由于无人机群具有相似的运动特征,探测雷达受到多种因素的限制,会导致多个临近目标发生混叠,影响探测效果,因此要求在信号处理的过程中提高对集群目标的分辨能力。

[0003] 目前大多数的研究集中在对单无人机探测的性能提升以及目标种类识别上。也有对群目标进行分辨提升的方法提出,例如文献“阵列雷达单脉冲群目标分辨方法[J]”(王罗胜斌,曾晖,徐振海,现代雷达,2021,43(09):6-13.)从雷达分辨机理出发,以参数化模型和极大似然估计为基础,结合阵列雷达灵活的空域处理能力,给出了自适应单脉冲和四通道单脉冲两种方法,实现了群目标分辨,然而,阵列雷达单脉冲群目标分辨方法的前提是预知目标数这一先验信息,但部分群目标场景难以获取,需要研究目标数估计方法。文献“一种适用于集群无人机超分辨的波束域方位估计算法[J]”(周清晨,李晓萌,沈显照,等.雷达科学与技术,2024,22(03):300-305),提出了一种波束域方位超分辨估计算法,该方法不仅可以避免传统的稀疏表示类测角方法的计算复杂度高和需要选取超参数问题,而且在单快拍数、入射信号空间角度间隔较小等非理想情况下都具备很好的分辨能力。但此方法是针对方位和俯仰空域上的超分辨,并未突破雷达系统固有距离分辨率限制。

发明内容

[0004] 本发明所要解决的技术问题是,针对当前雷达检测低小慢集群目标时,距离维容易混叠问题,提供一种能有效实现雷达针对集群类目标的超分辨探测的方法。

[0005] 本发明为解决上述技术问题所采用的技术方案是,一种针对低小慢集群目标的雷达超分辨方法,包括步骤:

[0006] 初始化步骤:设置雷达发射信号带宽 B 、雷达发射信号脉冲宽度 T 和调频斜率 K_r ;对距离维回波进行采样,得到方位维和距离维的二维回波信号;

[0007] 距离维脉冲压缩步骤:将回波沿距离维做傅里叶变换得到二维回波矩阵;利用调频斜率、雷达发射信号脉冲宽度构造距离维脉冲压缩参考函数,再进行傅里叶变换后得到参考函数频谱;将二维回波矩阵与参考函数频谱相乘,再对相乘结果进行傅里叶逆变换得

到距离维脉冲压缩后时域结果;

[0008] 集群目标回波模型构建步骤:对距离维脉冲压缩后时域结果的方位维做快速傅里叶变换得到距离-多普勒域回波数据矩阵;将集群目标在雷达系统距离-多普勒空间上的散射系数与距离-多普勒域回波数据矩阵的二维卷积再加上距离-多普勒空间上的随机噪声构成集群目标回波模型;

[0009] 稀疏超分辨的目标函数建立步骤:对幅度从集群目标回波模型中提取出距离维信号幅度,并利用距离维卷积核函数构建信号卷积矩阵 $\mathbf{H}$ 对距离维信号幅度进行离散化得到距离维超分辨模型 $\mathbf{s}$;采用稀疏正则化方法对距离维超分辨模型 $\mathbf{s}$ 进行描述得到稀疏超分辨的目标函数;

[0010] 超分辨率成像结果输出步骤:

[0011] 迭代求解计算目标函数的梯度,输出集群目标的距离维散射系数向量 $\mathbf{x}$ 形成的超分辨率成像结果。

[0012] 具体的,迭代求解计算目标函数的梯度的具体表示为:

$$[0013] \quad \mathbf{x}_k = \mathbf{x}_{k-1} \frac{\mathbf{H}^T \mathbf{s}}{\mathbf{H}^T \mathbf{H} \mathbf{x}_{k-1} + \lambda \text{diag} \left\{ ((\mathbf{x}_i)_{k-1})^2 + \varepsilon \right\}^{-\frac{1}{2}}} \mathbf{x}_{k-1}$$

[0014] 其中, $\mathbf{x}_k$ 是集群目标的距离维散射系数向量 $\mathbf{x}$ 第 k 次迭代结果, $\mathbf{x}_{k-1}$ 是向量 $\mathbf{x}$ 第 $k-1$ 次迭代结果, r 代表转置, λ 是正则化参数, $\text{diag}\{\cdot\}$ 为对角矩阵, $\mathbf{x}_i$ 为向量 $\mathbf{x}$ 的第 i 个元素, $(\mathbf{x}_i)_{k-1}$ 为 $\mathbf{x}_{k-1}$ 的第 i 个元素, ε 是一个用于解决L1范数不可微问题引入的常数。

[0015] 本发明针对传统雷达对空探测技术中距离分辨率受限的问题,引入一种基于距离-多普勒平面的超分辨方法,即:首先构建一种集群目标距离-多普勒平面的超分辨卷积回波信号模型,然后采用稀疏正则化方法进行集群目标位置估计。

[0016] 本发明的有益效果是,能够在常规信噪比情况下突破雷达系统固有距离分辨率限制,在集群目标超分辨场景中有广阔应用前景。

附图说明

[0017] 图1是本发明提供方法的流程框图。

[0018] 图2是本发明具体实施方式中采用的仿真目标分布示意图。

[0019] 图3是本发明具体实施方式中的原始回波数据。

[0020] 图4是本发明具体实施方式中距离维脉冲压缩后结果。

[0021] 图5是图4结果中某种一个脉冲的回波距离维剖面。

[0022] 图6是本发明具体实施方式中方位维傅里叶变换得到的距离-多普勒结果。

[0023] 图7是图6结果中目标所在多普勒单元的距离维剖面。

[0024] 图8是本发明具体实施方式中稀疏正则化超分辨方法估计得到的四个目标结果。

[0025] 图9是附图8中目标所在多普勒频率门的距离维剖面结果。

具体实施方式

[0026] 本发明方法包括:

[0027] 步骤一:首先建立雷达基带回波信号模型。

[0028] 设雷达发射信号脉冲宽度为 T ,信号带宽为 B ,雷达发射信号中心频率 f_0 和调频斜率 $K_r = B/T$,雷达在固定波束位置发射多个脉冲信号,经雷达接收处理,可得到以距离维时间变量和方位维时间变量为坐标的归一化幅度点目标二维回波基带信号 s_0 为:

$$s_0(\eta, \tau) = \text{rect}\left(\frac{\tau - 2R(\eta)/c}{T}\right) w_a(\eta - \eta_c) \times \exp\left\{\frac{-j4\pi f_0 R(\eta)}{c}\right\} \exp\left\{j\pi K_r \left(\tau - \frac{2R(\eta)}{c}\right)^2\right\} \exp\left\{\frac{j4\pi f_0 v \eta}{c}\right\} \quad (1)$$

[0030] 其中, rect 为矩形包络函数, $\exp$ 为指数函数, τ 为距离维时间变量,也称快时间, η 为方位维时间变量,也称慢时间, $R(\eta)$ 为雷达到目标的距离, η_c 为波束中心扫过目标的时间, $w_a(\bullet)$ 为方位矩形窗函数, c 为光速, v 为目标运动的径向速度。通常雷达为获得更高的目标信噪比,系统设计上会针对目标速度进行波形参数匹配,确保目标在一次多脉冲积累时间内不会跨越距离分辨单元,因此 $R(\eta) \approx R_0$, R_0 表示目标离雷达的距离。

[0031] 步骤二:距离维脉冲压缩。

[0032] 2-1进行距离维傅里叶变换:

$$S_0(\eta, f_\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s_0(\tau, \eta) \exp\{-j2\pi f_\tau \tau\} d\tau \quad (2)$$

[0034] $S_0(\eta, f_\tau)$ 为距离维傅里叶变换后的二维回波信号, $S_0(\eta, f_\tau)$ 的大小为 $M \times N$, f_τ 表示快时间频率域变量,即距离维频率域变量, j 为虚数单位。

[0035] 将公式(1)带入公式(2)中的积分号,则积分号内的相位 $\theta(\tau)$ 为:

$$\theta(\tau) = -\frac{4\pi f_0 R_0}{c} + \pi K_r \left[\tau - \frac{2R_0}{c} \right]^2 - 2\pi f_\tau \tau \quad (3)$$

[0037] 应用驻定相位原理(POSP)对公式(2)求积分,结果为:

$$S_0(\eta, f_\tau) = \text{rect}\left\{\frac{f_\tau}{|K_r|T}\right\} w_a(\eta - \eta_c) \exp\left\{\frac{j4\pi f_0 v \eta}{c}\right\} \times \exp\left\{-j\frac{4\pi(f_0 + f_\tau)R_0}{c}\right\} \exp\left\{-j\frac{\pi f_\tau^2}{K_r}\right\} \quad (4)$$

[0039] 2-2进行距离维脉冲压缩。

[0040] 在距离维对上述距离维傅里叶变换后的回波在频域做脉冲压缩,脉冲压缩参考函数 refer 为:

$$\text{refer}(\tau) = \text{rect}\left(\frac{\tau}{T}\right) \exp(j\pi K_r \tau^2) \quad (5)$$

[0042] 将公式(5)进行傅里叶变换后得到参考函数频谱 H 为:

[0043]
$$H(f_r) = \text{rect}\left\{\frac{f_r}{|K_r|T}\right\} \exp\left\{j\pi \frac{f_r^2}{K_r}\right\} \quad (6)$$

[0044] 将公式(4)和公式(6)相乘,在频域进行线性调频脉冲信号的脉冲压缩操作,得到:

[0045]
$$S_{\text{out}}(\eta, f_r) = S_0(\eta, f_r)H(f_r) = \text{rect}\left\{\frac{f_r}{|K_r|T}\right\} w_a(\eta - \eta_c) \exp\left\{\frac{j4\pi f_0 v \eta}{c}\right\} \\ \times \exp\left\{-j \frac{4\pi(f_0 + f_r)R_0}{c}\right\} \quad (7)$$

[0046] 将相乘结果进行傅里叶逆变换得到距离维脉冲压缩后时域结果 s_{rc} :

[0047]
$$s_{\text{rc}}(\eta, \tau) = \text{IFFT}_{\tau}\{S_{\text{out}}(\eta, f_r)\} \\ = \sin c\left[K_r T\left(\tau - \frac{2R_0}{c}\right)\right] w_a(\eta - \eta_c) \exp\left\{-j \frac{4\pi f_0 R_0}{c}\right\} \exp\left\{\frac{j4\pi f_0 v \eta}{c}\right\} \quad (8)$$

[0048] IFFT_{τ} 表示在距离维进行傅里叶逆变换。可以看到线性调频脉冲信号的脉冲压缩输出频谱为矩形,对应时域波形为sinc函数。

[0049] 步骤三:得到集群目标的距离-多普勒二维回波模型。

[0050] 在慢时间维进行傅里叶变换可以对有一定径向速度的目标完成相参积累以提高信噪比,因此对无人机的检测工作通常在距离-多普勒维平面进行,所以本发明所提方法需将回波变换到距离-多普勒平面进行处理,具体操作为:将公式(8)在方位慢时间维进行傅里叶变换,将距离-方位数据转换到距离-多普勒域:

[0051]
$$S_{2\text{df}}(f_{\eta}, \tau) = \text{FFT}_{\eta}\{s_{\text{rc}}(\eta, \tau)\} \\ = \sin c\left[K_r T\left(\tau - \frac{2R_0}{c}\right)\right] W_a(f_{\eta} - f_0 \frac{2v}{c}) \times \exp\left\{-j \frac{4\pi f_0 R_0}{c}\right\} \exp\{-j2\pi f_{\eta} \eta_c\} \quad (9)$$

[0052] 其中, f_{η} 表示慢时间频率域变量, FFT_{η} 表示对慢时间维做快速傅里叶变换,即对方位维做快速傅里叶变换。 $W_a(\cdot)$ 为 $w_a(\cdot)$ 的频谱形式。公式(9)为单位幅度点目标的距离-多普勒维冲激响应。

[0053] 集群目标回波模型则为多点目标的散射系数与该冲击响应的二维卷积。

[0054]
$$S_{\text{ddf}}(f_{\eta}, \tau) = x(f_{\eta}, \tau) \otimes S_{2\text{df}}(f_{\eta}, \tau) + n(f_{\eta}, \tau) \quad (10)$$

[0055] 其中, $\otimes$ 代表卷积操作, $x(f_{\eta}, \tau)$ 为集群目标在雷达系统距离-多普勒空间上的散射系数, $n(f_{\eta}, \tau)$ 为距离-多普勒空间上的随机噪声。

[0056] 步骤四:建立稀疏超分辨的目标函数。

[0057] 4-1构建信号卷积矩阵H。

[0058] 由于本文主要针对距离维幅度做超分辨,因此将距离维信号幅度从集群目标回波模型 $S_{\text{ddf}}(\eta, \tau)$ 中提取出来:

[0059]
$$S(\tau) = x(\tau) \otimes h_{\text{imp}}(\tau) + n(\tau) \quad (11)$$

[0060] 其中, $S(\tau)$ 表示距离维的信号幅度, $h_{\text{imp}}(\tau) = \sin c[K_r T(\tau - \frac{2R_0}{c})]$ 为距离维卷积核函数, $\mathbf{x}(\tau)$ 为集群目标的距离维散射系数, $\mathbf{n}(\tau)$ 为雷达系统接收机随机噪声。

[0061] 为了计算方便, 将此 $S(\tau)$ 离散化为距离维超分辨模型 $\mathbf{s}$:

$$[0062] \quad \mathbf{s} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (12)$$

[0063] 其中, $\mathbf{s}$ 、 $\mathbf{x}$ 和 $\mathbf{n}$ 为 $N \times 1$ 维的列向量, $\mathbf{H}$ 为距离维卷积核函数 $h_{\text{imp}}(\tau)$ 决定的卷积矩阵。对距离维卷积核函数 $\sin c[K_r T(\tau - \frac{2R_0}{c})]$ 离散化得到离散化的卷积核函数向量 $\mathbf{h} = [h_0 \ h_1 \ \dots \ h_{l-1}]$, l 为以 R_0 为中心的 sinc 函数向左右取到第一副瓣开始处的长度。

$$[0064] \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_0 & & & & h_{l-1} & \dots & h_1 \\ h_1 & h_0 & & & & \ddots & h_2 \\ \vdots & h_1 & \ddots & & & & \vdots \\ h_{l-1} & \vdots & & & & & \\ & h_{l-1} & & & & & \\ & & \ddots & & & & \\ & & & \ddots & & & \\ & & & & h_{l-1} & \dots & h_1 & h_0 \end{bmatrix}_{N \times N} \quad (13)$$

[0065] 由此, 距离维超分辨问题可以转化为对目标散射系数 $\mathbf{x}$ 的估计问题。

[0066] 4-2 构建稀疏正则化超分辨目标函数。

[0067] 为了能够缓解超分辨方法对噪声的敏感性, 并且有效利用集群目标的稀疏特性, 采用稀疏正则化方法对距离维的卷积模型进行超分辨求解。正则化方法是一种自带正则化惩罚项的最小二乘法, 用于缓解反卷积病态问题。稀疏超分辨的目标函数描述如下:

$$[0068] \quad \min_{\mathbf{x}} \{E(\mathbf{x}) = \|\mathbf{s} - \mathbf{H}\mathbf{x}\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{x}\|_1\} \quad (14)$$

[0069] 其中, $\|\cdot\|_2$ 为 L2 范数, $\|\cdot\|_1$ 为 L1 范数, $\|\mathbf{s} - \mathbf{H}\mathbf{x}\|_2^2$ 是数据保真项, $\|\mathbf{x}\|_1$ 为正则化项, λ 是正则化参数, 用以调整正则化项与保真项之间的权重比例, 通常由 L 曲线法确定。

[0070] 步骤五: 超分辨率成像结果输出。

[0071] 5-1 计算目标函数的梯度:

[0072] 为了求解目标函数, 首先需要计算目标函数的梯度。

$$[0073] \quad \nabla E(\mathbf{x}) = \mathbf{H}^T (\mathbf{H}\mathbf{x} - \mathbf{s}) + \lambda \text{diag} \left\{ \left((x_i)^2 + \varepsilon \right)^{-\frac{1}{2}} \right\} \mathbf{x} \quad (15)$$

[0074] 其中 $\mathbf{H}^T$ 代表矩阵 $\mathbf{H}$ 的转置, ε 是一个用于解决 L1 范数不可微问题引入的一个很小的常数, $\text{diag}\{\cdot\}$ 为对角矩阵, x_i 为向量 $\mathbf{x}$ 的第 i 个元素。

[0075] 然后令方程等于零, 可以得到:

$$[0076] \quad \frac{\mathbf{H}^T \mathbf{s}}{\mathbf{H}^T \mathbf{H} \mathbf{x} + \lambda \text{diag} \left\{ \left((x_i)^2 + \varepsilon \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \mathbf{x}} = 1 \quad (16)$$

[0077] 5-2迭代求解:

[0078] 对上式左右两边同时乘以 $\mathbf{x}_k$, $\mathbf{x}_k$ 是第 k 次迭代结果。由于 $\mathbf{x}_k$ 和 $\mathbf{x}_{k-1}$ 近似相等, 因此根据Picard乘法迭代方法可以得到如下迭代求解公式:

$$[0079] \quad \mathbf{x}_k = \mathbf{x}_{k-1} \frac{\mathbf{H}^T \mathbf{s}}{\mathbf{H}^T \mathbf{H} \mathbf{x}_{k-1} + \lambda \text{diag} \left\{ \left((x_i)_{k-1}^2 + \varepsilon \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \mathbf{x}_{k-1}} \quad (17)$$

[0080] 其中 $(x_i)_{k-1}$ 为向量 $\mathbf{x}_{k-1}$ 的第 i 个元素。

[0081] 迭代求解结束后, 输出集群目标的距离维散射系数 $\mathbf{x} = \mathbf{x}_k$ 。目标的散射系数是指入射方向目标单位截面积的雷达的反射率, 当雷达越精确估计出集群目标反射系数在距离维度的分布, 图像的分辨率越高。因此得到集群目标的距离维散射系数 $\mathbf{x}$ 后即能形成的超分辨率成像结果。

[0082] 实施例采用仿真实验的方法进行验证, 所有步骤、结论都在Matlab2020上验证正确。下面就实施例进行详细描述, 流程如图1所示。

[0083] 步骤一: 参数初始化。

[0084] 设置仿真目标场景参数, 目标场景如图2所示, 在距离雷达分别为2985m, 3000m, 3015m, 3030m的位置设置了四个集群编队小型无人机点目标, 每个目标的系统散射系数一致, 均归一化设置为1, 并按照信噪比20dB设置雷达系统噪声; 由于是集群编队目标, 因此每个目标的径向速度一致, 设置为6m/s。设置雷达系统参数, 雷达中心频率 f_0 为10GHz, 发射信号带宽 B 为5MHz、发射信号脉冲宽度 T 为20us的线性调频信号, 调频斜率 $K_r = 0.25 \text{MHz} / \mu\text{s}$, 发射脉冲个数 M 为128个, 脉冲重复频率 $\text{prf} = 2000 \text{Hz}$, 为了在距离维做超分辨处理, 以较高采样率 $f_r = 100 \text{MHz}$ 对距离维回波进行采样, 得到二维回波信号 $s_0(\eta, \tau)$ 的矩阵形式 $S_0(\eta, f_r)$, 矩阵规模为 128×4267 , 如图3所示。

[0085] 步骤二: 进行距离维脉冲压缩。

[0086] 根据系统参数构造距离维脉冲压缩参考函数 $\text{refer}(\tau) = \text{rect}\left(\frac{\tau}{T}\right) \exp(j\pi K_r \tau^2)$, 其中 $K_r = 0.25 \text{MHz} / \mu\text{s}$, $-10\mu\text{s} \leq \tau \leq 10\mu\text{s}$ 。将回波沿距离维做傅里叶变换, 并与脉冲压缩参考函数的频谱 $H(f_r)$ 相乘, 再将相乘后结果进行傅里叶逆变换到时域, 完成对回波 $S_0(\eta, f_r)$ 的距离维脉冲压缩, 得到时域结果 $s_{\text{rc}}(\eta, \tau)$, $s_{\text{rc}}(\eta, \tau)$ 为公式 (8) 的矩阵表达式, 规模保持不变, 如图4所示, 图4中某种一个脉冲的回波距离维剖面如图5所示。

[0087] 步骤三: 得到集群目标的距离-多普勒二维回波。

[0088] 针对脉冲压缩后的回波数据矩阵 $s_{\text{rc}}(\eta, \tau)$, 对其方位慢时间维度做快速傅里叶变换, 得到变换后的距离-多普勒域回波数据矩阵 $S_{2\text{dr}}(f_\eta, \tau)$, 其规模保持不变, 如图6所示, 图

6中目标所在多普勒单元的距离维剖面如图7所示。再利用 $S_{2df}(f_\eta, \tau)$ 、集群目标在雷达系统距离-多普勒空间上的散射系数与距离-多普勒空间上的随机噪声生成集群目标回波模型 $S_{ddf}(f_\eta, \tau)$ 。

[0089] 步骤四:构建距离维卷积矩阵。

[0090] 根据系统参数对距离维卷积核函数 $\sin c[K_r T(\tau - \frac{2R_0}{c})]$ 离散化,其中 $R_0 = 3000\text{m}$, 得到离散化的卷积核函数向量 $\mathbf{h} = [h_0 \ h_1 \ \dots \ h_{l-1}]$,由于目标原始回波主要取决于该卷积核函数的第一副瓣之间的响应,为减少矩阵规模降低计算量,其长度 l 为以 $R_0 = 3000\text{m}$ 为中心的 sinc 函数向左右取到第一副瓣开始处的长度,此处为 $l = 80$ 。由此得到系统卷积矩阵 $\mathbf{H}$:

[0091]
$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_0 & & & h_{l-1} & \dots & h_1 \\ & h_1 & h_0 & & & h_2 \\ & \vdots & h_1 & \ddots & & \vdots \\ & h_{l-1} & \vdots & & & \\ & & h_{l-1} & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & h_{l-1} & \dots & h_1 & h_0 \end{bmatrix} \quad \left. \vphantom{\begin{bmatrix} h_0 \\ h_1 \\ \vdots \\ h_{l-1} \end{bmatrix}} \right\} 4267 \quad (18)$$

4267

[0092] 步骤五:沿距离维进行超分辨估计。

[0093] 对距离-多普勒域回波数据矩阵后矩阵 $S_{ddf}(\eta, \tau)$ 第 j (j 的初始值为1) 行数据取幅值,即为待处理的原始回波 $\mathbf{s}$ 。按照公式 (14) 构造超分辨估计的目标函数。

[0094] 步骤六:利用迭代公式对最优解进行估计。

[0095] 按照表达式 (15) 求取目标函数梯度。其中 ϵ 取 10^{-8} , 正则化参数 λ 采用L曲线方法确定。然后利用公式 (17) 对目标最优解进行迭代估计,设置迭代初始值 $\mathbf{x}_0$ 为 $\mathbf{s}$ 。判断是否满足迭代终止条件:

[0096]
$$\|\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{k-1}\|_2^2 < \delta \quad (19)$$

[0097] 其中 δ 为根据噪声方差设定的阈值。若相邻两次迭代结果 $\mathbf{x}_k$ 和 $\mathbf{x}_{k-1}$ 不满足公式 (19) 则更新 $k = k + 1$ 继续迭代,直至满足迭代终止条件 $\mathbf{x} = \mathbf{x}_k$ 。

[0098] 步骤七:判断回波 $S_{ddf}(\eta, \tau)$ 的128行数据是否处理完毕,即是否满足 $j \geq 128$,满足则输出集群目标在雷达系统距离-多普勒空间的距离维散射系数 $\mathbf{x}$ 形成的超分辨率成像结果;否则 $j = j + 1$,重复步骤五和步骤六,最终得到本发明的集群目标超分辨方法结果,如图8所示,图8中目标所在多普勒门的距离维剖面图如图9所示。

[0099] 目标回波经距离维脉冲压缩以及方位维傅里叶变换后的结果如图6所示,由于四个点目标距离间隔15m,小于雷达脉压处理后的距离分辨率 $C/2B = 30\text{m}$,并且目标径向速度一致,因此在距离-多普勒平面无法分辨四个目标。图7为四个点目标所在多普勒单元的距离维剖面,可以看出四个点目标回波混叠在一起,无法彼此分开。图8为本发明的集群目

标超分辨方法结果,可以看出四个目标点在距离维度被明显分开;图9为目标所在多普勒门的距离剖面图,从结果可以更清晰地看出四个目标点得到明显分辨,因此本发明处理后的目标距离分辨率优于雷达原始距离分辨率,实现了对集群目标的距离超分辨。

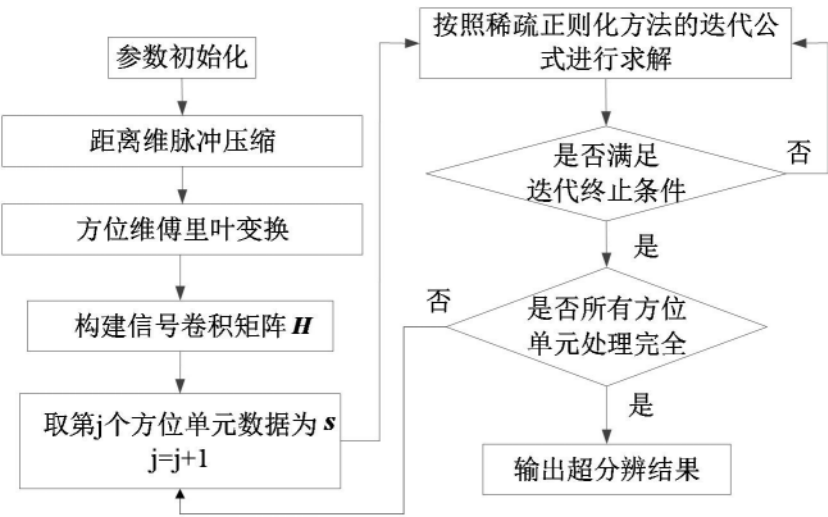


图1

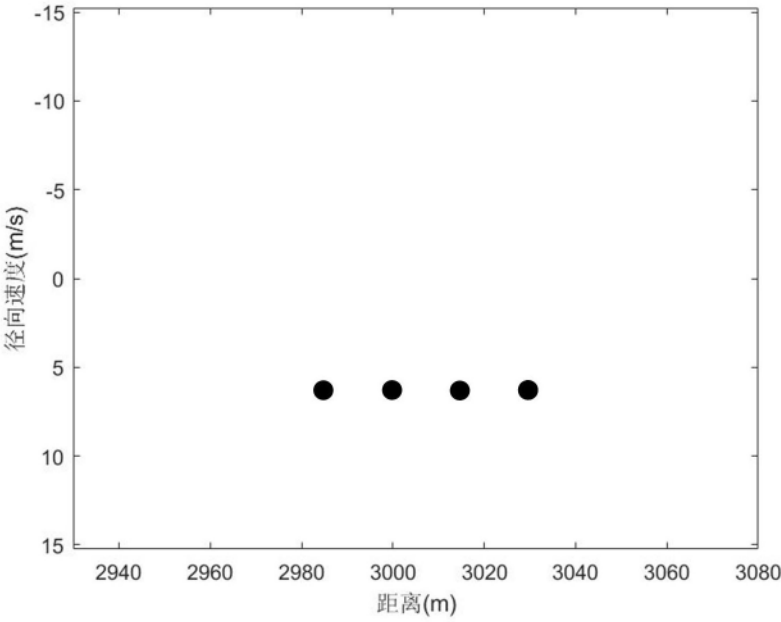


图2

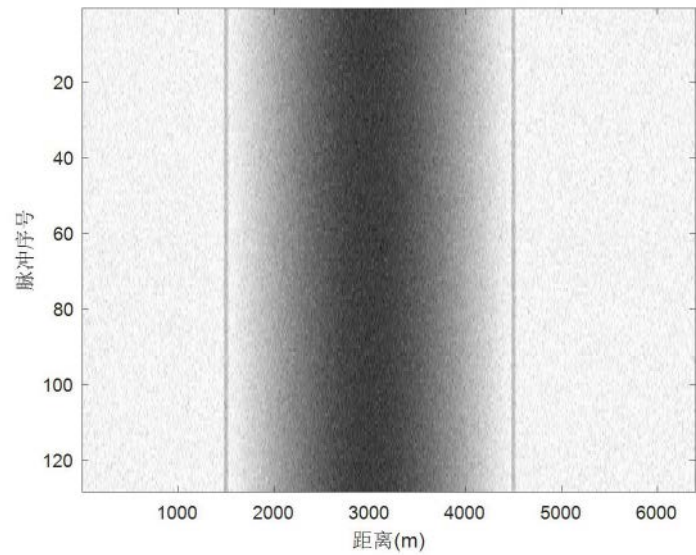


图3

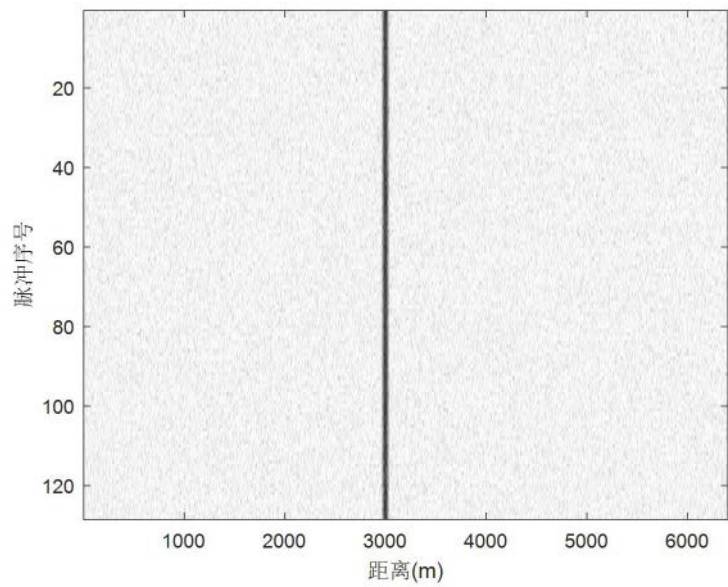


图4

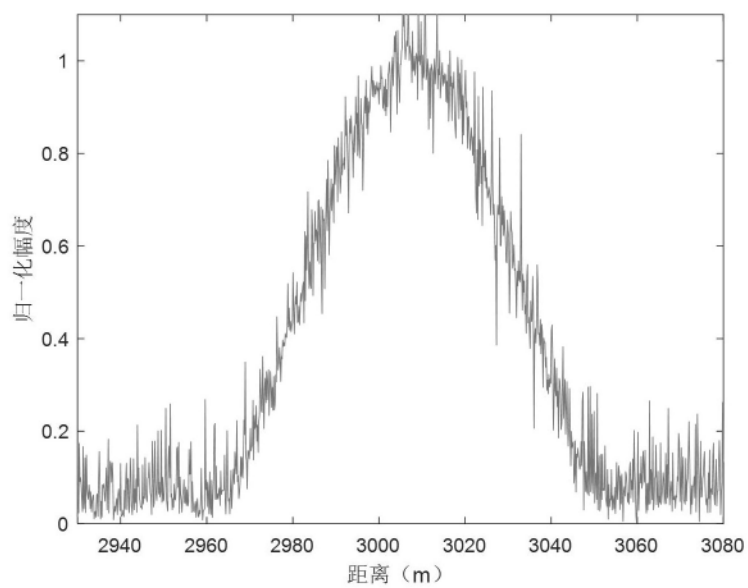


图5

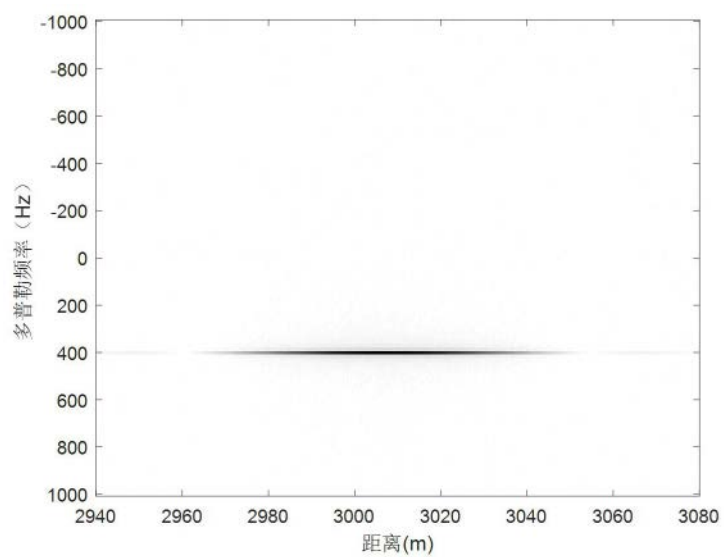


图6

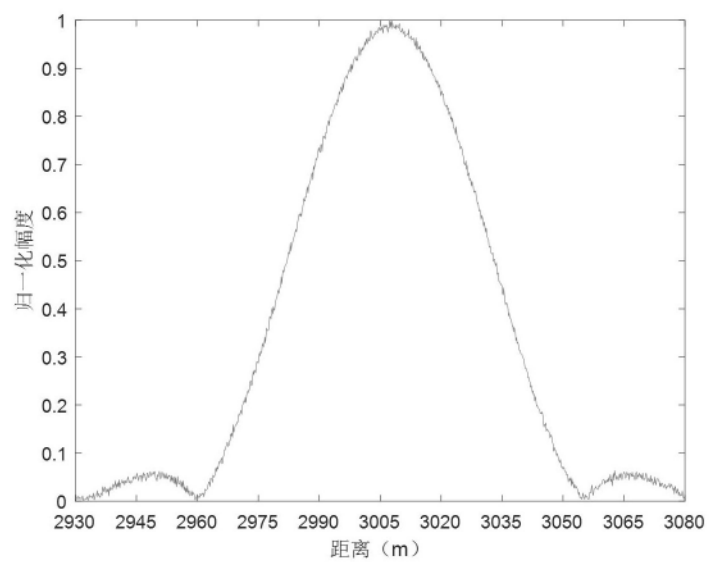


图7

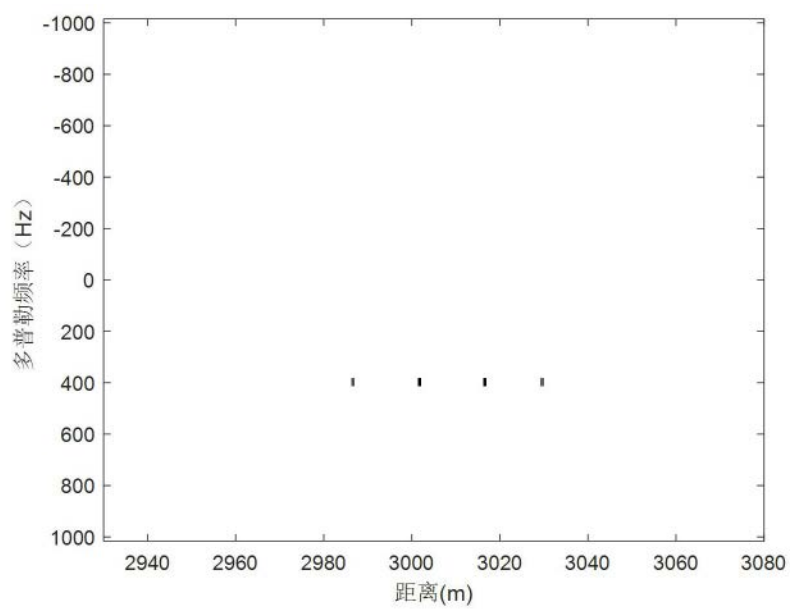


图8

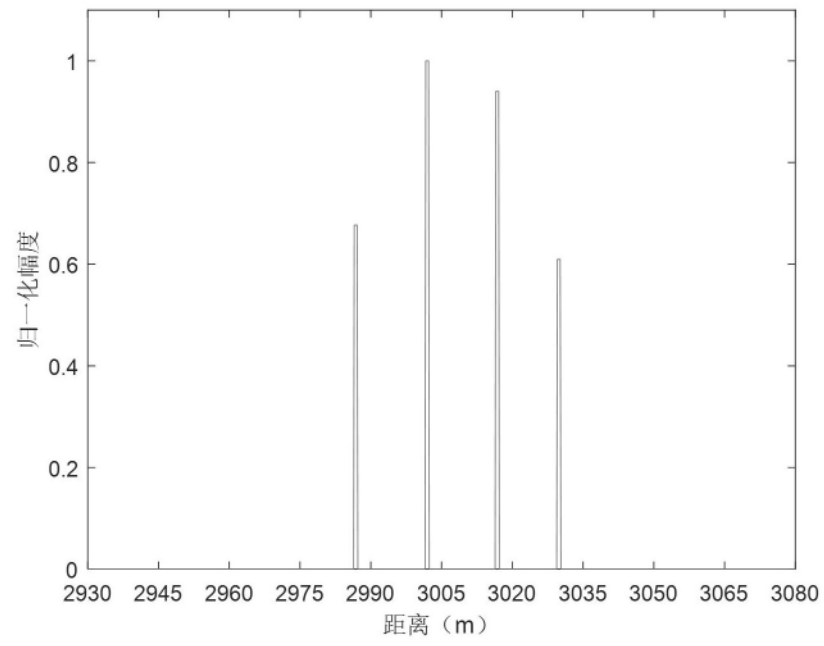


图9