



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107957574 A

(43)申请公布日 2018.04.24

(21)申请号 201711453838.6

(22)申请日 2017.12.28

(71)申请人 桂林电子科技大学

地址 541004 广西壮族自治区桂林市七星  
区金鸡路1号

(72)发明人 蒋留兵 杨中丽 车俐 宋永坤  
刘永吉 李骢

(74)专利代理机构 桂林市华杰专利商标事务所  
有限责任公司 45112

代理人 周雯

(51)Int.Cl.

G01S 7/41(2006.01)

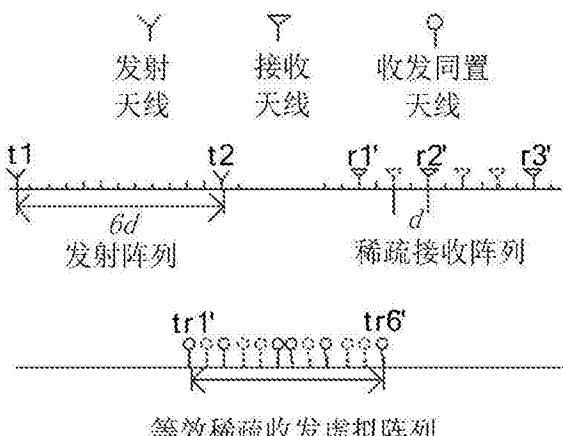
权利要求书4页 说明书10页 附图7页

(54)发明名称

基于IFFT和混合匹配追踪的时分地基MIMO  
滑坡雷达成像方法

(57)摘要

本发明公开了基于IFFT和混合匹配追踪的时分地基MIMO滑坡雷达成像方法，用于解决现有山体滑坡监测领域成像方法所用天线数目多、数据处理复杂度高的问题，并针对多目标成像的伪影点问题引入混合匹配追踪算法，大大改善成像质量。实现步骤为：构造等效随机稀疏收发阵列；建立回波信号采集模型；距离向压缩处理；方位向压缩处理；完成二维目标高分辨成像。本发明具有以下优点：减少阵列数目，降低硬件成本；降低了数据处理复杂度；提高了距离向和方位向分辨率。



1. 基于IFFT和混合匹配追踪的时分地基MIMO滑坡雷达成像方法，其特征在于包括以下步骤：

步骤1) 构造等效随机稀疏收发阵列；

步骤2) 构造时分地基MIMO雷达回波信号采集模型；

步骤3) 通过采集到的回波信号完成距离向压缩，并对得到的压缩数据进行合理的相位校正，消除相位的平方项，完成方位向预处理；

步骤4) 构造合适的观测矩阵和基于时延补偿因子的稀疏基，将经过距离向压缩的数据进行方位向压缩，对所有距离单元的数据进行重构处理，完成方位向数据压缩；

步骤5) 获得目标的二维高分辨成像。

2. 根据权利要求1所述的方法，其特征在于：所述步骤1) 构造等效随机稀疏收发阵列的方法为MIMO雷达是M发N收的均匀阵列，原始接收天线间隔为 $\lambda/2$ ，发射天线间隔为 $N(\lambda/2)$ ， $\lambda$ 是发射波波长，并指定接收阵列稀疏布置，从原始N个接收阵列中随机选取N'个，为保证阵列孔径长度足够大，第一个和最后一个接收天线位置不变，根据得到的N'个稀疏接收阵元和M个均匀的发射阵元，利用多项式理论得到MN'个虚拟阵元。

3. 根据权利要求1所述的方法，其特征在于：所述步骤2) 的信号为分时发射和接收步进频连续波信号。

4. 根据权利要求3所述的方法，其特征在于：所述分时发射和接收步进频连续波信号的方法包括以下步骤：

步骤2-1，由信号产生单元产生步进频连续波信号，设发射信号中单个脉冲表示为S(t)，

$$S(t) = \exp(j2\pi f_i t) \operatorname{rect}(t - iT_r),$$

$$i \in (0, 1, 2, \dots, Q-1) \quad (1),$$

其中 $f_i = f_0 + i \Delta f$ ,  $f_0$ 为脉冲起始频率,  $\Delta f$ 为频率步进量,  $\operatorname{rect}(t)$ 为单位矩形函数,  $T_r$ 为发射信号脉冲宽度,  $Q$ 为子脉冲个数；

步骤2-2，数字基带步进频信号经过数模转换后送入信号调制单元，雷达信号被调制到雷达工作频段后通过射频放大单元将信号功率放大，再由Tx分时选择器控制MIMO发射天线阵列分时将信号发射出去；

步骤2-3，分时选择器Rx控制MIMO接收天线阵列分时接收雷达回波信号，接收到的雷达回波信号非常微弱需放大后再进行正交解调，假设第n'个接收阵元接收到第m个发射阵元发射信号的回波，并将该通道称为第mn'个观测通道，将该观测通道回波信号幅度放大并经过解调采样后为，

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{mn'}(t) &= A_{mn'} \delta \exp\left(j2\pi f_i \left(-\tau_{mn'}\right)\right), \\ i &\in (0, 1, 2, \dots, Q-1), \\ \tau_{mn'} &= \frac{\sqrt{(x_0 - x_n')^2 + y_0^2} + \sqrt{(x_0 - x_m)^2 + y_0^2}}{c} \end{aligned} \quad (2),$$

其中,  $\delta$ 为目标散射系数,  $\tau_{mn'}$ 为该观测通道的时延,  $(x_0, y_0)$ 、 $(x_{n'}, 0)$ 、 $(x_m, 0)$  分别为目标和收、发天线的坐标,  $c$ 表示光速；

步骤2-4，对经过解调采样后的回波信号进行数据采集，将采集好的雷达数据送入信号

处理单元进行后续的成像处理。

5. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于:所述步骤3)距离向压缩的方法为逆傅里叶变换,并对得到的压缩数据进行合理的相位校正,消除相位的平方项,完成方位向预处理。

6. 根据权利要求5所述的方法,其特征在于:所述距离向压缩和方位向预处理的方法包括以下步骤:

步骤3-1,雷达回波信号经过解调采样后进行数据采集得到一个原始雷达数据矩阵I[MN',Q],在小间距布阵条件下,MIMO雷达阵列长度远小于监测区域目标到阵列的距离,距离徙动不明显,因此,距离向只需要进行逆傅里叶变换(IFT)即可得到较为准确的压缩数据,对I[MN',Q]矩阵按行分别进行IFT得到第mn'行数据为,

$$S_r(t_k, x_{mn'}) = \frac{A_{mn'}}{Q} \exp(-j2\pi f_0 \tau_{mn'}) \operatorname{sinc}\left(\pi B(t_k - \tau_{mn'})\right) \quad (3),$$

步骤3-2,将式(3)所示的时延曲线按幂级数展开,省略高方次项,为方便表达,把完成距离向压缩后的雷达数据变换到极坐标下表示,监测区域目标(x<sub>0</sub>,y<sub>0</sub>)的波达角设为θ,根据真实滑坡监测区域的几何特点推出θ很小,sin<sup>2</sup>θ值非常小,sin<sup>2</sup>θ/R<sub>0</sub>的值更小,可以忽略不计,时延曲线将合理的近似为,

$$\varphi_{mn'} \approx -\frac{2\pi}{\lambda} (2R_0 - \sin \theta (x_m + x_n)) - \frac{\pi}{\lambda R_0} (x_m^2 + x_n^2) \quad (4),$$

$$\text{其中, } R_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}, \quad \sin \theta = x_0 / R_0;$$

步骤3-3,对比传统的线性阵列,MIMO天线阵列稀疏布置的情况下会存在相位不连续现象,为提高雷达数据方位向压缩的质量,在方位向压缩之前进行预处理,即采用相位相乘的方法消除式(4)的第二项,因为R<sub>0</sub>是个变量,会造成算法的运算量巨大,所以对式(4)的第二项进行近似的校正,把式(4)第二项中的R<sub>0</sub>替换为R<sub>1</sub>,R<sub>1</sub>表示监测区域中心到雷达天线阵列坐标中心的距离,为一常量,因此对式(3)乘以校正因子

$S_{jiao,mn'} = \exp\left(j\frac{\pi}{\lambda R_1}(x_m^2 + x_n^2)\right)$ 完成方位向压缩预处理,那么得到,

$$S'_r(t_k, x_{mn'}) = \frac{A_{mn'}}{Q} \exp\left(-j2\pi f_0 \frac{2R_0}{c}\right) \exp\left(j2\pi f_0 \frac{\sin \theta (x_m + x_n)}{c}\right) \operatorname{sinc}\left(\pi B(t_k - \tau_{mn'})\right) \quad (5).$$

7. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于:所述步骤4)方位向压缩的方法为混合匹配追踪算法,采用的是基于时延补偿因子的稀疏基。

8. 根据权利要求7所述的方法,其特征在于:所述基于时延补偿因子的稀疏基的方法包括以下步骤:

步骤4-1,由步骤3处理得到的所有观测通道数据集合X={S<sub>r</sub>(t<sub>k</sub>, x<sub>1</sub>)<sup>H</sup>, ..., S<sub>r</sub>(t<sub>k</sub>, x<sub>MN'</sub>)<sup>H</sup>}可看作一个大小为Q×MN'的矩阵,其中Q为距离单元数,MN'为等效稀疏收发虚拟天线个数,假设等效均匀收发天线得到的回波数据矩阵记为Y,那么X的每一行均可看作Y每一行的低维观测,其中观测矩阵Φ={Φ<sub>u,v</sub>}为广义单位阵,且

$$\phi_{u,v} = \begin{cases} 1, & v = \delta_u, u = 1, \dots, MN', \delta_u \in 1, \dots, MN \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6),$$

$\Phi$  矩阵由  $MN'$  行  $MN$  列元素构成, 矩阵的每一行除了第  $\delta_u$  个元素为 1 外, 其余的全为 0,  $\delta_u$  由等效稀疏收发天线位置决定;

步骤4-2, 根据滑坡监测区域几何形状, 得出监测区域波达角的覆盖范围, 雷达监测区域距离向从  $y_{\min}$  到  $y_{\max}$ , 方位向从  $-x$  到  $x$ , 则波达角的范围为  $(-\arctan(x/y_{\min}), \arctan(x/y_{\min}))$ , 将其均分为  $MN$  份, 得  $\theta_1$  如式,

$$\theta_l = \frac{2\arctan\left(\frac{x}{R_{\min}}\right)}{MN - 1} l - \arctan\left(\frac{x}{R_{\min}}\right)$$

$$l \in (0, 1, 2, \dots, MN - 1) \quad (7),$$

令  $W_{1,mn} = \exp(-j2\pi f_0 \sin \theta_1 (x_m + x_n) / c)$ , 可由  $W_{1,mn}$  组建  $MN$  行  $MN$  列时延补偿因子矩阵如式,

$$\Psi = \begin{bmatrix} W_{0,11} & W_{1,11} & \dots & W_{l,11} & \dots & W_{MN-1,11} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ W_{0,mn} & W_{1,mn} & \dots & W_{l,mn} & \dots & W_{MN-1,mn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ W_{0,MN} & W_{1,MN} & \dots & W_{l,MN} & \dots & W_{MN-1,MN} \end{bmatrix} \quad (8),$$

时延补偿因子与信号本身在某种程度上存在一一对应的关系, 很全面的反应了散射点的特征信息, 故可以把其作为稀疏变换的稀疏基进行后续的数据压缩处理;

步骤4-3, 本文在构造稀疏接收阵列时, 接收天线是随机选取的, 等效的虚拟收发阵元的位置也是随机的, 满足广义单位阵  $\Phi$  与  $\Psi$  不相干的要求, 因此  $\Phi \cdot \Psi$  满足 RIP (Restricted Isometry Property) 条件, 由以上构造的稀疏变换矩阵和观测矩阵, 利用混合正交匹配追踪算法对  $X$  的第  $q$  行求解以下问题:

$$\Theta = \arg \min \|\Theta\|_0 \text{ 满足 } X_q^H = \Phi \Psi \Theta_q \quad (9),$$

然后对所有的  $q = 1, 2, \dots, Q$  求解式(9)问题, 即可得到二维像;

步骤4-4, 利用混合匹配追踪算法对式(9)进行求解的具体步骤如下。

9. 根据权利要求8所述的方法, 其特征在于: 所述混合匹配追踪算法求解的方法包括以下步骤:

步骤4-4-1, 采用标准正交匹配追踪算法得到稀疏解的初值,

$$\delta_{\text{omp}} = \text{omp}(x_q, T, K) \quad (10),$$

步骤4-4-2, 定义函数表示  $\text{max\_ind}(y, P)$ : 返回  $P$  索引, 找到向量  $y$  中幅值最大的元素所在的位置, 由式(10)得到的稀疏解初值可定义初始支撑集为,

$$\Lambda_{\text{old}} = \text{m2x\_ind}(|\delta_{\text{omp}}|, K) \quad (11),$$

步骤4-4-3, 由式(11)得到的初始支撑集可以将残差初始化为,

$$\gamma_{\text{old}} = x_q - T_{A_{\text{old}}} \left( \left( T_{A_{\text{old}}} \right)^H T_{A_{\text{old}}} \right)^{-1} \left( T_{A_{\text{old}}} \right)^H x_q \quad (12),$$

其中  $x_q$  为回波采样向量, 恢复矩阵  $T = \Phi \Psi$ ,  $K$  为稀疏度值;

步骤4-4-4, 依然采用标准正交匹配追踪算法对式(12)所求的残差进行求值, 可以得到,

$$\delta_{\text{omp}}^n = \text{omp}(\gamma_{\text{old}}, T, K) \quad (13),$$

步骤4-4-5, 利用式(13)构造 $\max\_ind\left(\left|\delta_{omp}^n\right|, K\right)$ 得到K个支撑集, 和 $\Lambda_{old}$ 一起将支撑集扩充至2K;

步骤4-4-6, 将原始测量信号向这2K个支撑集构成的子空间投影, 可以得到更新的支撑集为,

$$\mathcal{A}_{new} = \max\_ind \left[ \left[ \left( \mathbf{T}_{\mathcal{A}_{temp}} \right)^H \mathbf{T}_{\mathcal{A}_{temp}} \right]^{-1} \left( \mathbf{T}_{\mathcal{A}_{temp}} \right)^H x_q \middle|, K \right] \quad (14),$$

步骤4-4-7, 利用式(14)得到的新的支撑集对残差进行更新,

$$\gamma_{new} = x_q - \mathbf{T}_{\mathcal{A}_{new}} \left( \left( \mathbf{T}_{\mathcal{A}_{new}} \right)^H \mathbf{T}_{\mathcal{A}_{new}} \right)^{-1} \left( \mathbf{T}_{\mathcal{A}_{new}} \right)^H x_q \quad (15),$$

步骤4-4-8, 当残差满足范数关系 $\|\gamma_{old}\|_2^2 > \|\gamma_{new}\|_2^2$ 时, 则令 $\gamma_{old} = \gamma_{new}$ 和 $\Lambda_{old} = \Lambda_{new}$ , 然后跳回(4d5)进行迭代; 否则, 迭代停止, 计算和输出 $\tilde{\sigma}$ ,

$$\tilde{\sigma}_{\Lambda_{old}} = \left[ \left( \mathbf{T}_{\mathcal{A}_{old}} \right)^H \mathbf{T}_{\mathcal{A}_{old}} \right]^{-1} \left( \mathbf{T}_{\mathcal{A}_{old}} \right)^H x_q \quad (16).$$

## 基于IFFT和混合匹配追踪的时分地基MIMO滑坡雷达成像方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于山体滑坡监测雷达技术领域,涉及基于IFFT和混合匹配追踪的时分地基MIMO滑坡雷达成像方法。

### 背景技术

[0002] 山体滑坡是常见的地质灾害之一,对铁路、公路建设及维护和工农业生产造成了巨大的危害。据不完全统计,每年自然灾害造成的人员死亡和失踪人数中约有六分之一来自于滑坡灾害,给人民群众生命财产安全造成巨大损失。因此山体滑坡实时监测研究是近年来灾害预防领域重要的研究方向,也具有现实意义。

[0003] 地基雷达由于其稳定可控且可长期重复观测的特点,近年来已成为探测露天矿边坡形变、城区沉降、山体滑坡等领域的重要应用方向。本发明主要针对山体滑坡监测的关键技术——地基雷达成像进行研究。现有两大典型成像系统应用在山体滑坡监测领域:意大利的Joint Research Centre研制的LISA(Linear SAR)成像系统、佛罗伦萨大学和意大利IDS公司合作研制的GBInSAR(Ground Based InSAR)系统IBIS(Image By Interferometry Survey)。这些成像系统通过雷达天线在水平直轨道运动获得较高的方位向分辨率,但是天线运动的同时会影响测量的精度,也限制了雷达数据的采集速度。

[0004] MIMO雷达利用其多发多收体制形成的虚拟天线阵元替代实际天线阵元,可以很好的解决合成孔径的问题。然而传统的成像算法,如距离多普勒算法和CS(Chirp Scaling)算法由于雷达结构的特殊性不再适用。后向投影算法,又称BP成像算法,是一种时域成像算法,具有很强的适应性,不会束缚MIMO雷达天线阵列的自由布阵。BP算法大量的运用在MIMO雷达成像,然而标准BP算法的成像效率较低。把波束形成算法引入BP成像中,可以进一步提高成像算法效率,但需要的天线数目仍然较多。从现有的文献来看,在山体滑坡监测雷达领域,采用的仍是经典的均匀线性布阵方式,稀疏阵列下的地基MIMO雷达成像技术仍待进一步研究。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的是提供基于IFFT和混合匹配追踪的时分地基MIMO滑坡雷达成像方法,用于解决现有山体滑坡监测领域成像方法所用天线数目多、数据处理复杂度高的问题,并针对多目标成像的伪影点问题引入混合匹配追踪算法,大大改善成像质量。

[0006] 其原理是构造等效随机稀疏收发阵列,通过分时发射和接收步进频连续波信号建立时分地基MIMO雷达回波信号采集模型,对采集到的回波信号通过逆傅里叶变换完成距离向压缩,构造合适的测量矩阵和基于时延补偿因子的稀疏基,利用混合匹配追踪算法对距离压缩完的数据进行方位向压缩实现目标的二维高分辨成像。

[0007] 为实现上述目的,本发明采用的以下技术方案。

[0008] 基于IFFT和混合匹配追踪的时分地基MIMO滑坡雷达成像方法,包括以下步骤:

[0009] 步骤1) 构造等效随机稀疏收发阵列,所述构造等效随机稀疏收发阵列的方法为

MIMO雷达是M发N收的均匀阵列,原始接收天线间隔为 $\lambda/2$ ,发射天线间隔为 $N(\lambda/2)$ , $\lambda$ 是发射波长,并指定接收阵列稀疏布置,从原始N个接收阵列中随机选取N'个,为保证阵列孔径长度足够大,第一个和最后一个接收天线位置不变,根据得到的N'个稀疏接收阵元和M个均匀的发射阵元,利用多项式理论得到MN'个虚拟阵元;

[0010] 步骤2)构造时分地基MIMO雷达回波信号采集模型,所述的信号为分时发射和接收步进频连续波信号,所述分时发射和接收步进频连续波信号的方法包括以下步骤:

[0011] 步骤2-1,由信号产生单元产生步进频连续波信号,设发射信号中单个脉冲表示为 $S(t)$ ,

$$[0012] S(t) = \exp(j2\pi f_i t) \text{rect}(t - iT_r), \\ i \in \{0, 1, 2, \dots, Q-1\} \quad (1),$$

[0013] 其中 $f_i = f_0 + i \Delta f$ , $f_0$ 为脉冲起始频率, $\Delta f$ 为频率步进量, $\text{rect}(t)$ 为单位矩形函数, $T_r$ 为发射信号脉冲宽度,Q为子脉冲个数;

[0014] 步骤2-2,数字基带步进频信号经过数模转换后送入信号调制单元,雷达信号被调制到雷达工作频段后通过射频放大单元将信号功率放大,再由Tx分时选择器控制MIMO发射天线阵列分时将信号发射出去;

[0015] 步骤2-3,分时选择器Rx控制MIMO接收天线阵列分时接收雷达回波信号,接收到的雷达回波信号非常微弱需放大后再进行正交解调,假设第n'个接收阵元接收到第m个发射阵元发射信号的回波,并将该通道称为第mn'个观测通道,将该观测通道回波信号幅度放大并经过解调采样后为,

$$[0016] \hat{S}_{mn'}(t) = A_{mn'} \delta \exp(j2\pi f_i(-\tau_{mn'})), \\ i \in \{0, 1, 2, \dots, Q-1\}, \\ \tau_{mn'} = \frac{\sqrt{(x_0 - x_n')^2 + y_0^2} + \sqrt{(x_0 - x_m)^2 + y_0^2}}{c} \quad (2),$$

[0017] 其中, $\delta$ 为目标散射系数, $\tau_{mn'}$ 为该观测通道的时延, $(x_0, y_0)$ 、 $(x_{n'}, 0)$ 、 $(x_m, 0)$ 分别为目标和收、发天线的坐标,c表示光速;

[0018] 步骤2-4,对经过解调采样后的回波信号进行数据采集,将采集好的雷达数据送入信号处理单元进行后续的成像处理;

[0019] 步骤3)通过采集到的回波信号完成距离向压缩,并对得到的压缩数据进行合理的相位校正,消除相位的平方项,完成方位向预处理,所述距离向压缩的方法为逆傅里叶变换,并对得到的压缩数据进行合理的相位校正,消除相位的平方项,完成方位向预处理,所述方位向预处理的方法包括以下步骤:

[0020] 步骤3-1,雷达回波信号经过解调采样后进行数据采集得到一个原始雷达数据矩阵I[MN',Q],在小间距布阵条件下,MIMO雷达阵列长度远小于监测区域目标到阵列的距离,距离徙动不明显,因此,距离向只需要进行逆傅里叶变换(IFFT)即可得到较为准确的压缩数据,对I[MN',Q]矩阵按行分别进行IFFT得到第mn'行数据为,

$$[0021] S_r(t_k, x_{mn'}) = \frac{A_{mn'}}{Q} \exp(j2\pi f_0 \tau_{mn'}) \text{sinc}(\pi B(t_k - \tau_{mn'})) \quad (3),$$

[0022] 步骤3-2,将式(3)所示的时延曲线按幂级数展开,省略高方次项,为方便表达,把

完成距离向压缩后的雷达数据变换到极坐标下表示, 监测区域目标  $(x_0, y_0)$  的波达角设为  $\theta$ , 根据真实滑坡监测区域的几何特点推出  $\theta$  很小,  $\sin^2 \theta$  值非常小,  $\sin^2 \theta / R_0$  的值更小, 可以忽略不计, 时延曲线将合理的近似为,

$$[0023] \quad \varphi_{mn} \approx -\frac{2\pi}{\lambda} \left( 2R_0 - \sin \theta (x_m + x_n) \right) - \frac{\pi}{\lambda R_0} (x_m^2 + x_n^2) \quad (4),$$

$$[0024] \quad \text{其中, } R_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}, \quad \sin \theta = x_0 / R_0,$$

[0025] 步骤3-3, 对比传统的线性阵列, MIMO天线阵列稀疏布置的情况下会存在相位不连续现象, 为提高雷达数据方位向压缩的质量, 在方位向压缩之前进行预处理, 即采用相位相乘的方法消除式(4)的第二项, 因为  $R_0$  是个变量, 会造成算法的运算量巨大, 所以对式(4)的第二项进行近似的校正, 把式(4) 第二项中的  $R_0$  替换为  $R_1$ ,  $R_1$  表示监测区域中心到雷达天线阵列坐标中心的距离, 为一常量, 因此对式(3)乘以校正因子  $S_{jiao,mn} = \exp \left( j \frac{\pi}{\lambda R_1} (x_m^2 + x_n^2) \right)$  完成方位向压缩预处理, 那么得到,

$$[0026] \quad S_r(t_k, x_{mn}) = \frac{A_{mn}}{Q} \exp \left( -j 2\pi f_0 \frac{2R_0}{c} \right) \exp \left( j 2\pi f_0 \frac{\sin \theta (x_m + x_n)}{c} \right) \sin \left( \pi B(t_k - \tau_{mn}) \right) \quad (5);$$

[0027] 步骤4) 构造合适的观测矩阵和基于时延补偿因子的稀疏基, 将经过距离向压缩的数据进行方位向压缩, 对所有距离单元的数据进行重构处理, 完成方位向数据压缩, 所述方位向压缩的方法为混合匹配追踪算法, 所述基于时延补偿因子的稀疏基的方法包括以下步骤:

$$[0028] \quad \text{步骤4-1, 由步骤3处理得到的所有观测通道数据集合 } \mathbf{X} = \left\{ S_r(t_k, x_1)^H, \dots, S_r(t_k, x_{MN})^H \right\}$$

可看作一个大小为  $Q \times MN'$  的矩阵, 其中  $Q$  为距离单元数,  $MN'$  为等效稀疏收发虚拟天线个数, 假设等效均匀收发天线得到的回波数据矩阵记为  $\mathbf{Y}$ , 那么  $\mathbf{X}$  的每一行均可看作  $\mathbf{Y}$  每一行的低维观测, 其中观测矩阵  $\Phi = \{\Phi_{u,v}\}$  为广义单位阵, 且

$$[0029] \quad \Phi_{u,v} = \begin{cases} 1, & v = \delta_u, u = 1, \dots, MN', \delta_u \in 1, \dots, MN \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6),$$

[0030]  $\Phi$  矩阵由  $MN'$  行  $MN$  列元素构成, 矩阵的每一行除了第  $\delta_u$  个元素为 1 外, 其余的全为 0,  $\delta_u$  由等效稀疏收发天线位置决定;

[0031] 步骤4-2, 根据滑坡监测区域几何形状, 得出监测区域波达角的覆盖范围, 雷达监测区域距离向从  $y_{min}$  到  $y_{max}$ , 方位向从  $-x$  到  $x$ , 则波达角的范围为  $(-\arctan(x/y_{min}), \arctan(x/y_{min}))$ , 将其均分为  $MN$  份, 得  $\theta_1$  如式,

$$[0032] \quad \theta_l = \frac{2\arctan \left( \frac{x}{R_{min}} \right)}{MN - 1} l - \arctan \left( \frac{x}{R_{min}} \right) \\ l \in (0, 1, 2, \dots, MN - 1) \quad (7),$$

[0033] 令  $W_{1,mn} = \exp(-j 2\pi f_0 \sin \theta_1 (x_m + x_n) / c)$ , 可由  $W_{1,mn}$  组建  $MN$  行  $MN$  列时延补偿因子矩阵如式,

$$[0034] \quad \Psi = \begin{bmatrix} W_{0,11} & W_{1,11} & \cdots & W_{l,11} & \cdots & W_{MN-1,11} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{0,mn} & W_{1,mn} & \cdots & W_{l,mn} & \cdots & W_{MN-1,mn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{0,MN} & W_{1,MN} & \cdots & W_{l,MN} & \cdots & W_{MN-1,MN} \end{bmatrix} \quad (8),$$

[0035] 时延补偿因子与信号本身在某种程度上存在一一对应的关系,很全面的反应了散射点的特征信息,故可以把其作为稀疏变换的稀疏基进行后续的数据压缩处理;

[0036] 步骤4-3,本文在构造稀疏接收阵列时,接收天线是随机选取的,等效的虚拟收发阵元的位置也是随机的,满足广义单位阵 $\Phi$ 与 $\Psi$ 不相干的要求,因此 $\Phi \cdot \Psi$ 满足RIP (Restricted Isometry Property) 条件,由以上构造的稀疏变换矩阵和观测矩阵,利用混合正交匹配追踪算法对X的第q行求解以下问题:

$$[0037] \quad \Theta = \arg \min \|\Theta\|_0 \text{ 满足 } \mathbf{X}_q^H = \Phi \Psi \Theta_q \quad (9),$$

[0038] 然后对所有的 $q=1, 2, \dots, Q$ 求解式(9)问题,即可得到二维像,所述混合匹配追踪算法求解的方法包括以下步骤:

[0039] 步骤4-4-1,采用标准正交匹配追踪算法得到稀疏解的初值,

$$[0040] \quad \delta_{\text{omp}} = \text{omp}(\mathbf{x}_q, T, K) \quad (10),$$

[0041] 步骤4-4-2,定义函数表示max\_ind(y, P):返回P索引,找到向量y中幅值最大的元素所在的位置,由式(10)得到的稀疏解初值可定义初始支撑集为,

$$[0042] \quad \Lambda_{\text{old}} = \text{max\_ind}(|\delta_{\text{omp}}|, K) \quad (11),$$

[0043] 步骤4-4-3,由式(11)得到的初始支撑集可以将残差初始化为,

$$[0044] \quad \gamma_{\text{old}} = \mathbf{x}_q - \mathbf{T}_{A_{\text{old}}} \left( \left( \mathbf{T}_{A_{\text{old}}} \right)^H \mathbf{T}_{A_{\text{old}}} \right)^{-1} \left( \mathbf{T}_{A_{\text{old}}} \right)^H \mathbf{x}_q \quad (12),$$

[0045] 其中 $\mathbf{x}_q$ 为回波采样向量,恢复矩阵 $T = \Phi \Psi$ ,K为稀疏度值;

[0046] 步骤4-4-4,依然采用标准正交匹配追踪算法对式(12)所求的残差进行求值,可以得到,

$$[0047] \quad \delta_{\text{omp}}^n = \text{omp}(\gamma_{\text{old}}, T, K) \quad (13),$$

[0048] 步骤4-4-5,利用式(13)构造max\_ind(| $\delta_{\text{omp}}^n$ |, K)得到K个支撑集,和 $\Lambda_{\text{old}}$ 一起将支撑集扩充至2K;

[0049] 步骤4-4-6,将原始测量信号向这2K个支撑集构成的子空间投影,可以得到更新的支撑集为,

$$[0050] \quad A_{\text{new}} = \text{max\_ind} \left( \left( \mathbf{T}_{A_{\text{temp}}} \right)^H \mathbf{T}_{A_{\text{temp}}} \right)^{-1} \left( \mathbf{T}_{A_{\text{temp}}} \right)^H \mathbf{x}_q, K \right) \quad (14),$$

[0051] 步骤4-4-7,利用式(14)得到的新的支撑集对残差进行更新,

$$[0052] \quad \gamma_{\text{new}} = \mathbf{x}_q - \mathbf{T}_{A_{\text{new}}} \left( \left( \mathbf{T}_{A_{\text{new}}} \right)^H \mathbf{T}_{A_{\text{new}}} \right)^{-1} \left( \mathbf{T}_{A_{\text{new}}} \right)^H \mathbf{x}_q \quad (15),$$

[0053] 步骤4-4-8,当残差满足范数关系 $\|\gamma_{\text{old}}\|_2^2 > \|\gamma_{\text{new}}\|_2^2$ 时,则令 $\gamma_{\text{old}} = \gamma_{\text{new}}$ 和 $\Lambda_{\text{old}} = \Lambda_{\text{new}}$ ,

然后跳回(4d5)进行迭代;否则,迭代停止,计算和输出 $\tilde{\sigma}_q$ ,

$$[0054] \quad \tilde{\sigma}_{A_{\text{old}}} = \left[ \left( \mathbf{T}_{A_{\text{old}}} \right)^H \mathbf{T}_{A_{\text{old}}} \right]^{-1} \left( \mathbf{T}_{A_{\text{old}}} \right)^H \mathbf{x}_q \quad (16);$$

[0055] 步骤5)获得目标的二维高分辨成像。

[0056] 结合仿真实验,本发明的技术效果体现为:

[0057] 根据山体滑坡的实际成像场景设置雷达仿真参数,雷达发射步进频信号,载频15GHz,带宽300MHz,子脉冲数4096个,这里按照步骤1稀疏布阵方法布置6发25收的阵列,均匀接收阵元的间隔为 $\lambda/2$ ,发射阵元的间隔为 $50 \times (\lambda/2)$ ,阵列稀疏度为50%,雷达成像区域为距离向从1000m到2000m,方位向为-150m到150m,点目标的散射系数都设为1,附加噪声为加性高斯白噪声,信噪比为10dB;

[0058] 首先分析单点目标成像,目标方位向为0m,距离向为1500m,传统波束成形算法、标准正交匹配追踪算法以及本发明提出的算法成像结果,三种方法均对单点聚焦正确成像,表明对于单点目标成像,标准正交匹配追踪算法和本发明成像效果一致,明显优于传统波束形成算法,标准正交匹配追踪算法对于单点目标成像没有伪影点出现;

[0059] 其次分析多点目标成像,目标点位置信息表明了标准正交匹配追踪算法和本发明在稀疏阵列下多点目标聚焦成像的效果优于传统波束成形算法,但是存在明显的伪影点,影响多个目标之间的区分,这是由于标准正交匹配追踪算法在基信号选择时只能扩充而不能去除的策略造成的,本发明与标准正交匹配追踪算法不同之处在于迭代过程中结合了子空间追踪算法,去除了在前面迭代过程中被选择的病态索引,因此本发明的成像效果更好;

[0060] 对比传统波束形成算法、标准正交匹配追踪算法、本发明的分辨率和目标杂波比(TCR)指标对比分析,目标杂波比对应用来衡量目标在背景杂波中的凸显程度,三种方法的距离向分辨率基本相同,这是因为距离向分辨率只与发射信号带宽有关,标准正交匹配追踪算法和本发明的方位向分辨率明显优于传统波束形成算法,这是因为阵列的稀疏先验信息用在压缩感知理论可以大大改善成像的质量,本发明的TCR值最高,点目标的散射特性保存最好,比标准正交匹配追踪算法的TCR值高4dB左右,极大的改善了多目标成像的伪影点问题。

[0061] 与现有技术相比,本发明具有以下优点:

[0062] (1)在山体滑坡雷达监测领域,采用的仍是传统的均匀线性布阵方式,本发明采用稀疏布阵方式,大大减少了收发阵列的数目,降低了硬件成本;

[0063] (2)本发明采用的是较少的发射阵列均匀布阵,接收阵列在均匀布阵的基础上随机选取一半的位置数目作为接收阵列,从一定程度上降低了数据处理复杂度;

[0064] (3)在雷达天线数目低于传统均匀阵列的情况下,实现高分辨率成像。本发明通过发射步进频连续波信号获得高的距离向分辨率,方位向引入混合匹配追踪算法大大改善了多目标成像的伪影点问题,进一步提高了方位向分辨率。

#### 附图说明:

[0065] 图1为实施例MIMO稀疏布阵结构示意图;

[0066] 图2为实施例稀疏阵列单点目标传统波束形成算法成像结果;

- [0067] 图3为实施例稀疏阵列单点目标标准正交匹配追踪算法成像结果；
- [0068] 图4为实施例稀疏阵列单点目标本发明算法成像结果；
- [0069] 图5为实施例稀疏阵列多目标传统波束形成算法成像结果；
- [0070] 图6为实施例稀疏阵列多目标标准正交匹配追踪算法成像结果；
- [0071] 图7为实施例稀疏阵列多目标本发明算法成像结果。

## 具体实施方式

[0072] 本发明通过实施例，结合说明书附图对本发明内容作进一步详细说明，但不是对本发明的限定。

### 实施例

[0074] 基于IFFT和混合匹配追踪的时分地基MIMO滑坡雷达成像方法：

[0075] 步骤1，构造等效随机稀疏收发阵列，

[0076] 根据山体滑坡监测场景设计满足要求的收发阵列，传统MIMO雷达是M发N收的均匀阵列，原始接收天线间隔为 $\lambda/2$ ，发射天线间隔为 $N(\lambda/2)$ ， $\lambda$ 是发射波波长，并指定接收阵列稀疏布置，从原始N个接收阵列中随机选取 $N'$ 个，为保证阵列孔径长度足够大，第一个和最后一个接收天线位置不变。根据得到的 $N'$ 个稀疏接收阵元和M个均匀的发射阵元，利用多项式理论得到 $MN'$ 个虚拟阵元，以2发6收的阵列为例，示意图如图1所示；

[0077] 步骤2，构造时分地基MIMO雷达回波信号采集模型，

[0078] 步骤2-1，由信号产生单元产生步进频连续波信号，设发射信号中单个脉冲表示为 $S(t)$ ，如(1)式，

$$[0079] S(t) = \exp(j2\pi f_i t) \text{rect}(t - iT_r), \\ i \in \{0, 1, 2, \dots, Q-1\} \quad (1),$$

[0080] 其中 $f_i = f_0 + i \Delta f$ ， $f_0$ 为脉冲起始频率， $\Delta f$ 为频率步进量， $\text{rect}(t)$ 为单位矩形函数， $T_r$ 为发射信号脉冲宽度，Q为子脉冲个数；

[0081] 步骤2-2，数字基带步进频信号经过数模转换后送入信号调制单元，雷达信号被调制到雷达工作频段后通过射频放大单元将信号功率放大，再由Tx分时选择器控制MIMO发射天线阵列分时将信号发射出去，

[0082] 步骤2-3，分时选择器Rx控制MIMO接收天线阵列分时接收雷达回波信号，接收到的雷达回波信号非常微弱需放大后再进行正交解调，假设第 $n'$ 个接收阵元接收到第 $m$ 个发射阵元发射信号的回波，并将该通道称为第 $mn'$ 个观测通道，将该观测通道回波信号幅度放大并经过解调采样后为，

$$[0083] \tilde{S}_{mn'}(t) = A_{mn'} \delta \exp(j2\pi f_i (-\tau_{mn'})), \\ i \in \{0, 1, 2, \dots, Q-1\}, \\ \tau_{mn'} = \frac{\sqrt{(x_b - x_n')^2 + y_b^2} + \sqrt{(x_b - x_m)^2 + y_b^2}}{c} \quad (2),$$

[0084] 其中， $\delta$ 为目标散射系数， $\tau_{mn'}$ 为该观测通道的时延， $(x_0, y_0)$ 、 $(x_{n'}, 0)$ 、 $(x_m, 0)$ 分别为目标和收、发天线的坐标，c表示光速；

[0085] 步骤2-4，对经过解调采样后的回波信号进行数据采集，将采集好的雷达数据送入

信号处理单元进行后续的成像处理；

[0086] 步骤3)通过采集到的回波信号进行逆傅里叶变换完成距离向压缩，并对得到的压缩数据进行合理的相位校正，消除相位的平方项，完成方位向预处理，

[0087] 传统MIMO雷达需要设计具有良好正交性的雷达信号，接收端通过设计相应的匹配滤波器进行匹配滤波，分离出MIMO雷达天线阵列所形成的多个观测通道信号，分选出各雷达各观测信号的同时，也实现了雷达数据距离向压缩，而本发明采用时分MIMO雷达体制，雷达通过时分方式发射和接收雷达信号，具体雷达工作方式在步骤2中进行了阐述，基于时分MIMO技术的地基雷达接收完数据后，各通道数据被很好的分离开来，但是距离向雷达数据还没有进行压缩处理，步进频连续波是一个频域信号，变换到时域可以形成一个sinc函数信号，即可以形成一个窄脉冲，斜距不同的目标窄脉冲出现的位置也不一样，从而在距离向分离出不同目标，所以本发明采用逆傅立叶变换算法对雷达数据进行距离向压缩，

[0088] 步骤3-1，雷达回波信号经过解调采样后进行数据采集得到一个原始雷达数据矩阵I[MN',Q]，在小间距布阵条件下，MIMO雷达阵列长度远小于监测区域目标到阵列的距离，距离徙动不明显，因此，距离向只需要进行逆傅里叶变换(IFT)即可得到较为准确的压缩数据，对I[MN',Q]矩阵按行分别进行 IFFT得到第mn'行数据为，

$$[0089] S_r(t_k, x_{mn'}) = \frac{A_{mn'}}{Q} \exp\left(-j2\pi f_0 \tau_{mn'}\right) \text{sinc}\left(\pi B(t_k - \tau_{mn'})\right) \quad (3),$$

[0090] 步骤3-2，将式(3)所示的时延曲线按幂级数展开，省略高方次项，为方便表达，把完成距离向压缩后的雷达数据变换到极坐标下表示，监测区域目标(x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>)的波达角设为θ，根据真实滑坡监测区域的几何特点推出θ很小，sin<sup>2</sup>θ值非常小，sin<sup>2</sup>θ/R<sub>0</sub>的值更小，可以忽略不计，时延曲线将合理的近似为，

$$[0091] \varphi_{mn'} \approx -\frac{2\pi}{\lambda} (2R_0 - \sin\theta(x_m + x_n)) - \frac{\pi}{\lambda R_0} (x_m^2 + x_n^2) \quad (4),$$

[0092] 其中，R<sub>0</sub> =  $\sqrt{x_0^2 + y_0^2}$ ， sin θ = x<sub>0</sub> / R<sub>0</sub>；

[0093] 步骤3-3，对比传统的线性阵列，MIMO天线阵列稀疏布置的情况下会存在相位不连续现象，为提高雷达数据方位向压缩的质量，在方位向压缩之前进行预处理，即采用相位相乘的方法消除式(4)的第二项，因为R<sub>0</sub>是个变量，会造成算法的运算量巨大，所以对式(4)的第二项进行近似的校正，把式(4)第二项中的R<sub>0</sub>替换为R<sub>1</sub>，R<sub>1</sub>表示监测区域中心到雷达天线阵列坐标中心的距离，为一常量，因此对式(3)乘以校正因子S<sub>jiao,mn'</sub> = exp(j  $\frac{\pi}{\lambda R_1} (x_m^2 + x_n^2)$ )完成

方位向压缩预处理，那么得到，

$$[0094] S_r(t_k, x_{mn'}) = \frac{A_{mn'}}{Q} \exp\left(-j2\pi f_0 \frac{2R_0}{c}\right) \exp\left(j2\pi f_0 \frac{\sin\theta(x_m + x_n)}{c}\right) \text{sinc}\left(\pi B(t_k - \tau_{mn'})\right) \quad (5);$$

[0095] 步骤4)构造合适的观测矩阵和基于时延补偿因子的稀疏基，将经过距离向压缩的数据进行方位向压缩，

[0096] 若等效的虚拟收发天线是均匀布置的，在方位向用传统的波束形成算法进行数据压缩，即可得到高分辨率的图像，但本发明等效的虚拟收发天线是稀疏布置的，直接运用传

统方法就会导致旁瓣很高,由于对山体滑坡监测区域目标成像时,聚焦性强的目标只占据监测区域的极小部分,满足压缩感知理论的稀疏性要求,稀疏阵列可认为是原始均匀阵列的低维观测,因此本发明结合压缩感知理论对方位向数据进行压缩处理,针对多目标的伪影点问题,引入混合匹配追踪算法,既保证了基信号选择的正交性又对支撑集选取过程进行回溯优化,大大改善了传统正交匹配追踪(Orthogonal Matching Pursuit,OMP)算法的成像质量,

[0097] 步骤4-1,由步骤3处理得到的所有观测通道数据集合 $\mathbf{X} = \left\{ S_r(t_k, x_1)^H, \dots, S_r(t_k, x_{MN'})^H \right\}$

可看作一个大小为 $Q \times MN'$ 的矩阵,其中 $Q$ 为距离单元数, $MN'$ 为等效稀疏收发虚拟天线个数,假设等效均匀收发天线得到的回波数据矩阵记为 $\mathbf{Y}$ ,那么 $\mathbf{X}$ 的每一行均可看作 $\mathbf{Y}$ 每一行的低维观测,其中观测矩阵 $\Phi = \{\Phi_{u,v}\}$ 为广义单位阵,且

$$[0098] \quad \Phi_{u,v} = \begin{cases} 1, & v = \delta_u, u = 1, \dots, MN', \delta_u \in 1, \dots, MN \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6),$$

[0099]  $\Phi$ 矩阵由 $MN'$ 行 $MN$ 列元素构成,矩阵的每一行除了第 $\delta_u$ 个元素为1外,其余的全为0, $\delta_u$ 由等效稀疏收发天线位置决定;

[0100] 步骤4-2,根据滑坡监测区域几何形状,得出监测区域波达角的覆盖范围,雷达监测区域距离向从 $y_{\min}$ 到 $y_{\max}$ ,方位向从 $-x$ 到 $x$ ,则波达角的范围为 $(-\arctan(x/y_{\min}), \arctan(x/y_{\min}))$ ,将其均分为 $MN$ 份,得 $\theta_i$ 如式,

$$[0101] \quad \theta_i = \frac{2\arctan\left(\frac{x}{R_{\min}}\right)}{MN - 1} i - \arctan\left(\frac{x}{R_{\min}}\right) \quad i \in (0, 1, 2, \dots, MN - 1) \quad (7),$$

[0102] 令 $W_{1,mn} = \exp(-j2\pi f_0 \sin\theta_1 (x_m + x_n) / c)$ ,可由 $W_{1,mn}$ 组建 $MN$ 行 $MN$ 列时延补偿因子矩阵如式,

$$[0103] \quad \Psi = \begin{bmatrix} W_{0,11} & W_{1,11} & \cdots & W_{l,11} & \cdots & W_{MN-1,11} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{0,mn} & W_{1,mn} & \cdots & W_{l,mn} & \cdots & W_{MN-1,mn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{0,MN} & W_{1,MN} & \cdots & W_{l,MN} & \cdots & W_{MN-1,MN} \end{bmatrix} \quad (8),$$

[0104] 时延补偿因子与信号本身在某种程度上存在一一对应的关系,很全面的反应了散射点的特征信息,故可以把其作为稀疏变换的稀疏基进行后续的数据压缩处理;

[0105] 步骤4-3,本文在构造稀疏接收阵列时,接收天线是随机选取的,等效的虚拟收发阵元的位置也是随机的,满足广义单位阵 $\Phi$ 与 $\Psi$ 不相干的要求,因此 $\Phi \cdot \Psi$ 满足RIP(Restricted Isometry Property)条件,由以上构造的稀疏变换矩阵和观测矩阵,利用混合正交匹配追踪算法对 $\mathbf{X}$ 的第 $q$ 行求解以下问题,

$$[0106] \quad \Theta_q = \arg \min \|\Theta\|_0 \text{ 满足 } \mathbf{X}_q^H = \Phi \Psi \Theta_q \quad (9),$$

[0107] 然后对所有的 $q=1, 2, \dots, Q$ 求解式(9)问题,即可得到二维像;

[0108] 步骤4-4,利用混合匹配追踪算法对式(9)进行求解的具体步骤如下,

[0109] 步骤4-4-1,采用标准正交匹配追踪算法得到稀疏解的初值,

[0110]  $\delta_{\text{omp}} = \text{omp}(x_q, T, K)$  (10),

[0111] 步骤4-4-2,定义函数表示 $\text{max\_ind}(y, P)$ :返回P索引,找到向量y中幅值最大的元素所在的位置,由式(10)得到的稀疏解初值可定义初始支撑集为,

[0112]  $\Lambda_{\text{old}} = \text{max\_ind}(|\delta_{\text{omp}}|, K)$  (11),

[0113] 步骤4-4-3,由式(11)得到的初始支撑集可以将残差初始化为,

$$[0114] \gamma_{\text{old}} = x_q - \mathbf{T}_{A_{\text{old}}} \left[ \left( \mathbf{T}_{A_{\text{old}}} \right)^H \mathbf{T}_{A_{\text{old}}} \right]^{-1} \left( \mathbf{T}_{A_{\text{old}}} \right)^H x_q \quad (12),$$

[0115] 其中 $x_q$ 为回波采样向量,恢复矩阵 $T = \Phi \Psi$ , $K$ 为稀疏度值;

[0116] 步骤4-4-4,依然采用标准正交匹配追踪算法对式(12)所求的残差进行求值,可以得到,

$$[0117] \delta_{\text{omp}}^n = \text{omp}(\gamma_{\text{old}}, T, K) \quad (13),$$

[0118] 步骤4-4-5,利用式(13)构造 $\text{max\_ind}(|\delta_{\text{omp}}^n|, K)$ 得到K个支撑集,和 $\Lambda_{\text{old}}$ 一起将支撑集扩充至2K个;

[0119] 步骤4-4-6,将原始测量信号向这2K个支撑集构成的子空间投影,可以得到更新的支撑集为,

$$[0120] \Lambda_{\text{new}} = \text{max\_ind} \left[ \left( \mathbf{T}_{A_{\text{temp}}} \right)^H \mathbf{T}_{A_{\text{temp}}} \right]^{-1} \left( \mathbf{T}_{A_{\text{temp}}} \right)^H x_q, K \quad (14),$$

[0121] 步骤4-4-7,利用式(14)得到的新的支撑集对残差进行更新,

$$[0122] \gamma_{\text{new}} = x_q - \mathbf{T}_{A_{\text{new}}} \left[ \left( \mathbf{T}_{A_{\text{new}}} \right)^H \mathbf{T}_{A_{\text{new}}} \right]^{-1} \left( \mathbf{T}_{A_{\text{new}}} \right)^H x_q \quad (15),$$

[0123] 步骤4-4-8,当残差满足范数关系 $\|\gamma_{\text{old}}\|_2^2 > \|\gamma_{\text{new}}\|_2^2$ 时,则令 $\gamma_{\text{old}} = \gamma_{\text{new}}$ 和 $\Lambda_{\text{old}} = \Lambda_{\text{new}}$ ,然后跳回(4d5)进行迭代;否则,迭代停止,计算和输出 $\tilde{\sigma}$ ,

$$[0124] \tilde{\sigma}_{A_{\text{old}}} = \left[ \left( \mathbf{T}_{A_{\text{old}}} \right)^H \mathbf{T}_{A_{\text{old}}} \right]^{-1} \left( \mathbf{T}_{A_{\text{old}}} \right)^H x_q \quad (16);$$

[0125] 步骤5)获得目标的二维高分辨成像。

[0126] 以下结合仿真实验,对本发明的技术效果作进一步说明,

[0127] 根据山体滑坡的实际成像场景设置雷达仿真参数,雷达发射步进频信号,载频15GHz,带宽300MHz,子脉冲数4096个,这里按照步骤1稀疏布阵方法布置6发25收的阵列,均匀接收阵元的间隔为 $\lambda/2$ ,发射阵元的间隔为 $50 \times (\lambda/2)$ ,阵列稀疏度为50%,雷达成像区域为距离向从1000m到2000m,方位向为-150m到150m,点目标的散射系数都设为1,附加噪声为加性高斯白噪声,信噪比为10dB;

[0128] 首先分析单点目标成像,目标方位向为0m,距离向为1500m,图2、图3、图4给出了传统波束形成算法、标准正交匹配追踪算法以及本发明提出的算法成像结果,从图2、图3、图4看出,三种方法均对单点聚焦正确成像,但是图2有低幅度值的旁瓣,图3和图4没有这种情况

况,且图2的分辨率低于图3和图4,表明对于单点目标成像,标准正交匹配追踪算法和本发明成像效果一致,明显优于传统波束形成算法,标准正交匹配追踪算法对于单点目标成像没有伪影点出现;

[0129] 其次分析多点目标成像,目标点位置信息为: $tg1-(0, 1500)$ , $tg2-(-25, 1505)$ , $tg3-(25, 1505)$ , $tg4-(0, 1510)$ , $tg5-(-50, 1520)$ , $tg6-(50, 1520)$ , $tg7-(0, 1520)$ ,图5给出了传统波束形成算法效果图,图6给出了标准正交匹配追踪算法的成像效果图,图7给出了本发明成像效果图,可以看出,图5中由于阵元的缺失,不能很好的处理欠采样数据,呈现出的7个点目标图像模糊,只能大致辨别几个目标点的不同位置信息,且旁瓣水平比单点目标成像恶化明显,图6和图7表明了标准正交匹配追踪算法和本发明在稀疏阵列下多点目标聚焦成像的效果优于传统波束成形算法,但是图6存在明显的伪影点,影响多个目标之间的区分,这是由于标准正交匹配追踪算法在基信号选择时只能扩充而不能去除的策略造成的,本发明与标准正交匹配追踪算法不同之处在于迭代过程中结合了子空间追踪算法,去除了在前面迭代过程中被选择的病态索引,因此本发明的成像效果更好,为进一步分析本发明成像质量,结果见表1,

[0130] 表1不同成像方法的分辨率和目标杂波比

[0131]

成像方法	传统波束形成算法	标准正交匹配追踪算法	本发明方法
目标杂波比(dB)	67.13	73.33	77.36
距离向分辨率(m)	0.51	0.49	0.49
方位向分辨率(mrad)	7.94	0.993	0.992

[0132] 表1分别给出了传统波束形成算法、标准正交匹配追踪算法、本发明的分辨率和目标杂波比(TCR)指标对比分析,目标杂波比对应用来衡量目标在背景杂波中的凸显程度,其值越大,聚焦度越高,以dB的形式定义为,

$$[0133] TCR = 20 \lg \frac{\max_{(i,j) \in \Gamma} \{I(i,j)\}}{\text{mean}_{(i,j) \in \Omega} \{I(i,j)\}} \quad (17),$$

[0134] 式中 $\Gamma$ 为目标区域, $\Omega$ 为杂波区域,分析表1可知,三种方法的距离向分辨率基本相同,这是因为距离向分辨率只与发射信号带宽有关,正交匹配追踪算法和本发明的方位向分辨率明显优于传统波束形成算法,这是因为阵列的稀疏先验信息用在压缩感知理论可以大大改善成像的质量,从表1可以看出,本发明的TCR值最高,点目标的散射特性保存最好,比标准正交匹配追踪算法的TCR值高4dB左右,极大的改善了多目标成像的伪影点问题。

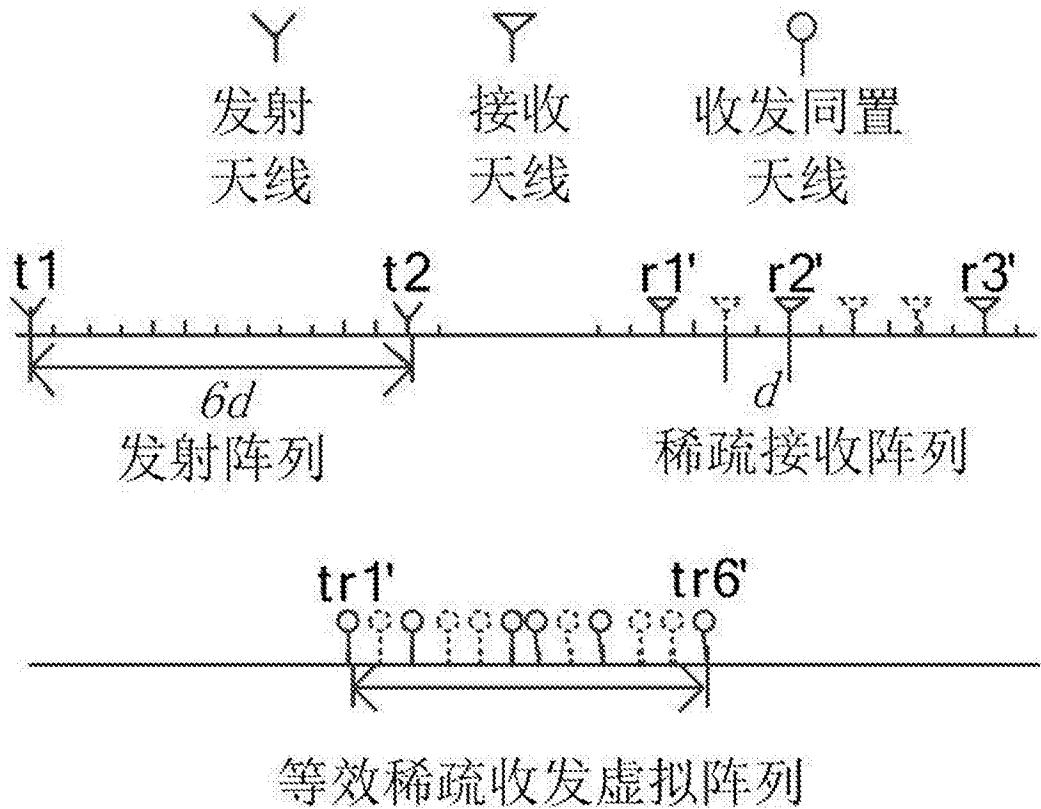


图1

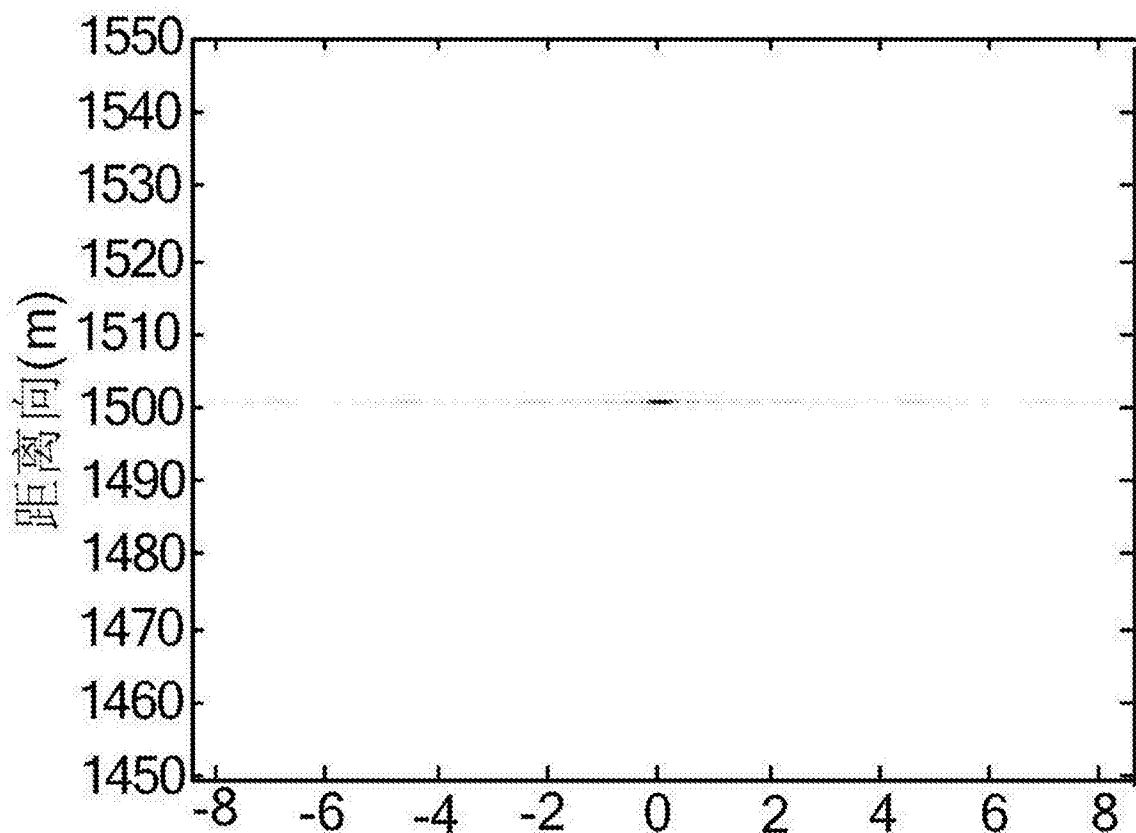


图2

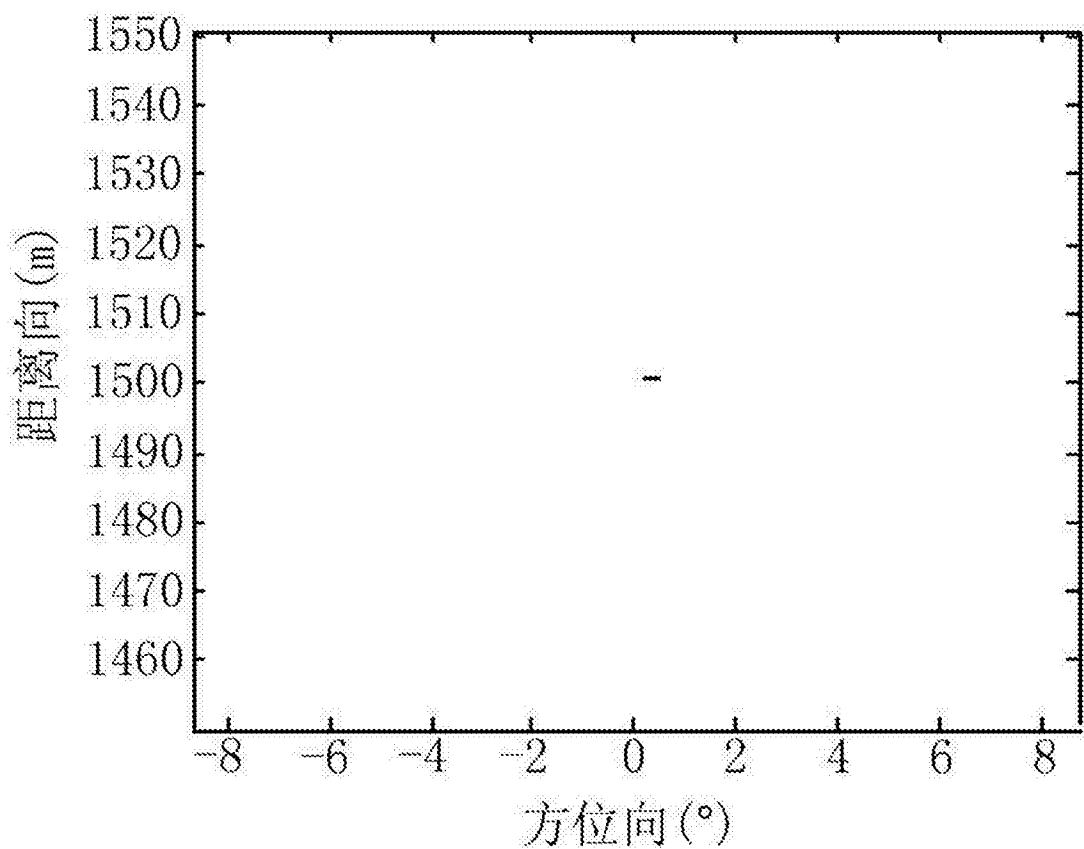


图3

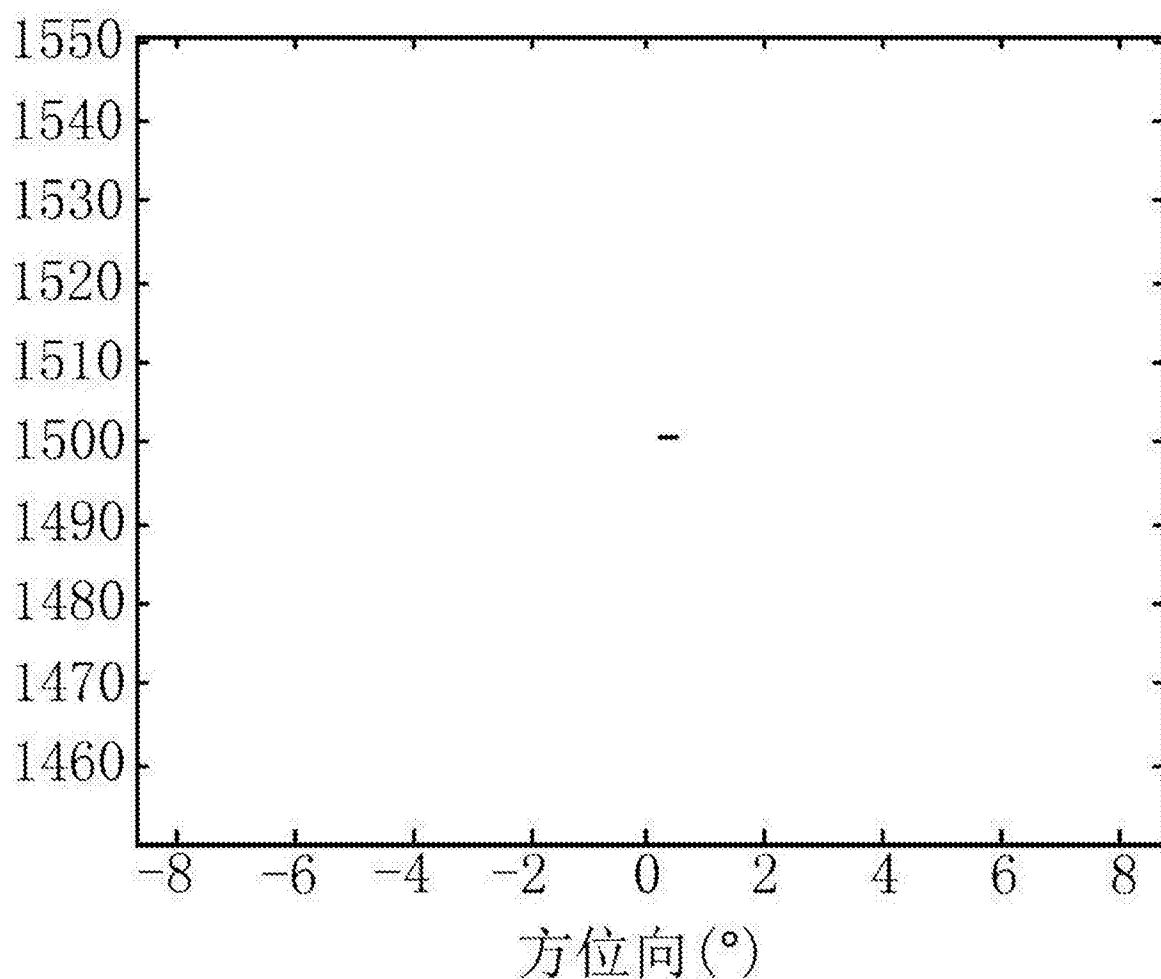


图4

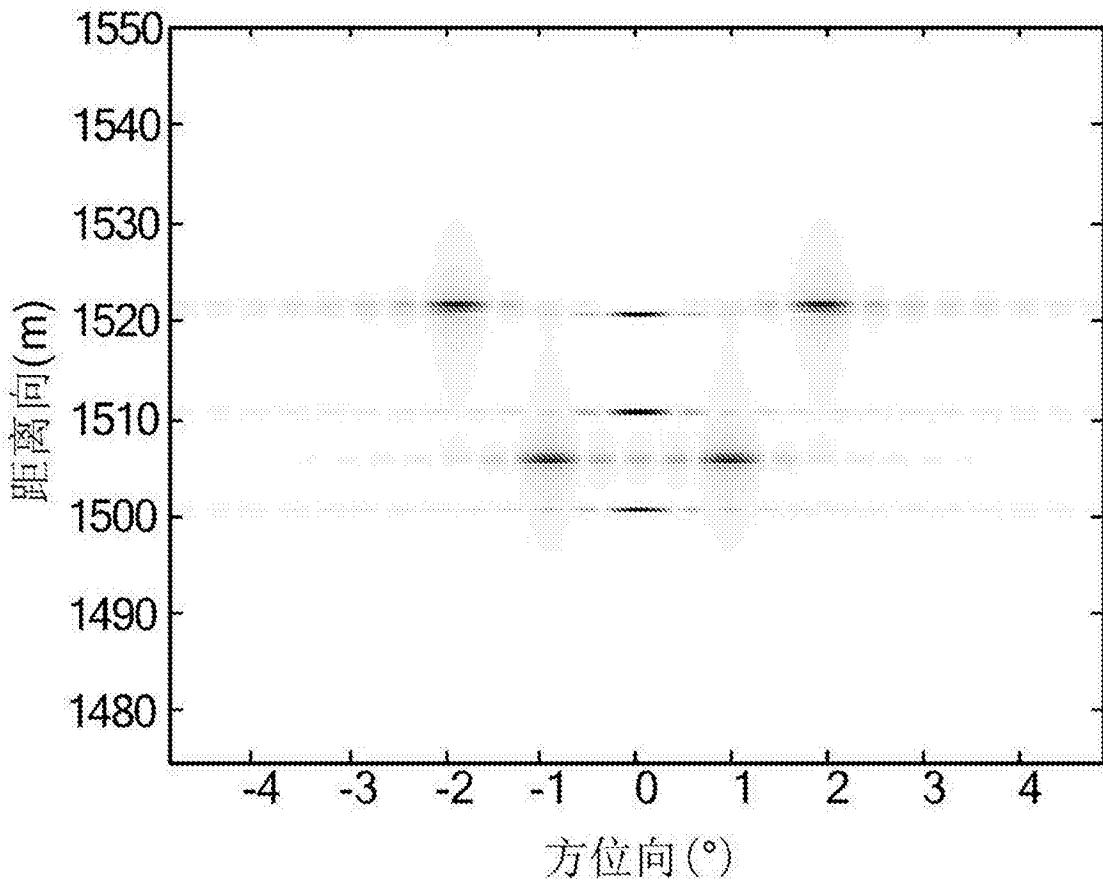


图5

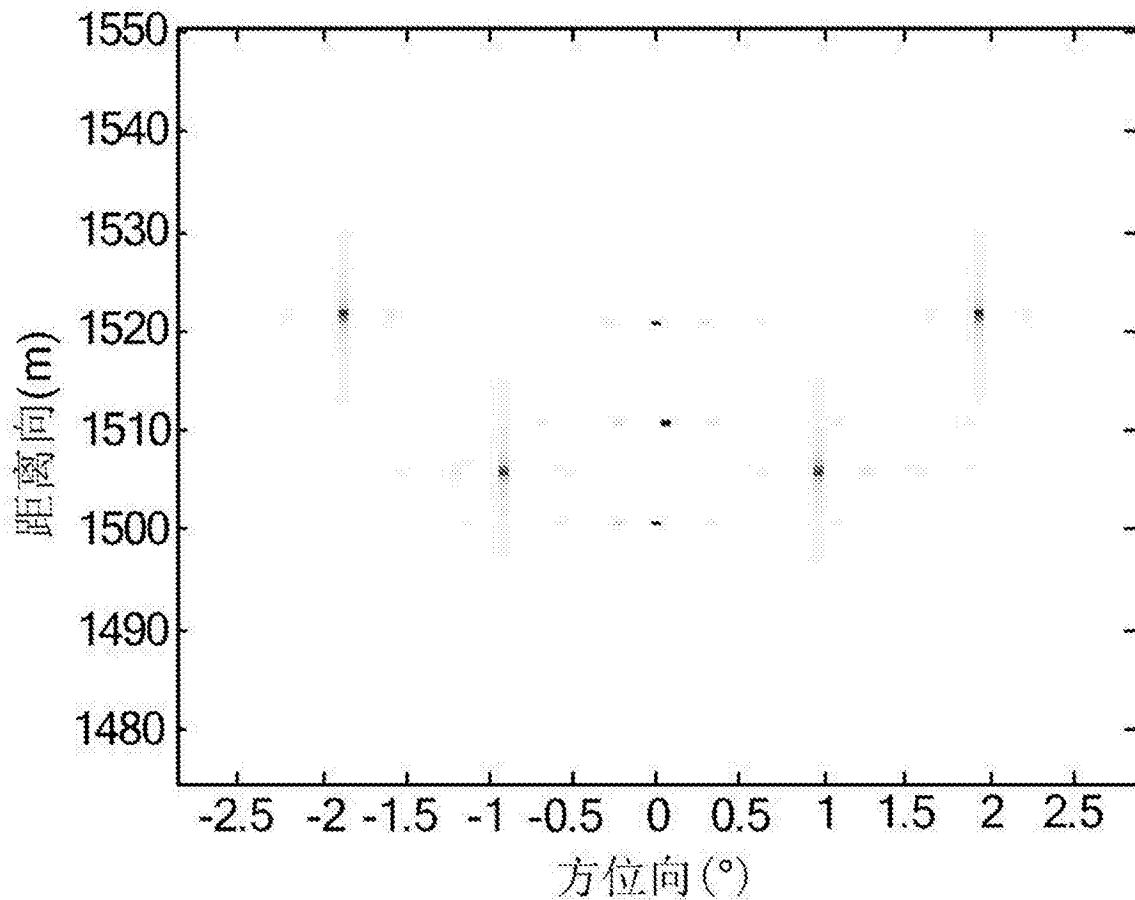


图6

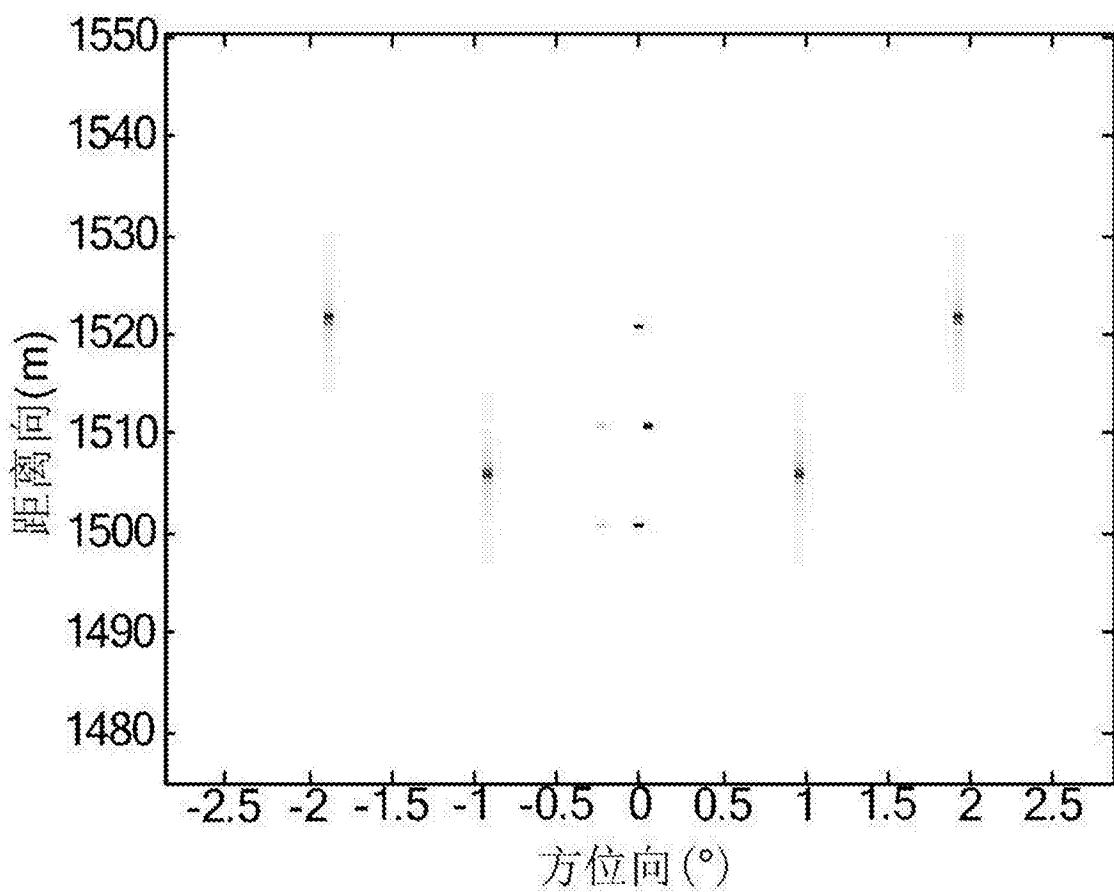


图7