



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110441772 A

(43)申请公布日 2019.11.12

(21)申请号 201910692454.2

(22)申请日 2019.07.30

(71)申请人 北京环境特性研究所
地址 100854 北京市海淀区永定路50号

(72)发明人 田鹤

(74)专利代理机构 北京格允知识产权代理有限公司 11609

代理人 周娇娇

(51)Int.Cl.
G01S 13/90(2006.01)

权利要求书3页 说明书7页 附图2页

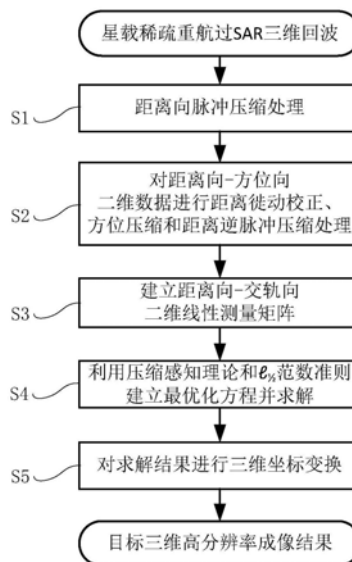
(54)发明名称

大轨道分布范围下星载稀疏重航过SAR三维成像方法

(57)摘要

本发明涉及一种大轨道分布范围下星载稀疏重航过SAR三维成像方法,包括:获取回波信号,在距离向进行脉冲压缩处理,得到距离向聚焦后的数据;针对每一个交轨向采样单元对应的距离向-方位向二维数据进行距离徙动校正、方位压缩和距离逆脉冲压缩处理,得到方位向聚焦后的数据;针对每一个方位向分辨单元对应的距离向-交轨向二维数据建立距离向-交轨向二维线性测量矩阵;利用压缩感知理论和 $\ell_{1/2}$ 范数最优化准则建立最优化方程并求解,得到目标在距离向-交轨向的后向散射系数;进行三维坐标变换,得到三维成像结果。本发明解决了稀疏重航过采样造成的图像混叠问题,以及大轨道分布范围下距离向-交轨向数据耦合问题,有效提高成像质量。

CN 110441772 A



1. 一种大轨道分布范围下星载稀疏重航过SAR三维成像方法,其特征在于,包括如下步骤:

S1、获取星载稀疏重航过SAR三维回波信号,并对其在距离向进行脉冲压缩处理,得到距离向聚焦后的数据;

S2、根据得到的距离向聚焦后的数据,针对其中每一个交轨向采样单元对应的一组距离向-方位向二维数据,进行距离徙动校正、方位压缩和距离逆脉冲压缩处理,得到方位向聚焦后的数据;

S3、根据得到方位向聚焦后的数据,针对其中每一个方位向分辨单元对应的一组距离向-交轨向二维数据,按照发射信号波形和成像空间几何,建立距离向-交轨向二维线性测量矩阵;

S4、根据距离向-交轨向二维线性测量矩阵,利用压缩感知理论和 $l_{1/2}$ 范数最优化准则建立最优化方程并求解,得到目标在距离向-交轨向二维成像空间各分辨单元对应的后向散射系数;

S5、对求解得到的后向散射系数进行三维坐标变换,得到观测目标的三维成像结果。

2. 根据权利要求1所述的三维成像方法,其特征在于:所述步骤S1中,当获取的星载稀疏重航过SAR三维回波信号其对应的发射信号为线性调频信号时,对三维回波信号在距离向进行脉冲压缩处理时,所用的频域匹配滤波器 $H_r(f)$ 表达式为:

$$H_r(f) = \text{rect}\left(\frac{f}{K_r T_p}\right) \exp(+j\pi \frac{f^2}{K_r});$$

其中, f 表示距离向频率, K_r 为调频率, T_p 为脉宽, $\text{rect}(\cdot)$ 表示矩阵运算。

3. 根据权利要求2所述的三维成像方法,其特征在于:所述步骤S1中,得到的距离向聚焦后的数据 $g_{rc}(t, y_m, s_n)$ 表达式为:

$$g_{rc}(t, y_m, s_n) = \sigma_q \text{sinc}\left[\frac{t - \tau_q(y_m, s_n)}{T_p}\right] \exp\{-j2\pi f_c \tau_q(y_m, s_n)\};$$

其中, t 表示距离向快时间, y_m 表示SAR平台在方位向第 m 个采样时刻对应的方位位置, s_n 表示SAR平台在第 n 次航过对应的交轨位置, f_c 表示中心频率, σ_q 为观测目标中第 q 个散射中心的后向散射系数; $\tau_q(y_m, s_n)$ 表示观测目标中第 q 个散射中心至SAR平台的距离时延,其表达式为:

$$\tau_q(y_m, s_n) = \frac{2}{c} \sqrt{(R_0 - z_q')^2 + (y_m - y_q')^2 + (s_n - x_q')^2};$$

其中, c 表示光速, R_0 表示SAR平台至观测目标的最近斜距, (x_q', y_q', z_q') 表示第 q 个散射中心在SAR三维成像几何坐标系下的位置。

4. 根据权利要求3所述的三维成像方法,其特征在于:所述步骤S2中,进行距离徙动校正时,需校正的距离徙动在距离多普勒域中的表达式为:

$$\Delta R(f_{t_m}) = \frac{f_c \sqrt{(R_0 - z_q')^2 + (s_n - x_q')^2}}{8v^2 c} f_{t_m}^2;$$

其中, f_{t_m} 为多普勒频率, v 为SAR平台飞行速度。

5. 根据权利要求4所述的三维成像方法,其特征在于:所述步骤S2中,进行方位压缩时,方位压缩所用的频域匹配滤波器 $H_a(f_{t_m})$ 为:

$$H_a(f_{t_m}) = \exp\left(-j\pi \frac{f_{t_m}^2}{K_a}\right);$$

其中, K_a 为方位向调频率。

6. 根据权利要求5所述的三维成像方法,其特征在于:所述步骤S2中,进行距离逆脉冲压缩处理时,距离逆脉冲压缩所用的频域匹配滤波器 $H_{ri}(f)$ 为:

$$H_{ri}(f) = H_r^*(-f)。$$

7. 根据权利要求6所述的三维成像方法,其特征在于:所述步骤S2中,得到的方位向聚焦后的数据 $g_{ac}(t, y_m, s_n)$ 表达式为:

$$g_{ac}(t, y_m, s_n) = \sigma_q \text{sinc}(y_m - y_q) \text{rect}\left[\frac{t - 2R_{s_n}/c}{T_p}\right] \exp\left(-j \frac{4\pi R_{s_n}}{\lambda}\right); \\ \cdot \exp\left\{j\pi K_r [t - 2R_{s_n}/c]^2\right\}$$

其中, $R_{s_n} = \sqrt{(R_0 - z_q)^2 + (s_n - x_q)^2}$, λ 表示雷达发射信号波长。

8. 根据权利要求7所述的三维成像方法,其特征在于:所述步骤S3中,建立距离向-交轨向二维线性测量矩阵 Φ 时,将待重建的距离向-交轨向成像空间划分为 $N_x \times N_z$ 个成像单元,针对第 m 个方位向分辨单元,距离向-交轨向二维线性测量矩阵 Φ 表达式为:

$$\Phi = \begin{bmatrix} \varphi[R_{s_1}(P_{11})] & \varphi[R_{s_1}(P_{12})] & \dots & \varphi[R_{s_1}(P_{ij})] & \dots & \varphi[R_{s_1}(P_{N_x N_z})] \\ \varphi[R_{s_2}(P_{11})] & \varphi[R_{s_2}(P_{12})] & \dots & \varphi[R_{s_2}(P_{ij})] & \dots & \varphi[R_{s_2}(P_{N_x N_z})] \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \varphi[R_{s_n}(P_{11})] & \varphi[R_{s_n}(P_{12})] & \dots & \varphi[R_{s_n}(P_{ij})] & \dots & \varphi[R_{s_n}(P_{N_x N_z})] \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \varphi[R_{s_N}(P_{11})] & \varphi[R_{s_N}(P_{12})] & \dots & \varphi[R_{s_N}(P_{ij})] & \dots & \varphi[R_{s_N}(P_{N_x N_z})] \end{bmatrix};$$

其中, $\varphi[R_{s_n}(P_{ij})] = \exp\left\{j\pi K_r [t - 2R_{s_n}(P_{ij})/c]^2\right\}$, P_{ij} 为成像空间中距离向第 i 个、交轨向第 j 个分辨单元位置, $t = [t_1 \ t_2 \ \dots \ t_{N_r}]^T$ 为距离向快时间向量, N 表示交轨向稀疏重航过次数, N_r 表示距离向采样点数, N_x 表示交轨向成像单元个数, N_z 表示距离向成像单元个数。

9. 根据权利要求8所述的三维成像方法,其特征在于:所述步骤S4中,利用压缩感知理论和 $l_{1/2}$ 范数最优化准则建立最优化方程时,最优化方程的表达式为:

$$\min_{\sigma} \{\|y - \Phi\sigma\|_2^2 + \xi \|\sigma\|_{1/2}^2\};$$

其中, y 表示距离向-交轨向二维数据构成的回波向量,其表达式为:

$$y = [g_{ac}(t, y_m, s_1)^T \ \dots \ g_{ac}(t, y_m, s_n)^T \ \dots \ g_{ac}(t, y_m, s_N)^T]^T;$$

σ 表示目标在距离向-交轨向二维成像空间中各分辨单元对应的后向散射系数,其表达式为:

$$\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_{11} \cdots \sigma_{1N_z} \sigma_{21} \cdots \sigma_{2N_z} \cdots \sigma_{N_x 1} \cdots \sigma_{N_x N_z}]^T;$$

ξ 表示正则化参数。

10. 一种计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,其特征在于,所述计算机程序被处理器执行时实现权利要求1至9中任一项所述的三维成像方法的步骤。

大轨道分布范围下星载稀疏重航过SAR三维成像方法

技术领域

[0001] 本发明涉及雷达成像技术领域,尤其涉及一种大轨道分布范围下星载稀疏重航过SAR三维成像方法。

背景技术

[0002] 星载SAR(合成孔径雷达)三维成像技术在地形测绘、战场侦察等领域有着重要应用价值。由于卫星平台限制,交轨向重航过为非均匀、欠采样分布,采用传统成像方法会使图像出现严重模糊。随着压缩感知理论和稀疏信号处理方法在雷达稀疏成像领域的广泛应用,基于压缩感知理论的SAR成像方法可在稀疏采样下实现对目标的无模糊三维成像。目前,基于压缩感知理论的三维成像方法为维持不同航过间信号相同的相位关系,需要轨道分布在1km范围内,对应的交轨向理论分辨率为数十米,且超分辨率有限,无法达到厘米级分辨率要求。此外,目前的成像方法通常会忽略了回波信号在交轨向和距离向的耦合问题,在大孔径下会使导致图像失真。

发明内容

[0003] 本发明的目的是针对上述至少一部分问题,提供了一种大轨道分布范围下的星载稀疏重航过SAR三维成像方法。

[0004] 为了实现上述目的,本发明提供了一种大轨道分布范围下星载稀疏重航过SAR三维成像方法,包括如下步骤:

[0005] S1、获取星载稀疏重航过SAR三维回波信号,并对其在距离向进行脉冲压缩处理,得到距离向聚焦后的数据;

[0006] S2、根据得到的距离向聚焦后的数据,针对其中每一个交轨向采样单元对应的一组距离向-方位向二维数据,进行距离徙动校正、方位压缩和距离逆脉冲压缩处理,得到方位向聚焦后的数据;

[0007] S3、根据得到方位向聚焦后的数据,针对其中每一个方位向分辨单元对应的一组距离向-交轨向二维数据,按照发射信号波形和成像空间几何,建立距离向-交轨向二维线性测量矩阵;

[0008] S4、根据距离向-交轨向二维线性测量矩阵,利用压缩感知理论和 $\ell_{1/2}$ 范数最优化准则建立最优化方程并求解,得到目标在距离向-交轨向二维成像空间各分辨单元对应的后向散射系数;

[0009] S5、对求解得到的后向散射系数进行三维坐标变换,得到观测目标的三维成像结果。

[0010] 优选地,所述步骤S1中,当获取的星载稀疏重航过SAR三维回波信号其对应的发射信号为线性调频信号时,对三维回波信号在距离向进行脉冲压缩处理时,所用的频域匹配滤波器 $H_r(f)$ 表达式为:

$$[0011] \quad H_r(f) = \text{rect}\left(\frac{f}{K_r T_p}\right) \exp\left(+j\pi \frac{f^2}{K_r}\right);$$

[0012] 其中, f 表示距离向频率, K_r 为调频率, T_p 为脉宽, $\text{rect}(\cdot)$ 表示矩阵运算。

[0013] 优选地, 所述步骤S1中, 得到的距离向聚焦后的数据 $g_{rc}(t, y_m, s_n)$ 表达式为:

$$[0014] \quad g_{rc}(t, y_m, s_n) = \sigma_q \text{sinc}\left[\frac{t - \tau_q(y_m, s_n)}{T_p}\right] \exp\{-j2\pi f_c \tau_q(y_m, s_n)\};$$

[0015] 其中, t 表示距离向快时间, y_m 表示SAR平台在方位向第 m 个采样时刻对应的方位位置, s_n 表示SAR平台在第 n 次航过对应的的交轨位置, f_c 表示中心频率, σ_q 为观测目标中第 q 个散射中心的后向散射系数; $\tau_q(y_m, s_n)$ 表示观测目标中第 q 个散射中心至SAR平台的距离时延, 其表达式为:

$$[0016] \quad \tau_q(y_m, s_n) = \frac{2}{c} \sqrt{(R_0 - z_q')^2 + (y_m - y_q')^2 + (s_n - x_q')^2};$$

[0017] 其中, c 表示光速, R_0 表示SAR平台至观测目标的最近斜距, (x_q', y_q', z_q') 表示第 q 个散射中心在SAR三维成像几何坐标系下的位置。

[0018] 优选地, 所述步骤S2中, 进行距离徙动校正时, 需校正的距离徙动在距离多普勒域中的表达式为:

$$[0019] \quad \Delta R(f_{t_m}) = \frac{f_c \sqrt{(R_0 - z_q')^2 + (s_n - x_q')^2}}{8v^2 c} f_{t_m}^2;$$

[0020] 其中, f_{t_m} 为多普勒频率, v 为SAR平台飞行速度。

[0021] 优选地, 所述步骤S2中, 进行方位压缩时, 方位压缩所用的频域匹配滤波器 $H_a(f_{t_m})$ 为:

$$[0022] \quad H_a(f_{t_m}) = \exp\left(-j\pi \frac{f_{t_m}^2}{K_a}\right);$$

[0023] 其中, K_a 为方位向调频率。

[0024] 优选地, 所述步骤S2中, 进行距离逆脉冲压缩处理时, 距离逆脉冲压缩所用的频域匹配滤波器 $H_{ri}(f)$ 为:

$$[0025] \quad H_{ri}(f) = H_r^*(-f)。$$

[0026] 优选地, 所述步骤S2中, 得到的方位向聚焦后的数据 $g_{ac}(t, y_m, s_n)$ 表达式为:

$$[0027] \quad g_{ac}(t, y_m, s_n) = \sigma_q \text{sinc}(y_m - y_q') \text{rect}\left[\frac{t - 2R_{s_n}/c}{T_p}\right] \exp\left(-j\frac{4\pi R_{s_n}}{\lambda}\right); \\ \cdot \exp\left\{j\pi K_r [t - 2R_{s_n}/c]^2\right\}$$

[0028] 其中, $R_{s_n} = \sqrt{(R_0 - z_q')^2 + (s_n - x_q')^2}$, λ 表示雷达发射信号波长。

[0029] 优选地, 所述步骤S3中, 建立距离向-交轨向二维线性测量矩阵 Φ 时, 将待重建的距离向-交轨向成像空间划分为 $N_x \times N_z$ 个成像单元, 针对第 m 个方位向分辨单元, 距离向-交

轨向二维线性测量矩阵 Φ 表达式为:

$$[0030] \quad \Phi = \begin{bmatrix} \varphi[R_{s_1}(P_{11})] & \varphi[R_{s_1}(P_{12})] & \dots & \varphi[R_{s_1}(P_{ij})] & \dots & \varphi[R_{s_1}(P_{N_x N_z})] \\ \varphi[R_{s_2}(P_{11})] & \varphi[R_{s_2}(P_{12})] & \dots & \varphi[R_{s_2}(P_{ij})] & \dots & \varphi[R_{s_2}(P_{N_x N_z})] \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \varphi[R_{s_n}(P_{11})] & \varphi[R_{s_n}(P_{12})] & \dots & \varphi[R_{s_n}(P_{ij})] & \dots & \varphi[R_{s_n}(P_{N_x N_z})] \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \varphi[R_{s_N}(P_{11})] & \varphi[R_{s_N}(P_{12})] & \dots & \varphi[R_{s_N}(P_{ij})] & \dots & \varphi[R_{s_N}(P_{N_x N_z})] \end{bmatrix}$$

[0031] 其中, $\varphi[R_{s_n}(P_{ij})] = \exp\left\{j\pi K_r \left[t - 2R_{s_n}(P_{ij})/c\right]^2\right\}$, P_{ij} 为成像空间中距离向第 i 个、交轨向第 j 个分辨单元位置, $t = [t_1 \ t_2 \ \dots \ t_{N_r}]^T$ 为距离向快时间向量, N 表示交轨向稀疏重航过次数, N_r 表示距离向采样点数, N_x 表示交轨向成像单元个数, N_z 表示距离向成像单元个数。

[0032] 优选地, 所述步骤 S4 中, 利用压缩感知理论和 $\ell_{1/2}$ 范数最优化准则建立最优化方程时, 最优化方程的表达式为:

$$[0033] \quad \min_{\sigma} \left\{ \|\mathbf{y} - \Phi\sigma\|_2^2 + \xi \|\sigma\|_{1/2} \right\};$$

[0034] 其中, \mathbf{y} 表示距离向-交轨向二维数据构成的回波向量, 其表达式为:

$$[0035] \quad \mathbf{y} = [g_{ac}(t, y_m, s_1)^T \cdots g_{ac}(t, y_m, s_n)^T \cdots g_{ac}(t, y_m, s_N)^T]^T;$$

[0036] σ 表示目标在距离向-交轨向二维成像空间中各分辨单元对应的后向散射系数, 其表达式为:

$$[0037] \quad \sigma = [\sigma_{11} \cdots \sigma_{1N_z} \ \sigma_{21} \cdots \sigma_{2N_z} \ \cdots \ \sigma_{N_x 1} \cdots \sigma_{N_x N_z}]^T;$$

[0038] ξ 表示正则化参数。

[0039] 本发明还提供了一种计算机可读存储介质, 其上存储有计算机程序, 所述计算机程序被处理器执行时实现上述任一项所述的三维成像方法的步骤。

[0040] 本发明的上述技术方案具有如下优点: 本发明提供了一种大轨道分布范围下星载稀疏重航过 SAR 三维成像方法, 该方法针对稀疏重航过采样方式, 引入压缩感知理论和稀疏信号处理方法, 实现图像高程向无模糊成像。在大轨道分布范围下, 建立距离向-交轨向二维线性测量矩阵并联合求解, 避免了交轨向和距离向的回波信号耦合和距离徙动问题, 解决了以往星载 SAR 三维成像中图像高程向分辨率低和高度向模糊问题。

附图说明

[0041] 图1为星载稀疏重航过 SAR 三维成像几何示意图;

[0042] 图2是本发明实施例中一种大轨道分布范围下星载稀疏重航过 SAR 三维成像方法步骤示意图;

[0043] 图3为采用传统成像方法得到的 20km 轨道分布范围和 500 次航过对应的未稀疏重航过 SAR 三维成像仿真结果图;

[0044] 图4为采用本发明中成像方法得到的 20km 轨道分布范围和 25 次航过对应的稀疏重航过 SAR 三维成像仿真结果图。

具体实施方式

[0045] 为使本发明实施例的目的、技术方案和优点更加清楚,下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例是本发明的一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动的前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0046] 星载合成孔径雷达(SAR)三维成像技术采用星载SAR对场景中的观测目标发射信号并进行观测,获得包含目标散射中心信息的回波信号,对回波信号进行处理实现三维成像。如图1所示,图1为星载稀疏重航过SAR三维成像几何示意图,其中 x 、 y 、 z 轴方向分别表示场景所在三维空间的地距向、方位向和高程向, s 方向为SAR垂直视线方向(交轨向), r 方向为雷达视线方向(距离向), θ 为SAR入射角; H 表示卫星平台高度,即星载SAR平台高度,SAR平台沿方位向以速度 v 匀速飞行;SAR平台至观测目标最近斜距为 R_0 。通过SAR平台对同一场景的 N 次重复航过构成 $N-1$ 条基线,在交轨向形成长度为 L 的孔径结构。由于SAR平台受限,其三维成像通常由第三维的多航过观测数据得到,且通常为欠采样、非均匀分布。目前,稀疏重航过采样通常造成图像混叠问题,大轨道分布范围下的距离向-交轨向数据耦合。

[0047] 如图2所示,本发明实施例提供的一种大轨道分布范围下星载稀疏重航过SAR三维成像方法,包括如下步骤:

[0048] S1、获取星载稀疏重航过SAR三维回波信号,并对其在距离向进行脉冲压缩处理,得到距离向聚焦后的数据 $g_{rc}(t, y_m, s_n)$ 。其中,具体如何获取星载稀疏重航过SAR三维回波信号,可通过现有技术中的多种方式实现,在此不再进一步限定。

[0049] S2、根据步骤S1得到的距离向聚焦后的数据 $g_{rc}(t, y_m, s_n)$,针对其中每一个交轨向采样单元对应的一组距离向-方位向二维数据,进行距离徙动校正、方位压缩和距离逆脉冲压缩处理,得到方位向聚焦后的数据 $g_{ac}(t, y_m, s_n)$ 。

[0050] S3、根据步骤S2得到的方位向聚焦后的数据 $g_{ac}(t, y_m, s_n)$,针对其中每一个方位向分辨单元对应的一组距离向-交轨向二维数据,按照发射信号波形和成像空间几何,建立距离向-交轨向二维线性测量矩阵 Φ 。

[0051] S4、根据步骤S3得到的距离向-交轨向二维线性测量矩阵 Φ ,利用压缩感知理论和 $\ell_{1/2}$ 范数最优化准则建立最优化方程并求解,得到目标在距离向-交轨向二维成像空间各分辨单元对应的后向散射系数 σ 。其中,压缩感知理论和 $\ell_{1/2}$ 范数最优化准则为现有技术,在此不再重复说明。

[0052] S5、对步骤S4中求解最优化方程得到的后向散射系数进行三维坐标变换,得到观测目标的三维成像结果。

[0053] 本发明提供的SAR三维成像方法,特别适用于大轨道分布以及稀疏重航过,其不需要维持不同航过间信号相同的相位关系,可测量轨道分布范围显著扩大;并且加入了距离徙动校正,可避免距离徙动问题;同时,建立的距离向-交轨向二维线性测量矩阵 Φ 避免了交轨向和距离向的回波信号耦合,可在星载SAR大轨道分布范围和高稀疏采样率下实现对目标的三维高分辨率成像,有效降低重航过观测次数要求,同时提高图像的高程向分辨率至0.5m。

[0054] 优选地,步骤S1中,当获取的星载稀疏重航过SAR三维回波信号其对应的发射信号为线性调频信号时,对三维回波信号在距离向进行脉冲压缩处理时,所用的频域匹配滤波

器 $H_r(f)$ 表达式为:

$$[0055] \quad H_r(f) = \text{rect}\left(\frac{f}{K_r T_p}\right) \exp\left(+j\pi \frac{f^2}{K_r}\right) \quad (1)$$

[0056] 其中, f 表示距离向频率, K_r 为调频率, T_p 为脉宽, $\text{rect}(\cdot)$ 表示矩阵运算。

[0057] 进一步地,步骤S1中,对三维回波信号在距离向进行脉冲压缩处理,得到的距离向聚焦后的数据 $g_{rc}(t, y_m, s_n)$ 表达式为:

$$[0058] \quad g_{rc}(t, y_m, s_n) = \sigma_q \text{sinc}\left[\frac{t - \tau_q(y_m, s_n)}{T_p}\right] \exp\{-j2\pi f_c \tau_q(y_m, s_n)\} \quad (2)$$

[0059] 其中, t 表示距离向快时间, y_m 表示SAR平台在方位向第 m 个采样时刻对应的方位位置, s_n 表示SAR平台在第 n 次航过对应的的交轨位置, f_c 表示中心频率, σ_q 为观测目标中第 q 个散射中心的后向散射系数; $\tau_q(y_m, s_n)$ 表示观测目标中第 q 个散射中心至SAR平台的距离时延,其表达式为:

$$[0060] \quad \tau_q(y_m, s_n) = \frac{2}{c} \sqrt{(R_0 - z_q')^2 + (y_m - y_q')^2 + (s_n - x_q')^2} \quad (3)$$

[0061] 其中, c 表示光速, R_0 表示SAR平台至观测目标的最近斜距, (x_q', y_q', z_q') 表示第 q 个散射中心在SAR三维成像几何坐标系下的位置。

[0062] 优选地,步骤S2中,进行距离徙动校正时,需校正的距离徙动在距离多普勒域中的表达式为:

$$[0063] \quad \Delta R(f_{t_m}) = \frac{f_c \sqrt{(R_0 - z_q')^2 + (s_n - x_q')^2}}{8v^2 c} f_{t_m}^2 \quad (4)$$

[0064] 其中, f_{t_m} 为多普勒频率, v 为SAR平台飞行速度。

[0065] 优选地,步骤S2中,进行方位压缩时,方位压缩所用的频域匹配滤波器 $H_a(f_{t_m})$ 为:

$$[0066] \quad H_a(f_{t_m}) = \exp\left(-j\pi \frac{f_{t_m}^2}{K_a}\right) \quad (5)$$

[0067] 其中, K_a 为方位向调频率。

[0068] 优选地,步骤S2中,进行距离逆脉冲压缩处理时,距离逆脉冲压缩所用的频域匹配滤波器 $H_{ri}(f)$ 为:

$$[0069] \quad H_{ri}(f) = H_r^*(-f) \quad (6)$$

[0070] 进一步地,步骤S2中,针对三维数据 $g_{rc}(t, y_m, s_n)$ 中每一个交轨向采样单元对应的一组距离向-方位向二维数据,进行距离徙动校正、方位压缩和距离逆脉冲压缩处理后,得到的方位向聚焦后的数据 $g_{ac}(t, y_m, s_n)$ 表达式为:

$$[0071] \quad g_{ac}(t, y_m, s_n) = \sigma_q \text{sinc}(y_m - y_q') \text{rect}\left[\frac{t - 2R_{s_n}/c}{T_p}\right] \exp\left(-j\frac{4\pi R_{s_n}}{\lambda}\right) \cdot \exp\left\{j\pi K_r [t - 2R_{s_n}/c]^2\right\} \quad (7)$$

[0072] 其中, $R_{s_n} = \sqrt{(R_0 - z_q)^2 + (s_n - x_q)^2}$, λ 表示雷达发射信号波长。

[0073] 优选地,步骤S3中,按照发射信号波形和成像空间几何,建立距离向-交轨向二维线性测量矩阵 Φ 时,将待重建的距离向-交轨向成像空间划分为 $N_x \times N_z$ 个成像单元,针对第 m 个方位向分辨单元,距离向-交轨向二维线性测量矩阵 Φ 表达式为:

$$[0074] \quad \Phi = \begin{bmatrix} \varphi[R_{s_1}(P_{11})] & \varphi[R_{s_1}(P_{12})] & \dots & \varphi[R_{s_1}(P_{ij})] & \dots & \varphi[R_{s_1}(P_{N_x N_z})] \\ \varphi[R_{s_2}(P_{11})] & \varphi[R_{s_2}(P_{12})] & \dots & \varphi[R_{s_2}(P_{ij})] & \dots & \varphi[R_{s_2}(P_{N_x N_z})] \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \varphi[R_{s_n}(P_{11})] & \varphi[R_{s_n}(P_{12})] & \dots & \varphi[R_{s_n}(P_{ij})] & \dots & \varphi[R_{s_n}(P_{N_x N_z})] \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \varphi[R_{s_N}(P_{11})] & \varphi[R_{s_N}(P_{12})] & \dots & \varphi[R_{s_N}(P_{ij})] & \dots & \varphi[R_{s_N}(P_{N_x N_z})] \end{bmatrix} \quad (8)$$

[0075] 其中, $\varphi[R_{s_n}(P_{ij})] = \exp\{j\pi K_r [t - 2R_{s_n}(P_{ij})/c]^2\}$, P_{ij} 为成像空间中距离向第 i 个、交轨向第 j 个分辨单元位置, $t = [t_1 \ t_2 \ \dots \ t_{N_r}]^T$ 为距离向快时间向量, N 表示交轨向稀疏重航过次数, N_r 表示距离向采样点数, N_x 表示交轨向成像单元个数, N_z 表示距离向成像单元个数。

[0076] 优选地,在步骤S4中,利用压缩感知理论和 $\ell_{1/2}$ 范数最优化准则建立最优化方程时,最优化方程的表达式为:

$$[0077] \quad \min_{\sigma} \{ \|y - \Phi\sigma\|_2^2 + \xi \|\sigma\|_{1/2} \} \quad (9)$$

[0078] 其中, y 表示距离向-交轨向二维数据构成的回波向量,其表达式为:

$$[0079] \quad y = [g_{ac}(t, y_m, s_1)^T \dots g_{ac}(t, y_m, s_n)^T \dots g_{ac}(t, y_m, s_N)^T]^T \quad (10)$$

[0080] σ 表示目标在距离向-交轨向二维成像空间中各分辨单元对应的后向散射系数,其表达式为:

$$[0081] \quad \sigma = [\sigma_{11} \dots \sigma_{1N_z} \ \sigma_{21} \dots \sigma_{2N_z} \ \dots \sigma_{N_x 1} \dots \sigma_{N_x N_z}]^T \quad (11)$$

[0082] ξ 表示正则化参数。

[0083] 求解(9)式的最优化方程,即可得到 σ 。在步骤S5中对求解得到的 σ 进行三维坐标变换,即可得到三维成像结果。具体的求解方法以及三维坐标变换方法均为现有技术,再此不再重复说明。

[0084] 为验证本发明的效果,还通过仿真对传统成像方法与本发明提供的成像方法进行了对比。如图3和图4所示,图3示出了采用传统成像方法得到的20km轨道分布范围和500次航过对应的未稀疏重航过SAR三维成像仿真结果。星载重航过SAR侧视三维成像仿真参数如表1所示。系统工作在侧视模式,距离向分辨率为0.1m,天线大小为10m,条带模式下的方位向分辨率为5m。交轨向(垂直视线方向)分辨率为0.58m,对应高程向分辨率为0.41m。20km轨道分布范围和500次航过对应的交轨采样间隔为40m,垂直视线方向地物不模糊范围为291m,高程向地物不模糊范围为206m。成像方法采用基于三维BP(反向传播)的传统成像方法,成像结果接近真实值,可将其作为稀疏图像重建质量评价的比较值。

[0085] 表1星载重航过SAR侧视三维成像仿真参数

	参数	数值
	工作波长(λ)	0.03m
	发射信号带宽(B_s)	1.5GHz
	距离向采样率	1.8GHz
	发射信号时宽	0.5 μ s
[0086]	脉冲重复频率(PRF)	2KHz
	参考平台高度(H)	500km
	入射角	45°
	天线大小	10m
	机载平台速度	7km/s
	交轨采样最小间隔	40m/111.3m
	交轨等效孔径长度	20km

[0087] 图4示出了采用本发明提供的成像方法得到的20km轨道分布范围和25次航过对应的稀疏重航过SAR三维成像仿真结果。仿真参数如表1所示。20km轨道分布范围和25次航过对应的交轨采样最小间隔为111.3m,稀疏采样率为13%,垂直视线方向地物不模糊范围为105m,高程向地物不模糊范围为74m。从图像重建结果中可看出,采用本发明中距离向-交轨向二维数据联合处理的方法,可有效避免大轨道分布范围带来的数据耦合和距离徙动问题;在稀疏采样率13%条件下,仍可得到与满采样成像性能相当的结果。验证了本发明方法的有效性。

[0088] 在本发明一些优选的实施方式中,还提供了一种计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,计算机程序被处理器执行时实现上述任一实施方式中所述的大轨道分布范围下星载稀疏重航过SAR三维成像方法。

[0089] 本领域普通技术人员可以理解实现上述实施例方法中的全部或部分流程,是可以通过计算机程序来指令相关的硬件来完成,计算机程序可存储于一非易失性计算机可读取存储介质中,该计算机程序在执行时,可包括如上述各方法的实施例的流程。

[0090] 最后应说明的是:以上实施例仅用以说明本发明的技术方案,而非对其限制;尽管参照前述实施例对本发明进行了详细的说明,本领域的普通技术人员应当理解:其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分技术特征进行等同替换;而这些修改或者替换,并不使相应技术方案的本质脱离本发明各实施例技术方案的精神和范围。

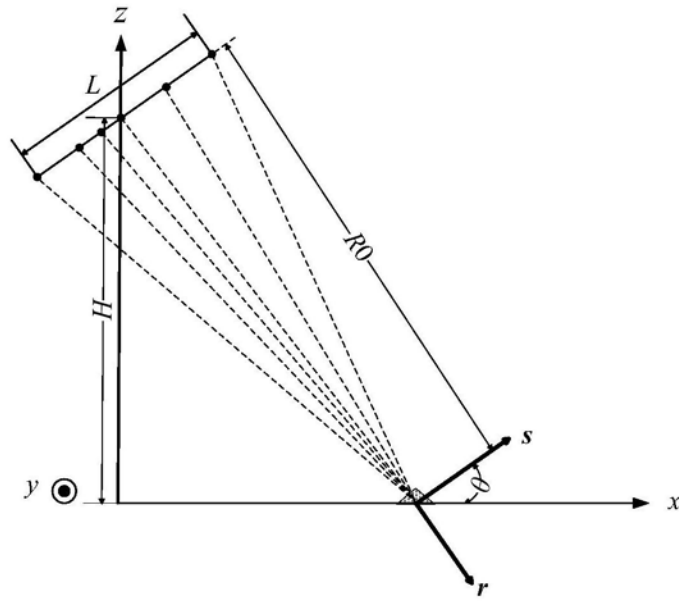


图1

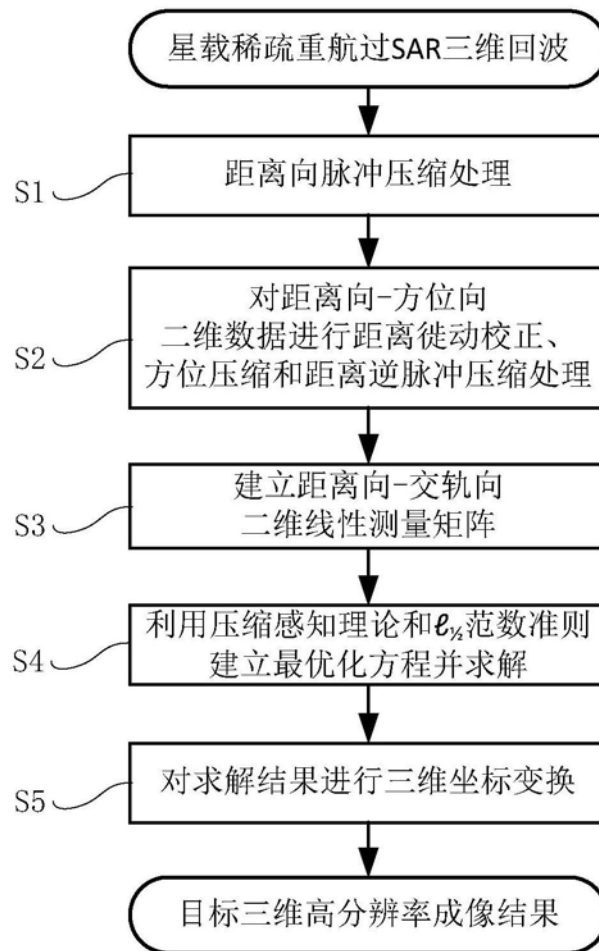


图2

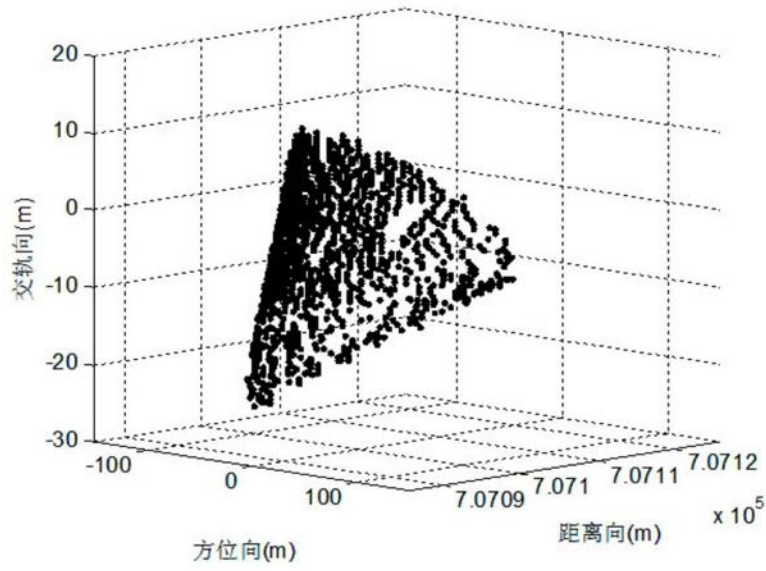


图3

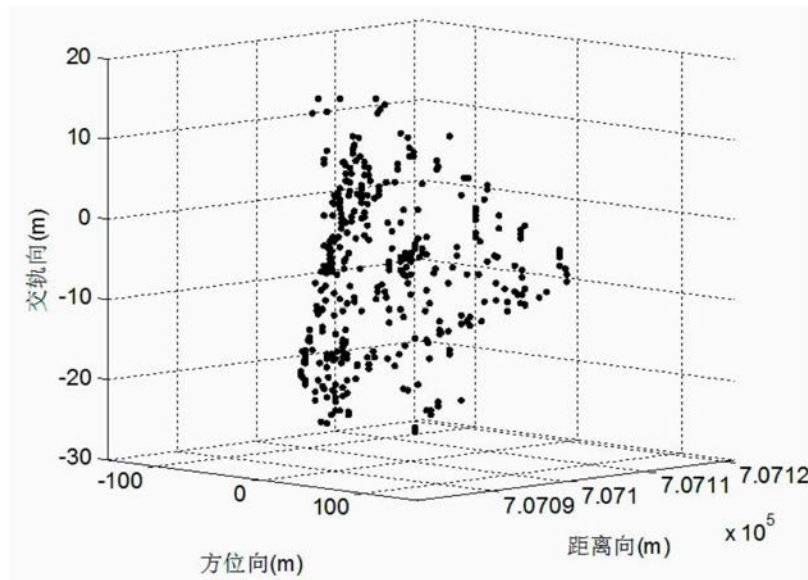


图4