

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2024 年 3 月 7 日 (07.03.2024)



(10) 国际公布号
WO 2024/045362 A1

(51) 国际专利分类号:

G01S 13/90 (2006.01) **G01S 7/41** (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2022/133528

(22) 国际申请日: 2022 年 11 月 22 日 (22.11.2022)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:

202211053214.6 2022年8月31日 (31.08.2022) CN

(71) 申请人: 南京隼眼电子科技有限公司 (NANJING HAWKEYE TECHNOLOGY CO., LTD) [CN/CN]; 中国江苏省南京市江宁经济技术开发区秣周东路9号, Jiangsu 211111 (CN)。东南大学 (SOUTHEAST UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国江苏省南京市江宁区东南大学路2号, Jiangsu 211102 (CN)。

(72) 发明人: 徐刚 (XU, Gang); 中国江苏省南京市江宁经济技术开发区秣周东路9号, Jiangsu 211111 (CN)。张邦杰 (ZHANG, Bangjie); 中国江苏省南京市江宁经济技术开发区秣周东路9号, Jiangsu 211111 (CN)。姬昂 (JI, Ang); 中国江苏省南京市江宁经济技术开发区秣周东路9号, Jiangsu 211111 (CN)。张慧 (ZHANG, Hui); 中国江苏省南京市江宁经济技术开发区秣周东路9号, Jiangsu 211111 (CN)。洪伟 (HONG, Wei); 中国江苏省南京市江宁经济技术开发区秣周东路9号, Jiangsu 211111 (CN)。郭坤鹏 (GUO, Kunpeng); 中国江苏省南京市江宁经济技术开发区秣周东路9号, Jiangsu 211111 (CN)。冯友怀 (FENG, Youhuai); 中国江苏省南京市江宁经济技术开发区秣周东路9号, Jiangsu 211111 (CN)。

(74) 代理人: 深圳紫藤知识产权代理有限公司 (PURPLEVINE INTELLECTUAL PROPERTY

(54) Title: TIME-DOMAIN IMAGING METHOD FOR VEHICLE-BORNE DOPPLER-DIVISION-MULTIPLE-ACCESS MIMO SYNTHETIC APERTURE RADAR

(54) 发明名称: 车载多普勒分集MIMO合成孔径雷达时域成像方法

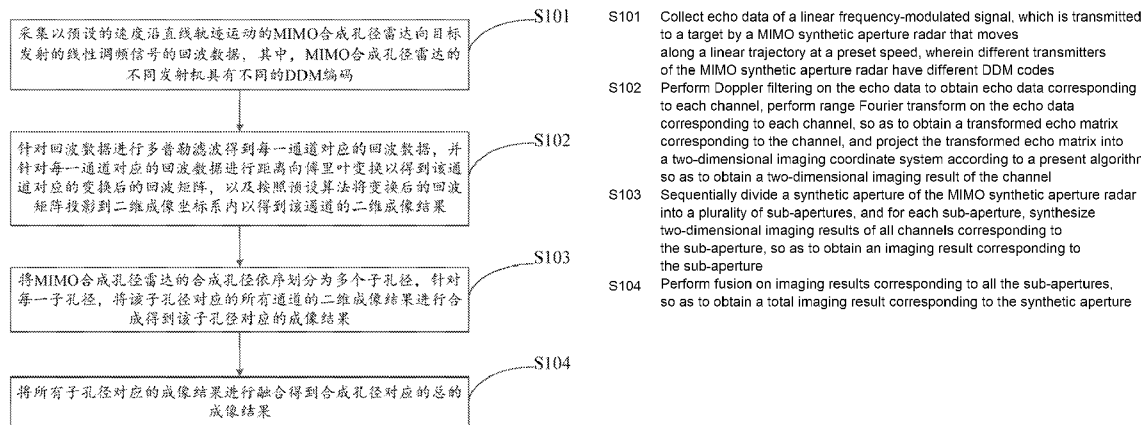


图 1

(57) Abstract: A time-domain imaging method for a vehicle-borne Doppler-division-multiple-access MIMO synthetic aperture radar. The method comprises: collecting echo data of a linear frequency-modulated signal, which is transmitted to a target by a MIMO synthetic aperture radar that moves along a linear trajectory at a preset speed (S101); performing Doppler filtering on the echo data to obtain echo data corresponding to each channel, and according to the echo data corresponding to each channel, obtaining a transformed echo matrix corresponding to the channel, and projecting the echo matrix into a two-dimensional imaging coordinate system, so as to obtain a two-dimensional imaging result of the channel (S102); sequentially dividing a synthetic aperture of the synthetic aperture radar into a plurality of sub-apertures, and synthesizing two-dimensional imaging results of all channels corresponding to the sub-aperture, so as to obtain an imaging result corresponding to the sub-aperture (S103); and performing image fusion on imaging results corresponding to all the sub-apertures, so as to obtain a total imaging result corresponding to the synthetic aperture (S104). Thus, wide-angle-of-view high-resolution imaging is realized.

(SHENZHEN) CO., LTD.); 中国广东省深圳市南山区粤海街道大冲社区华润置地大厦 C 座2901, Guangdong 518052 (CN)。

- (81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。
- (84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:
— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

(57) 摘要: 一种车载多普勒分集 MIMO 合成孔径雷达时域成像方法, 该方法包括: 采集以预设的速度沿直线轨迹运动的 MIMO 合成孔径雷达向目标发射的线性调频信号的回波数据 (S101); 针对回波数据进行多普勒滤波得到每一通道对应的回波数据, 并对根据每一通道对应的回波数据得到该通道对应的变换后的回波矩阵, 以及将回波矩阵投影到二维成像坐标系内以得到该通道的二维成像结果 (S102); 将合成孔径雷达的合成孔径依序划分为多个子孔径, 将每一子孔径对应的所有通道的二维成像结果进行合成得到该子孔径对应的成像结果 (S103); 将所有子孔径对应的成像结果进行图像融合得到合成孔径对应的总的成像结果 (S104), 从而实现宽视角高分辨成像。

车载多普勒分集 MIMO 合成孔径雷达时域成像方法

技术领域

本发明涉及雷达信号处理技术领域,尤其涉及一种车载多普勒分集 MIMO 合成孔径雷达时域成像方法。

5 背景技术

作为一种全天时、全天候微波传感工具,雷达在许多工程领域发挥了重要作用。其中,由于具有低成本、低功耗和尺寸小等优点,工作在毫米波段的调频连续波(FMCW, Frequency-Modulated Continuous Wave)系统已被广泛应用于车辆自动驾驶。目前,L2级自动驾驶已基本实现,L3及更高级别的自动驾驶技术则对毫米波雷达的性能提出了更为严格的要求。

车载雷达的成像主要有点云和合成孔径两种技术形式。点云在成像过程包含恒虚警检测等步骤,仅保留了感兴趣目标的图像,丢弃了场景的环境信息。而且点云通常比较稀疏,一般需要对图像进行多帧融合才能用于目标检测与识别。

与点云不同,车载合成孔径雷达(SAR, Synthetic Aperture Radar)使用宽带发射波形和雷达平台的运动实现二维高分辨率成像,同时保留了场景内所有位置的散射信息。相较于传统的机载或星载SAR,车载SAR目前存在一些独特的挑战:车载雷达距待观测区域较近,不满足远场条件;车载SAR需要提供很宽的视野(FOV, Field of View),这对运动补偿和弯曲校正等提出了很高的要求;车载SAR要求算法有较好的实时成像性能,这要求算法具有高度的并行性。

针对车载毫米波SAR成像存在的问题,国内外学者做了很多相关的工作,

如能够提供高实时成像性能和宽视野的 FMCW-SAR 是亟需解决的问题。

技术问题

本发明提供了一种车载多普勒分集 MIMO 合成孔径雷达时域成像方法，
通过对于发射机进行DDM编码并且滤波得到每一单通道对应的回波数据并基
5 于该回波数据二维成像，实现宽视角高分辨成像。

技术方案

第一方面，提供了一种车载多普勒分集 MIMO 合成孔径雷达时域成像方
法，所述方法包括：

采集以预设的速度沿直线轨迹运动的 MIMO 合成孔径雷达向目标发射的
10 线性调频信号的回波数据，其中，所述 MIMO 合成孔径雷达的不同发射机具
有不同的 DDM 编码；

针对所述回波数据进行多普勒滤波得到每一通道对应的回波数据，并针对
每一通道对应的回波数据进行距离向傅里叶变换以得到该通道对应的变换后
的回波矩阵，以及按照预设算法将所述变换后的回波矩阵投影到二维成像坐标
15 系内以得到该通道的二维成像结果；

将所述 MIMO 合成孔径雷达的合成孔径依序划分为多个子孔径，将每一
子孔径对应的所有所述通道的二维成像结果进行合成得到该子孔径对应的成
像结果；

将所有所述子孔径对应的所述成像结果进行融合得到所述合成孔径对应
20 的总的成像结果。

进一步地，所述针对所述回波数据进行多普勒滤波得到每一通道对应的回
波数据包括：

针对所述 MIMO 合成孔径雷达的每个通道, 设该通道由第 p 个发射机以及第 q 个接收机组成, 则通过如下方式得到该通道对应的回波数据:

针对所述第 q 个接收机接收到的回波数据 $S_{IF}^q(m, n)$, 沿第 m 行做离散傅里叶变换得到:

$$S_{DFT}^q(m, h) = \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N S_{IF}^q(m, n) \exp\left(\frac{-j2\pi(n-1)}{N}(h - \Delta_p)\right)$$

根据上式对回波数据 $S_{IF}^q(m, n)$ 进行多普勒域滤波以分离出该通道对应的回波数据 $S_{IF}^{pq}(m, n)$;

其中, m 为单个脉冲内采样点索引, n 为脉冲索引, 且 $n=1, 2, \dots, N$, j 为虚数单位, h 为多普勒单元索引, $\Delta_p = (N\phi_p)/(2\pi PRF)$, ϕ_p 为多普勒调制相位, PRF 为脉冲重复频率。

进一步地, 针对每一所述子孔径, 将该子孔径对应的所有所述通道的二维成像结果进行合成得到该子孔径对应的成像结果包括:

根据所述 MIMO 合成孔径雷达成像范围内的感兴趣区域的主波束指向以及波束宽度确定每一通道对应的权重系数;

将所述每一通道的像素点乘以该通道对应的权重系数后得到每一通道对应的权重图像;

将所有通道对应的权重图像进行合成得到该子孔径对应的成像结果。

进一步地, 所述针对每一通道对应的回波数据进行距离向傅里叶变换以得到该通道对应的变换后的回波矩阵, 并按照预设算法将所述变换后的回波矩阵

投影到二维成像坐标系内以得到该通道的二维成像结果包括：

(1) 基于该通道对应的所述回波矩阵估计该通道对应的多普勒中心频率以及多普勒调频率；

(2) 基于所述多普勒中心频率以及所述多普勒调频率确定该通道对应的
5 雷达当前航行速度估计值；

(3) 针对每个所述二维成像坐标系下的像素点，根据该像素点在所述二维成像坐标系下的坐标值确定该像素点对应的距离单元索引，并基于所述当前航行速度估计值确定该像素点的相干累加所需的补偿相位因子；

(4) 针对每个所述像素点，根据其对应的补偿相位因子以及距离单元索引和所述变换后的回波矩阵进行相干累加以得到该像素点的成像值。
10

进一步地，所述基于该通道对应的回波矩阵估计该通道对应的多普勒中心频率包括：

针对该通道对应的所述回波矩阵的每个行向量，设该行向量为 S_a ，则通过执行如下操作估计该通道对应的多普勒中心频率：

15 按照下式对该行向量 S_a 进行自相关以得到该行向量对应的自相关矩阵 R_a ；

$$R_a = S_a * S_a^* / N_0;$$

其中， N_0 表示所述回波矩阵的列数， S_a^* 是 S_a 的共轭转置；

根据下式确定该通道对应的所述多普勒中心频率 f_{dc} ：

$$f_{dc} = \frac{1}{A} \sum_{a=1}^A \frac{f_s}{2\pi} \text{angle}(R_a')$$

20 ;

其中, A 为回波矩阵的行数, R_a' 是 R_a 的逆傅里叶变换, $\text{angle}()$ 表示取相位操作, f_s 是该通道对应的接收机的采样频率。

进一步地, 根据下式确定该通道对应的所述多普勒调频率估计值 γ_d :

$$\gamma_d = \gamma + \frac{4(\text{PRF})^2}{N^2} \Delta R$$

5 其中, γ 为调频率, PRF 为脉冲重复频率, N 为脉冲索引, ΔR 为通过所述回波矩阵计算得到的前后视图的移动量。

进一步地, 所述根据所述多普勒调频率以及所述多普勒中心频率确定该通道对应的所述雷达当前航行速度估计值包括:

根据下式确定所述雷达当前航行速度估计值:

$$v = \sqrt{\frac{\lambda R_0 \gamma_d}{2} + \left(\frac{\lambda f_{dc}}{2} \right)^2}$$

10

其中, v 为所述雷达当前航行速度估计值, R_0 为场景中心距离, λ 为 MIMO 所述 MIMO 合成孔径雷达的载频对应的波长, f_{dc} 为所述通道对应的多普勒中心频率, γ_d 为所述通道对应的多普勒调频率估计值。

进一步地, 所述按照预设算法将所述变换后的回波矩阵投影到二维成像坐标系内以得到该通道的二维成像结果包括:

15

按照预设的网格划分模式将所述 MIMO 合成孔径雷达的成像区域划分成网格以构成所述二维成像坐标系, 并且所述网格中的每个网格元素分区构成一个所述像素点。

进一步地, 所述针对每个所述二维成像坐标系下的像素点, 根据该像素点在所述二维成像坐标系下的坐标值确定该像素点对应的距离单元索引, 包括:

20

按照下式计算第 n 个脉冲内雷达天线相位中心到像素点 x, y 的斜距

$R_n(x, y)$:

$$R_n(x, y) = \sqrt{\left(x - \frac{v(n-1)}{PRF}\right)^2 + y^2}$$

其中, y 为该像素点的纵坐标, x 是该像素点的横坐标, v 为所述雷达当

5 前航行速度估计值, PRF 为脉冲重复频率;

根据下式确定第 n 个脉冲下该像素点对应的所述距离单元索引 Id_n :

$$Id_n = \lceil R_n(x, y) / (\Delta r / \beta) \rceil$$

其中, Δr 为采样前的信号采样间隔, β 为插值倍数, $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整操作。

10 进一步地, 针对每个所述二维成像坐标系下的像素点, 基于所述当前航行速度估计值确定该像素点的相干累加所需的补偿相位因子包括:

根据该像素点对应的所述斜距确定该像素点的相干累加所需的所述补偿相位因子。

15 进一步地, 所述根据该像素点对应的所述斜距确定该像素点的相干累加所需的所述补偿相位因子包括:

根据下式确定第 n 个脉冲下该像素点对应的所述补偿相位因子 ϕ_n :

$$\phi_n = \frac{4\pi R_n(x, y)}{\lambda}$$

其中, $R_n(x,y)$ 为第 n 个脉冲内雷达天线相位中心到像素点 x,y 的斜距, λ 为所述 MIMO 合成孔径雷达的载频对应的波长。

进一步地, 所述针对每个所述像素点, 根据其对应的补偿相位因子以及距离单元索引以及所述变换后的回波矩阵进行相干累加以得到该像素点的成像

5 值包括:

根据下式计算每一所述像素点对应的所述成像值:

$$I_n = \sum_{n=1}^N s_r(Id_n, n) \exp(j\phi_n)$$

其中, I 表示第 n 个脉冲下该像素点对应的成像值, $s_r(Id,n)$ 表示所述变换后的回波矩阵 s_r 中该第 n 个脉冲下该像素点对应的距离单元索引 Id_n 所指示的
10 矩阵元素, j 为虚数单位, ϕ_n 为第 n 个脉冲下该像素点对应的所述补偿相位因子。

进一步地, 所述网格中的每个网格元素分区的面积不大于所述 MIMO 合成孔径雷达的最小分辨面积。

15 有益效果

在本发明中, 对每一个通道而言, 由于对发射机的发射脉冲进行了 DDM 编码, 因此, 可以将回波数据进行多普勒滤波得到每一个通道对应的回波数据, 针对每一个通道的回波数据进行成像, 再根据对于子孔径的划分, 将所有通道对应的成像结果合成为每一个子孔径的成像结果, 最终根据所有子孔径对应的
20 成像结果融合得到总的成像结果, 从而有效解决了近场和广角聚焦问题, 从而使得合成孔径雷达具有较高的成像性能以及较宽的成像视野。进一步地, 在得

到所有通道对应的权重系数后，在对每一子孔径的成像结果进行合成时之前，将该子孔径的每一通道中图像的像素点均乘以该通道对应的权重系数之后，将子孔径的所有通道对应的乘以权重系数后的权重图像进行合成，从而得到该子孔径的图像，将所有子孔径的图像进行融合从而得到合成孔径的成像结果，一方面，本发明可以根据感兴趣区域的主波束指向以及宽度从而得到每一个通道对应的权重系数，使得感兴趣区域的成像效果更好，另一方面，如果感兴趣区域只占据成像区域某一小部分，那么使用本发明提出的方法可以明显降低计算复杂度，提高实时成像性能。

附图说明

10 为了更清楚地说明本发明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一简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图是本发明的一些实施例，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动的前提下，还可以根据这些附图获得其他的实施例。

15 图 1 是本发明实施例中车载多普勒分集 MIMO 合成孔径雷达时域成像方法的流程图；

图 2 是本发明实施例中 MIMO 合成孔径雷达成像几何；

图 3 是本发明实施例中 MIMO 合成孔径雷达在成像过程中照射范围的示意图；

图 4 是本发明实施例中实验一的单通道 SAR 成像实验波形参数图；

20 图 5a 是本发明实施例中实验一的单通道 SAR 成像对应的光学图像；

图 5b 是本发明实施例中实验一的单通道 SAR 成像实验结果图；

图 6 是本发明实施例中实验二的 MIMO SAR 成像实验波形参数图；

图 7 是本发明实施例中实验二的 MIMO SAR 成像实验天线排布模式图；

图 8 是本发明实施例中实验二的 MIMO SAR 成像实验某一通道距离-多普勒图；

图 9a 是本发明实施例中实验二的 MIMO SAR 成像结果；

图 9b 是本发明实施例中实验二的单通道 SAR 成像结果；

5 图 10 是本发明实施例中实验二的 MIMO SAR 成像实验成像场景光学图；

图 11 是本发明实施例中实验二的 MIMO SAR 成像实验功率模式对比图；

图 12 是本发明实施例中实验二的 MIMO SAR 单车辆位置成像图；

图 13a-13d 是本发明实施例中实验二的 MIMO SAR 成像实验单孔径成像对比图。

10 本发明的实施方式

为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚，下面将结合本发明中的附图，对本发明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前提下所获得的所有其他实施例，都属于

15 本发明保护的范围。

由于雷达工作时周期性发送脉冲信号，在脉冲间隔时间内对回波信号进行采样。回波采样间隔与脉冲重复间隔（脉冲周期）虽然在一个时间轴上，但是在量级上差别非常大，所以将回波采样间隔与脉冲重复周期分成了两个维度，分别称为快时间和慢时间。将每个脉冲间隔内的回波分割出来作为一行，以二
20 维数组的形式存储采样到的回波信号，那么时间轴上的横轴表示快时间，纵轴表示慢时间。

MIMO（Multiple-Input Multiple-Output，多输入多输出）技术是指在发射端和接收端分别使用多个发射天线和接收天线，使信号通过发射端与接收端的

多个天线传送和接收，从而改善通信质量。它能充分利用空间资源，通过多个天线实现多发多收，在不增加频谱资源和天线发射功率的情况下，可以成倍地提高系统信道容量，显示出明显的优势、被视为下一代移动通信的核心技术。

DDM (Doppler Division Multiple access, 多普勒分集) 波形又称为紧密交错型频分复用正交波形, 它的频谱几乎重叠, 拥有较好的多输入单输出对消比, 可避免不同频率信号引起的目标或杂波 RCS (Radar Cross Section, 雷达截面积) 去相关。DDM 波形之间的频率偏移量 Δf 很小, 使用多普勒滤波器组可将不同发射单元的信号相互分离。

下面结合图 1-12 详细描述本发明的车载多普勒分集 MIMO 合成孔径雷达时域成像方法。

如图 1 所示, 本发明提供了一车载多普勒分集 MIMO 合成孔径雷达时域成像方法, 该方法包括:

S101、采集以预设的速度沿直线轨迹运动的 MIMO 合成孔径雷达向目标发射的线性调频信号的回波数据, 其中, MIMO 合成孔径雷达的不同发射机具有不同的 DDM 编码。

在发明中, 合成孔径雷达可以为车载合成孔径雷达, 该雷达的工作场景需要满足是以下两个条件: (1) 合成孔径雷达以预设的速度沿直线轨迹运动, 发射线性调频信号; (2) 发射信号期间, 合成孔径雷达正侧视工作, 并且雷达波束中心指向不变, 由于本发明中是针对合成孔径雷达的, 合成孔径雷达的工作场景必须要满足发射信号期间, 合成孔径雷达正侧视工作, 并且雷达波束中心指向不变, 因此上述步骤中隐含了条件 (2)。

对发射脉冲进行 DDM 编码的具体方法为: 调频连续波雷达的第 p 个发射

机的发射脉冲 s_{Tx}^p 可表示为:

$$s_{Tx}^p(t_r, t_m) = G_p \text{rect}\left(\frac{t_r}{T}\right) \exp(j2\pi f_c t_r) \exp(j\pi \gamma t_r^2) \exp(j\varphi_p t_m)$$

其中, t_r 为脉冲间的快时间, t_m 为脉冲间的慢时间, G_p 为发射增益, T 为脉冲宽度, f_c 是雷达载频, γ 为调频率, $\text{rect}()$ 为矩形窗函数, φ_p 为多普勒调制相位, 以四个发射机的情况为例, DDM 编码分别为 $\varphi_p / PRF = \pi/2, \pi, 3\pi/2, 2\pi$, 其中, PRF (pulse repetition frequency) 为脉冲重复频率。

S102、针对回波数据进行多普勒滤波得到每一通道对应的回波数据, 并针对每一通道对应的回波数据进行距离向傅里叶变换以得到该通道对应的变换后的回波矩阵, 以及按照预设算法将变换后的回波矩阵投影到二维成像坐标系内以得到该通道的二维成像结果。

S103、将 MIMO 合成孔径雷达的合成孔径依序划分为多个子孔径, 针对每一子孔径, 将该子孔径对应的所有通道的二维成像结果进行合成得到该子孔径对应的成像结果。

S104、将所有子孔径对应的成像结果进行融合得到合成孔径对应的总的成像结果。

在本发明中, 对每一个通道而言, 由于对发射机的发射脉冲进行了 DDM 编码, 因此, 可以将回波数据进行多普勒滤波得到每一个通道对应的回波数据, 针对每一个通道的回波数据进行成像, 再将每一子孔径对应的所有通道的二维成像结果进行合成得到该子孔径对应的成像结果, 最终根据所有子孔径对应的

成像结果融合得到总的成像结果,从而有效解决了近场和广角聚焦问题,从而使得合成孔径雷达具有较高的成像性能以及较宽的成像视野,实现了实现宽视角高分辨成像。

进一步地,针对回波数据进行多普勒滤波得到每一通道对应的回波数据包

5 括:

针对 MIMO 合成孔径雷达的每个通道,设该通道由第 p 个发射机以及第 q 个接收机组成,则通过如下方式得到该通道对应的回波数据:

针对第 q 个接收机接收到的回波数据 $S_{IF}^q(m, n)$, 沿第 m 行做离散傅里叶变换得到:

$$S_{DFT}^q(m, h) = \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N S_{IF}^q(m, n) \exp\left(\frac{-j2\pi(n-1)}{N}(h - \Delta_p)\right)$$

10

根据上式对回波数据 $S_{IF}^q(m, n)$ 进行多普勒域滤波以分离出该通道对应的回波数据 $S_{IF}^{pq}(m, n)$;

其中, m 为单个脉冲内采样点索引, n 为脉冲索引, 且 $n=1, 2, \dots, N$, j 为虚数单位, h 为多普勒单元索引, $\Delta_p = (N\phi_p)/(2\pi PRF)$, ϕ_p 为多普勒调制相位, PRF 为脉冲重复频率。

15

在本实施例中,对针对回波数据进行多普勒滤波得到每一通道对应的回波数据之前,对回波数据进行解线性调频操作并做模数转换,而后对回波数据进行多普勒滤波,具体地:

单个通道的离散中频信号表达式为:

$$\mathbf{S}_{IF}^{pq}(m, n) = G_p G_q \sum_{k=1}^K \sigma_k \exp(j\varphi_k^{pq}) \exp\left(\frac{-j4\pi\gamma R_k(n)}{c} \cdot \frac{m-1}{f_s}\right) \exp\left(\frac{-j4\pi f_c R_k(n)}{c}\right) \exp\left(j4\pi\gamma \left(\frac{R_k(n)}{c}\right)^2\right)$$

其中, f_c 是雷达载频, G_q 为接收增益, $m=1, 2, \dots, M$ 为单个脉冲内采

样点索引, $n=1, 2, \dots, N$ 为脉冲索引, $k=1, 2, \dots, K$ 为散射点索引, σ_k 为第 k 个散射点的反射系数, 散射点是分布在场景中的目标上的, 与目标相对

5 应。 φ_k^{pq} 为对于由第 p 个发射机以及第 q 个接收机组成的通道中对于第 k 个散射点, 天线阵元位置产生的相位差, 在远场和平面波条件下可以表示为:

$$\varphi_k^{pq} = \frac{2\pi}{\lambda} (d_p + d_q) \sin(\theta_k)$$

其中, λ 为雷达载频对应的波长, θ_k 为第 k 个散射点相对于垂直阵列方向的夹角, d_p 和 d_q 分别为发射机和接收机在阵列中的基线长度。进一步的, 第 q

10 个接收机对应的离散中频信号 $\mathbf{S}_{IF}^q$ 表达式为:

$$\begin{aligned}
S_{IF}^q(m, n) &= G_q \sum_{p=1}^P G_p \exp\left(\frac{j\varphi_p(n-1)}{PRF}\right) \sum_{k=1}^K \sigma_k \exp\left(\frac{-j4\pi f_c R_k(n)}{c}\right) \\
&\quad \exp\left(\frac{-j4\pi\gamma R_k(n)}{c} \cdot \frac{m-1}{f_s}\right) \exp\left(j4\pi\gamma \left(\frac{R_k(n)}{c}\right)^2\right) \exp(j\varphi_k^{pq}) \\
&= \sum_{p=1}^P \exp\left(\frac{j\varphi_p(n-1)}{PRF}\right) S_{IF}^{pq}(m, n)
\end{aligned}$$

对上述信号，沿第 m 行做离散傅里叶变换，可得：

$$S_{DFT}^q(m, h) = \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N S_{IF}^{pq}(m, n) \exp\left(\frac{-j2\pi(n-1)}{N} (h - \Delta_p)\right)$$

5 其中， $\Delta_p = (N\varphi_p) / (2\pi PRF)$ ， h 为多普勒单元索引，可以看出经过 DDM 编码，不同发射通道的回波信号在多普勒域中占据不同带宽，因此可通过多普勒滤波分离出单通道信号。

进一步地，针对于每一子孔径，将该子孔径对应的所有通道的二维成像结果进行合成得到该子孔径对应的成像结果包括：

10 根据 MIMO 合成孔径雷达成像范围内的感兴趣区域的主波束指向以及波束宽度确定每一通道对应的权重系数；

将每一通道的像素点乘以该通道对应的权重系数后得到每一通道对应的权重图像；

将所有通道对应的权重图像进行合成得到该子孔径对应的成像结果。

15 在本步骤中，可以采用基于交替方向乘子法的数字波束形成算法得到权重系数，也可以基于二维图像坐标的传统数字波束形成方法得到权重系数，其中，

基于二维图像坐标的传统数字波束形成方法得到权重系数的具体步骤为：

在距离-方位图像上，根据坐标换算得到坐标点(x,y)对应的角度

$\theta = \arcsin(x / \sqrt{x^2 + y^2})$ ，并设置权重向量：

$$\mathbf{w} = \begin{pmatrix} 1 \\ \exp(j\pi \sin \theta) \\ \vdots \\ \exp(j\pi(P+Q-1)\sin \theta) \end{pmatrix}$$

5 其中，P 和 Q 分别为雷达的发射机以及接收机的总数，因此，权重向量中的一个元素对应于一个通道，也即是该通道的权重系数。

在此基础上，将 $\pm 45^\circ$ 的宽视野均匀划分为 L 个网格， θ_l 处的功率模式可以表示为：

$$P(\theta_l) = \|\mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta_l)\|_2^2 = \mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta_l) \mathbf{a}^H(\theta_l) \mathbf{w} ;$$

10 其中， $\|\cdot\|_2$ 表示取向量的二范数。用最小均方误差来衡量实际功率模式

$P(\theta_l)$ 与期望功率模式 $D(\theta_l)$ 的近似程度，得到一个优化问题，目标函数为：

$$\min_{\mathbf{w}} \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \|\mathbf{D}(\theta_l) - \mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta_l) \mathbf{a}^H(\theta_l) \mathbf{w}\|_2^2$$

引入两个新变量：

-16-

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} 1 \\ \mathbf{w} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{R}(\theta_l) = \begin{pmatrix} D(\theta_l) & \mathbf{0}^T \\ \mathbf{0} & -a(\theta_l)a^H(\theta_l) \end{pmatrix}$$

那么优化问题可以更简洁地描述为：

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{u}} \quad & \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \|\mathbf{u}^H \mathbf{R}(\theta_l) \mathbf{u}\|_2^2 \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{u}^H \mathbf{E} \mathbf{u} = 1 \end{aligned}$$

其中，E 为第一个元素为 1，其他元素为 0 的对角矩阵。直接求解上式十

5 分困难，可引入辅助变量 $\mathbf{v}$ ，原问题形式变为：

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{u}, \mathbf{v}} \quad & \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \|\mathbf{u}^H \mathbf{R}(\theta_l) \mathbf{v}\|_2^2 \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{u} = \mathbf{v}, \mathbf{u}^H \mathbf{E} \mathbf{v} = 1 \end{aligned}$$

改写后的问题形式只包含相互独立的 $\mathbf{u}$ 和 $\mathbf{v}$ 的二次项，可以在 ADMM 框架下求解。增广拉格朗日函数可表示为

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \|\mathbf{u}^H \mathbf{R}(\theta_l) \mathbf{v}\|_2^2 + \text{Re}\{\mathbf{r}_1^H (\mathbf{u} - \mathbf{v})\} + \frac{\rho_1}{2} \|\mathbf{u} - \mathbf{v}\|_2^2 \\ & + \text{Re}\left\{\mathbf{r}_2^H (\mathbf{u}^H \mathbf{E} \mathbf{v} - 1)\right\} + \frac{\rho_2}{2} \|\mathbf{u}^H \mathbf{E} \mathbf{v} - 1\|_2^2 \end{aligned}$$

10 其中， $\mathbf{r}_1$ 和 $\mathbf{r}_2$ 为对偶变量， ρ_1 和 ρ_2 为惩罚系数。接下推导 $\mathcal{L}$ 关于变量 $\mathbf{u}$ 和 $\mathbf{v}$ 的共轭梯度：

在每次迭代，直至收敛的过程中

-17-

(1) 更新 $\mathbf{u}$: 以 $\mathbf{u}$ 为变量, $\mathcal{L}$ 可表示为

$$\begin{aligned}\mathcal{L}(\mathbf{u}) = & \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \|\mathbf{v}^H \mathbf{R}^H(\theta_i) \mathbf{u}\|_2^2 + \frac{\rho_1}{2} \left\| \mathbf{u} - \mathbf{v} + \frac{\mathbf{r}_1}{\rho_1} \right\|_2^2 \\ & + \frac{\rho_2}{2} \left\| \mathbf{v}^H \mathbf{E}^H \mathbf{u} - 1 + \frac{\mathbf{r}_2^H}{\rho_2} \right\|_2^2\end{aligned}$$

上式关于 $\mathbf{u}$ 的共轭梯度为

$$\begin{aligned}\nabla_{\mathbf{u}} \mathcal{L}(\mathbf{u}) = & \left(\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \mathbf{R}(\theta_i) \mathbf{v} \mathbf{v}^H \mathbf{R}^H(\theta_i) \right) \mathbf{u} + \frac{\rho_1}{2} \left(\mathbf{u} - \mathbf{v} + \frac{\mathbf{r}_1}{\rho_1} \right) \\ & + \frac{\rho_2}{2} \mathbf{E} \mathbf{v} \left(\mathbf{v}^H \mathbf{E}^H \mathbf{u} - 1 + \frac{\mathbf{r}_2^H}{\rho_2} \right)\end{aligned}$$

5 令上式为 0, 那么第 i 次迭代中有

$$\mathbf{u}^{(i+1)} = \Xi^{(i)-1} \Phi^{(i)}$$

其中

$$\begin{aligned}\Xi^{(i)} = & \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \mathbf{R}(\theta_i) \mathbf{v}^{(i)} \mathbf{v}^{(i)H} \mathbf{R}^H(\theta_i) + \frac{\rho_1}{2} \mathbf{I} + \frac{\rho_2}{2} \mathbf{E} \mathbf{v}^{(i)} \mathbf{v}^{(i)H} \mathbf{E}^H \\ \Phi^{(i)} = & \frac{\rho_1}{2} \left(\mathbf{v}^{(i)} - \frac{\mathbf{r}_1^{(i)}}{\rho_1} \right) + \frac{\rho_2}{2} \mathbf{E} \mathbf{v}^{(i)} \left(1 - \frac{\mathbf{r}_2^{(i)H}}{\rho_2} \right)\end{aligned}$$

(2) 更新 $\mathbf{v}$: 类似于更新 $\mathbf{u}$ 的过程, 第 i 次迭代中有

$$\mathbf{v}^{(i+1)} = \Theta^{(i)-1} \Psi^{(i)}$$

10

其中

$$\Theta^{(i)} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mathbf{R}^H(\theta_l) \mathbf{u}^{(i+1)} \mathbf{u}^{(i+1)H} \mathbf{R}(\theta_l) + \frac{\rho_1}{2} I + \frac{\rho_2}{2} \mathbf{E}^H \mathbf{u}^{(i+1)} \mathbf{u}^{(i+1)H} \mathbf{E}$$

$$\Phi^{(i)} = \frac{\rho_1}{2} \left(\mathbf{u}^{(i+1)} + \frac{\mathbf{r}_1^{(i)}}{\rho_1} \right) + \frac{\rho_2}{2} \mathbf{E}^H \mathbf{u}^{(i+1)} \left(\mathbf{1} - \frac{\mathbf{r}_2^{(i)}}{\rho_2} \right)$$

(3) 更新对偶变量：根据前面的结果，对偶变量 $\mathbf{r}_1^{(i+1)}$ 和 $\mathbf{r}_2^{(i+1)}$ 可以更新为

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_1^{(i+1)} &= \mathbf{r}_1^{(i)} + \rho_1 \left(\mathbf{u}^{(i+1)} - \mathbf{v}^{(i+1)} \right) \\ \mathbf{r}_2^{(i+1)} &= \mathbf{r}_2^{(i)} + \rho_2 \left(\mathbf{u}^{(i+1)H} \mathbf{E} \mathbf{v}^{(i+1)} \right) \end{aligned}$$

5 迭代结束，输出 $\mathbf{u}^{(i+1)}$ 和 $\mathbf{v}^{(i+1)}$ 。

在迭代结束后，根据 $\mathbf{u}$ 得到权重向量中每一个元素，从而确定所有通道对应的权重系数。

由此，可以根据感兴趣区域的主波束指向，波束宽度计算出所有通道对应的权重系数。

10 在得到所有通道对应的权重系数后，在对每一子孔径的成像结果进行合成时之前，将该子孔径的每一通道中图像的像素点均乘以该通道对应的权重系数之后，将子孔径的所有通道对应的乘以权重系数后的权重图像进行合成，从而得到该子孔径的图像，将所有子孔径的图像进行融合从而得到合成孔径的成像结果。一方面，本发明可以根据感兴趣区域的主波束指向以及宽度从而得到每一个通道对应的权重系数，使得感兴趣区域的成像效果更好，另一方面，如果

15 感兴趣区域只占据成像区域某一小部分，那么使用本发明提出的方法可以明显

降低计算复杂度, 提高实时成像性能。

进一步地, 针对每一通道对应的回波数据进行距离向傅里叶变换以得到该通道对应的变换后的回波矩阵, 并按照预设算法将变换后的回波矩阵投影到二维成像坐标系内以得到该通道的二维成像结果包括:

5 (1) 基于该通道对应的回波矩阵估计该通道对应的多普勒中心频率以及多普勒调频率;

(2) 基于多普勒中心频率以及多普勒调频率确定该通道对应的雷达当前航行速度估计值;

(3) 针对每个二维成像坐标系下的像素点, 根据该像素点在二维成像坐标系下的坐标值确定该像素点对应的距离单元索引, 并基于当前航行速度估计值确定该像素点的相干累加所需的补偿相位因子;

(4) 针对每个像素点, 根据其对应的补偿相位因子以及距离单元索引和变换后的回波矩阵进行相干累加以得到该像素点的成像值。

进一步地,基于该通道对应的回波矩阵估计该通道对应的多普勒中心频率

针对该通道对应的回波矩阵的每个行向量, 设该行向量为 S_a , 则通过执行如下操作估计该通道对应的多普勒中心频率:

按照下式对该行向量 S_a 进行自相关以得到该行向量对应的自相关矩阵 R_a ;

$$R_a = S_a * S_a^* / N_0;$$

其中, N_0 表示回波矩阵的列数, S_a^* 是 S_a 的共轭转置;

根据下式确定该通道对应的多普勒中心频率 f_{dc} :

$$f_{dc} = \frac{1}{A} \sum_{a=1}^A \frac{f_s}{2\pi} \text{angle}(R_a')$$

其中，A 为回波矩阵的行数， R_a' 是 R_a 的逆傅里叶变换后的矩阵， $\text{angle}()$ 表示取相位操作， f_s 是该通道对应的接收机的采样频率。

进一步地，根据下式确定该通道对应的多普勒调频率估计值 γ_d ：

$$\gamma_d = \gamma + \frac{4(\text{PRF})^2}{N^2} \Delta R$$

5

其中， γ 为调频率，PRF 为脉冲重复频率，N 为脉冲索引， ΔR 为通过回波矩阵计算得到的前后视图的移动量。

进一步地，根据多普勒调频率以及多普勒中心频率确定该通道对应的雷达当前航行速度估计值包括：

10 根据下式确定雷达当前航行速度估计值：

$$v = \sqrt{\frac{\lambda R_0 \gamma_d}{2} + \left(\frac{\lambda f_{dc}}{2} \right)^2}$$

其中， v 为雷达当前航行速度估计值， R_0 为场景中心距离， λ 为合成孔径雷达的载频对应的波长， f_{dc} 为通道对应的多普勒中心频率， γ_d 为通道对应的多普勒调频率估计值。具体地，场景为成像区域，场景中心距离为场景的中心到合成孔径雷达之间的垂直距离，示例性地，场景的距离向为 $[a,b]$ ，方位向为 $[-c,c]$ ，那么场景的中心为 $[(a+b)/2,0]$ ， λ 是雷达载频对应的波长。

15

更进一步地，还可以通过多普勒中心频率确定雷达视线角 θ_0 ，计算公式如下：

$$\theta_0 = \arcsin\left(\frac{\lambda f_{dc}}{2v}\right)$$

可以通过雷达视线角 θ_0 判断合成孔径雷达是否正侧视工作。

进一步地,按照预设算法将变换后的回波矩阵投影到二维成像坐标系内以得到该通道的二维成像结果包括:

- 5 按照预设的网格划分模式将合成孔径雷达的成像区域划分成网格以构成二维成像坐标系,并且网格中的每个网格元素分区构成一个像素点。

进一步地,针对每个二维成像坐标系下的像素点,根据该像素点在二维成像坐标系下的坐标值确定该像素点对应的距离单元索引,包括:

按照下式计算第 n 个脉冲内雷达天线相位中心到像素点 x,y 的斜距

10 $R_n(x,y)$:

$$R_n(x, y) = \sqrt{\left(x - \frac{v(n-1)}{PRF}\right)^2 + y^2}$$

其中, y 为该像素点的纵坐标, x 是该像素点的横坐标, v 为雷达当前航行速度估计值, PRF 为脉冲重复频率;

根据下式确定第 n 个脉冲下该像素点对应的距离单元索引 Id_n :

$$Id_n = \lceil R_n(x, y) / (\Delta r / \beta) \rceil$$

15

其中, Δr 为采样前的信号采样间隔, β 为插值倍数, $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整操作。

在本实施例中,在进行投影之前,先要构建合成孔径雷达到目标之前的距离模型,由于本发明中合成孔径雷达的工作场景为(1)合成孔径雷达以预设的速度沿直线轨迹运动,发射线性调频信号;(2)发射信号期间,合成孔径雷达正侧视工作,并且雷达波束中心指向不变,如图2所示,由于发射脉冲宽度和电磁波传播时延都远小于脉冲重复间隔时间,对于同一脉冲可以认为雷达在同一位置发射和接收散射回波。定义雷达运动方向为x轴正方向,雷达波束中心指向为y轴正方向,在此不考虑脉冲间的快时间 $\hat{t}$ 的影响,距离模型可以近似为:

$$R(t_m) = \sqrt{(x - v_0 t_m)^2 + y^2}$$

10 其中, t_m 为脉冲间的慢时间, v_0 为雷达速度。进一步地, $t_m = (n-1)/PRF$, 因此, 可得第 n 个脉冲内雷达天线相位中心到像素点 x, y 的斜距 $R_n(x, y)$:

$$R_n(x, y) = \sqrt{\left(x - \frac{v(n-1)}{PRF}\right)^2 + y^2}。$$

进一步地,针对每个二维成像坐标系下的像素点,基于当前航行速度估计值确定该像素点的相干累加所需的补偿相位因子包括:

15 根据该像素点对应的斜距确定该像素点的相干累加所需的补偿相位因子。

具体地,根据该像素点对应的斜距确定该像素点的相干累加所需的补偿相位因子包括:

根据下式确定第 n 个脉冲下该像素点对应的补偿相位因子 ϕ_n :

$$\phi_n = \frac{4\pi R_n(x, y)}{\lambda};$$

其中, $R_n(x, y)$ 为第 n 个脉冲内雷达天线相位中心到像素点 x, y 的斜距, λ 为合成孔径雷达的载频对应的波长。

进一步地, 针对每个像素点, 根据其对应的补偿相位因子以及距离单元索引以及变换后的回波矩阵进行相干累加以得到该像素点的成像值包括:

根据下式计算每一像素点对应的成像值:

$$I_n = \sum_{n=1}^N s_r(Id_n, n) \exp(j\phi_n);$$

其中, I 表示第 n 个脉冲下该像素点对应的成像值, $s_r(Id, n)$ 表示变换后的回波矩阵 s_r 中该第 n 个脉冲下该像素点对应的距离单元索引 Id_n 所指示的矩阵元素, j 为虚数单位, ϕ_n 为第 n 个脉冲下该像素点对应的补偿相位因子。

进一步地, 网格中的每个网格元素分区的面积不大于合成孔径雷达的最小分辨面积。

更进一步地, 为精确补偿相位进行相干积累成像, 在划分成像网格时, 划分的网格大小尽量小于 SAR 成像分辨率, 即:

$$\begin{cases} \Delta x < \rho_a \\ \Delta y < \rho_r \end{cases}$$

其中, Δx 为成像平面方位向网格大小, Δy 为距离向网格大小。

为说明本发明 SAR 成像方法的有效性，使用 TI (Texas Instruments) 毫米波级联雷达的 RF (Wireless Module) 模块和 DSP (Digital Signal Processing) 模块，通过在典型场景停车场实地实验并处理实测数据来进行进一步的论证：

实验一

5 1、实验参数

参照图 3，实验过程中车载毫米波雷达理想运动轨迹为沿 x 轴正方向以速度 v_1 运动，雷达波束中心始终沿 y 轴正方向。实验过程中雷达采取单发单收工作模式，图 4 给出了波形参数，表 1 给出了单通道 SAR 成像实验系统参数。

对单通道回波信号，无需进行 DDM 编码和多普勒滤波，使用回波数据估计运动参数后，进行二维成像即可。

表 1

系统参数	变量
距离向分辨率	0.15 m
最大无模糊距离	76.8 m
方位向分辨率	≈ 0.2 m
最大无模糊速度	$\approx \pm 4.7$ m/s

2、实验过程与结果

图 5a 为实际场景光学图像，图 5b 为单通道二维成像结果。对比图 5a 以及图 5b 可以看出，其中 1 为井盖，2 为空车位，SAR 成像结果清晰显示了汽车的轮廓，反映了车辆的停车位置以及空车位的位置，同时也能从 SAR 图像中观察到井盖和混凝土块之间的交界处。成像区域距雷达平台 10~30 米，视野范围为 $\pm 45^\circ$ ，成像结果的边缘未出现几何畸变，这也说明了本发明提出的成像方法在近场和宽视野条件下的高分辨率性能。

20 实验二

为进一步说明本发明提出的基于 DDM 的多通道二维成像方法的有效性，通过以下 MIMO SAR 实验进行验证：

1、实验参数

同样参照图 3，实验过程中车载毫米波雷达理想运动轨迹为沿 x 轴正方向以速度 v_1 运动，雷达波束中心始终沿 y 轴正方向，雷达以正侧视对某处停车场进行观测。实验过程中雷达采取 2 发 8 收工作模式，2 个发射机 DDM 编码为 0 或者 π ，因此最大无模糊速度变为理论值的一半。图 6 给出了波形参数，图 7 展示了天线阵列的排布模式，表 2 给出了 MIMO SAR 成像实验系统参数。

表 2

系统参数	变量
距离向分辨率	0.0586 m
最大无模糊距离	30 m
方位向分辨率	≈ 0.05 m
最大无模糊速度	$\approx \pm 9.5541$ m/s

某个接收机回波信号信道分离前其距离-多普勒图像，如图 8 所示，可以看出两个发射通道对应的回波在图像中占据不同的位置，这也印证了本发明提出的成像方法中关于多普勒滤波的分析。对回波信号进行多普勒滤波，分离出共 16 个单通道信号。

为展示本发明使用的基于交替方向乘子法的数字波束形成算法的优点，首先基于经典的数字波束形成方法对单通道 SAR 图像进行融合，如图 9a 和图 9b 分别给出了 MIMO SAR 和单通道 SAR 成像结果，图 10 是对应的场景光学图像。可以看出，相较于单通道图像，MIMO 阵列提供了额外的高增益，因此成像结果中汽车车身轮廓更加清晰一些。

为演示基于交替方向乘子法的数字波束方法，基于 16 个元素的均匀线性

阵列进行仿真实验。感兴趣区域设置为主波束指向 10° ，波束宽度为 20° 。在使用本发明提出的成像方法后，经过约 40 次迭代后算法收敛，图 11 给出了期望与算法结果的功率方向图对比结果，将这组权向量应用到 16 个通道的二维成像结果中。为便于观察，感兴趣区域为一个车辆位置，图 12 为成像场景中一个车辆位置的结果，图 13a~13c 分别展示了对同一车辆位置三个孔径的成像结果，图 13d 则是前三幅图像在图像域的合成结果。可以看出，与单孔径图像相比，多孔径合成图像中感兴趣区域对应的车身轮廓更加完整，后视镜等结构更加清晰，这表明即使仅在图像域中进行非相干，合成多孔径图像质量仍有明显提升。

单通道 SAR 成像和 MIMO SAR 成像实验结果表明，本发明所提出的基于 DDM 的 MIMO 车载毫米波雷达多通道二维成像方法无需波形设计即可完成 MIMO 信道分离，有效解决了进场成像和广角聚焦问题，数字波束灵活可控，并最终实现了高分辨率 SAR 成像。

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。

权 利 要 求 书

1、一种车载多普勒分集 MIMO 合成孔径雷达时域成像方法，其特征在于，所述方法包括：

采集以预设的速度沿直线轨迹运动的 MIMO 合成孔径雷达向目标发射的
5 线性调频信号的回波数据，其中，所述 MIMO 合成孔径雷达的不同发射机具有不同的 DDM 编码；

针对所述回波数据进行多普勒滤波得到每一通道对应的回波数据，并针对每一通道对应的回波数据进行距离向傅里叶变换以得到该通道对应的变换后的回波矩阵，以及按照预设算法将所述变换后的回波矩阵投影到二维成像坐标
10 系内以得到该通道的二维成像结果；

将所述 MIMO 合成孔径雷达的合成孔径依序划分为多个子孔径，针对每一所述子孔径，将该子孔径对应的所有所述通道的二维成像结果进行合成得到该子孔径对应的成像结果；

将所有所述子孔径对应的所述成像结果进行融合得到所述合成孔径对应的
15 的总的成像结果。

2、如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述针对所述回波数据进行多普勒滤波得到每一通道对应的回波数据包括：

针对所述 MIMO 合成孔径雷达的每个通道，设该通道由第 p 个发射机以及第 q 个接收机组成，则通过如下方式得到该通道对应的回波数据：

20 针对所述第 q 个接收机接收到的回波数据 $S_F^q(m, n)$ ，沿第 m 行做离散傅里叶变换得到：

$$\mathbf{S}_{DFT}^q(m, h) = \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N \mathbf{S}_{IF}^q(m, n) \exp \left(\frac{-j2\pi(n-1)}{N} (h - \Delta_p) \right)$$

根据上式对回波数据 $\mathbf{S}_{IF}^q(m, n)$ 进行多普勒域滤波以分离出该通道对应的

回波数据 $\mathbf{S}_{IF}^{pq}(m, n)$

其中, m 为单个脉冲内采样点索引, n 为脉冲索引, 且 $n=1, 2, \dots, N$, j 为

5 虚数单位, h 为多普勒单元索引, $\Delta_p = (N\varphi_p) / (2\pi PRF)$, φ_p 为多普勒调制相位, PRF 为脉冲重复频率。

3、如权利要求 1 所述的方法, 其特征在于, 针对每一所述子孔径, 将该子孔径对应的所有所述通道的二维成像结果进行合成得到该子孔径对应的成像结果包括:

10 根据所述 MIMO 合成孔径雷达的成像范围内的感兴趣区域的主波束指向以及波束宽度确定每一通道对应的权重系数;

将所述每一通道的像素点乘以该通道对应的权重系数后得到每一通道对应的权重图像;

将所有通道对应的权重图像进行合成得到该子孔径对应的成像结果。

15 4、如权利要求 1 所述的方法, 其特征在于, 所述针对每一通道对应的回波数据进行距离向傅里叶变换以得到该通道对应的变换后的回波矩阵, 并按照预设算法将所述变换后的回波矩阵投影到二维成像坐标系内以得到该通道的二维成像结果包括:

(1) 基于该通道对应的所述回波矩阵估计该通道对应的多普勒中心频率

以及多普勒调频率;

(2) 基于所述多普勒中心频率以及所述多普勒调频率确定该通道对应的雷达当前航行速度估计值;

(3) 针对每个所述二维成像坐标系下的像素点, 根据该像素点在所述二维成像坐标系下的坐标值确定该像素点对应的距离单元索引, 并基于所述当前航行速度估计值确定该像素点的相干累加所需的补偿相位因子;

(4) 针对每个所述像素点, 根据其对应的补偿相位因子以及距离单元索引和所述变换后的回波矩阵进行相干累加以得到该像素点的成像值。

5、如权利要求 4 所述的方法, 其特征在于, 所述基于该通道对应的回波矩阵估计该通道对应的多普勒中心频率包括:

针对该通道对应的所述回波矩阵的每个行向量, 设该行向量为 S_a , 则通过执行如下操作估计该通道对应的多普勒中心频率:

按照下式对该行向量 S_a 进行自相关以得到该行向量对应的自相关矩阵 R_a ;

$$R_a = S_a * S_a^* / N_0;$$

其中, N_0 表示所述回波矩阵的列数, S_a^* 是 S_a 的共轭转置;

根据下式确定该通道对应的所述多普勒中心频率 f_{dc} :

$$f_{dc} = \frac{1}{A} \sum_{a=1}^A \frac{f_s}{2\pi} \text{angle}(R_a')$$

其中, A 为回波矩阵的行数, R_a' 是 R_a 的逆傅里叶变换后的矩阵, $\text{angle}()$ 表示取相位操作, f_s 是该通道对应的接收机的采样频率。

6、如权利要求 4 所述的方法，其特征在于，根据下式确定该通道对应的所述多普勒调频率估计值 γ_d ：

$$\gamma_d = \gamma + \frac{4(PRF)^2}{N^2} \Delta R$$

5 其中， γ 为调频率，PRF 为脉冲重复频率，N 为脉冲索引， ΔR 为通过所述回波矩阵计算得到的前后视图的移动量。

7、如权利要求 6 所述的方法，其特征在于，所述根据所述多普勒调频率以及所述多普勒中心频率确定该通道对应的所述雷达当前航行速度估计值包括：

根据下式确定所述雷达当前航行速度估计值：

$$v = \sqrt{\frac{\lambda R_0 \gamma_d}{2} + \left(\frac{\lambda f_{dc}}{2} \right)^2}$$

10

其中， v 为所述雷达当前航行速度估计值， R_0 为场景中心距离， λ 为所述 MIMO 合成孔径雷达的载频对应的波长， f_{dc} 为所述通道对应的多普勒中心频率， γ_d 为所述通道对应的多普勒调频率估计值。

8、如权利要求 4-7 中任一项所述的方法，其特征在于，所述按照预设算法将所述变换后的回波矩阵投影到二维成像坐标系内以得到该通道的二维成像结果包括：

15

按照预设的网格划分模式将所述 MIMO 合成孔径雷达的成像区域划分成网格以构成所述二维成像坐标系，并且所述网格中的每个网格元素分区构成一个所述像素点。

20 9、如权利要求 8 所述的方法，其特征在于，所述针对每个所述二维成像

坐标系下的像素点,根据该像素点在所述二维成像坐标系下的坐标值确定该像素点对应的距离单元索引,包括:

按照下式计算第 n 个脉冲内雷达天线相位中心到像素点 x, y 的斜距 $R_n(x, y)$:

$$R_n(x, y) = \sqrt{\left(x - \frac{v(n-1)}{PRF}\right)^2 + y^2}$$

其中, y 为该像素点的纵坐标, x 是该像素点的横坐标, v 为所述雷达当前航行速度估计值, PRF 为脉冲重复频率;

根据下式确定第 n 个脉冲下该像素点对应的所述距离单元索引 Id_n :

$$Id_n = \lceil R_n(x, y) / (\Delta r / \beta) \rceil$$

其中, Δr 为采样前的信号采样间隔, β 为插值倍数, $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整操作。

10、如权利要求 9 所述的方法,其特征在于,针对每个所述二维成像坐标系下的像素点,基于所述当前航行速度估计值确定该像素点的相干累加所需的补偿相位因子包括:

15 根据该像素点对应的所述斜距确定该像素点的相干累加所需的所述补偿相位因子。

11、如权利要求 10 所述的方法,其特征在于,所述根据该像素点对应的所述斜距确定该像素点的相干累加所需的所述补偿相位因子包括:

根据下式确定第 n 个脉冲下该像素点对应的所述补偿相位因子 φ_n :

$$\phi_n = \frac{4\pi R_n(x, y)}{\lambda}$$

其中, $R_n(x, y)$ 为第 n 个脉冲内雷达天线相位中心到像素点 x, y 的斜距, λ 为所述 MIMO 合成孔径雷达的载频对应的波长。

12、如权利要求 10 所述的方法, 其特征在于, 所述针对每个所述像素点, 5 根据其对应的补偿相位因子以及距离单元索引以及所述变换后的回波矩阵进行相干累加以得到该像素点的成像值包括:

根据下式计算每一所述像素点对应的所述成像值:

$$I_n = \sum_{n=1}^N s_r(Id_n, n) \exp(j\phi_n)$$

其中, I 表示第 n 个脉冲下该像素点对应的成像值, $s_r(Id, n)$ 表示所述变换 10 后的回波矩阵 s_r 中该第 n 个脉冲下该像素点对应的距离单元索引 Id_n 所指示的矩阵元素, j 为虚数单位, ϕ_n 为第 n 个脉冲下该像素点对应的所述补偿相位因子。

13、如权利要求 8 所述的方法, 其特征在于, 所述网格中的每个网格元素分区的面积不大于所述 MIMO 合成孔径雷达的最小分辨面积。

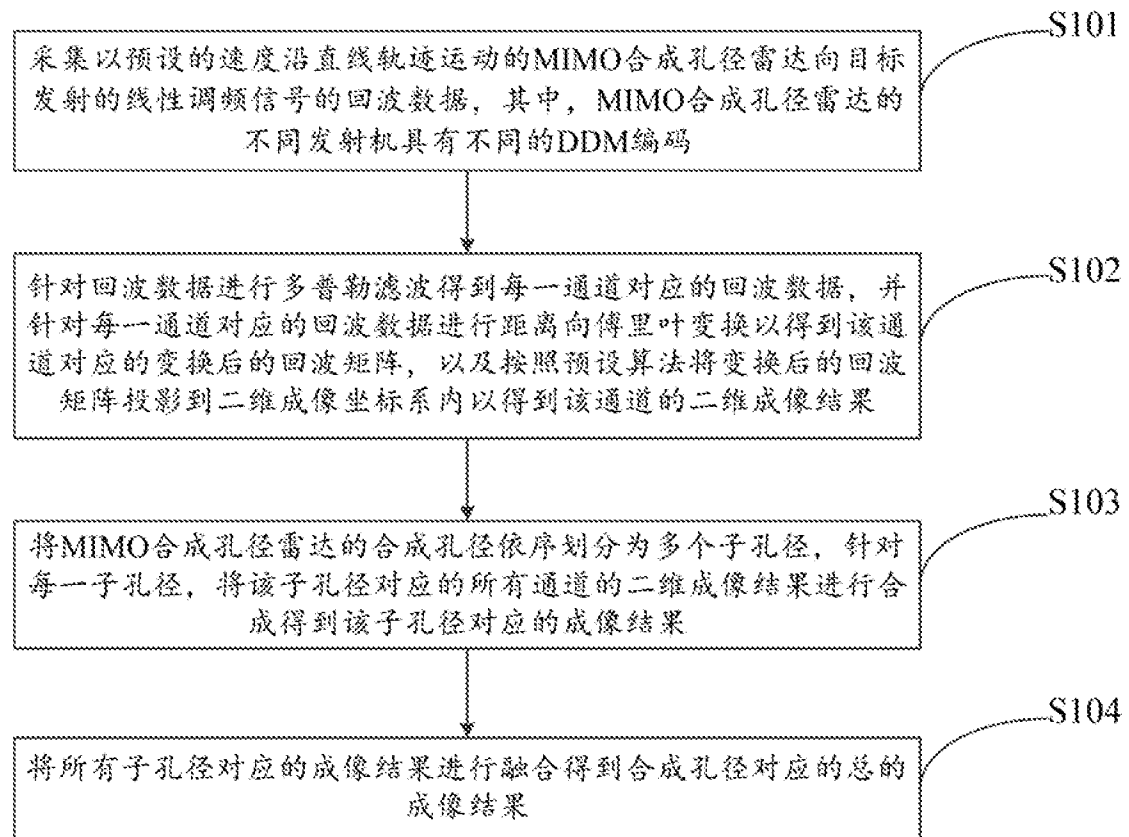


图 1

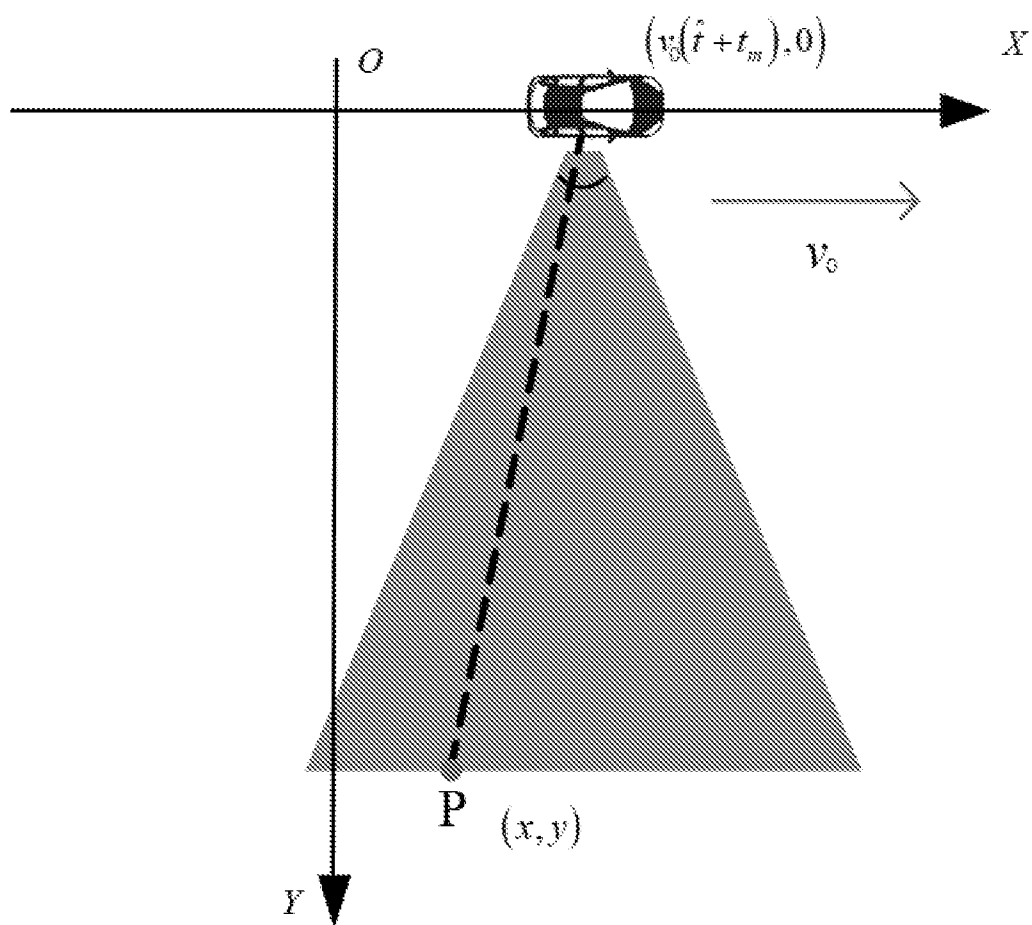


图 2

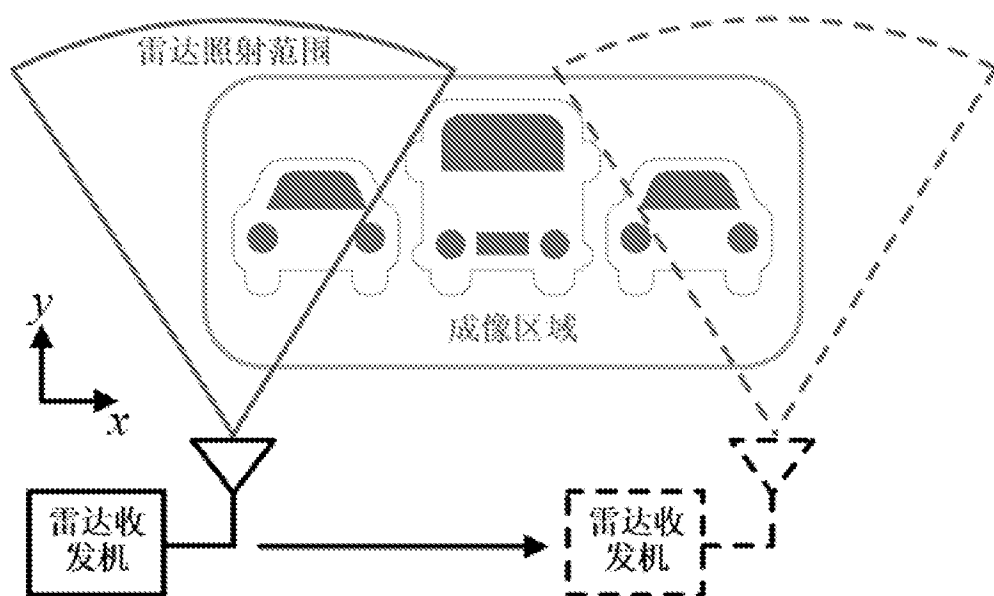


图 3

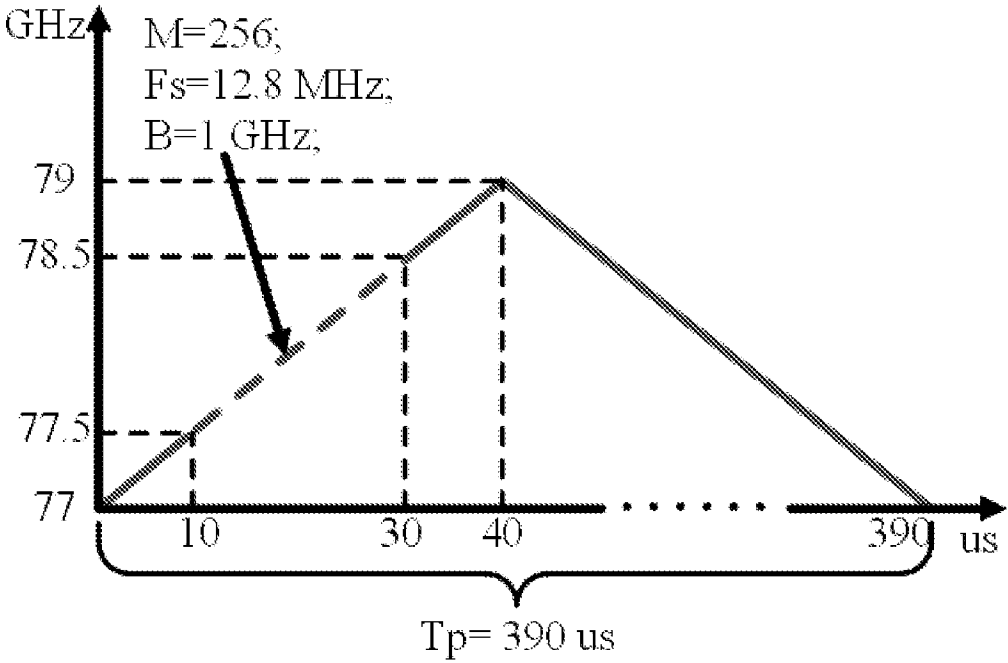


图 4



图 5a

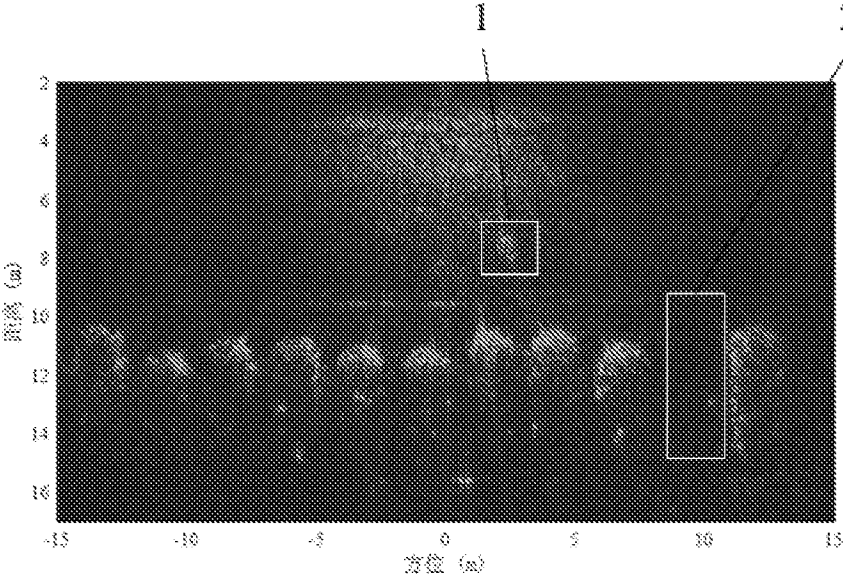


图 5b

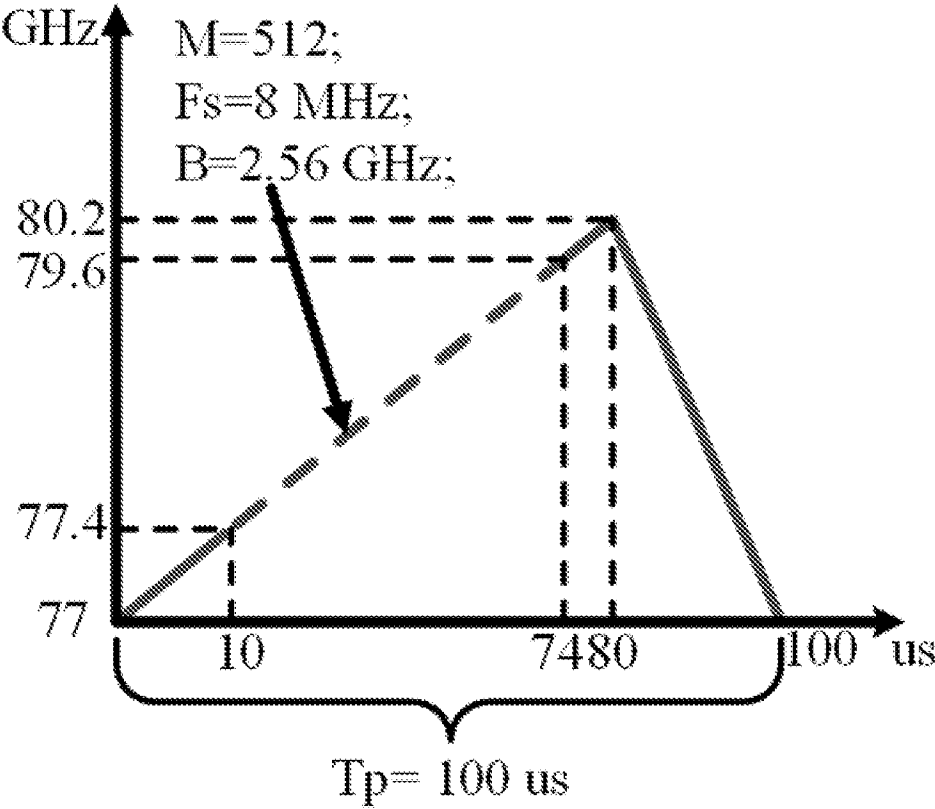


图 6

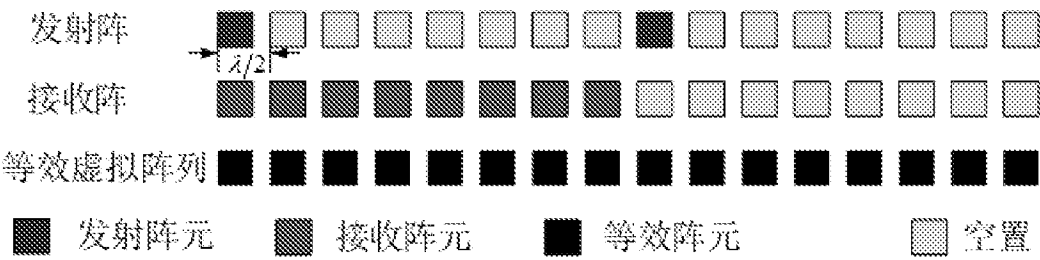


图 7

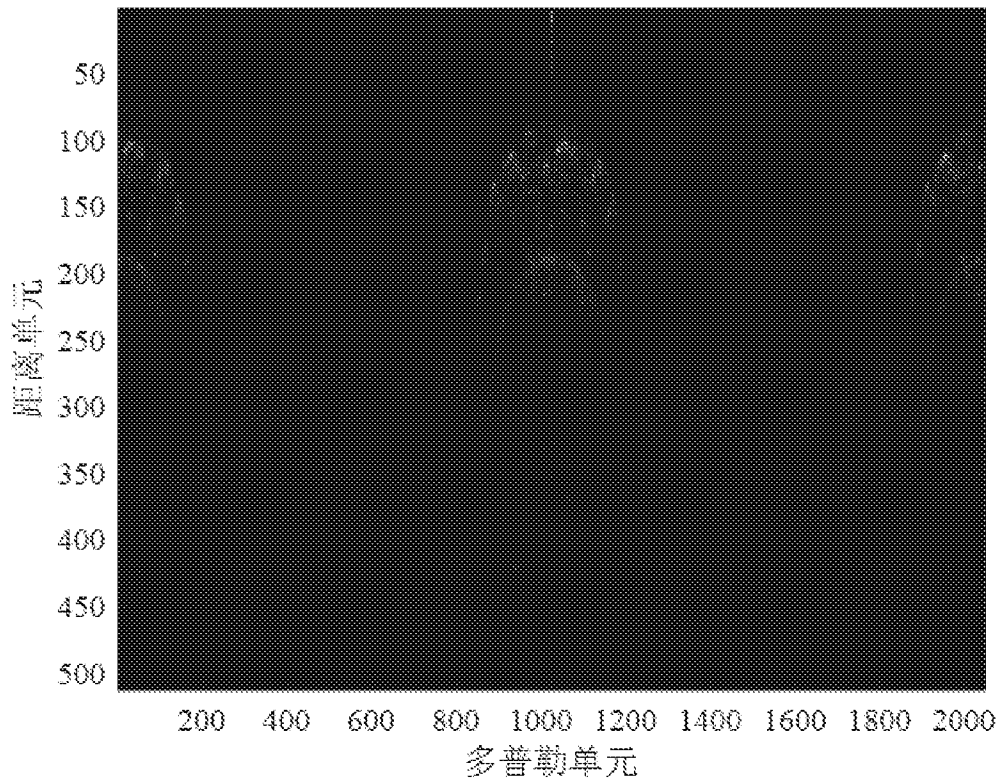


图 8

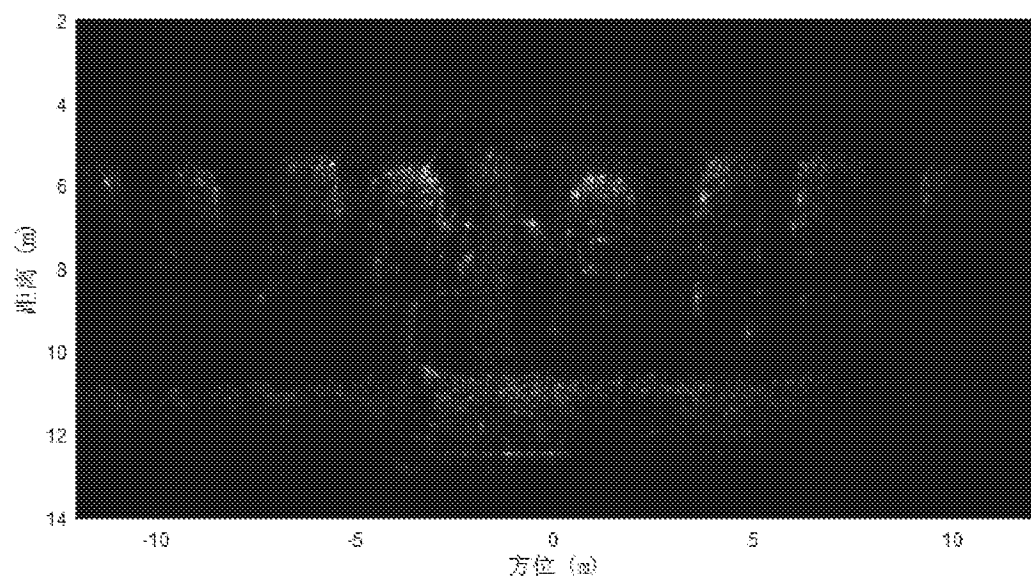


图 9a

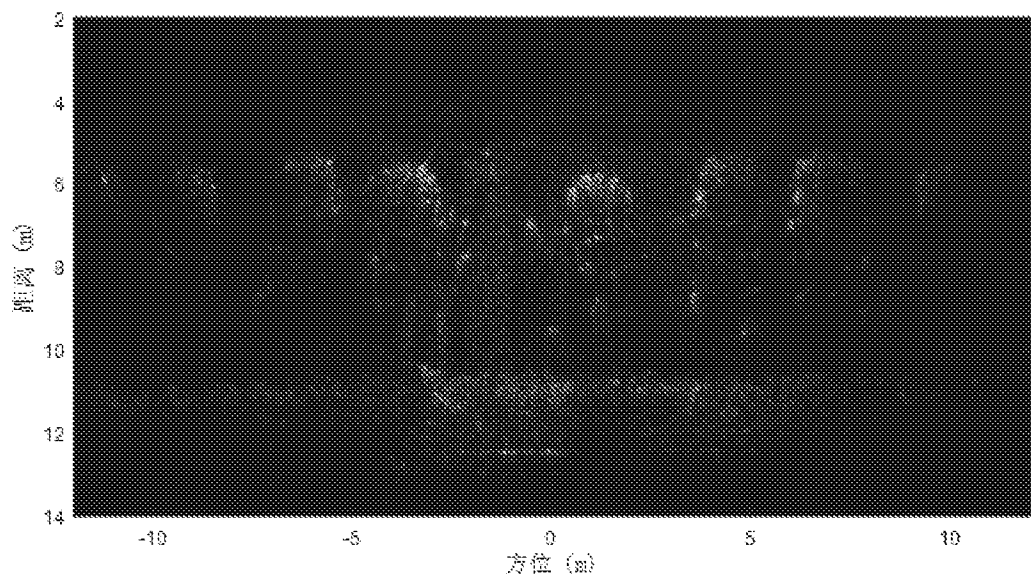


图 9b



图 10

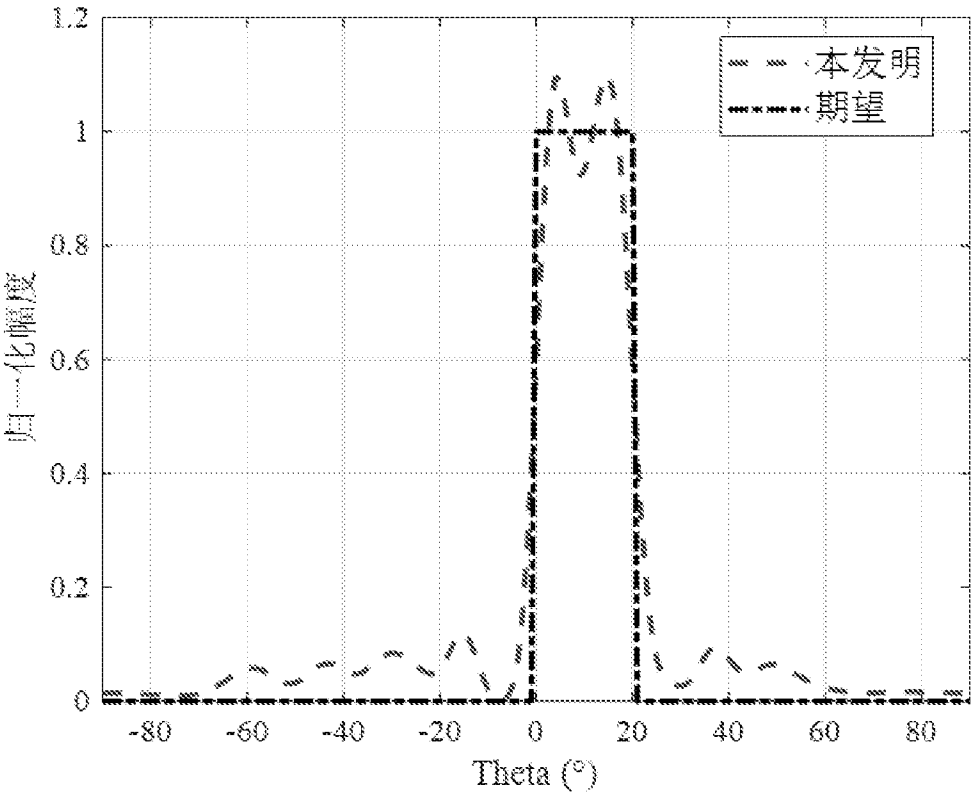


图 11

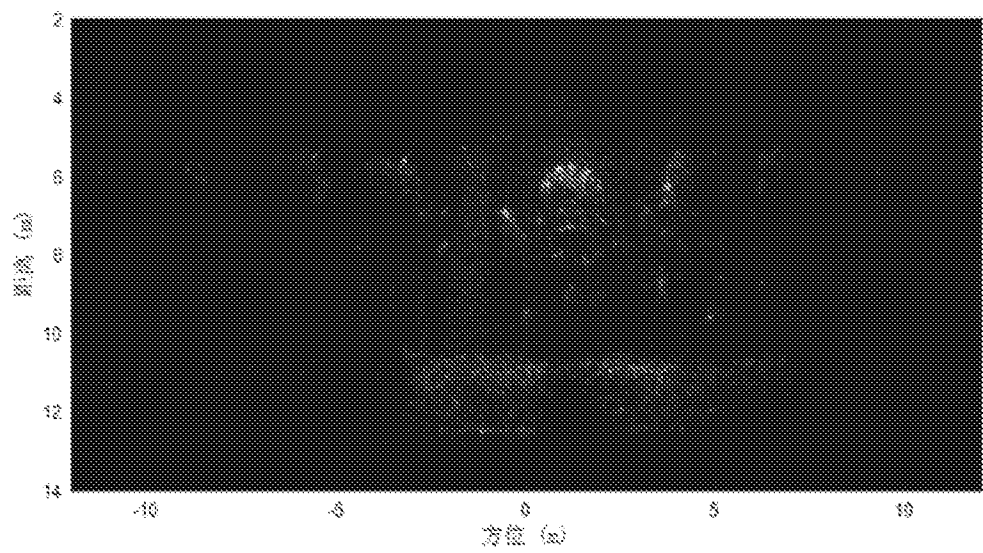


图 12

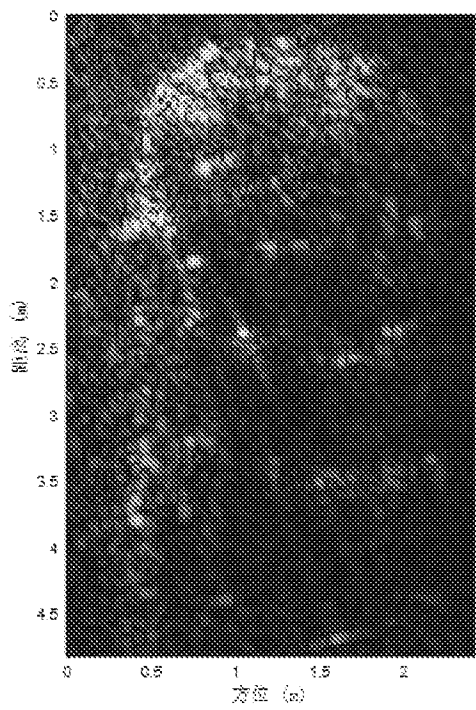


图 13a

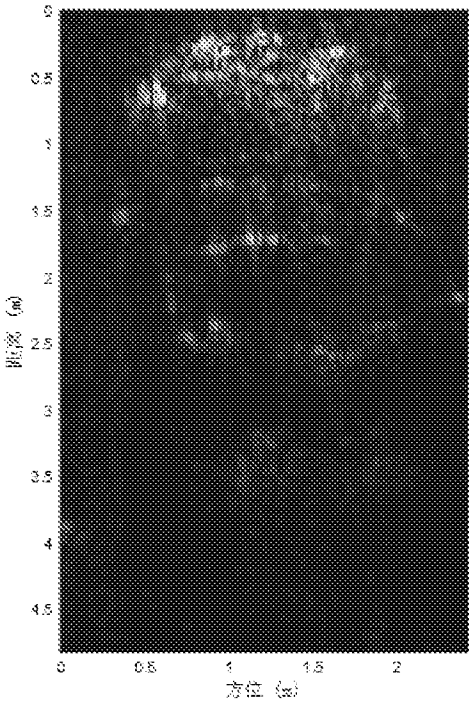


图 13b

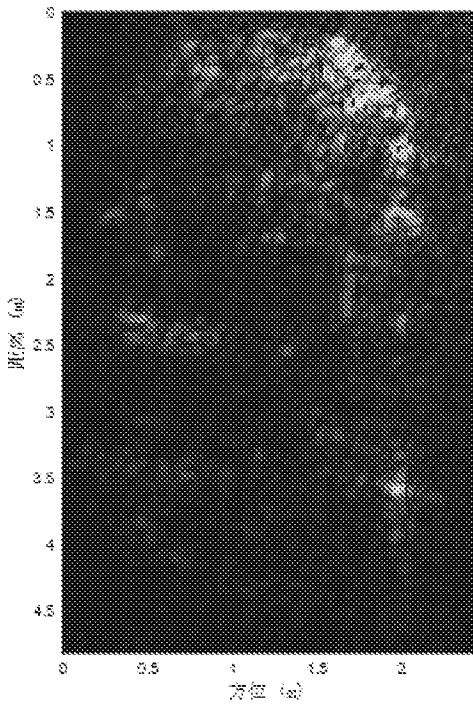


图 13c

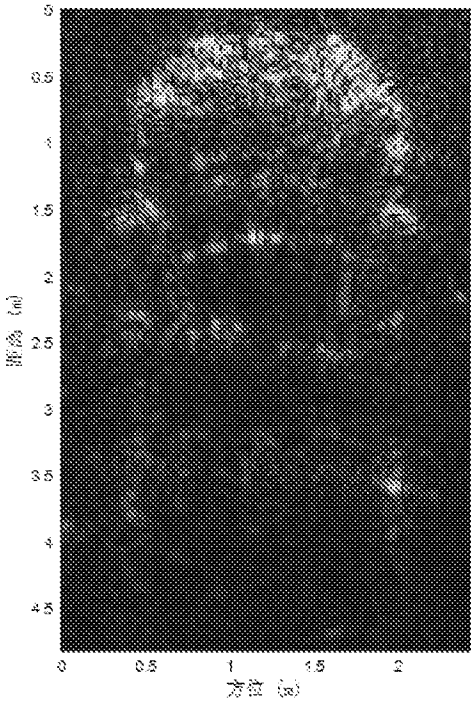


图 13d

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2022/133528

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01S13/90(2006.01)i;G01S7/41(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC:G01S

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNTXT, CNABS, CNKI, ENTXT: 合成孔径雷达, 多输入多输出, 多普勒分集波形, 多普勒滤波, 成像, 子孔径, 车载, 回波, echo, vehicle, imaging, Doppler, MIMO, SAR, DDM

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 115128608 A (HAWKEYE TECHNOLOGY CO., LTD. et al.) 30 September 2022 (2022-09-30) description, paragraphs [0006]-[0062], and figures 1-13d	1-13
A	CN 114839633 A (HAWKEYE TECHNOLOGY CO., LTD. et al.) 02 August 2022 (2022-08-02) description, paragraphs [0025]-[0034], and figure 1	1-13
A	CN 114578358 A (NXP USA INC.) 03 June 2022 (2022-06-03) entire document	1-13
A	CN 113777577 A (HAWKEYE TECHNOLOGY CO., LTD. et al.) 10 December 2021 (2021-12-10) entire document	1-13
A	CN 104166141 A (NO.38 RESEARCH INSTITUTE OF CETC) 26 November 2014 (2014-11-26) entire document	1-13
A	CN 112444811 A (BEIHANG UNIVERSITY) 05 March 2021 (2021-03-05) entire document	1-13

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“D” document cited by the applicant in the international application

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

19 April 2023

Date of mailing of the international search report

06 May 2023

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/ CN)
China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing 100088

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2022/133528

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 5608404 A (US ARMY) 04 March 1997 (1997-03-04) entire document	1-13

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2022/133528

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	115128608	A	30 September 2022	None			
CN	114839633	A	02 August 2022	None			
CN	114578358	A	03 June 2022	EP	4009074	A1	08 June 2022
				US	2022171049	A1	02 June 2022
				US	11614531	B2	28 March 2023
CN	113777577	A	10 December 2021	None			
CN	104166141	A	26 November 2014	None			
CN	112444811	A	05 March 2021	None			
US	5608404	A	04 March 1997	None			

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2022/133528

A. 主题的分类

G01S13/90(2006.01)i;G01S7/41(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

IPC:G01S

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称,和使用的检索词(如使用))

CNTXT, CNABS, CNKI, ENTXT: 合成孔径雷达, 多输入多输出, 多普勒分集波形, 多普勒滤波, 成像, 子孔径, 车载, 回波, echo, vehicle, imaging, Doppler, MIMO, SAR, DDM

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 115128608 A (南京隼眼电子科技有限公司 等) 2022年9月30日 (2022 - 09 - 30) 说明书第[0006]-[0062]段, 图1-13d	1-13
A	CN 114839633 A (南京隼眼电子科技有限公司 等) 2022年8月2日 (2022 - 08 - 02) 说明书第[0025]-[0034]段, 图1	1-13
A	CN 114578358 A (恩智浦美国有限公司) 2022年6月3日 (2022 - 06 - 03) 全文	1-13
A	CN 113777577 A (南京隼眼电子科技有限公司 等) 2021年12月10日 (2021 - 12 - 10) 全文	1-13
A	CN 104166141 A (中国电子科技集团公司第三十八研究所) 2014年11月26日 (2014 - 11 - 26) 全文	1-13
A	CN 112444811 A (北京航空航天大学) 2021年3月5日 (2021 - 03 - 05) 全文	1-13
A	US 5608404 A (US ARMY) 1997年3月4日 (1997 - 03 - 04) 全文	1-13

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“D” 申请人在国际申请中引证的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2023年4月19日

国际检索报告邮寄日期

2023年5月6日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局

中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

授权官员

张静

电话号码 (+86) 62085727

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2022/133528

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	115128608	A	2022年9月30日	无			
CN	114839633	A	2022年8月2日	无			
CN	114578358	A	2022年6月3日	EP	4009074	A1	2022年6月8日
				US	2022171049	A1	2022年6月2日
				US	11614531	B2	2023年3月28日
CN	113777577	A	2021年12月10日	无			
CN	104166141	A	2014年11月26日	无			
CN	112444811	A	2021年3月5日	无			
US	5608404	A	1997年3月4日	无			