



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111708024 B

(45) 授权公告日 2020.11.10

(21) 申请号 202010841476.3

(22) 申请日 2020.08.20

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 111708024 A

(43) 申请公布日 2020.09.25

(73) 专利权人 湖南雷远电子科技有限公司

地址 410000 湖南省长沙市长沙高新开发区尖山路39号长沙中电软件园总部大楼A1013室

(72) 发明人 柴进 李楚军 秦明英 洪青宇

(74) 专利代理机构 长沙国科天河知识产权代理有限公司 43225

代理人 周达

(51) Int. Cl.

G01S 13/89 (2006.01)

G01S 7/41 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 111505629 A, 2020.08.07

CN 105005036 A, 2015.10.28

CN 109991600 A, 2019.07.09

CN 111226131 A, 2020.06.02

CN 205450265 U, 2016.08.10

CN 105932427 A, 2016.09.07

US 2018172806 A1, 2018.06.21

US 2017146651 A1, 2017.05.25

US 2020191913 A1, 2020.06.18

纪泽栋. 毫米波成像系统天线设计.《中国优秀硕士学位论文全文数据库 信息科技辑》.2013, 第I136-26页.

孟祥新 等. A fast imaging algorithm for sparse array imaging based on PCA and modified SLIM methods.《红外与毫米波学报》.2020, 第39卷(第3期),

戚福伟. 毫米波成像快速扫描分析.《中国优秀硕士学位论文全文数据库 信息科技辑》.2013,

审查员 陈文爽

权利要求书3页 说明书8页 附图2页

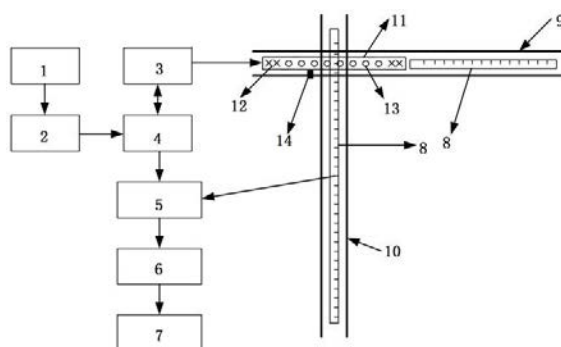
(54) 发明名称

拼接式稀疏平面阵列毫米波成像装置及方法

(57) 摘要

拼接式稀疏平面阵列毫米波成像装置及方法, 毫米波信号通过收发单元传输给一维稀疏阵列天线, 同时收发单元接收目标回波信号并传输给数据处理单元; 一维稀疏阵列天线设置在二维移动组件上, 通过二维移动组件实现水平和垂直方向移动, 完成之字形的扫描运动, 获取n个稀疏平面子阵的回波信号; 二维移动组件上设置有坐标记录模块, 实时记录一维稀疏阵列天线的位置坐标信息并输出给数据处理单元。数据处理单元, 根据来自收发单元的回波信号和来自坐标记录模块的一维稀疏阵列天线的位置坐标信息进行目标成像, 将对n个稀疏平面子阵的成像结果进行拼接即可得到最终的目标成像结果。本发明在保证成像质量的同时极大的降低了系统的硬

件成本。



1. 拼接式稀疏平面阵列毫米波成像装置, 其特征在于, 包括:

毫米波信号产生单元, 产生毫米波信号;

收发单元, 将毫米波信号按次序传输给一维稀疏阵列天线的每个发射阵元天线, 发射阵元天线将毫米波信号辐射到空间中进行探测; 同时收发单元接收一维稀疏阵列天线所有接收阵元天线的回波信号并传输给数据处理单元;

一维稀疏阵列天线设置在二维移动组件上, 通过二维移动组件实现水平方向和竖直方向移动, 完成之字形的扫描运动, 获取n个稀疏平面子阵的回波信号; 二维移动组件上设置有坐标记录模块, 能够实时记录一维稀疏阵列天线的位置坐标信息并输出给数据处理单元;

其中所述一维稀疏阵列天线的扫描运动方式是: 设置一维稀疏阵列天线扫描起点, 在水平方向上以扫描起点对应的水平坐标为基准等间隔设定n个线阵位置, 确定竖直方向扫描高度、竖直方向扫描位置点间的扫描间距以及相邻线阵位置间的间隔, 通过二维移动组件控制一维稀疏阵列天线沿竖直方向竖直运动, 开始首次竖直方向扫描, 在竖直方向每隔设定的扫描间距完成一次一维稀疏阵列天线的电子扫描, 直至完成设定的竖直方向扫描高度, 则完成一次完整的竖直方向扫描, 获得第一个稀疏平面子阵的回波信号; 接着通过二维移动组件控制一维稀疏阵列天线沿水平方向运动到下一个线阵位置, 开始下一次竖直方向扫描, 通过n次竖直方向的扫描得到n个稀疏平面子阵的回波信号;

数据处理单元, 根据来自收发单元的回波信号和来自坐标记录模块的一维稀疏阵列天线的位置坐标信息进行目标成像, 方法如下:

S1: 一维稀疏阵列天线开始扫描运动, 在一维稀疏阵列天线扫描运动中的每一个扫描位置点, 发射阵元天线通过电子开关切换实现顺序发射毫米波信号, 所有的接收阵元天线在每一个发射阵元天线工作时, 都同时处于接收状态, 完成整个扫描运动后录取到n个稀疏平面子阵的回波信号;

S2: 在一维稀疏阵列天线扫描运动过程中的任一个扫描位置点, 对一维稀疏阵列天线的任意一个发射阵元天线构建其对应的雷达回波信号模型为:

$$s(x_R, z, k) = \iiint \iiint \sigma(x_i, y_i, z_i) \exp\left[-jk_{sT} \sqrt{(x_i - x_T)^2 + y_i^2}\right] \exp(-jk_{xR} x_i) \\ \cdot \exp(-jk_{yR} y_i) \exp(-j2k_z z_i) \exp(jk_{xR} x_R) \exp(j2k_z z) dk_{xR} dk_z dx_i dy_i dz_i$$

其中: (x_i, y_i, z_i) 、 $\sigma(x_i, y_i, z_i)$ 分别为目标散射点的三维位置坐标以及其对应的复值散射强度; x_R 为接收阵元天线的水平位置坐标; z 为一维稀疏阵列天线其阵列高度坐标; $k = 2\pi f / c$ 为波数; $k_{sT} = \sqrt{k^2 - k_z^2}$, $k_{yR} = \sqrt{k^2 - k_{xR}^2 - k_z^2}$, k_{xR} 和 k_z 分别为 x_R 和 z 对应的空间波数; x_T 为发射阵元天线的水平位置坐标;

S3: 对雷达回波信号模型的等式两端做关于 x_R 和 z 的傅里叶变换;

$$s(k_{xR}, 2k_z, k) = \iiint \sigma(x_i, y_i, z_i) \exp\left[-jk_{sT}\sqrt{(x_i - x_T)^2 + y_i^2}\right] \exp(-jk_{xR}x_i) \\ \cdot \exp(-jk_{yR}y_i) \exp(-j2k_z z_i) dx_i dy_i dz_i$$

将上式转化为

$$s(k_{xR}, 2k_z, k) = \iint \sigma(x_i, y_i, 2k_z) \exp\left[-jk_{sT}\sqrt{(x_i - x_T)^2 + y_i^2}\right] \\ \cdot \exp(-jk_{xR}x_i) \exp(-jk_{yR}y_i) dx_i dy_i$$

其中 $\sigma(x_i, y_i, 2k_z) = \int \sigma(x_i, y_i, z_i) \exp(-j2k_z z_i) dz_i$;

S4: 对附加项 $\exp\left[-jk_{sT}\sqrt{(x_i - x_T)^2 + y_i^2}\right]$ 进行补偿, $\sigma(x_i, y_i, 2k_z)$ 的表达式转换为:

$$\sigma(x_i, y_i, 2k_z) = \int \left[\int s(k_{xR}, 2k_z, k) \exp(jk_{yR}y_i) \exp(jk_{xR}x_i) dk_{xR} \right] \\ \cdot \exp\left[jk_{sT}\sqrt{(x_i - x_T)^2 + y_i^2}\right] dk_{yR}$$

S5: 对 $\sigma(x_i, y_i, 2k_z)$ 沿着 k_z 执行傅里叶变换, 得到三维成像的结果;

$$\sigma(x_i, y_i, z_i) = \int \left\{ \int \left[\int s(k_{xR}, 2k_z, k) \exp(jk_{yR}y_i) \exp(jk_{xR}x_i) dk_{xR} \right] \right. \\ \left. \cdot \exp\left[jk_{sT}\sqrt{(x_i - x_T)^2 + y_i^2}\right] dk_{yR} \right\} \exp(-j2k_z z_i) dk_z$$

对应离散形式的三维成像的结果表示为:

$$\sigma(x_i, y_i, z_i) = \text{IFT}_{k_z} \left\{ \sum_{k_{yR}} \left[\text{IFT}_{k_{xR}} \left[s(k_{xR}, 2k_z, k_{yR}) \exp(jk_{yR}y_i) \right] \cdot \exp\left[jk_{sT}\sqrt{(x_i - x_T)^2 + y_i^2}\right] \right] \right\}$$

S6: 对于一维稀疏阵列天线扫描运动过程中任一线阵位置对应的竖直方向扫描过程中的所有扫描位置点, 按照S2至S5中的步骤获得每个扫描位置点的各发射阵列天线的成像结果, 然后进行相参累加即可得到该线阵位置所对应的稀疏平面子阵回波信号的成像结果, 表示为:

$$\sigma(x_i, y_i, z_i) = \sum_{T=1}^4 \sigma(x_i, y_i, z_i)|_{x=x_T}$$

S7: 对n个稀疏平面子阵回波信号的成像结果进行拼接即得到最终的目标成像结果。

2. 根据权利要求1所述拼接式稀疏平面阵列毫米波成像装置, 其特征在于, 毫米波信号产生单元包括毫米波扫频源和二倍频器, 毫米波扫频源产生毫米波信号, 经两个二倍

频器后传输给收发单元。

3. 根据权利要求2所述拼接式稀疏平面阵列毫米波成像装置,其特征在于,毫米波扫频源产生17~20GHz线性调频的毫米波信号。

4. 根据权利要求2所述拼接式稀疏平面阵列毫米波成像装置,其特征在于,所述收发单元包括收发组件和电子开关阵列,毫米波信号产生单元通过收发组件连接电子开关阵列,所述电子开关阵列与一维稀疏阵列天线连接,所述毫米波信号产生单元产生毫米波信号经收发组件、电子开关阵列传输给一维稀疏阵列天线的每个发射阵元天线,同时电子开关阵列接收一维稀疏阵列天线所有接收阵元天线的信号,并回传给收发组件。

5. 根据权利要求4所述拼接式稀疏平面阵列毫米波成像装置,其特征在于,收发组件包括功分器、功率放大器、低噪声放大器和混频器,功分器将输入的毫米波信号分成2路,一路传输给功率放大器,另一路作为本振信号输入给混频器的本振端口;功率放大器将放大后的毫米波信号传输给电子开关阵列;低噪声放大器同时接收返回的回波信号,放大后传输给混频器的射频端口;经过混频器混频之后输出中频信号传输给数据处理单元。

6. 根据权利要求2所述拼接式稀疏平面阵列毫米波成像装置,其特征在于,所述一维稀疏阵列天线为一维四发八收稀疏阵列天线,设有4个发射阵元天线和8个接收阵元天线,其中8个接收阵元天线等间距设置。

7. 根据权利要求6所述拼接式稀疏平面阵列毫米波成像装置,其特征在于,所述二维移动组件包括光栅尺、水平方向伺服电机、竖直方向伺服电机、水平滑块、竖直滑块、水平导轨和竖直导轨,所述水平导轨和竖直导轨上均设置有光栅尺,用于采集一维稀疏阵列天线的位置坐标信息并输出给数据处理单元;所述一维稀疏阵列天线安装在竖直导轨上的竖直滑块上,竖直滑块与竖直方向伺服电机驱动连接,能够在竖直方向伺服电机的驱动下沿着竖直导轨移动,竖直导轨安装在水平导轨上的水平滑块上,水平滑块与水平方向伺服电机驱动连接,能够在水平方向伺服电机的驱动下沿着水平导轨移动;水平方向伺服电机、竖直方向伺服电机均连接数据处理单元,由数据处理单元控制两伺服电机进而实现一维稀疏阵列天线完成扫描运动。

8. 根据权利要求7所述拼接式稀疏平面阵列毫米波成像装置,其特征在于,所述数据处理单元包括数据采集卡和数据处理器,数据采集卡用于采集来自收发组件的中频信号和来自光栅尺的一维稀疏阵列天线的位置坐标信息,将其数字化后传输给数据处理器;数据处理器利用接收的数字信息进行目标成像。

9. 根据权利要求8所述拼接式稀疏平面阵列毫米波成像装置,其特征在于,所述数据处理单元还包括显示单元,显示单元与数据处理器连接,用于显示目标成像结果。

拼接式稀疏平面阵列毫米波成像装置及方法

技术领域

[0001] 本发明属于毫米波雷达系统和雷达信号处理技术领域，具体地涉及一种拼接式稀疏平面阵列毫米波成像装置及方法。

背景技术

[0002] 现有的阵列毫米波成像装置利用一维均匀准单站线阵进行平面扫描和柱面扫描，对目标进行成像。均匀准单站线阵的收发通道是均匀分布的，需要大量的电子开关和收发阵元。

[0003] 为了降低阵元数目，文献【Sparse Multi-Static Arrays for Near-Field Millimeter-Wave Imaging】中提出了一种稀疏互质阵列，发射阵元数目与接收阵元数目之间存在一定的整数比例，在减少阵元数目的同时可以获取与均匀分布线阵相当的成像质量。这种阵列分布方式相比于均匀分布线阵阵元数目得到了降低，但是整体的阵元数目依旧较多。

发明内容

[0004] 针对现有的阵列毫米波成像装置最大的问题是开关天线数目和收发阵元数目多、硬件成本较高的问题，本发明提出了一种拼接式稀疏平面阵列毫米波成像装置及方法。

[0005] 为实现上述技术目的，本发明采用的具体技术方案如下：

[0006] 拼接式稀疏平面阵列毫米波成像装置，包括：

[0007] 毫米波信号产生单元，产生毫米波信号。

[0008] 收发单元，将毫米波信号按次序传输给一维稀疏阵列天线的每个发射阵元天线，发射阵元天线将毫米波信号辐射到空间中进行探测；同时收发单元接收一维稀疏阵列天线所有接收阵元天线的回波信号并传输给数据处理单元。

[0009] 一维稀疏阵列天线设置在二维移动组件上，通过二维移动组件实现水平方向和竖直方向移动，完成之字形的扫描运动，获取n个稀疏平面子阵的回波信号；二维移动组件上设置有坐标记录模块，能够实时记录一维稀疏阵列天线的位置坐标信息并输出给数据处理单元。

[0010] 数据处理单元，根据来自收发单元的回波信号和来自坐标记录模块的一维稀疏阵列天线的位置坐标信息进行目标成像。

[0011] 本发明中，所述一维稀疏阵列天线的扫描运动方式是：设置一维稀疏阵列天线扫描起点，在水平方向上以扫描起点对应的水平坐标为基准等间隔设定n个线阵位置，确定竖直方向扫描高度、竖直方向扫描位置点间的扫描间距以及相邻线阵位置间的间隔，通过二维移动组件控制一维稀疏阵列天线沿竖直方向竖直运动，开始首次竖直方向扫描，在竖直方向每隔设定的扫描间距完成一次一维稀疏阵列天线的电子扫描，直至完成设定的竖直方向扫描高度，则完成一次完整的竖直方向扫描，获得第一个稀疏平面子阵的回波信号；接着通过二维移动组件控制一维稀疏阵列天线沿水平方向运动到下一个线阵位置，开始下一次

竖直方向扫描,通过n次竖直方向的扫描得到n个稀疏平面子阵的回波信号。

[0012] 作为本发明的优选方案,毫米波信号产生单元包括毫米波扫频源和二倍频器,毫米波扫频源产生17~20GHz线性调频的毫米波信号,经两个二倍频器后传输给收发单元。

[0013] 作为本发明的优选方案,所述收发单元包括收发组件和电子开关阵列,毫米波信号产生单元通过收发组件连接电子开关阵列,所述电子开关阵列与一维稀疏阵列天线连接,所述毫米波信号产生单元产生毫米波信号经收发组件、电子开关阵列传输给一维稀疏阵列天线的每个发射阵元天线,同时电子开关阵列接收一维稀疏阵列天线所有接收阵元天线的信号,并回传给收发组件。进一步地,收发组件包括功分器、功率放大器、低噪声放大器和混频器,功分器将输入的毫米波信号分成2路,一路传输给功率放大器,另一路作为本振信号输入给混频器的本振端口;功率放大器将放大后的毫米波信号传输给电子开关阵列;低噪声放大器同时接收返回的回波信号,放大后传输给混频器的射频端口;经过混频器混频之后输出中频信号传输给数据处理单元。

[0014] 作为本发明的优选方案,本发明所述一维稀疏阵列天线为一维四发八收稀疏阵列天线,设有4个发射阵元天线和8个接收阵元天线,其中8个接收阵元天线等间距设置。

[0015] 作为本发明的优选方案,本发明所述二维移动组件包括光栅尺、水平方向伺服电机、竖直方向伺服电机、水平滑块、竖直滑块、水平导轨和竖直导轨,所述水平导轨和竖直导轨上均设置有光栅尺,用于采集一维稀疏阵列天线的位置坐标信息并输出给数据处理单元;所述一维稀疏阵列天线安装在竖直导轨上的竖直滑块上,竖直滑块与竖直方向伺服电机驱动连接,能够在竖直方向伺服电机的驱动下沿着竖直导轨移动,竖直导轨安装在水平导轨上的水平滑块上,水平滑块与水平方向伺服电机驱动连接,能够在水平方向伺服电机的驱动下沿着水平导轨移动;水平方向伺服电机、竖直方向伺服电机均连接数据处理单元,由数据处理单元控制两伺服电机进而实现一维稀疏阵列天线完成扫描运动。

[0016] 作为本发明的优选方案,所述数据处理单元包括数据采集卡和数据处理器,数据采集卡用于采集来自收发组件的中频信号和来自光栅尺的一维稀疏阵列天线的位置坐标信息,将其数字化后传输给数据处理器;数据处理器利用接收的数字信息进行目标成像。进一步地,所述数据处理单元还包括显示单元,显示单元与数据处理器连接,用于显示目标成像结果。

[0017] 另一方面,本发明提供基于上述拼接式稀疏平面阵列毫米波成像装置的成像方法,包括以下步骤:

[0018] S1:一维稀疏阵列天线开始扫描运动,在一维稀疏阵列天线扫描运动中的每一个扫描位置点,发射阵元天线通过电子开关切换实现顺序发射毫米波信号,所有的接收阵元天线在每一个发射阵元天线工作时,都同时处于接收状态,完成整个扫描运动后录取到n个稀疏平面子阵的回波信号;

[0019] S2:在一维稀疏阵列天线扫描运动过程中的任一个扫描位置点,对一维稀疏阵列天线的任意一个发射阵元天线构建其对应的雷达回波信号模型为:

$$[0020] \quad s(x_R, z, k) = \iiint \sigma(x_i, y_i, z_i) \exp\left(-jk_{sT} \sqrt{(x_i - x_T)^2 + y_i^2}\right) \exp(-jk_{xR} x_i) \\ \cdot \exp(-jk_{yR} y_i) \exp(-j2k_z z_i) \exp(jk_{xR} x_R) \exp(j2k_z z) dk_{xR} dk_z dx_i dy_i dz_i$$

[0021] 其中： (x_i, y_i, z_i) 、 $\sigma(x_i, y_i, z_i)$ 分别为目标散射点的三维位置坐标以及其对应的复值散射强度； x_R 为接收阵元天线的水平位置坐标； z 为一维稀疏阵列天线其阵列高度坐标； $k = 2\pi f / c$ 为波数； $k_{sT} = \sqrt{k^2 - k_z^2}$ ， $k_{yR} = \sqrt{k^2 - k_{xR}^2 - k_z^2}$ ， k_{xR} 和 k_z 分别为 x_R 和 z 对应的空间波数； x_T 为发射阵元天线的水平位置坐标；

[0022] S3：对雷达回波信号模型的等式两端做关于 x_R 和 z 的傅里叶变换；

$$[0023] \quad s(k_{xR}, 2k_z, k) = \iiint \sigma(x_i, y_i, z_i) \exp\left(-jk_{sT} \sqrt{(x_i - x_T)^2 + y_i^2}\right) \exp(-jk_{xR} x_i) \\ \cdot \exp(-jk_{yR} y_i) \exp(-j2k_z z_i) dx_i dy_i dz_i$$

[0024] 将上式转化为

$$[0025] \quad s(k_{xR}, 2k_z, k) = \iint \sigma(x_i, y_i, 2k_z) \exp\left(-jk_{sT} \sqrt{(x_i - x_T)^2 + y_i^2}\right) \\ \cdot \exp(-jk_{xR} x_i) \exp(-jk_{yR} y_i) dx_i dy_i$$

[0026] 其中

$$[0027] \quad \sigma(x_i, y_i, 2k_z) = \int \sigma(x_i, y_i, z_i) \exp(-j2k_z z_i) dz_i$$

[0028] S4：对附加项 $\exp\left(-jk_{sT} \sqrt{(x_i - x_T)^2 + y_i^2}\right)$ 进行补偿，将 $\sigma(x_i, y_i, 2k_z)$ 的表达式转换为：

$$[0029] \quad \sigma(x_i, y_i, 2k_z) = \int \left[\int s(k_{xR}, 2k_z, k) \exp(jk_{yR} y_i) \exp(jk_{xR} x_i) dk_{xR} \right] \\ \cdot \exp\left(jk_{sT} \sqrt{(x_i - x_T)^2 + y_i^2}\right) dk_{yR}$$

[0030] S5：对 $\sigma(x_i, y_i, 2k_z)$ 沿着 k_z 执行傅里叶变换，得到三维成像的结果；

$$[0031] \quad \sigma(x_i, y_i, z_i) = \int \left\{ \int \left[\int s(k_{xR}, 2k_z, k) \exp(jk_{yR} y_i) \exp(jk_{xR} x_i) dk_{xR} \right] \right. \\ \cdot \exp\left(jk_{sT} \sqrt{(x_i - x_T)^2 + y_i^2}\right) dk_{yR} \left. \right\} \exp(-j2k_z z_i) dk_z$$

[0032] 对应离散形式的三维成像的结果表示为：

$$[0033] \quad \sigma(x_i, y_i, z_i) = \text{IFT}_{k_z} \left\{ \sum_{k_{yR}} \text{IFT}_{k_{xR}} \left[s(k_{xR}, 2k_z, k_{yR}) \exp(jk_{yR} y_i) \right] \cdot \exp \left(jk_{sT} \sqrt{(x_i - x_T)^2 + y_i^2} \right) \right\}$$

[0034] S6:对于一维稀疏阵列天线扫描运动过程中任一线阵位置对应的竖直方向扫描过程中的所有扫描位置点,按照S2至S5中的步骤获得每个扫描位置点的各发射阵列天线的成像结果,然后进行相参累加即可得到该线阵位置所对应的稀疏平面子阵回波信号的成像结果,表示为:

$$[0035] \quad \sigma(x_i, y_i, z_i) = \sum_{T=1}^4 \sigma(x_i, y_i, z_i) |_{x=x_T}$$

[0036] S7:对n个稀疏平面子阵回波信号的成像结果进行拼接即可得到最终的目标成像结果。

[0037] 本发明利用毫米波扫频源,产生线性调频的毫米波信号,通过收发组件、电子开关阵列和四发八收一维稀疏阵列天线,向空间辐射毫米波探测信号。一维稀疏阵列天线在电子开关阵列、水平导轨、竖直导轨和伺服电机等的共同作用下,水平方向扫描拼接得到长稀疏线阵,扩大成像视场范围,高度方向利用一维等间隔机械扫描进而形成等效的二维稀疏平面阵列。数据录取过程中,数据采集卡同时采集收发组件的中频信号和利用光栅尺获得的的天线位置信息,提高天线定位精度。在一维稀疏阵列天线扫描运动的每一个四发八收稀疏阵列的扫描位置点,发射阵元天线通过电子开关切换实现顺序发射,所有的接收阵元天线在每一个发射阵元天线工作时,都同时处于接收状态。在录取到完整的稀疏平面阵列回波数据后,本发明提供了相应体制下的目标成像方法,对稀疏线阵竖直向扫描形成的每一个子稀疏平面阵列进行等视场成像,将所有稀疏平面阵列成像结果进行拼接即可得到最终的目标成像结果。本发明的有益效果如下:

[0038] 本发明方法所需阵元数目小于传统方案阵元数目的10%,极大的降低了成像系统的硬件成本。

[0039] 本发明的稀疏阵列间隔远大于均匀阵列所需满足的四分之一波长,极大的降低了阵列集成的难度。

[0040] 本发明提出了对应本发明系统的稀疏平面阵列快速频域成像方法,其处理流程只包含简单的快速傅里叶变换处理和求和过程,可以只针对感兴趣的目标距离范围进行成像,方法运行效率高。整个方法流程不存在影响成像质量的近似误差,可以保证本发明的系统的良好成像效果。

附图说明

[0041] 图1为拼接式稀疏平面阵列毫米波成像装置的结构示意图。

[0042] 图2为收发组件传输过程示意图。

[0043] 图3为四发八收线阵阵元位置分布图。

具体实施方式

[0044] 为了使本发明的技术方案及优点更加清楚明白,以下结合附图及实施例,对本发

明进行进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅用于解释本发明,并不用于限定本发明。

[0045] 实施例1:

[0046] 参照图1至图3,本实施例提供一种拼接式稀疏平面阵列毫米波成像装置,包括:毫米波扫频源1、倍频链路2、收发组件4、电子开关阵列3、一维四发八收稀疏阵列天线11、光栅尺8、伺服电机14、水平导轨9、竖直导轨10、数据采集卡5、数据处理单元6和显示器7。

[0047] 毫米波扫频源1产生17~20GHz线性调频的毫米波信号,经两个二倍频器组成的倍频链路2后的宽带信号传输给收发组件4,收发组件4包括功分器、功率放大器、低噪声放大器和混频器,其传输过程如图2所示。功分器将毫米波信号分成2路,一路传输给功率放大器,另一路作为本振信号输入给混频器的本振端口。功率放大器将放大后的毫米波信号传输给电子开关阵列。八个接受通道的低噪声放大器同时接收返回的毫米波信号,放大后传输给混频器的射频端口。混频器输出的八通道中频信号传输给数据采集卡。电子开关阵列将收发组件输出的毫米波信号依次传输给一维阵列天线的每个发射天线,同时接收一维阵列天线所有接收天线的信号,并回传给收发组件。

[0048] 在本实施例中,一维阵列天线由4个发射天线12和8个接收天线13组成,阵元位置如图3所示。发射天线12接收电子开关阵列3的毫米波信号,辐射到空间中进行探测;接收天线13接收目标回波信号。本实施例中8个接收天线等间距设置,8个接收天线组成的接收阵列的总长度为14cm,相邻接收阵元的间距为2cm。

[0049] 所述水平导轨9和竖直导轨10上均设置有光栅尺8,用于采集一维稀疏阵列天线11的位置坐标信息并传输给数据采集卡5。伺服电机14是包括水平方向伺服电机和竖直方向伺服电机。所述一维稀疏阵列天线11安装在竖直导轨10上的竖直滑块(图中未示出)上,竖直滑块与竖直方向伺服电机驱动连接,能够在竖直方向伺服电机的驱动下沿着竖直导轨移动,竖直导轨10安装在水平导轨9上的水平滑块上,水平滑块与水平方向伺服电机驱动连接,能够在水平方向伺服电机的驱动下沿着水平导轨9移动;水平方向伺服电机、竖直方向伺服电机均连接数据处理单元6,由数据处理单元6控制两伺服电机进而实现一维稀疏阵列天线11完成之字形的扫描运动。

[0050] 由数据处理单元6控制竖直方向伺服电机,驱动竖直滑块进而带动一维稀疏阵列天线11沿竖直导轨10竖直运动,开始首次竖直方向扫描,在扫描起点所对应的竖直方向上每隔设定的扫描间距设置有一个扫描位置点,在每个扫描位置点完成一次一维稀疏阵列天线的电子扫描,直至完成设定的竖直方向扫描高度上所有扫描位置点的扫描,则完成一次完整的竖直方向扫描,获得一个稀疏平面子阵的回波信号。数据处理单元6控制水平方向伺服电机,驱动水平滑块进而带动一维稀疏阵列天线11沿水平导轨9水平运动到下一个线阵位置,该线阵位置对应的竖直方向上同样每隔设定的扫描间距设置有一个扫描位置点,开始下一次竖直方向扫描,依次类推,通过n次竖直方向的扫描得到五个稀疏平面子阵的回波信号。

[0051] 预先设置一维稀疏阵列天线11扫描起点,在水平导轨9上以扫描起点对应的水平坐标为基准等间隔设定n个线阵位置,其中n=5。确定竖直方向扫描高度本实施例中竖直方向的扫描高度为1.8m,竖直方向扫描时的每个扫描位置点间的扫描间距为2mm,这样在每个水平线阵位置对应的竖直方向有900个扫描位置点。所设置的相邻线阵位置间的间隔要求满足下一个线阵位置最左侧的接收阵元天线与上一个线阵位置最右侧的接收天线阵元的

间隔为一维稀疏阵列天线上相邻接收阵元天线之间的间距,本实施例为2cm。竖直方向伺服电机在数据处理器6的控制下,驱动一维稀疏阵列天线11沿竖直导轨10竖直运动,开始首次竖直方向扫描,在竖直方向每隔设定的扫描间距(本实施例为2mm)完成一次一维稀疏阵列天线的电子扫描,完成一次一维阵列天线的电子扫描后,竖直方向伺服电机控制一维阵列天线移动到竖直方向的下一个扫描位置点,直至完成一次完整的竖直方向扫描,得到了长度14cm,高度1.8m的稀疏平面子阵的回波信号。完成一个稀疏平面子阵的扫描后,水平方向伺服电机在数据处理器6的控制下,驱动一维稀疏阵列天线沿水平导轨运动到下一个线阵位置,开始下一次竖直方向扫描,下一个线阵位置最左侧的接收阵元天线与上一个线阵位置最右侧的接收阵元天线的间隔为2cm,从而保证成像结果方位向的连续性。通过5次水平方位线阵位置的扫描,最终形成 $0.7\text{m} \times 1.8\text{m}$ 的等效二维稀疏平面阵列天线。在整个机械扫描过程中,光栅尺实时记录一维稀疏阵列天线的坐标位置信息,并将信号传输给数据采集卡。数据采集卡采集收发组件的八路中频信号和一维阵列天线位置信息,将其数字化后传输给数据处理器。数据处理器利用接收的数字信息进行成像。

[0052] 实施例2:

[0053] 基于实施例1提供的拼接式稀疏平面阵列毫米波成像装置,本实施例提供一种拼接式稀疏平面阵列毫米波成像方法:

[0054] S1:一维稀疏阵列天线开始扫描运动,在一维稀疏阵列天线扫描运动中的每一个扫描位置点,发射阵元天线通过电子开关切换实现顺序发射毫米波信号,所有的接收阵元天线在每一个发射阵元天线工作时,都同时处于接收状态,完成整个扫描运动后录取到n个稀疏平面子阵的回波信号。

[0055] S2:在一维稀疏阵列天线扫描运动过程中的任一个扫描位置点,对一维稀疏阵列天线的任意一个发射阵元天线构建其对应的雷达回波信号模型为:

$$[0056] \quad s(x_R, z, k) = \iiint \sigma(x_i, y_i, z_i) \exp(-jkR_T - jkR_R) dx_i dy_i dz_i$$

[0057] 上式中, (x_i, y_i, z_i) 、 $\sigma(x_i, y_i, z_i)$ 分别为目标散射点的三维位置坐标以及其对应的复值散射强度, x_R 为接收阵元天线的水平位置坐标, z 为一维稀疏阵列天线其阵列高度坐标。 $k = 2\pi f / c$ 为波数, f 为系统工作频率, c 为光速。 R_T 和 R_R 分别为发射阵元天线和接收阵元天线到目标的距离,分别表达为:

$$[0058] \quad R_T = \sqrt{(x_i - x_T)^2 + y_i^2 + (z_i - z)^2}$$

$$[0059] \quad R_R = \sqrt{(x_i - x_R)^2 + y_i^2 + (z_i - z)^2}$$

[0060] 其中 x_T 为发射阵元天线的水平位置坐标。依据球面波展开理论,有:

$$[0061] \quad \exp(-jkR_R) \approx \iint \frac{2\pi y_i^2}{k^2} e^{-j\pi/2} \exp(-jk_{yR} y_i) \cdot \exp(-jk_{xR}(x_i - x_R) - jk_z(z_i - z)) dk_{xR} dk_z$$

$$[0062] \quad \exp(-jkR_T) \approx \int \frac{\sqrt{2\pi} y_i}{k} e^{-j\pi/4} \exp\left(-jk_{sT} \sqrt{(x_i - x_T)^2 + y_i^2}\right) \cdot \exp(-jk_z(z_i - z)) dk_z$$

[0063] 其中:

$$[0064] \quad k_{yR} = \sqrt{k^2 - k_{xR}^2 - k_z^2}, k_{sT} = \sqrt{k^2 - k_z^2}$$

[0065] 其中, k_{xR} 和 k_z 分别为 x_R 和 z 对应的空间波数。

[0066] 忽略幅度带来的影响, 最终的雷达回波信号模型表达为:

$$[0067] \quad s(x_R, z, k) = \iiint \iiint \sigma(x_i, y_i, z_i) \exp\left(-jk_{sT} \sqrt{(x_i - x_T)^2 + y_i^2}\right) \exp(-jk_{xR} x_i) \\ \cdot \exp(-jk_{yR} y_i) \exp(-j2k_z z_i) \exp(jk_{xR} x_R) \exp(j2k_z z) dk_{xR} dk_z dx_i dy_i dz_i$$

[0068] S3: 对雷达回波信号模型的等式两端做关于 x_R 和 z 的傅里叶变换;

$$[0069] \quad s(k_{xR}, 2k_z, k) = \iiint \sigma(x_i, y_i, z_i) \exp\left(-jk_{sT} \sqrt{(x_i - x_T)^2 + y_i^2}\right) \exp(-jk_{xR} x_i) \\ \cdot \exp(-jk_{yR} y_i) \exp(-j2k_z z_i) dx_i dy_i dz_i$$

[0070] 可进一步转化为:

$$[0071] \quad s(k_{xR}, 2k_z, k) = \iint \sigma(x_i, y_i, 2k_z) \exp\left(-jk_{sT} \sqrt{(x_i - x_T)^2 + y_i^2}\right) \\ \cdot \exp(-jk_{xR} x_i) \exp(-jk_{yR} y_i) dx_i dy_i$$

[0072] 其中 $\sigma(x_i, y_i, 2k_z) = \int \sigma(x_i, y_i, z_i) \exp(-j2k_z z_i) dz_i$ 。

[0073] S4: 对附加项 $\exp\left(-jk_{sT} \sqrt{(x_i - x_T)^2 + y_i^2}\right)$ 进行补偿。

[0074] 对于传统的自发自收体制, 直接插值然后3D-FFT即可实现成像, 但是 k_{sT} 是关于 k_z 和 k 的函数, 需要补偿掉这一项对成像的影响。

[0075] 首先固定 k_z 和 k , 此时为 k_{sT} 固定值, 再定义 y_i 的成像区域, 即可实现对附加项

$\exp\left(-jk_{sT} \sqrt{(x_i - x_T)^2 + y_i^2}\right)$ 的补偿。 $\sigma(x_i, y_i, 2k_z)$ 的表达式可进一步转化为:

$$[0076] \quad \sigma(x_i, y_i, 2k_z) = \int \left[\int s(k_{xR}, 2k_z, k) \exp(jk_{yR} y_i) \exp(jk_{xR} x_i) dk_{xR} \right] \\ \cdot \exp\left(jk_{sT} \sqrt{(x_i - x_T)^2 + y_i^2}\right) dk_{yR}$$

[0077] S5: 对 $\sigma(x_i, y_i, 2k_z)$ 沿着 k_z 执行傅里叶变换即可得到三维成像的结果, 成像结果可表达为:

$$\begin{aligned} \sigma(x_i, y_i, z_i) = & \int \left\{ \int \left[s(k_{xR}, 2k_z, k) \exp(jk_{yR}y_i) \exp(jk_{xR}x_i) dk_{xR} \right] \right. \\ & \left. \cdot \exp\left(jk_{sT} \sqrt{(x_i - x_T)^2 + y_i^2}\right) dk_{yR} \right\} \exp(-j2k_z z_i) dk_z \end{aligned} \quad [0078]$$

[0079] 对应离散形式的三维成像的结果表示为:

$$\sigma(x_i, y_i, z_i) = \text{IFT}_{k_z} \left\{ \sum_{k_{yR}} \left[\text{IFT}_{k_{xR}} \left[s(k_{xR}, 2k_z, k_{yR}) \exp(jk_{yR}y_i) \right] \cdot \exp\left(jk_{sT} \sqrt{(x_i - x_T)^2 + y_i^2}\right) \right] \right\} \quad [0080]$$

[0081] S6: 对于一维稀疏阵列天线扫描运动过程中任一线阵位置对应的竖直方向扫描过程中的所有扫描位置点, 按照S2至S5中的步骤获得每个扫描位置点的各发射阵列天线的成像结果, 然后进行相参累加即可得到该线阵位置所对应的稀疏平面子阵回波信号的成像结果, 表示为:

$$\sigma(x_i, y_i, z_i) = \sum_{T=1}^4 \sigma(x_i, y_i, z_i) \big|_{x=x_T} \quad [0082]$$

[0083] S7: 对五个稀疏平面子阵回波信号的成像结果进行拼接即可得到最终的目标成像结果。

[0084] 本实施例提出了采用一个较短的四发八收毫米波稀疏线阵, 结合水平导轨和竖直导轨, 在水平长度方向上利用短线阵的扫描等效形成长稀疏线阵, 在竖直高度方向上采用与传统方案相同的等间距扫描方式, 进而等效形成稀疏面阵。本发明只利用12个阵元, 结合提出的成像方法, 可以获得与上百个阵元相当质量的成像结果, 极大的降低了系统的硬件成本。

[0085] 综上所述, 虽然本发明已以较佳实施例揭露如上, 然其并非用以限定本发明, 任何本领域普通技术人员, 在不脱离本发明的精神和范围内, 当可作各种更动与润饰, 因此本发明的保护范围当视权利要求书界定的范围为准。

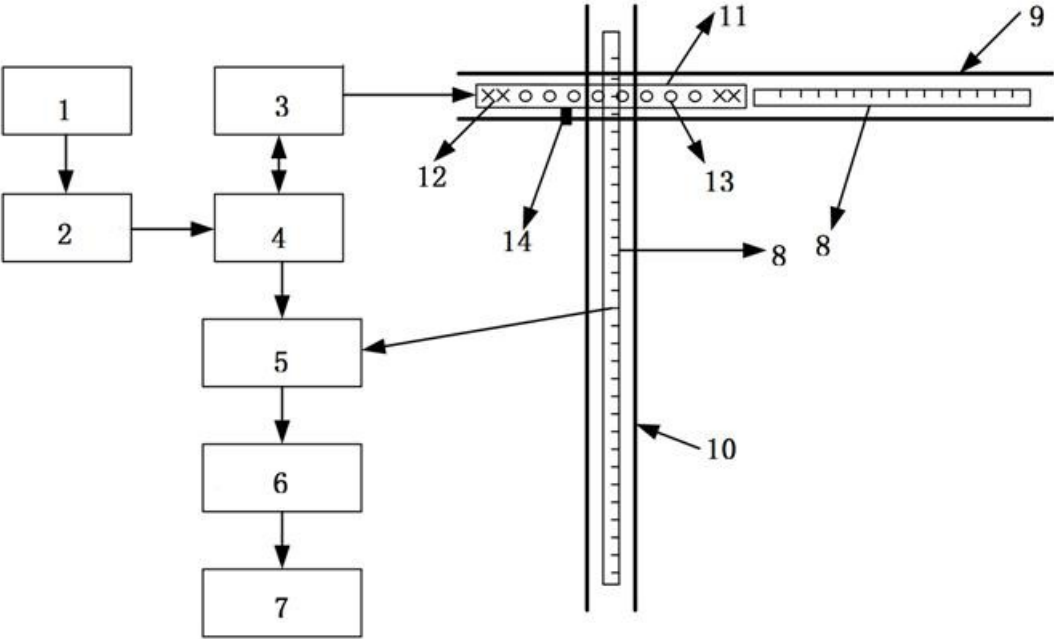


图1

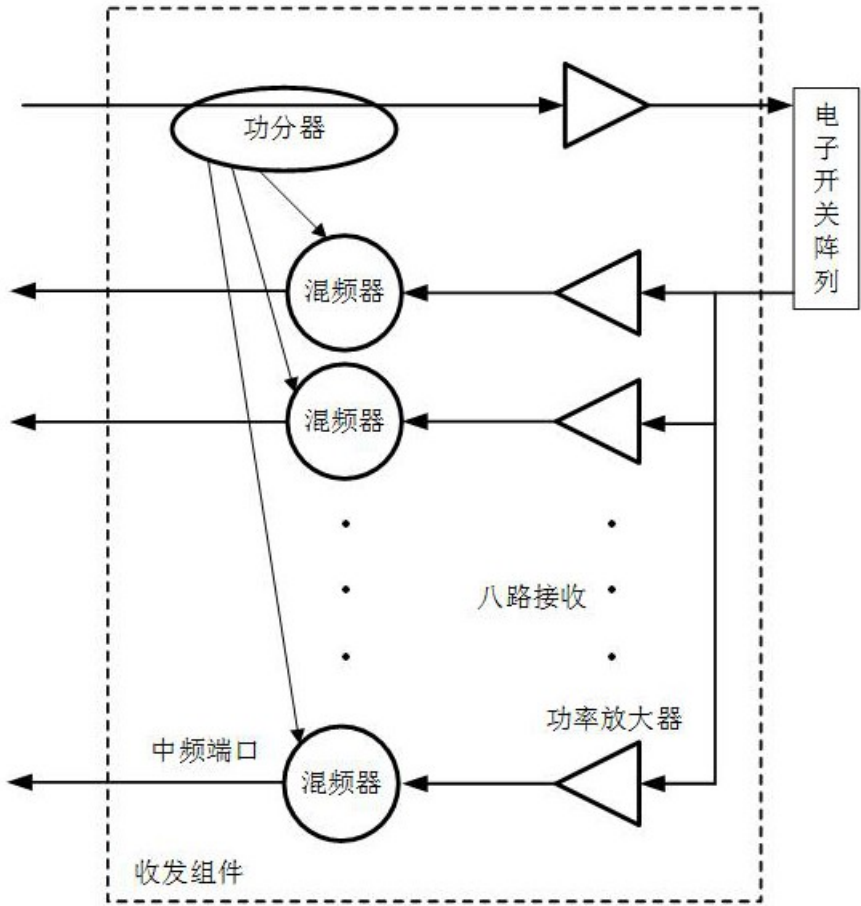


图2

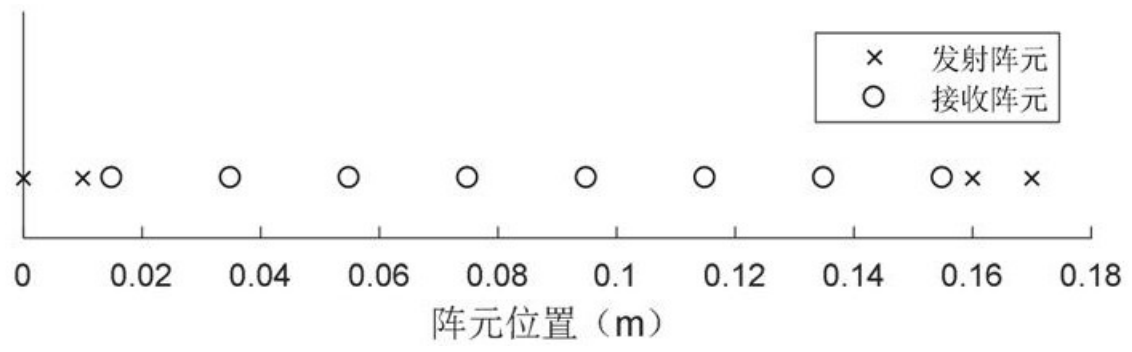


图3