



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108896988 A

(43)申请公布日 2018. 11. 27

(21)申请号 201810441917.3

(22)申请日 2018.05.10

(71)申请人 北京航空航天大学

地址 100191 北京市海淀区学院路37号

(72)发明人 许小剑

(74)专利代理机构 北京科迪生专利代理有限公司 11251

代理人 杨学明 成金玉

(51)Int.Cl.

G01S 13/89(2006.01)

G01S 7/42(2006.01)

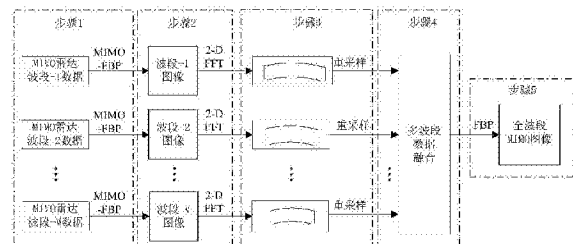
权利要求书1页 说明书8页 附图3页

(54)发明名称

一种针对MIMO雷达近场测量的多波段超宽带成像处理方法

(57)摘要

本发明公开了一种针对雷达近场测量的多波段超宽带成像处理方法,其主要步骤如下:首先,采用适合于多输入多输出(MIMO)雷达近场成像处理的滤波-逆投影(MIMO-FBP)算法,对多个波段的数据进行图像重构,并自动完成每个波段下的通道均衡化、方向图修正、传播衰减补偿和球面波前修正,得到各波段的低分辨率复图像;其次,通过二维快速傅里叶变换(2-D FFT)将各波段的复图像变换到对应的数据域,并沿扇环进行重采样,得到各波段图像对应的扇环域数据;第三,对所得到的多波段扇环域成像数据以适当的方式融合,得到全波段MIMO超宽带成像数据;最后,采用传统FBP成像算法对融合后的全波段数据进行图像重建,由此得到全波段高分辨率图像。



CN 108896988 A

1. 一种针对MIMO雷达近场测量的多波段超宽带成像处理方法,其特征在于,实现步骤如下:

步骤1:各单个波段数据的MIMO-FBP成像处理

采用适合于MIMO雷达近场成像处理的MIMO-FBP算法,对每个波段的MIMO雷达成像数据进行图像重构,得到每个波段的低分辨率复图像,自动完成每个波段下MIMO雷达各收发通道的均衡化、阵元方向图修正、信号传播路径衰减补偿以及近场球面波前修正;

步骤2:各单个波段的MIMO图像变换到数据域

通过二维快速傅里叶变换(2-D FFT)将每个波段的复图像变换到对应的数据域,得到每个波段对应的数据,其数据支撑域为扇环形区域,该数据是经过各种通道校正后的多波段MIMO成像数据;

步骤3:成像数据重采样

根据每个波段成像数据支撑域为扇环形区域、不同波段数据的支撑具有不同的扇环半径的特点,在数据域沿扇环进行重采样,得到每个波段成像对应的扇环域数据;

步骤4:多波段MIMO成像数据融合

对重采样所得到的多波段扇环域MIMO成像数据以适当的方式进行融合,得到全波段MIMO超宽带成像数据;

步骤5:全波段融合数据的FBP成像处理

采用FBP成像算法对融合后的全波段MIMO超宽带成像进行图像重建,并由此得到全波段高分辨率图像。

2. 根据权利要求1所述的一种针对MIMO雷达近场测量的多波段超宽带成像处理方法,其特征在于:提出将MIMO成像中逐个波段采用MIMO-FBP算法分别得到其重构图像后,通过2-D FFT变换到数据域并沿扇环形区域进行数据重采样,获得每个MIMO雷达波段的重采样数据。

3. 根据权利要求1所述的一种针对MIMO雷达近场测量的多波段超宽带成像处理方法,其特征在于:对重采样所得到的多波段扇环域MIMO成像极坐标格式数据以适当的方式进行融合,可得到全波段MIMO超宽带成像数据。多波段数据融合的具体方法包括:

如果对于全部Q个波段,频率较低的频段 $q-1$ 到频率较高的频段 $q$ , $q=2, \dots, Q$ ,前者的最高频率同后者的最低频率是相邻接的,也即波段之间不存在数据凹口,则可直接将全部Q个波段的数据经幅度增益均衡化和相位对准后,按照频段由低到高的顺序链接起来;

如果对于全部Q个波段,某个频率较低的频段 $q-1$ 同频率较高的频段 $q$ , $q=2, \dots, Q$ ,两者之间存在数据凹口,也即前者的最高频率同后者的最低频率之间是非相邻接的,则可先进行全部Q个波段数据的幅度增益均衡化和相位对准,然后采用基于参数化模型方法,先对凹口数据通过模型预测进行填充,得到完全无凹口的各波段数据,然后再按照频段由低到高的顺序将所有波段的数据链接起来;

由此完成全部Q个频段的数据融合,得到全波段MIMO成像数据。

4. 根据权利要求1所述的一种针对MIMO雷达近场测量的多波段超宽带成像处理方法,其特征在于:对多波段数据融合得到的全波段MIMO成像数据,采用传统的FBP成像算法进行图像重构处理,得到MIMO雷达全波段高分辨率雷达图像。

## 一种针对MIMO雷达近场测量的多波段超宽带成像处理方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及雷达成像处理技术领域,具体涉及一种针对MIMO(多输入多输出)雷达近场测量的多波段超宽带成像处理方法。

### 背景技术

[0002] MIMO雷达高分辨率近场诊断成像测量雷达是一种新体制成像雷达,具有系统便携性能好、成像测量与处理速度快、毋需目标作旋转运动即可实现对静止目标高分辨率快拍成像等优点。但是,MIMO成像雷达的工程化应用面临以下两方面的问题:

[0003] (1)MIMO成像雷达的方位向(横向距离)成像分辨率与MIMO天线在横向上的虚拟孔径尺寸成正比,同天线阵列与被测目标之间的距离成反比。横向距离分辨率 $\delta_{cr}$ 的计算式为:

$$[0004] \quad \delta_{cr} \approx \frac{\lambda R_0}{2L_{vir}} \quad (1)$$

[0005] 式中, $\lambda$ 为雷达信号波长, $L_{vir}$ 为线性MIMO阵列虚拟孔径长度, $R_0$ 为目标到阵列中心的距离。

[0006] 因此,为了实现对目标的横向距离高分辨率,要求满足以下两个条件之一:其一,MIMO天线阵列在横向上尺寸足够长,以便保证虚拟孔径 $L_{vir}$ 足够长;其二,成像测量的距离不太远,也即成像测量往往是在近场条件下进行的。

[0007] (2)MIMO成像的径向距离分辨率取决于雷达发射与接收信号的带宽。径向距离分辨率 $\delta_{dr}$ 的计算式为:

$$[0008] \quad \delta_{dr} = \frac{c}{2B} \quad (2)$$

[0009] 式中, $c$ 为雷达波传播速度, $B$ 为雷达信号带宽。

[0010] 由于MIMO雷达成像径向距离分辨率与雷达带宽成反比,高的距离分辨率要求大的雷达带宽。但是,由于MIMO雷达采用多个发射和多个接收单元的组合来获得横向高分辨率成像所需的大虚拟孔径 $L_{vir}$ ,且一般在近场球面波前条件下进行成像测量,这使得在采用MIMO雷达对目标进行二维高分辨率精密诊断成像中,必须采取有效的测量和处理技术,消除MIMO雷达收发通道、天线阵元方向图、信号传播路径衰减、以及球面波前等因素对目标成像造成的不利影响。而在给定极化条件下,雷达的收发通道特性、天线方向图、传播路径衰减等均随雷达频率而变化,这导致MIMO成像雷达的图像处理必须针对一个较窄的频段范围内进行,即使MIMO阵列天线、雷达发射信号等覆盖的全频段带宽度足够宽,也难以通过传统的成像处理,实现全频段的高分辨率成像,影响了MIMO雷达成像系统的距离分辨率。

[0011] Liu等人在文献(Yongze Liu,Xiaojian Xu,and Guangyao Xu.MIMO Radar Calibration and Imagery for Near-Field Scattering Diagnosis.IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems,Vol.54,No.1,pp.442-452,2018)中提出一种用于MIMO雷达近场测量成像的MIMO-FBP算法,但是由于没有解决全频段多波段下的雷达收发通道特性、天线方向图、传播路径衰减等同时校准的问题,仅能针对单个波段较窄频段范围

内的MIMO测量数据进行成像处理,影响了MIMO成像的距离分辨率。

## 发明内容

[0012] 本发明所要解决的技术问题为:本发明提出一种可以实现MIMO雷达多波段超宽带联合成像处理的方法,该方法首先采用适合于MIMO雷达近场成像处理的滤波-逆投影(MIMO-FBP)算法,对多个波段的MIMO雷达成像数据进行图像重构,并在此过程中自动完成每个波段下的收发通道均衡化、阵元方向图修正、信号传播路径衰减补偿以及近场球面波前修正,得到每个波段的低分辨率复图像;然后通过二维快速傅里叶变换(2-D FFT)将每个波段的复图像变换到对应的数据域,并通过沿扇环形数据域重采样得到经过各种通道校正后的多波段MIMO成像数据,最后对所得到的多波段扇环域MIMO成像数据融合以获得全波段MIMO超宽带成像数据,并采用传统FBP成像算法对数据进行超宽带图像重建,由此得到全波段高分辨率MIMO图像。从而可解决MIMO雷达近场成像测量条件下,因图像重建中需要同时完成收发通道均衡化、阵元方向图修正、信号传播路径衰减补偿等处理,而这些影响因素是随雷达频率变化的,使得图像重建难以针对超宽带数据进行,只能在较窄频段内实现,导致MIMO雷达成像距离分辨率受到限制的问题。

[0013] 本发明所采用的技术方案如下:一种针对MIMO雷达近场测量的多波段超宽带成像处理方法,实现步骤如下:

[0014] 步骤1:各单个波段数据的MIMO-FBP成像处理

[0015] 采用适合于MIMO雷达近场成像处理的MIMO-FBP算法,对每个波段的MIMO雷达成像数据进行图像重构,得到每个波段的低分辨率复图像,自动完成每个波段下MIMO雷达各收发通道的均衡化、阵元方向图修正、信号传播路径衰减补偿以及近场球面波前修正;

[0016] 步骤2:各单个波段的MIMO图像变换到数据域

[0017] 通过二维快速傅里叶变换(2-D FFT)将每个波段的复图像变换到对应的数据域,得到每个波段对应的数据,其数据支撑域为扇环形区域,该数据是经过各种通道校正后的多波段MIMO成像数据;

[0018] 步骤3:成像数据重采样

[0019] 根据每个波段成像数据支撑域为扇环形区域、不同波段数据的支撑具有不同的扇环半径的特点,在数据域沿扇环进行重采样,得到每个波段成像对应的扇环域数据;

[0020] 步骤4:多波段MIMO成像数据融合

[0021] 对重采样所得到的多波段扇环域MIMO成像数据以适当的方式进行融合,得到全波段MIMO超宽带成像数据;

[0022] 步骤5:全波段融合数据的FBP成像处理

[0023] 采用FBP成像算法对融合后的全波段MIMO超宽带成像进行图像重建,并由此得到全波段高分辨率图像。

[0024] 其中,提出将MIMO成像中逐个波段采用MIMO-FBP算法分别得到其重构图像后,通过2-D FFT变换到数据域并沿扇环形区域进行数据重采样,获得每个MIMO雷达波段的重采样数据。

[0025] 其中,对重采样所得到的多波段扇环域MIMO成像极坐标格式数据以适当的方式进行融合,可得到全波段MIMO超宽带成像数据。多波段数据融合的具体方法包括:

[0026] 如果对于全部 $Q$ 个波段,频率较低的频段 $q-1$ 到频率较高的频段 $q, q=2, \dots, Q$ ,前者的最高频率同后者的最低频率是相邻接的,也即波段之间不存在数据凹口,则可直接将全部 $Q$ 个波段的数据经幅度增益均衡化和相位对准后,按照频段由低到高的顺序链接起来;

[0027] 如果对于全部 $Q$ 个波段,某个频率较低的频段 $q-1$ 同频率较高的频段 $q, q=2, \dots, Q$ ,两者之间存在数据凹口,也即前者的最高频率同后者的最低频率之间是非相邻接的,则可先进行全部 $Q$ 个波段数据的幅度增益均衡化和相位对准,然后采用基于参数化模型方法,先对凹口数据通过模型预测进行填充,得到完全无凹口的各波段数据,然后再按照频段由低到高的顺序将所有波段的数据链接起来;

[0028] 由此完成全部 $Q$ 个频段的数据融合,得到全波段MIMO成像数据。

[0029] 其中,对多波段数据融合得到的全波段MIMO成像数据,采用传统的FBP成像算法进行图像重构处理,得到MIMO雷达全波段高分辨率雷达图像。

[0030] 本发明的主要技术优点:

[0031] 本发明提供了MIMO雷达近场成像处理的新方法,该方法可实现全频段超宽带MIMO成像处理,解决了以下两个技术问题:

[0032] (1) 在MIMO雷达近场成像测量条件下,因图像重建中需要同时完成收发通道均衡化、阵元方向图修正、信号传播路径衰减补偿等处理,而这些影响因素是随雷达频率变化的,使得现有MIMO-FBP图像重建算法难以针对超宽带数据进行处理,只能在较窄频段内实现,由此导致MIMO雷达成像距离分辨率受限的问题。

[0033] (2) 当多个MIMO雷达成像测量频段的频率不是互为邻接时,采用本发明所提出的处理方法,可实现多个MIMO成像频段数据的融合成像。

[0034] 上述两个技术问题的解决,可以大大提高MIMO近场成像的距离分辨率。

## 附图说明

[0035] 图1为MIMO雷达多波段超宽带成像处理示意图;

[0036] 图2为MIMO天线阵列对目标区成像关系示意图;

[0037] 图3为两个不同波段的扇环形数据域示意图,其中,图3(a)为较低频率波段;图3(b)为较高频率波段;

[0038] 图4为三个不同波段扇环形数据域示意图,其中,图4(a)为三个波段频率相邻接:波段间无数据凹口;图4(b)为三个波段频率非相邻接:波段间有数据凹口;

[0039] 图5为子块多波段融合图像与真实全频段图像对比,其中,图5(a)为波段-1图像;图5(b)为波段-2图像;图5(c)为波段-3图像;图5(d)为全波段MIMO图像。

## 具体实施方式

[0040] 下面结合附图进一步说明本发明的具体实施方式,但不作为对本发明的限定。

[0041] 对MIMO雷达多波段成像数据进行全频段超宽带联合成像处理的基本流程如图1所示,分为5个主要处理步骤:

[0042] 步骤1:各单个波段数据的MIMO-FBP成像处理

[0043] 采用适合于MIMO雷达近场成像处理的MIMO-FBP算法,对每个波段的MIMO雷达成像数据进行图像重构,得到每个波段的低分辨率复图像。在此过程中,自动完成每个波段下

MIMO雷达各收发通道的均衡化、阵元方向图修正、信号传播路径衰减补偿以及近场球面波前修正；

[0044] 步骤2:各单个波段的MIMO图像变换到数据域

[0045] 通过二维快速傅里叶变换(2-DFFT)将每个波段的复图像变换到对应的数据域,得到每个波段对应的数据,其数据支撑域为扇环形区域。该数据是经过各种通道校正后的多波段MIMO成像数据。

[0046] 步骤3:成像数据重采样

[0047] 根据每个波段成像数据支撑域为扇环形区域、不同波段数据的支撑具有不同的扇环半径这一特点,在数据域沿扇环进行重采样,得到每个波段成像对应的扇环域数据。

[0048] 步骤4:多波段MIMO成像数据融合

[0049] 对重采样所得到的多波段扇环域MIMO成像数据以适当的方式进行融合,得到全波段MIMO超宽带成像数据。

[0050] 步骤5:全波段融合数据的FBP成像处理

[0051] 采用FBP成像算法对融合后的全波段MIMO超宽带成像进行图像重建,并由此得到全波段高分辨率图像。

[0052] 对上述5个步骤详细讨论如下。

[0053] (1)步骤1:各单个波段数据的MIMO-FBP成像处理

[0054] 一方面,在近场条件下,对MIMO雷达目标进行精密成像,必须消除MIMO收发多通道幅相特性均衡化、阵元天线方向图、信号传播路径衰减、以及近场球面波前等因素对成像的影响。另一方面,在给定极化条件下,雷达的收发通道特性、天线方向图、传播路径衰减等均随雷达频率而变化,这导致MIMO成像雷达的图像处理必须针对一个较窄的频段范围内进行,即使MIMO阵列天线、雷达发射信号等覆盖的全频段带宽度足够宽,也必须采取逐个波段一一成像的处理方法,否则难以得到高质量重构图像。

[0055] 为此,采用适合于MIMO雷达近场成像处理的MIMO-FBP算法,对每个具有较窄频率范围的单波段MIMO雷达成像数据进行图像重构,得到每个波段的低分辨率复图像。由于单一波段的频带范围较窄,在此过程中,结合MIMO-FBP算法,可自动完成每个波段下MIMO雷达各收发通道的均衡化、阵元方向图修正、信号传播路径衰减补偿以及近场球面波前修正。具体过程说明如下:

[0056] 如图2所示。以第m个发射天线和第n个接收天线为例进行说明。在目标本体坐标系中,雷达阵列与X轴平行,阵列中心到坐标系原点的参考距离为 $R_0$ ,根据图2所示几何关系,计算目标上(x,y)位置处的散射中心分别在收、发天线方向图中的方位角 $\varphi_m$ 和 $\varphi_n$ ,计算公式为:

$$[0057] \quad \varphi_m = \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{x - x_m}{y + R_0} \right) \quad (3)$$

$$[0058] \quad \varphi_n = \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{x - x_n}{y + R_0} \right) \quad (4)$$

[0059] 式中,x,y为目标散射中心的位置; $x_m, x_n$ 分别指第m个发射天线单元、第n个接收天线单元在MIMO阵列中的位置; $R_0$ 为MIMO阵列中心到目标中心的距离。

[0060] 利用方向图的解析式或方向图测量数据列表计算出雷达频点 $f_k$ 处的电场方向图 $A_{Tm}(\varphi_m, f_k)$ 和 $A_{Rn}(\varphi_n, f_k)$ ,用于成像过程中的幅度修正。这样,当考虑天线阵列方向图和信号传播路径衰减的影响时,被成像目标的后向散射场回波信号模型可表示为:

$$[0061] \quad s_{mn}(f_k) = \iint_D \frac{A_{Tm}(\varphi_m, f_k) A_{Rn}(\varphi_n, f_k)}{R_{Tm} R_{Rn}} \sqrt{\sigma(x, y)} e^{-j \frac{4\pi f_k}{c} \left( \frac{R_{Tm} + R_{Rn}}{2} - R_0 \right)} dx dy \quad (5)$$

[0062] 式中, $s_{mn}(f_k)$ 表示成像测量的目标回波信号; $R_{Tm}, R_{Rn}$ 分别表示第 $m$ 个发射天线和第 $n$ 个接收天线到目标中心的距离; $\sqrt{\sigma(x, y)}$ 表示目标的二维散射分布函数; $c$ 为电波传播速度; $f_k$ 为第 $k$ 个频点的雷达频率;其他参数与前述相同。

[0063] 根据电磁逆散射理论,通过对目标后向散射场的相干聚焦可以获得目标散射分布的雷达像,聚焦因子包含了电磁波传播过程中的幅度和相位变化。在给定雷达频率和收-发天线对的情况下,聚焦因子可以表示为:

$$[0064] \quad \xi(x_{Tm}, x_{Rn}, f_k) = \frac{R_{Tm} R_{Rn}}{A_{Tm}(\varphi_m, f_k) A_{Rn}(\varphi_n, f_k)} e^{j \frac{4\pi f_k}{c} \left( \frac{R_{Tm} + R_{Rn}}{2} - R_0 \right)} \quad (6)$$

[0065] 式中, $\xi(x_{Tm}, x_{Rn}, f_k)$ 表示第 $k$ 个雷达频点、第 $m$ 个发射天线单元与第 $n$ 个接收天线单元对应的聚焦因子;其他参数与前述相同。

[0066] 图像重建模型可以表示为:

$$[0067] \quad \sqrt{\hat{\sigma}(x, y)} = \frac{1}{MNK} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K s_{mn}(f_k) \frac{R_{Tm} R_{Rn}}{A_{Tm}(\varphi_m, f_k) A_{Rn}(\varphi_n, f_k)} e^{j \frac{4\pi f_k}{c} \left( \frac{R_{Tm} + R_{Rn}}{2} - R_0 \right)} \quad (7)$$

[0068] 式中, $\sqrt{\hat{\sigma}(x, y)}$ 表示图像重建得到的目标二维散射分布函数, $M, N$ 和 $K$ 分别表示MIMO雷达天线阵列的发射阵元个数、接收阵元个数以及雷达扫频点数;其他参数与前述相同。

[0069] 为了减少校准测量以及为了处理上的简便性,在图像重建过程中,一般仅用中心频点处的天线方向图,将此时的 $A_{Tm}(\varphi, f_k)$ 和 $A_{Rn}(\varphi, f_k)$ 记为 $A_{Tm}(\varphi, f_0)$ 和 $A_{Rn}(\varphi, f_0)$ , $f_0$ 表示MIMO雷达当前测量波段的中心频率。

[0070] 如此,适用于MIMO雷达的近场MIMO-FBP成像算法如下:

[0071] 步骤1-1:对每个通道的频域数据 $s_{mn}(f_k)$ 做快速逆傅里叶变换(IFFT),得到一维距离像 $P_{mn}(r)$ ;

[0072] 步骤1-2:对一维距离像 $P_{mn}(r)$ 进行插值操作,得到 $(x, y)$ 位置处的图像重建值 $P_{mn}(r')$ ;

[0073] 步骤1-3:将 $P_{mn}(r')$ 乘上式(6)中的聚焦因子,得到下式:

$$[0074] \quad \sqrt{\hat{\sigma}_{mn}(x, y)} = \frac{R_{Tm} R_{Rn}}{A_{Tm}(\varphi_m, f_0) A_{Rn}(\varphi_n, f_0)} P_{mn}(r') e^{j 4\pi f_{\min} r' / c} \quad (8)$$

[0075] 式中 $f_{\min}$ 表示当前成像波段的最低雷达频率。

[0076] 步骤1-4:对所有通道的 $\sqrt{\hat{\sigma}_{mn}(x, y)}$ 进行相干求和得到图像的重建值:

$$[0077] \quad \sqrt{\hat{\sigma}(x, y)} = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sqrt{\hat{\sigma}_{mn}(x, y)} \quad (9)$$

[0078] 如此,便得到了当前波段下经过对MIMO雷达各收发通道的均衡化、阵元方向图修正、信号传播路径衰减补偿以及近场球面波前修正等校正处理的重构图像。

[0079] (2) 步骤-2:各单个波段的MIMO图像变换到数据域

[0080] 假设MIMO雷达共测得Q个波段的成像数据,其对应的MIMO-FBP算法重构图像记为 $\sqrt{\hat{\sigma}_q(x,y)}$ ,  $q=1,2,\dots,Q$ 。

[0081] 通过二维快速傅里叶变换(2-DFFT)将每个波段的复图像 $\sqrt{\hat{\sigma}_q(x,y)}$ ,  $q=1,2,\dots,Q$ ,变换到对应的数据域,得到每个波段重构图像所对应的数据,记为 $S_q(f,\theta)$ ,  $q=1,2,\dots,Q$ ,其在数据空间 $(f,\theta)$ 的支撑域均为扇环形区域,且不同波段数据的支撑具有不同的扇环半径。图3给出了当测量波段为两个波段时,不同波段的扇环形数据域示意图。注意该数据是经过各种通道校正后的多波段MIMO成像数据。

[0082] (3) 步骤3:成像数据重采样

[0083] 根据每个波段成像数据支撑域为扇环形区域、不同波段数据的支撑具有不同的扇环半径这一特点,针对每个MIMO成像波段,在数据域沿扇环进行重采样,得到每个波段成像对应的扇环域重采样数据。重采样可按下列公式进行:

$$[0084] \quad N_{f_i} = \frac{ny}{2} + k_i L_y \cos(\theta_j) \quad (10)$$

$$[0085] \quad N_{\theta_j} = \frac{nx}{2} + k_i L_x \sin(\theta_j) \quad (11)$$

[0086] 式中, $N_{f_i}$ 为采样点在扇环上对应纵向索引值,下标 $f_i$ 为频率, $i$ 为频率索引值, $ny$ 为采用MIMO-FBP算法在径向的成像点数, $k_i = 2f_i/c$ ,为波数, $c$ 为光速; $L_y$ 为径向成像距离,下标 $y$ 代表径向; $\theta_j$ 为采样点对应方位角;下标 $j$ 为方位索引值; $\cos$ 为余弦函数; $N_{\theta_j}$ 为采样点在扇环上对应横向索引值;下标 $\theta_j$ 表示方位; $nx$ 为采用MIMO-FBP算法在横向成像点数; $L_x$ 为横向成像距离,下标 $x$ 代表横向; $\sin$ 为正弦函数。

[0087] 通过该公式,可以准确地实现沿扇环将每个波段MIMO-FBP重构图像对应的数据的重采样,获得多波段数据融合所需的极坐标格式成像数据。由此得到的第 $q$ 个波段的重采样数据可记为 $S_q(f_i,\theta_j)$ ,  $q=1,2,\dots,Q$ ,  $i=1,2,\dots,N_{f_q}$ ,  $j=1,2,\dots,N_{\theta_q}$ ;其中 $N_{f_q}$ ,  $N_{\theta_q}$ 分别表示第 $q$ 个波段数据的频率样本点数和方位样本点数。

[0088] 对于所有Q个波段, $q=1,2,\dots,Q$ ,假设 $q$ 取值较小的索引号对应于频率较低的频段,较大的索引号对应于频率较高的频段。后续的多波段融合要求对于所有Q个波段,有 $N_{\theta_1} = N_{\theta_2} = \dots = N_{\theta_Q}$ 。因此,在对每个波段的数据重采样中,要求所有Q个波段的方位样本点数是相同的。

[0089] (4) 步骤-4:多波段MIMO成像数据融合

[0090] 对重采样所得到的多波段扇环域MIMO成像极坐标格式数据以适当的方式进行融合,可得到全波段MIMO超宽带成像数据。具体方法是:

[0091] 如果对于全部Q个波段,频率较低的频段 $q-1$ 到频率较高的频段 $q$ ,  $q=2,\dots,Q$ ,前者的最高频率同后者的最低频率是相邻接的,也即波段之间不存在数据凹口,则可直接将全部Q个波段的数据经幅度增益均衡化和相位对准后,按照频段由低到高的顺序链接起来,如图4(a)所示。波段之间幅度增益均衡化和相位对准的方法可参见(K.M.Cuomo,J.E.Piou,



and J.T.Mayhan,Ultrawide-Band Coherent Processing,IEEE Transactions on Antennas and Propagation,Vol.47,No.6,pp.1094-1107,1999)等文献。

[0092] 如果对于全部 $Q$ 个波段,某个频率较低的频段 $q-1$ 同频率较高的频段 $q, q=2, \dots, Q$ ,两者之间存在数据凹口,也即前者的最高频率同后者的最低频率之间是非相邻接的,则可先进行全部 $Q$ 个波段数据的幅度增益均衡化和相位对准,然后采用基于参数化模型等方法,先对凹口数据通过模型预测进行填充,得到完全无凹口的各波段数据,然后再按照频段由低到高的顺序将所有波段的数据链接起来,如图4(b)所示。波段间凹口数据预测与填充的方法可参见(贺飞扬,分布式多波段雷达超分辨成像技术研究,博士论文,北京航空航天大学,2009)等文献。

[0093] 由此,完成全部 $Q$ 个波段的数据融合,得到MIMO全波段融合数据。

[0094] (5) 步骤5:全波段融合数据的FBP成像处理

[0095] 采用传统FBP成像算法对融合后的全波段MIMO超宽带成像进行图像重建,并由此得到全波段高分辨率图像。传统FBP成像算法的实现可参见文献(许小剑,雷达目标散射特性测量与处理新技术,雷达与探测前沿技术丛书,北京:国防工业出版社,2018)

[0096] 实施例

[0097] 本实施例采用的数据是实际MIMO雷达近场测量得到的飞机模型目标成像数据,该成像测量数据的MIMO雷达频率覆盖3个波段,称为波段-1、波段-2和波段-3。其中波段-1频率最低,波段-3频率最高,且3个波段的最低和最高频率之间是相互邻接的,也即波段间不存在数据凹口。因此,MIMO雷达多波段数据融合成像处理的步骤如下:

[0098] 步骤1:采用MIMO-FBP成像算法对3个波段的数据逐一进行图像重构

[0099] 采用适合于MIMO雷达近场成像处理的MIMO-FBP算法,对每个波段的MIMO雷达成像数据进行图像重构,得到波段-1、波段-2和波段-3的低分辨率复图像。在此过程中,自动完成每个波段下MIMO雷达各收发通道的均衡化、阵元方向图修正、信号传播路径衰减补偿以及近场球面波前修正;

[0100] 步骤2:将3个波段的重构MIMO图像逐一变换到数据域

[0101] 通过二维快速傅里叶变换(2-DFFT)将波段-1、波段-2和波段-3对应的复图像逐一变换到对应的数据域,得到波段-1、波段-2和波段-3对应的数据,其数据支撑域为扇环形区域。

[0102] 步骤3:对3个波段的成像数据进行重采样

[0103] 根据每个波段成像数据的支撑域为扇环形区域,且波段-1、波段-2和波段-3各自数据的支撑域具有不同的扇环半径这一特点,按照公式(10)和(11)所给定的计算方法在数据域沿扇环进行重采样,得到每个波段成像对应的扇环域数据。

[0104] 步骤4:多波段MIMO成像数据融合

[0105] 由于波段-1、波段-2和波段-3之间对重采样所得到的多波段扇环域MIMO成像数据以适当的方式进行融合,得到全波段MIMO超宽带成像数据,如图4(a)所示。

[0106] 步骤5:全波段融合数据的FBP成像处理

[0107] 采用传统FBP成像算法对融合后的全波段MIMO成像数据进行图像重建,并由此得到全波段高分辨率图像。

[0108] 图5(a)~(d)分别示出了采用波段-1、波段-2、波段-3和3个波段融合后的全波段

数据的成像结果。从图中可以看出,最终,全波段数据的重构图像其横向距离分辨率与高频段(波段-3)图像基本一致,而径向距离分辨率比所有3个波段图像的径向距离分辨率都高,从而实现了全波段融合高分辨率成像。

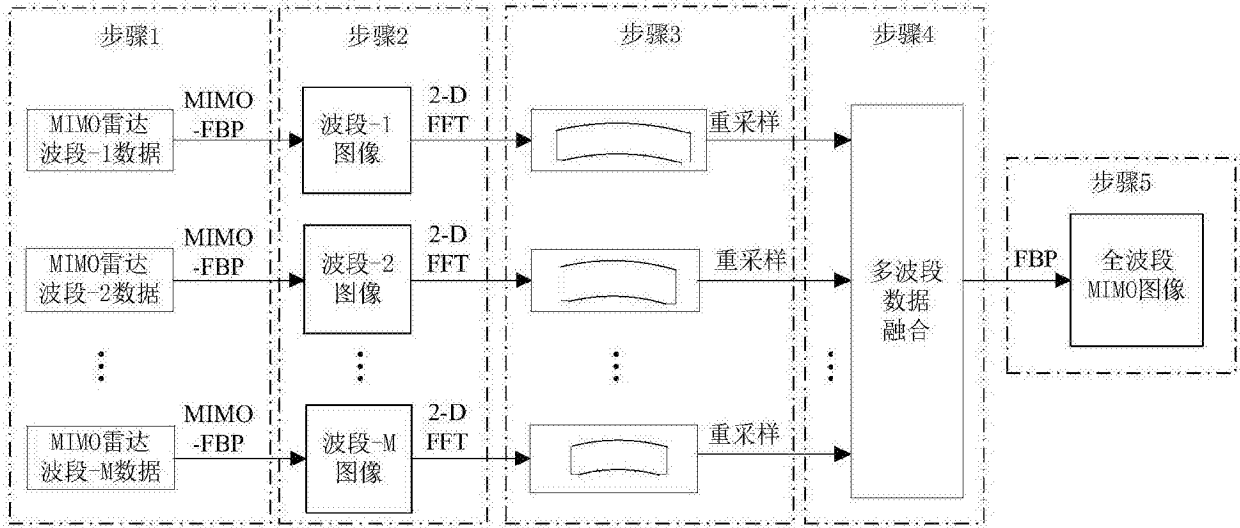


图1

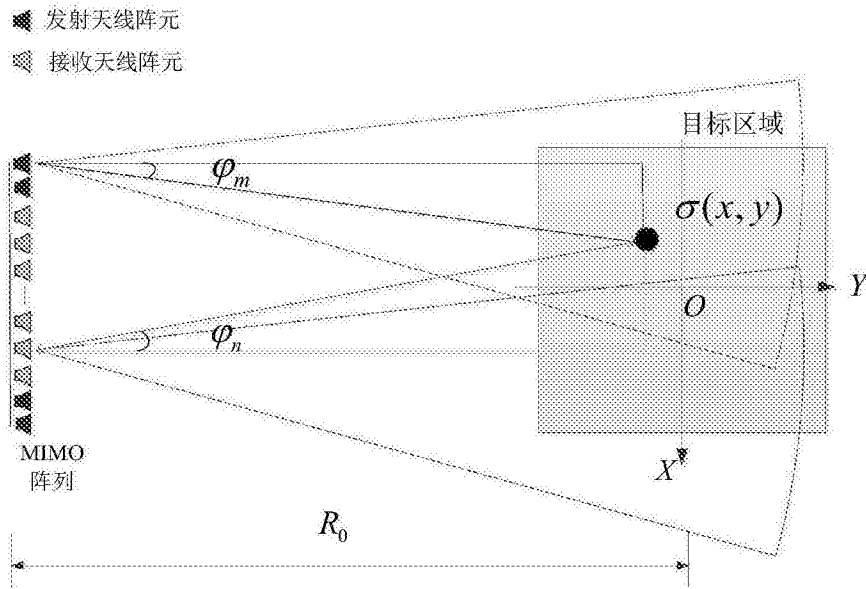


图2

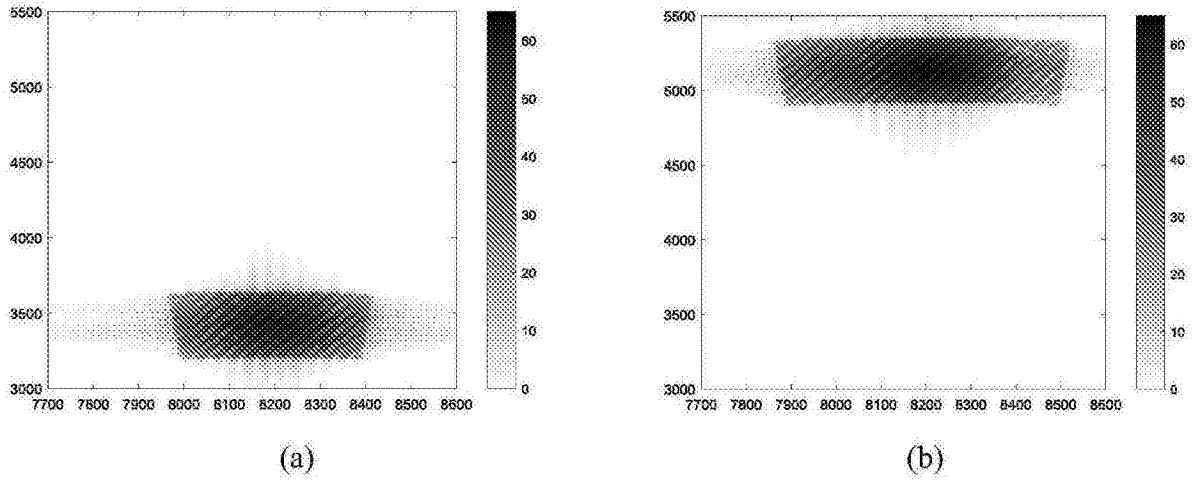


图3

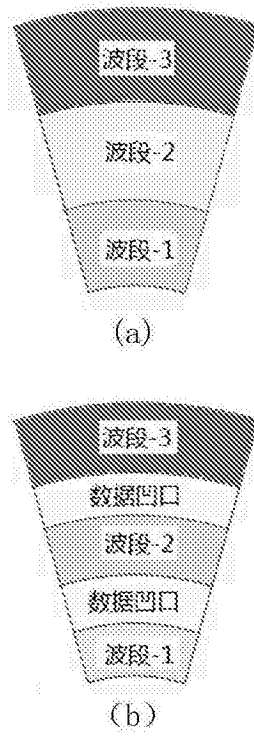


图4

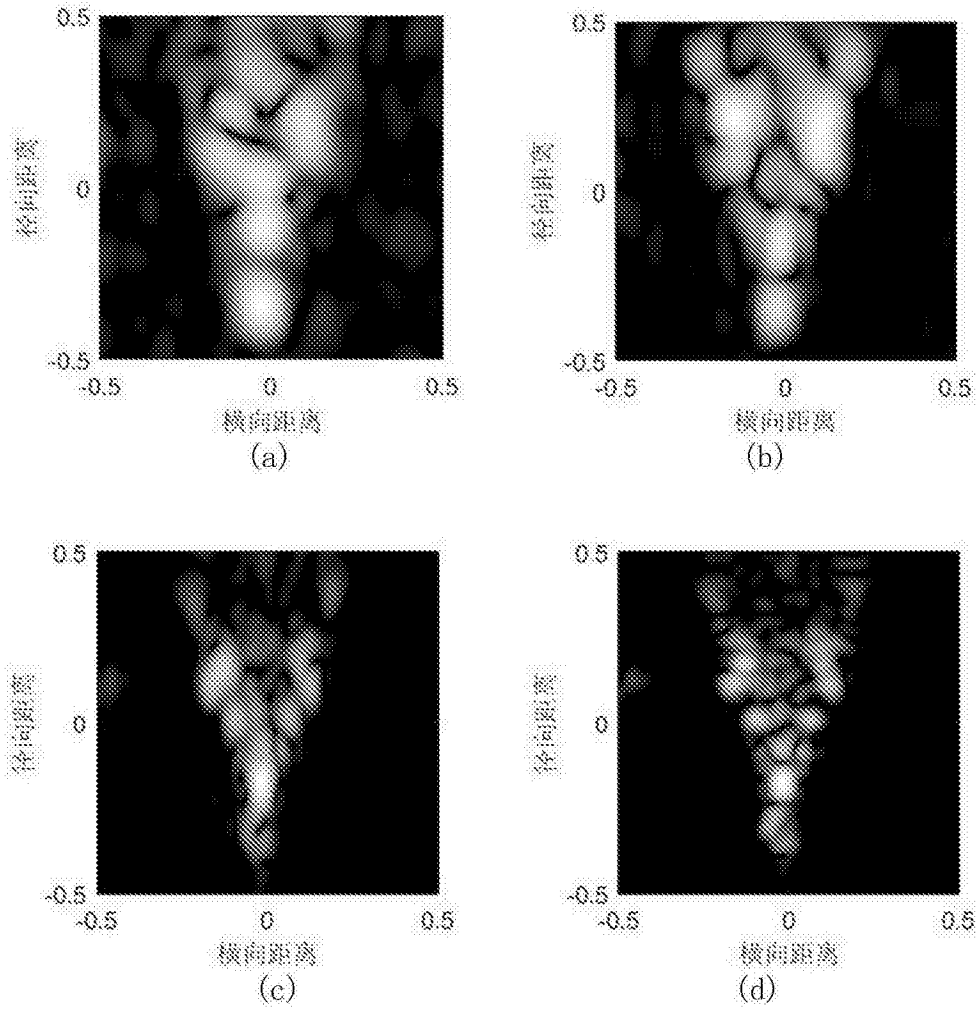


图5