



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110244267 A

(43)申请公布日 2019.09.17

(21)申请号 201910422582.5

(22)申请日 2019.05.21

(71)申请人 成都航天科工微电子系统研究院有限公司

地址 610213 四川省成都市天府新区华阳街道南段846号

(72)发明人 武春风 汪宗福 顾彤 白明顺 吴婷婷 刘洋

(74)专利代理机构 中国和平利用军工技术协会专利中心 11215

代理人 刘光德 彭霜

(51)Int.Cl.

G01S 7/40(2006.01)

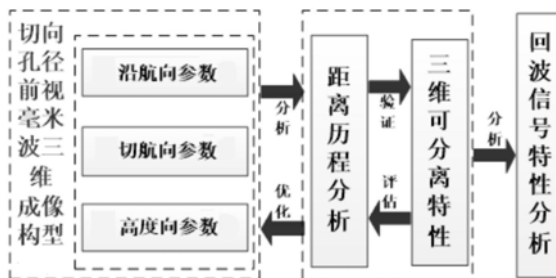
权利要求书1页 说明书9页 附图4页

(54)发明名称

弹载毫米波切向前视SAR三维成像模型性能分析方法

(57)摘要

本发明公开了一种弹载毫米波切向前视SAR三维成像模型性能分析方法,该方法根据回波信号表征数学模型,结合雷达参数和运动参数,分析弹载毫米波切向前视SAR三维成像模型的三维空变耦合特性和三维空间分辨能力,并以空间全向运动模型为参考,采用BP算法对比分析其对观测区域空间三维成像结果的影响,从而能够准确获得弹载毫米波切向前视SAR三维成像模型的成像能力的性能参数,方便设计人员对模型进一步优化,以提高成像模型对目标的识别能力。



1. 一种弹载毫米波切向前视SAR三维成像模型性能分析方法,所述成像模型为基于弹道下降轨的运动模型,并结合导弹为防止拦截而飞行的蛇形规避运动特性构造的空间三维切向孔径模型,其特征在于:该方法包括如下步骤:

根据导弹下降轨的运动模型,并利用导弹规避拦截的蛇形切向运动特性,结合其沿航向和高度向的运动特征,获得表征回波信号的数学模型;

根据上述回波信号表征数学模型,结合雷达参数和运动参数,分析该成像模型的三维空变耦合特性和三维空间分辨能力;

针对成像模型的空间三维切向运动,以空间全向运动模型为参考,采用BP算法对比分析其对观测区域空间三维成像结果的影响。

2. 根据权利要求1所述的弹载毫米波切向前视SAR三维成像模型性能分析方法,其特征在于:分析三维成像空间中是否存在等距离历程集,以根据具有相同距离历程的某些像素上是否存在散射点,判断成像后的三维图像空间是否产生虚假像素点。

3. 根据权利要求2所述的弹载毫米波切向前视SAR三维成像模型性能分析方法,其特征在于:根据如下方程组判断是否存在等距离历程集:

$$\begin{cases} \|\bar{\mathbf{P}}_{apc}(l) - \bar{\mathbf{A}}\| = \|\bar{\mathbf{P}}_{apc}(l) - \bar{\mathbf{B}}\| \\ \mathbf{C}_{(N-1) \times 3} \cdot (\bar{\mathbf{A}} - \bar{\mathbf{B}}) = 0 \end{cases}$$

其中, $\bar{\mathbf{A}}$ 和 $\bar{\mathbf{B}}$ 为观测区域中的任意两个点目标, $\bar{\mathbf{P}}_{apc}$ 表示初始雷达平台的位置矢量信息, $\mathbf{C}_{(N-1) \times 3}$ 是雷达平台的瞬时速度矢量矩阵。

4. 根据权利要求1所述的弹载毫米波切向前视SAR三维成像模型性能分析方法,其特征在于:根据切向孔径模型的切航迹向分辨率和高度向与沿航向的耦合向分辨率,分析该成像模型的三维空变耦合特性和三维空间分辨能力。

5. 根据权利要求1所述的弹载毫米波切向前视SAR三维成像模型性能分析方法,其特征在于:将所述切向孔径模型的切向路径表示为所述全向运动模型的稀疏采样。

6. 根据权利要求5所述的弹载毫米波切向前视SAR三维成像模型性能分析方法,其特征在于:选择切航向变速模型作为所述切向路径。

7. 根据权利要求5所述的弹载毫米波切向前视SAR三维成像模型性能分析方法,其特征在于:所述成像模型的接收信号对应于全向运动模型的全孔径面阵波数域数据与稀疏矩阵相乘。

弹载毫米波切向前视SAR三维成像模型性能分析方法

技术领域

[0001] 本发明涉及弹载高分辨雷达制导技术,尤其是涉及导弹飞行轨道正前方目标雷达三维成像模型,适用于为弹载合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar,SAR)提供准确的前视三维成像能力。

背景技术

[0002] 当前,弹载合成孔径雷达(SAR)导引头在导弹下降段采用聚束SAR成像模式,通过对目标场景进行高分辨率二维聚焦成像,实时获取目标场景的SAR成像,并和设定的SAR基准图像进行匹配定位,以实现目标的定位和识别。

[0003] 然而,常规的合成孔径雷达成像技术是通过发射大带宽信号以及依靠载体的运动在空间形成虚拟大孔径来分别获取距离和方位的高分辨微波图像,此时雷达波束指向与载体的飞行方向需要有一定的夹角,以获取方位高分辨成像所需的虚拟阵列孔径。因此,传统的弹载平台在利用SAR成像技术探测和识别目标时,就需要导弹的飞行方向与弹目间距存在一定的角度,才能获取目标的方位高分辨像,最终需要飞行一定的弧形轨迹才能打击目标;这将极大地消耗导弹自身的能量,增加了制导控制的难度;

[0004] 此外,由于传统的弹载SAR导引头不具备自主寻的攻击目标的能力,必须采用匹配制导的方式攻击目标,这极大地降低了导弹精确打击目标的性能。譬如,要攻击地面的静止或运动的装甲目标以及海面运动的舰船目标等,就很难找到合适的匹配区域用于定位并攻击目标。同时,反装甲导弹或巡航导弹,由于地形起伏或海浪引起的迭掩、阴影以及合成孔径积累时间内观测视角的限制,给SAR图像解译和目标识别带来了困难。

[0005] 因此,针对上述问题,本领域技术人员进行了大量的研究,并提出了一些解决方案。然而,这些方案的有效性难以准确估计,从而使得相关的研究及工程应用进展缓慢。

发明内容

[0006] 有鉴于此,本发明提出一种弹载毫米波前视切向SAR成像模型性能分析方法,该方法基于弹道机动的下降轨聚束SAR三维成像模型,能够对弹载毫米波前视切向SAR成像性能进行准确分析,进而为弹载毫米波前视切向SAR成像技术进行技术改进以及工程应用提供依据。

[0007] 为实现上述目的,本发明采用如下技术方案:

[0008] 一种弹载毫米波切向前视SAR三维成像模型性能分析方法,所述成像模型为基于弹道下降轨的运动模型,并结合导弹为防止拦截而飞行的蛇形规避运动特性构造的空间三维切向孔径模型,该方法包括如下步骤:

[0009] 根据导弹下降轨的运动模型,并利用导弹规避拦截的蛇形切向运动特性,结合其沿航向和高度向的运动特征,获得表征回波信号的数学模型;

[0010] 根据上述回波信号表征数学模型,结合雷达参数和运动参数,分析该成像模型的三维空变耦合特性和三维空间分辨能力;

[0011] 针对成像模型的空间三维切向运动,以空间全向运动模型为参考,采用BP算法对比分析其对观测区域空间三维成像结果的影响。

[0012] 根据进一步的实施方式,分析三维成像空间中是否存在等距离历程集,以根据具有相同距离历程的某些像素上是否存在散射点,判断成像后的三维图像空间是否产生虚假像素点。

[0013] 根据进一步的实施方式,根据如下方程组判断是否存在等距离历程集:

$$[0014] \quad \begin{cases} \|\bar{\mathbf{P}}_{apc}(l) - \bar{\mathbf{A}}\| = \|\bar{\mathbf{P}}_{apc}(l) - \bar{\mathbf{B}}\| \\ \mathbf{C}_{(N-1) \times 3} \cdot (\bar{\mathbf{A}} - \bar{\mathbf{B}}) = 0 \end{cases}$$

[0015] 其中, $\bar{\mathbf{A}}$ 和 $\bar{\mathbf{B}}$ 为观测区域中的任意两个点目标, $\bar{\mathbf{P}}_{apc}$ 表示初始雷达平台的位置矢量信息, $\mathbf{C}_{(N-1) \times 3}$ 是雷达平台的瞬时速度矢量矩阵。

[0016] 根据进一步的实施方式,根据切向孔径模型的切航迹向分辨率和高度向与沿航向的耦合向分辨率,分析该成像模型的三维空变耦合特性和三维空间分辨能力。

[0017] 根据进一步的实施方式,将所述切向孔径模型的切向路径表示为所述全向运动模型的稀疏采样。

[0018] 根据进一步的实施方式,选择切航向变速模型作为所述切向路径。

[0019] 根据进一步的实施方式,所述成像模型的接收信号对应于全向运动模型的全孔径面阵波数域数据与稀疏矩阵相乘。

[0020] 本发明根据回波信号表征数学模型,结合雷达参数和运动参数,分析弹载毫米波切向前视SAR三维成像模型的三维空变耦合特性和三维空间分辨能力,并以空间全向运动模型为参考,采用BP算法对比分析其对观测区域空间三维成像结果的影响,从而能够准确获得弹载毫米波切向前视SAR三维成像模型的成像能力的性能参数,方便设计人员对模型进一步优化,以提高成像模型对目标的识别能力。

附图说明

[0021] 图1为弹载毫米波前视切向SAR几何构型示意图;

[0022] 图2为根据本发明实施例的弹载毫米波前视切向SAR性能分析方法流程图;

[0023] 图3为空间三维运动的等距离点集,其中:(a)为直线运动轨迹,(b)为曲线运动轨迹;

[0024] 图4为曲线运动轨迹模型分析示意图;

[0025] 图5为三维变速曲线切向运动路径示意图,其中:(a)为高度向变速运动,(b)为切航向变速运动,(c)为沿航向变速运动;

[0026] 图6为切向孔径轨迹的三维空间角度示意图;

[0027] 图7为根据本发明的点目标空间三维分辨率仿真结果,其中:(a)为3dB-3D聚焦图像,(b)为切航向分辨率,(c)为高度向分辨率,(d)切航向-沿航向切片图像,(e)沿航向-高度向切片图像,(f)切航向-高度向切片图像;

[0028] 图8为多点三维成像结果,其中:(a)为3dB三维BP成像结果,(b)为10dB三维BP成像结果。

具体实施方式

[0029] 下面结合附图和具体实施方式对本发明进行更详细地描述。

[0030] 本发明提出的弹载毫米波前视切向SAR成像模型性能分析方法,根据弹载毫米波前视切向SAR构型的三维运动特性,即沿航迹向、切航迹向、高度向的运动特性,分析设计不同的运动参数,获取其空间三维的合成孔径,并采用几何矢量分析法对理想条件下弹载平台与参考点目标之间的距离历程进行分析,判断是否存在等距离历程点集,分析其对观测区域空间三维成像结果的影响,以优化空间三维的切向路径。

[0031] 所述弹载毫米波前视切向SAR成像模型基于弹道下降轨的运动模型,并结合导弹为防止拦截而飞行的蛇形规避运动特性构造,因此该模型充分利用了导弹弹道的运动特点,因此更符合实际背景。

[0032] 所述方法具体包括如下步骤:

[0033] 步骤1:根据导弹下降轨的运动模型,并利用导弹规避拦截的蛇形切向运动特性,结合其沿航向和高度向的运动特征,获得表征回波信号的数学模型;

[0034] 基于导弹规避的蛇形机动能力实现空间的切向孔径,可以避免传统弹载SAR模型中为实现方位高分辨而与目标间距存在一定角度的问题。同时,随着沿航向高速运动,获取切航向的多视角观测,可实现对场景目标的持续观测。

[0035] 针对空间三维切向孔径模型,分析观测区域中任意两个点目标 \bar{A} 和 \bar{B} 的距离历程,并分别记为 $R(n, \bar{A})$ 和 $R(n, \bar{B})$ 。

[0036] 若所述两个点具有相同的斜距历程,即 $R(n, \bar{A}) = R(n, \bar{B})$ 时,则对于观测区域的回波 $S_{total}(\bar{P}_w)$,散射点 \bar{A} 和 \bar{B} 的积分叠加可表示为:

$$\begin{aligned}
 S_{total}(\bar{A} \cup \bar{B}) &= \sigma_A \cdot S_{rc}(t, n; \bar{A}) + \sigma_B \cdot S_{rc}(t, n; \bar{B}) \\
 [0037] \quad &= (\sigma_A + \sigma_B) \cdot S_{rc}(t, n; \bar{A}) \\
 &= (\sigma_A + \sigma_B) \cdot S_{rc}(t, n; \bar{B})
 \end{aligned} \tag{1}$$

[0038] 由式(1)可知,空间中具有相同距离历程的散射点具有相同的回波信号形式,其散射系数在数学上不可分,因而图像中某像素点强度是观测区域中与该像素点距离历程相同的散射点散射系数的叠加。同时,若具有相同距离历程的某些像素上并没有散射点,成像后的三维图像空间将会产生虚假像素点。

[0039] 因此,本发明根据切向孔径毫米波雷达前视三维成像模型,对三维成像空间中相等距离历程集进行分析。具体而言,根据如下方程组判断是否存在等距离历程集:

$$[0040] \quad \begin{cases} \|\bar{P}_{apc}(l) - \bar{A}\| = \|\bar{P}_{apc}(l) - \bar{B}\| \\ \mathbf{C}_{(N-1) \times 3} \cdot (\bar{A} - \bar{B}) = 0 \end{cases} \tag{2}$$

[0041] 式中, \bar{P}_{apc} 表示初始雷达平台的位置矢量信息, $\mathbf{C}_{(N-1) \times 3}$ 是雷达平台的瞬时速度矢量矩阵,其表达式为:

$$[0042] \quad C_{(N-1) \times 3} = \begin{bmatrix} v_x(1) - v_x(2) & v_y(1) - v_y(2) & v_z(1) - v_z(2) \\ v_x(2) - v_x(3) & v_y(2) - v_y(3) & v_z(2) - v_z(3) \\ \dots\dots\dots & \dots\dots\dots & \dots\dots\dots \\ v_x(N-1) - v_x(N) & v_y(N-1) - v_y(N) & v_z(N-1) - v_z(N) \end{bmatrix} \quad (3)$$

[0043] 根据如图4所示的曲线运动轨迹模型,当切向路径为空间三维匀速直线运动或空间某一维变速的曲线运动,即矩阵 $C_{(N-1) \times 3}$ 的秩分别为1或2时,式(2)中方程一的解为一过点 \bar{A} 的圆球,而方程二的解分别为一过点 \bar{A} 且垂直于切向路径的圆和一条过 \bar{A} 点的直线,其与方程一的合集分别为空间中的一个圆和空间中分布在切向路径两侧的对称散射点,存在等距离点集,此时无法在观测区域内进行空间三维成像。但由于空间波束固定沿某一方向进行照射,因而如图3(b)所示的模型可以进行空间三维成像。同时,当切向路径为空间多维的变速曲线运动时,矩阵 $C_{(N-1) \times 3}$ 为满秩矩阵,式(2)的解集为空间中的单一固定点 \bar{A} ,满足空间三维成像条件。

[0044] 假定雷达载荷平台以速度 $v_x(n)$ 、 $v_y(n)$ 和 $v_z(n)$ 沿空间三维切向运动,并以角度 β 对观测区域进行聚束照射,对于空间中的任意散射点 $\bar{P}_w \triangleq [x_w, y_w, z_w]^T$,在慢时间 n ($n \subseteq (0, N_a - 1)$)时,定义雷达的位置矢量 $\bar{P}_t(n)$ 为:

$$[0045] \quad \bar{P}_t(n) = \begin{bmatrix} x_t(n) \\ y_t(n) \\ z_t(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ 0 \\ H \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_x(n) \\ v_y(n) \\ -v_z(n) \end{bmatrix} \cdot n \quad (4)$$

[0046] 其中, $[x_0, 0, H]^T$ 表示方位时刻 $n=0$ 时雷达平台的位置矢量,在每个方位时刻 n ,雷达平台相对于散射点 \bar{P}_w 的发射距离历程 $R(n, \bar{P}_w)$ 可表示为

$$[0047] \quad R(n, \bar{P}_w) \triangleq \|\bar{P}_t(n) - \bar{P}_w\|_2 \quad (5)$$

$$\triangleq \sqrt{(x_0 + v_x(n) \cdot n - x_w)^2 + (v_y(n) \cdot n - y_w)^2 + (H - v_z(n) \cdot n - z_w)^2}$$

[0048] 其中, $\|\cdot\|_2$ 表示算子的 l_2 范数。

[0049] 设观测区域中心 $\bar{P}_0 \triangleq [0, 0, 0]^T$ 为参考点,根据多元泰勒展开定理,将公式(5)在参考点 \bar{P}_0 处进行空间展开,可得:

$$[0050] \quad R(n, \bar{P}_w) = R(n, \bar{P}_0) + \nabla R(n, \bar{P}_0) \cdot \bar{P}_w + e_{sp}(n, \bar{P}_w) \quad (6)$$

[0051] 其中, ∇ 表示梯度运算算子, e_{sp} 为空域的截断误差。

[0052] 根据向量求导的性质可知, $\nabla R(n, \bar{P}_0)$ 可表示为:

$$[0053] \quad \nabla R(n, \bar{P}_0) = [\hat{x}(n), \hat{y}(n), \hat{z}(n)] \quad (7)$$

[0054] 其中,

$$[0055] \quad \hat{x}(n) = \frac{\partial R(n, \bar{P}_0)}{\partial x} = \frac{x_0 + v_x(n) \cdot n}{\sqrt{(x_0 + v_x(n) \cdot n)^2 + (v_y(n) \cdot n)^2 + (H - v_z(n) \cdot n)^2}} \quad (8)$$

$$[0056] \quad \hat{y}(n) = \frac{\partial R(n, \bar{P}_0)}{\partial y} = \frac{v_y(n) \cdot n}{\sqrt{(x_0 + v_x(n) \cdot n)^2 + (v_y(n) \cdot n)^2 + (H - v_z(n) \cdot n)^2}} \quad (9)$$

$$[0057] \quad \hat{z}(n) = \frac{\partial R(n, \bar{P}_0)}{\partial z} = \frac{H - v_z(n) \cdot n}{\sqrt{(x_0 + v_x(n) \cdot n)^2 + (v_y(n) \cdot n)^2 + (H - v_z(n) \cdot n)^2}} \quad (10)$$

[0058] 定义方位零时刻波束中心穿越 \bar{P}_0 散射点时对应的视线方向矢量 $\bar{\alpha}$ 为:

$$[0059] \quad \bar{\alpha} = \begin{bmatrix} \hat{x}(0) \\ \hat{y}(0) \\ \hat{z}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_0}{R(0, \bar{P}_0)} \\ 0 \\ \frac{H}{R(0, \bar{P}_0)} \end{bmatrix} \quad (11)$$

[0060] 定义载荷平台的空空间三维速度矢量 $\bar{\beta}$ 为:

$$[0061] \quad \bar{\beta} = \begin{bmatrix} \frac{v_x(n)}{R(0, \bar{P}_0)} \\ \frac{v_y(n)}{R(0, \bar{P}_0)} \\ \frac{-v_z(n)}{R(0, \bar{P}_0)} \end{bmatrix} \quad (12)$$

[0062] 则距离历程 $R(n, \bar{P}_w)$ 为:

$$[0063] \quad R(n, \bar{P}_w) = R(n, \bar{P}_0) + (\bar{\alpha} + \bar{\beta} \cdot n) \bar{P}_w \quad (13)$$

[0064] 假设发射信号为线性调频信号,即:

$$[0065] \quad S_r(t) = A \cdot \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp(j2\pi f_c t) \exp(\pi k_r t^2) \quad (14)$$

[0066] 其中, A为发射信号的幅度, f_c 为发射信号的载频, k_r 为线性调频信号的调频率, T_p 为发射信号的脉宽, 则散射点 \bar{P}_w 反射后阵元接收到的回波可表示为:

$$[0067] \quad \begin{aligned} S_r(t, n; \bar{P}_w) &= \sigma(\bar{P}_w) \cdot S_t(t - \tau) \\ &= A \cdot \sigma(\bar{P}_w) \cdot \text{rect}\left(\frac{t - \tau}{T_p}\right) \exp(j2\pi f_c (t - \tau)) \exp(\pi k_r (t - \tau)^2) \end{aligned} \quad (15)$$

[0068] 其中, $\sigma(\bar{P}_w)$ 为 \bar{P}_w 点的回波散射系数, $\tau = 2R(n, \bar{P}_w)/c$ 为 \bar{P}_w 点的回波延迟, c 为光速。

[0069] 如图4所示, 雷达平台与散射点 (x, y, z) 之间的距离历程为:

$$[0070] \quad R = [(R_0 \cos(\theta) \cos(\phi) - x)^2 + (R_0 \cos(\theta) \sin(\phi) - y)^2 + (R_0 \sin(\theta) - z)^2]^{1/2} \quad (16)$$

[0071] 其中, R_0 表示雷达与散射中心点之间的瞬时距离, 当载荷平台运动较慢时可认为近似保持不变。对式(13)进行泰勒展开:

$$[0072] \quad R = \tilde{R}_0 - \tilde{x} \cos(\theta) \cos(\phi) - \tilde{y} \cos(\theta) \sin(\phi) - \tilde{z} \sin(\theta) \quad (17)$$

[0073] 其中:

$$[0074] \quad \tilde{R}_0 = R_0 + \frac{[(x^2 - z^2)\sin(\theta_0)\cos(\theta_0) - 2xz\cos^2(\theta_0)](\theta - \theta_0)}{2R_0} \quad (18)$$

$$[0075] \quad \tilde{x} = x + \frac{-(y^2 + z^2)\cos(\theta_0) + 2xz\sin(\theta_0)}{2R_0} \quad (19)$$

$$[0076] \quad \tilde{y} = y + \frac{xy\cos(\theta_0) + yz\sin(\theta_0)}{R_0} \quad (20)$$

$$[0077] \quad \tilde{z} = z - \frac{(x^2 + y^2)\sin(\theta_0)}{2R_0} \quad (21)$$

[0078] 其中, θ_0 表示高度角的均值,则式(15)所接收的雷达信号回波经混频处理后可得:

$$[0079] \quad S_{rc}(t, n; \bar{\mathbf{P}}_w) = A \cdot \sigma(\bar{\mathbf{P}}_w) \cdot \text{rect}\left(\frac{t - \tau}{T_p}\right) \exp(-j\frac{4\pi}{c}(f_c + k_r(t - \tau_0))\Delta R) \quad (22)$$

[0080] 其中, $\Delta R = c(\tau - \tau_0)/2$ 可表示为:

$$[0081] \quad \Delta R = \tilde{x}\cos(\theta)\cos(\phi) + \tilde{y}\cos(\theta)\sin(\phi) + \tilde{z}\sin(\theta) \quad (23)$$

[0082] 将式(23)带入式(22)中得:

$$[0083] \quad S_{rc}(t, n; \bar{\mathbf{P}}_w) = a(\Delta x, \Delta y, \Delta z) \exp(-j(\Delta x \cdot K_x + \Delta y \cdot K_y + \Delta z \cdot K_z)) \quad (24)$$

[0084] 其中, $a(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 为点散布函数,而 K_x, K_y 和 K_z 分别为:

$$[0085] \quad K_x = \frac{4\pi}{c}(f_c + k_r(t - \tau_0))\cos(\phi)\cos(\theta) \quad (25)$$

$$[0086] \quad K_y = \frac{4\pi}{c}(f_c + k_r(t - \tau_0))\cos(\phi)\sin(\theta) \quad (26)$$

$$[0087] \quad K_z = \frac{4\pi}{c}(f_c + k_r(t - \tau_0))\sin(\theta) \quad (27)$$

[0088] 步骤2:根据回波信号数学表征模型,结合雷达参数和运动参数,分析其三维空变耦合特性和三维空间分辨能力;

[0089] 利用弹道下降轨与蛇形机动相结合的空间三维运动,获取空间三维的分辨能力,用于分析其相对于二维图像由于地形起伏或海浪引起的迭掩、阴影以及合成孔径积累时间内观测视角的限制而导致的图像解译和目标识别问题的能力,判断其是否具备对目标的高分辨三维成像,以增强目标识别的能力。

[0090] 假定切向路径为沿空间某一维变速的曲线运动,其空间三维路径如图5所示:

[0091] 根据模糊函数的定义,三维空间的广义模糊函数可以表示为:

$$[0092] \quad \chi(\bar{\mathbf{P}}_\omega, \bar{\mathbf{P}}_0) = \frac{\sum_n \int S_{rc}(t, n, \bar{\mathbf{P}}_\omega) S_{rc}(t, n, \bar{\mathbf{P}}_0) dt}{\sqrt{\sum_n \int |S_{rc}(t, n, \bar{\mathbf{P}}_\omega)|^2 dt} \sqrt{\sum_n \int |S_{rc}(t, n, \bar{\mathbf{P}}_0)|^2 dt}} \quad (28)$$

[0093] 其本质是散射点 $\bar{\mathbf{P}}_\omega$ 和散射点 $\bar{\mathbf{P}}_0$ 回波信号的归一化互相关。由于式(28)分母是积分常数,对分辨率没有影响,因此该式可简化为:

$$[0094] \quad \chi(\bar{P}_w, \bar{P}_0) = C_0 * \sum_n \int S_{rc}(t, n, \bar{P}_w) S_{rc}(t, n, \bar{P}_0) dt \quad (29)$$

$$[0095] \quad = C_0 * \sum_n \chi^r(r - \Delta R(n, \bar{P}_w, \bar{P}_0)) \exp(j2\pi f_c \frac{2\Delta R(n, \bar{P}_w, \bar{P}_0)}{c}) \quad (30)$$

[0096] 其中, 距离向模糊函数 $\chi^r(r - \Delta R(n, \bar{P}_w, \bar{P}_0))$ 包含了距离向分辨率信息, 可表示为:

$$[0097] \quad \chi^r(r - \Delta R(n, \bar{P}_w, \bar{P}_0)) = T_p \text{sinc} \left(\pi \left(\frac{2B \cdot \Delta R(n, \bar{P}_w, \bar{P}_0)}{c} \right) \right) \quad (31)$$

[0098] 将(13) 带入(31) 中, 可知 $\Delta R(n, \bar{P}_w, \bar{P}_0)$ 为:

$$[0099] \quad \Delta R(n, \bar{P}_w, \bar{P}_0) = (\bar{\alpha} + \bar{\beta} \cdot n) \bar{P}_w \quad (32)$$

[0100] 因此, 三维广义模糊函数可进一步化简为:

$$[0101] \quad \chi(\bar{P}_w, \bar{P}_0) = C_0 * \sum_n \frac{\chi^r(r - \Delta R(n, \bar{P}_w, \bar{P}_0)) \exp(j\frac{4\pi}{\lambda} \bar{\alpha} \cdot \bar{P}_w)}{\exp(j\frac{4\pi}{\lambda} \bar{\gamma} \cdot \bar{P}_w n) \exp(j\frac{4\pi}{\lambda} \bar{\varepsilon} \cdot \bar{P}_w n)} \quad (33)$$

[0102] 其中, $\bar{\beta} = \bar{\gamma} + \bar{\varepsilon}$, 而 $\bar{\gamma}$ 和 $\bar{\varepsilon}$ 可表示为:

$$[0103] \quad \bar{\gamma} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{v_y(n)}{R(0, \bar{P}_0)} \\ \frac{-v_z(n)}{R(0, \bar{P}_0)} \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$[0104] \quad \bar{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \frac{v_x(n)}{R(0, \bar{P}_0)} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (35)$$

[0105] 在忽略沿航迹向和切航迹向雷达平台运动所引起的距离徙动的情况下, 可近似的认为 $\Delta R(n, \bar{P}_w, \bar{P}_0) = \Delta R(0, \bar{P}_w, \bar{P}_0)$, 即距离向模糊函数不随慢时间变换。因此可知, 回波信号在 $\bar{\alpha}$ 方向上的距离分辨率为:

$$[0106] \quad \delta_p^r = \frac{c}{2B} \cdot \frac{\bar{\alpha}}{|\bar{\alpha}|} \quad (36)$$

[0107] 如图6所示, 由于高度向与沿航向的耦合速度矢量 $\bar{\gamma}$ 和切航向速度矢量 $\bar{\varepsilon}$ 相互正交, 因此切航向模糊函数 $\chi^{ct}(\bar{P}_w, \bar{P}_0)$ 和高度向与沿航向耦合向模糊函数 $\chi^{ct}(\bar{P}_w, \bar{P}_0)$ 可分别表示为:

$$[0108] \quad \chi^{ct}(\bar{\mathbf{P}}_w, \bar{\mathbf{P}}_0) = \sum_n \exp(j \frac{4\pi}{\lambda} \bar{\boldsymbol{\varepsilon}} \cdot \bar{\mathbf{P}}_w n) = q \text{sinc}(\frac{2L_x x_w}{\lambda R(0, \bar{\mathbf{P}}_0)}) \quad (37)$$

$$[0109] \quad \chi^{ot}(\bar{\mathbf{P}}_w, \bar{\mathbf{P}}_0) = \sum_n \exp(j \frac{4\pi}{\lambda} \bar{\boldsymbol{\gamma}} \cdot \bar{\mathbf{P}}_w n) = q \text{sinc}(\frac{2L_y y_w}{\lambda R(0, \bar{\mathbf{P}}_0)}) \quad (38)$$

$$[0110] \quad \text{其中, } L_x = \frac{R(0, \bar{\mathbf{P}}_0)}{\Delta\theta}, \quad L_y = \frac{R(0, \bar{\mathbf{P}}_0)}{(\phi_1 - \phi_2)}。$$

[0111] 以 $\text{sinc}(\cdot)$ 函数的第一个零点作为分辨率, 可知毫米波切向 SAR 模型切航迹向分辨率和高度向与沿航向的耦合向分辨率分别为:

$$[0112] \quad \delta_p^{ct} = \frac{\lambda R(0, \bar{\mathbf{P}}_0)}{2L_y} \approx \frac{\lambda}{2(\phi_1 - \phi_2)} \quad (39)$$

$$[0113] \quad \delta_p^{ot} = \frac{\lambda R(0, \bar{\mathbf{P}}_0)}{2L_x} \approx \frac{\lambda}{2\Delta\theta} \quad (40)$$

[0114] 点目标空间三维分辨率的仿真结果如图7所示。

[0115] 步骤3, 针对模型的空间三维切向运动, 以空间全向运动模型为参考, 采用BP算法对比分析其对观测区域空间三维成像结果的影响。

[0116] 如图5所示, 切向轨迹 SAR 前视毫米波三维成像模型的空间路径本质是相应的空间面阵的稀疏采样, 将雷达接收信号回波与 $S_r^*(t - \tau_0, n; \bar{\mathbf{P}}_w)$ 进行混频得:

$$[0117] \quad S_{rc}(t, n; \bar{\mathbf{P}}_w) = A \cdot \sigma(\bar{\mathbf{P}}_w) \cdot \text{rect}(\frac{t - \tau}{T_p}) \exp(-j \frac{4\pi}{c} (f_c + k_r(t - \tau_0)) \Delta R) \quad (41)$$

$$[0118] \quad \text{其中, } \Delta R = \frac{c}{2} (\tau - \tau_0)。$$

[0119] 假定雷达与目标间的距离远大于目标尺寸, 则

$$[0120] \quad \Delta R = \Delta x \cos(\phi) \cos(\theta) + \Delta y \cos(\phi) \sin(\theta) + \Delta z \sin(\phi) \quad (42)$$

[0121] 将(42)代入(41)中得:

$$[0122] \quad S_{rc}(t, n; \bar{\mathbf{P}}_w) = a(\Delta x, \Delta y, \Delta z) \exp(-j(\Delta x \cdot K_x + \Delta y \cdot K_y + \Delta z \cdot K_z)) \quad (43)$$

[0123] 其中, $a(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 为点散布函数, 而 K_x, K_y 和 K_z 为:

$$[0124] \quad \begin{cases} K_x = \frac{4\pi}{c} (f_c + k_r(t - \tau_0)) \cos(\phi) \cos(\theta) \\ K_y = \frac{4\pi}{c} (f_c + k_r(t - \tau_0)) \cos(\phi) \sin(\theta) \\ K_z = \frac{4\pi}{c} (f_c + k_r(t - \tau_0)) \sin(\phi) \end{cases} \quad (44)$$

[0125] 因此, 接收信号为三维波数域 (K_x, K_y, K_z) 中频率为 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 的三维复正弦信号, 其频率 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 对应着各散射点在空间中的分布特性。

[0126] 相对于全孔径面阵, 切向孔径轨迹毫米波三维成像模型的切向路径可看作对全孔径面阵的稀疏采样, 则接收信号对应于全孔径面阵波数域数据与稀疏矩阵 $S_{pa}(k_x, k_y, k_z)$ 相乘, 即:

$$[0127] \quad S_{rc}(t, n; \bar{\mathbf{P}}_w) = S_{pa}(k_x, k_y, k_z) \cdot S_{rc}(t, n; \bar{\mathbf{P}}_w) \quad (45)$$

[0128] 若采用基于匹配滤波的传统非参数化成像算法,如3D-RD算法、3D-CS算法和3D-BP成像算法等,则重建的三维空间目标为稀疏矩阵 $S_{pa}(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 与点散布函数 $a(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 的卷积,将导致成像结果中出现主瓣展宽、旁瓣增强,甚至出现混叠、虚假目标等问题。

[0129] 参照步骤2中对切向轨迹SAR前视毫米波三维成像模型的分辨率分析,选用切航向变速模型作为模拟的切向路径,并分别采用3D-BP成像算法对7个散射点:(15,15,0)、(15,-15,0),(-15,15,0),(-15,-15,0),(0,0,0),(0,0,15),(0,0,-15)进行成像,其具体雷达参数如表1所示。

[0130] 表1 弹载毫米波切向前视SAR三维成像系统仿真参数

[0131]

载频	94 GHz	切航向飞行速度	12m/s
信号带宽	800 MHz	切航向飞行加速度	10m/s ²
脉冲宽度	1.5us	沿航向飞行速度	6m/s
合成孔径时间	1.67s	高度向飞行速度	2m/s
作用距离	3000m	观测区域	60m×60m×60m
下视角	30°	观测区域采样单元数	61×61×61

[0132] 如图8(a)所示,当采用3D-BP成像算法时,实现了空间离散分布的7个散射点三维成像并用圆圈框出,说明了该模型的三维成像能力,但由于其只画出了点目标主瓣的成像结果,无法体现其三维成像结果的旁瓣特性。对比图8(b)可以发现,当三维成像结果门限设定为10dB时,由于数据稀疏导致的高旁瓣特性使得在三维成像空间中出现了许多的虚假点目标。

[0133] 因此,针对该模型选择适合的三维成像结果门限值,可以使其满足三维成像性能要求。

[0134] 进一步地,本发明还包括根据上述分析结果,对空间三维切向路径进行优化的步骤。

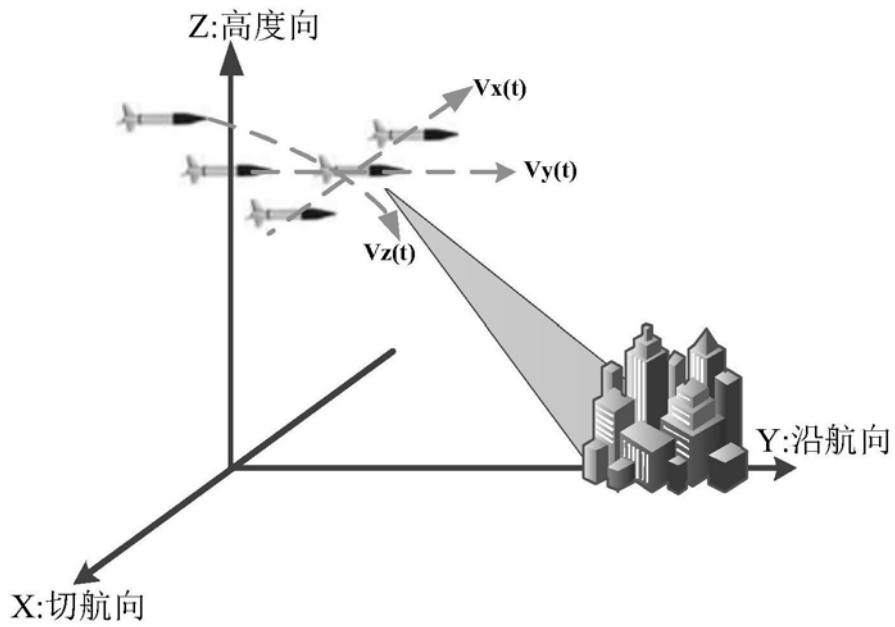


图1

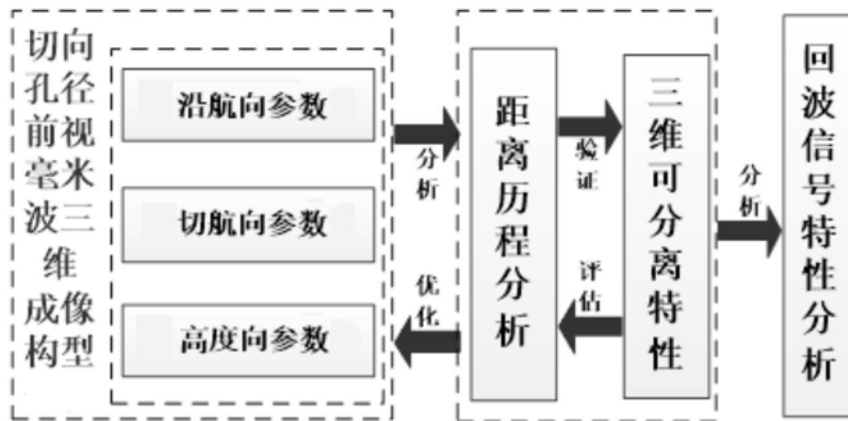


图2

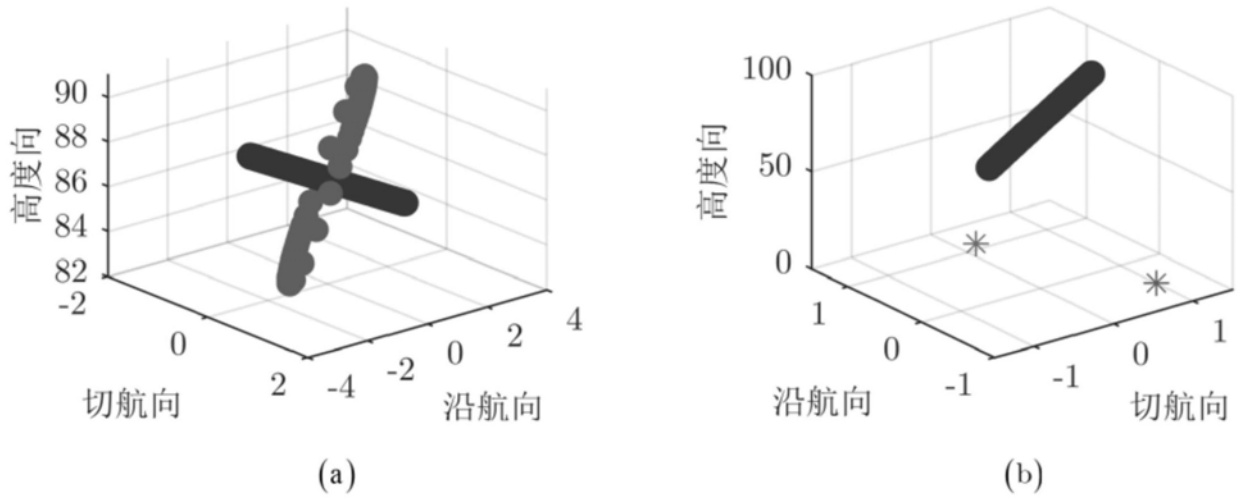


图3

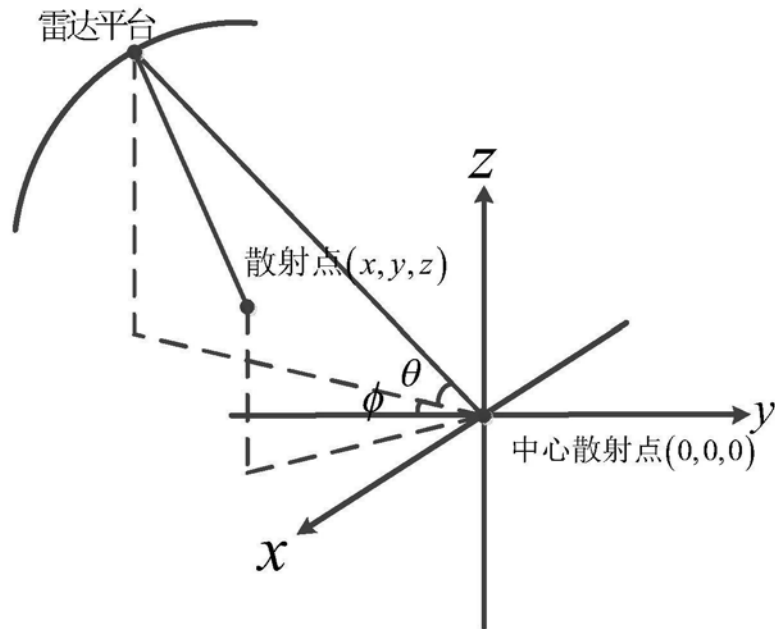


图4

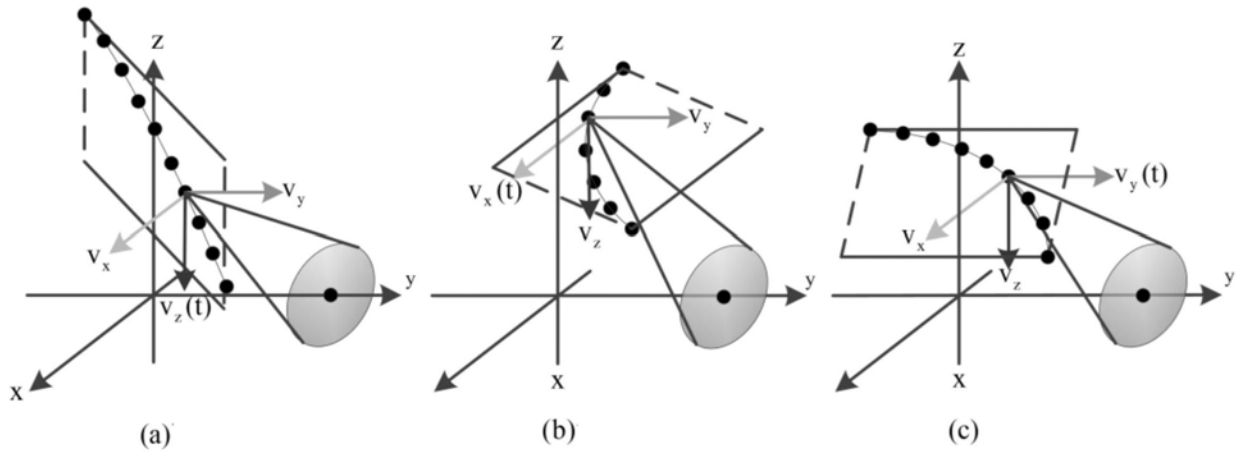


图5

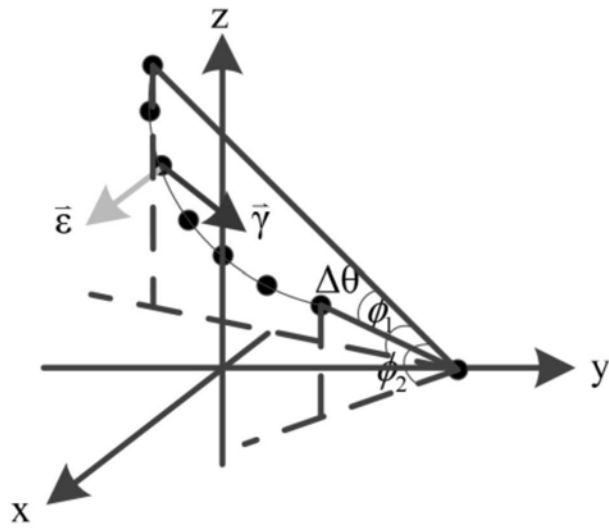


图6

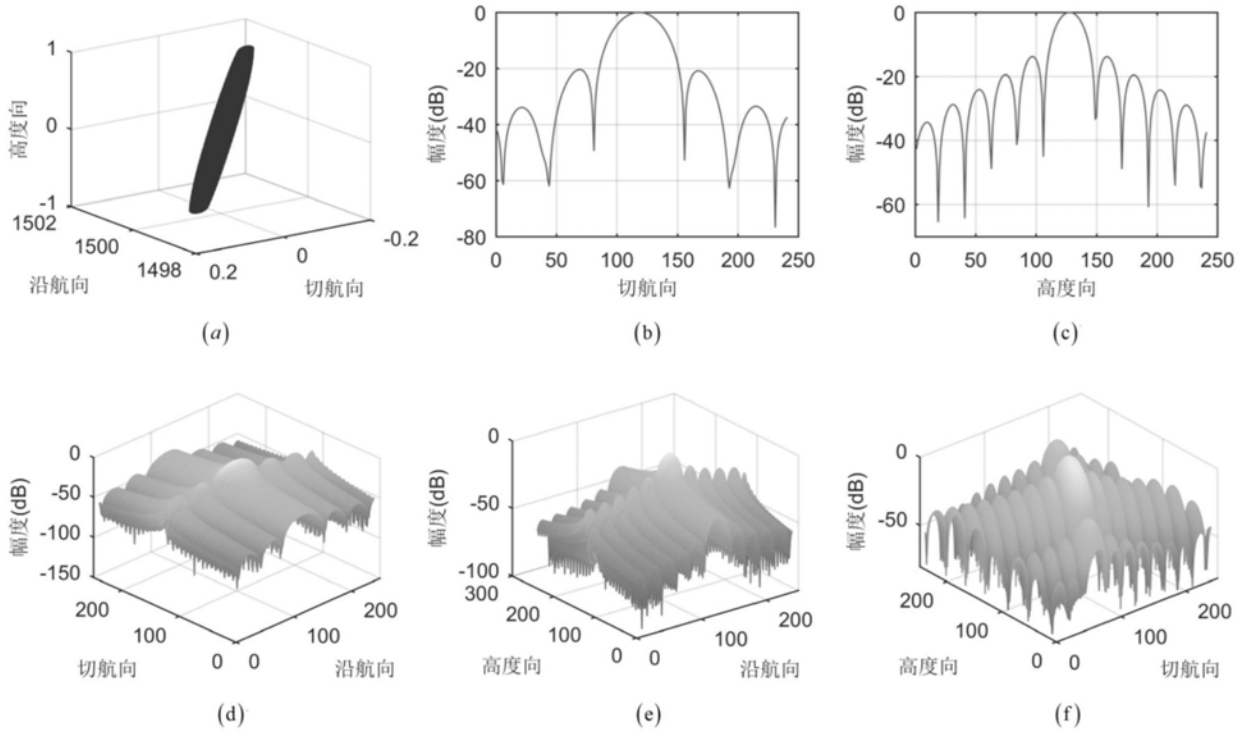


图7

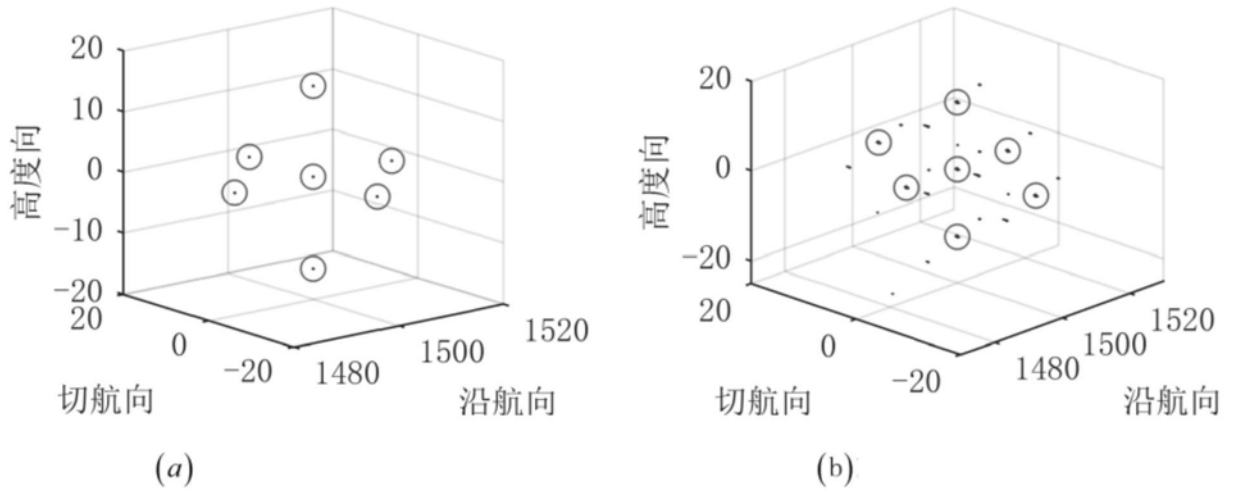


图8