

双基地 ISAR 成像平面研究及目标回波模型修正

董健^{①②} 尚朝轩^① 高梅国^② 傅雄军^②

^①(军械工程学院雷达工程教研室 石家庄 050003)

^②(北京理工大学雷达技术研究所 北京 100081)

摘要: 该文分析了双基地逆合成孔径雷达的成像平面。采用基于双基地 SAR 成像平面分析, 双基地目标旋转矢量分析两种方法, 分别建立了两种不同的双基地 ISAR 成像平面模型。为验证模型正确性, 分别将两种模型应用于双基地转台成像分析, 并仿真验证。成像仿真结果表明了旋转矢量分析法建立模型的正确性。基于成像平面分析, 研究了双基地转台模型的适应性, 修正了常用的双基地 ISAR 散射点回波模型, 验证了修正回波模型的正确性, 并针对不同的目标运动情况, 给出了成像平面的估计算法。

关键词: 逆合成孔径雷达; 双基地; 成像平面; 回波模型

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)08-1855-08

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00706

The Image Plane Analysis and Echo Model Amendment of Bistatic ISAR

Dong Jian^{①②} Shang Chao-xuan^① Gao Mei-guo^② Fu Xiong-jun^②

^①(Radar Engineering Staff Room, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

^②(Radar Technique Institute, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: This paper discusses mainly the image plane of the bistatic ISAR. The image plane is modeled by two different methods separately. One is modeling the image plane according to the bistatic SAR image plane; the other is to model the plane by target rotation vector analysis. The modeling process is presented in detail. They are then testified by applying them to interpret the bistatic turntable imaging. The simulation results show the validity of the second model. Based on the image plane analysis, the application condition of the turntable imaging model is analyzed. And the common used bistatic ISAR echo model is modified. Simulation results show the validity of the modified model. Finally, the image plane estimation method is also given according to different target motion situation.

Key words: ISAR; Bistatic; Image plane; Echo model

1 引言

双基地雷达是发射机与接收机分离很远的雷达系统^[1], 雷达的早期形式就是双基地雷达。由于双基地雷达在雷达对抗方面的突出优点, 自上世纪 70 年代中期, 西方国家相继重启双基地雷达研制。以“圣殿”防空双基地雷达、夸加林靶场 MMS 雷达、法国“Graves”空间目标监视双基地雷达等为代表的双基地雷达已投入实用。

成像双基地雷达是双基地雷达的特殊形式, 可分为双基地 SAR 和双基地 ISAR 两大类。双基地 SAR 的概念提出于 20 世纪 70 年代, 随着雷达信号处理技术的不断进步, 双基地 SAR 已成为成像雷达的研究热点, 正步入实用阶段。与双基地 SAR 相比, 双基地 ISAR 研究相对较少, 尚未见实用系统, 主

要为实验样机。这些研究大都基于单基地雷达进行, 经过改造实现双基地雷达的功能。例如, 昆士兰大学的 Palmer 研究了伪多基地 ISAR(Emulated Multistatic ISAR)成像技术, 得到了货轮的伪双基地雷达像^[2,3]。挪威防御技术研究院使用空中交通管制雷达(ATC)和全向接收天线组成“搭乘雷达系统”, 获得了民航客机的 ISAR 图像^[4]。

国内对双基地 ISAR 的研究与单基地 ISAR 几乎同时起步, 北京理工大学在上世纪 80 年代末曾较系统地研究了双基地 ISAR 成像的基本理论^[5], 此后可见报道极少。2006 年开始, 国内又重新开始了双基地 ISAR 的研究, 例如, 国防科技大学的吴勇分析了双基地 ISAR 成像原理, 研究了双基地 ISAR 的分辨率及其运动补偿方法^[6]。上海交通大学的黄艺毅研究了双基地 ISAR 的包络对齐和相位校正方法^[7]。海军工程大学的张亚标等人研究了双基地 ISAR 成像对目标尺寸、系统采样率的要求^[8]。哈尔

2009-05-12 收到, 2010-03-29 改回

国家 863 计划项目(2008AA0194)资助课题

通信作者: 董健 radarvincent@sina.com

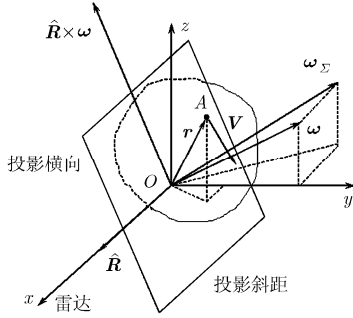


图 2 单基地雷达成像平面及几何关系^[4]

方位轴是转动多普勒的投影方向, 因此 $\hat{\mathbf{R}} \times \boldsymbol{\omega}(t)$ 就是成像方位向。

按照该方法分析双基地 ISAR 的情况。如图 3, O 为目标散射中心, x 轴方向指向雷达发射站。为方便分析, 不失一般性, 建立右手系 $Oxyz$, 使接收站位于 xOy 平面内。发射站与目标距离 R_t , 接收站与目标距离 R_r , 雷达发射站 LOS、接收站 LOS 方向上的单位矢量分别为 $\hat{\mathbf{R}}_t$, $\hat{\mathbf{R}}_r$ 。设目标总旋转矢量为 $\boldsymbol{\omega}_\Sigma(t)$, A 为目标上的散射点, 忽略目标平动, 该点由目标旋转产生的速度矢量为 $\mathbf{V}(t)$ 。

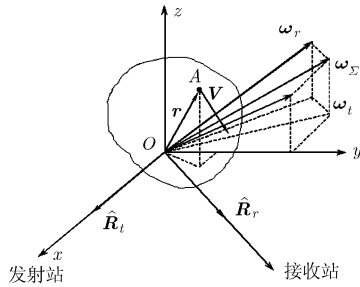


图 3 双基地雷达成像平面及几何关系

双基地多普勒是速度矢量在发射站 LOS 和接收站 LOS 上分别作用结果之和。则散射点 A 由目标旋转产生的多普勒 $f_d(t)$ 满足

$$f_d(t) = \frac{f}{c} [\mathbf{V}(t) \cdot \hat{\mathbf{R}}_t + \mathbf{V}(t) \cdot \hat{\mathbf{R}}_r] \quad (2)$$

双基地情况下 $\mathbf{V}(t) = \boldsymbol{\omega}_\Sigma(t) \times \mathbf{r}(t)$ 仍成立, 代入得

$$f_d(t) = \frac{f}{c} \cdot \mathbf{r}(t) \cdot [\hat{\mathbf{R}}_t \times \boldsymbol{\omega}_\Sigma(t) + \hat{\mathbf{R}}_r \times \boldsymbol{\omega}_\Sigma(t)] \quad (3)$$

设 $\boldsymbol{\omega}_t$, $\boldsymbol{\omega}_r$ 分别是 $\boldsymbol{\omega}_\Sigma$ 在发射站 LOS 正交平面及接收站 LOS 正交平面的投影, 即 $\boldsymbol{\omega}_\Sigma$ 相对发射站、接收站的有效旋转矢量。则式(3)可进一步写为

$$f_d(t) = \frac{f}{c} \cdot \mathbf{r}(t) \cdot [\hat{\mathbf{R}}_t \times \boldsymbol{\omega}_t(t) + \hat{\mathbf{R}}_r \times \boldsymbol{\omega}_r(t)] \quad (4)$$

类比单基地 ISAR, 双基地 ISAR 的距离向为

$$\boldsymbol{\Theta} = \hat{\mathbf{R}}_t + \hat{\mathbf{R}}_r \quad (5)$$

即双基地角平分线方向, 双基地雷达的方位向为

$$\boldsymbol{\Xi} = \hat{\mathbf{R}}_t \times \boldsymbol{\omega}_t(t) + \hat{\mathbf{R}}_r \times \boldsymbol{\omega}_r(t) \quad (6)$$

当目标存在自旋、俯仰、横滚、偏航等复杂的运动情况时, 上述表达式能很好地确定某一瞬时目标的成像投影面。若目标为平稳目标, 成横向像所需的转动分量主要靠目标视角改变提供, 则上式可进一步简化。假设目标以速度 $\mathbf{v}(t)$ 平稳运动, 不存在复杂机动情况, 则该速度产生的相对于发射站、接收站的有效旋转矢量分别为

$$\boldsymbol{\omega}_t = \frac{\hat{\mathbf{R}}_t \times \mathbf{v}(t)}{R_t} = \frac{\hat{\mathbf{R}}_t \times \mathbf{v}_t(t)}{R_t} \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\omega}_r = \frac{\hat{\mathbf{R}}_r \times \mathbf{v}(t)}{R_r} = \frac{\hat{\mathbf{R}}_r \times \mathbf{v}_r(t)}{R_r} \quad (8)$$

这里 $\mathbf{v}_t(t)$, $\mathbf{v}_r(t)$ 分别为 $\mathbf{v}(t)$ 在发射站 LOS 切向, 接收站 LOS 切向的分量。将式(7), 式(8)代入式(6)并化简, 可得

$$\boldsymbol{\Xi} = - \left[\frac{\mathbf{v}_t(t)}{R_t} + \frac{\mathbf{v}_r(t)}{R_r} \right] \quad (9)$$

式(9)给出了平稳运动目标双基地 ISAR 方位向的表达式。这里的负号对实际的方向没有实质的影响。以下称该模型为模型 II。

4 双基地 ISAR 成像平面模型验证仿真

上述两个模型分别从不同角度分析得到了双基地 ISAR 成像平面。比较两个模型可发现, 模型 II 式(9)中的 $\mathbf{v}_t(t)$, $\mathbf{v}_r(t)$ 分别就是模型 I 中的有效运动矢量 \mathbf{V}'_t , \mathbf{V}'_r 。由此, 虽然两个模型在距离向上取得了一致: 均为双基地角平分线矢量; 但两者在方位向上出现差异。

为验证模型正确性, 使用双基地理想转台成像进行模型验证。图 4 给出了双基地雷达转台模型示意图。 T 为发射站, R 为接收站, O 为目标散射中心。以 O 为原点, 双基地角平分线延长线方向为 y 轴正方向, 建立右手系 xOy 。 $\mathbf{R}_t = \mathbf{OT}$, $\mathbf{R}_r = \mathbf{OR}$, $\hat{\mathbf{R}}_t$, $\hat{\mathbf{R}}_r$ 分别为发射站 LOS、接收站 LOS 方向上的单位矢量。则 y 轴就是该双基地雷达的一维距离像方向 $\boldsymbol{\Theta}$ 。不失一般性, 假定目标以 O 为中心, 在双基地平面 OTR 内以 $\boldsymbol{\omega}$ 逆时针转动, $\boldsymbol{\omega}$ 方向垂直纸面向外。这一模型参照单基地 ISAR 转台模型, 其距离向、方位向、等效转动的意义都很明确, 便于对双基地 ISAR 成像进行分析^[6,8]。

按照模型 I 运动相对性原理, 目标以角速度 $\boldsymbol{\omega}$ 逆时针转动, 等效于目标不动, 而发射站、接收站均以 $-\boldsymbol{\omega}$ 顺时针转动, 转速分别为: $\mathbf{V}_t = -\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R}_t$, $\mathbf{V}_r = -\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R}_r$ 。对应目标相对发射站、接收站的有效运动矢量分别为 $\mathbf{V}'_t = -\mathbf{V}_t$, $\mathbf{V}'_r = -\mathbf{V}_r$ 。

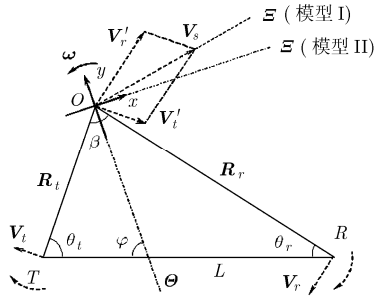


图 4 双基地转台模型方位向分析

由矢量代数可知:

$$\mathbf{V}_t' \wedge \mathbf{V}_r' = \beta \tag{10}$$

$$\mathbf{V}_t' = k \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{R}_t, \quad \mathbf{V}_r' = k \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{R}_r \tag{11}$$

其中 $k = V_t'/R_t = V_r'/R_r$, 旋转矩阵 $\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \cos 90^\circ & \sin 90^\circ \\ -\sin 90^\circ & \cos 90^\circ \end{bmatrix}$.

模型 I 指出, $\mathbf{V}_t', \mathbf{V}_r'$ 的合成矢量 \mathbf{V}_s 的方向, 就是该转台运动的方位向 Ξ , 即

$$\Xi = \mathbf{V}_s = \mathbf{V}_t' + \mathbf{V}_r' = k \cdot \mathbf{S} \cdot (\mathbf{R}_t + \mathbf{R}_r) \tag{12}$$

$\mathbf{R}_t + \mathbf{R}_r$ 是目标三角形 $\triangle OTR$ 基线 TR 的中线。易见 Ξ 与目标三角形 $\triangle OTR$ 基线 TR 的中线正交, 当且仅当 $R_t = R_r$ 时, \mathbf{V}_s 与双基地角平分线正交, 即距离向与方位向正交。因此依据模型 I, 对非特殊位置的转台目标成像, 其方位轴与距离轴不正交, 两轴夹角大小与转速无关, 与目标空间位置有关。

而按照模型 II, 对于图 4 所描述的双基地转台模型, $\omega_\Sigma(t)$ 方向垂直纸面向外, 该情况等效于图 3 中 $\omega_\Sigma(t)$ 方向平行 z 轴, 且 $\omega_\Sigma(t) = \omega_t(t) = \omega_r(t)$ 的特殊情况。转台模型的方位轴为

$$\Xi = \widehat{\mathbf{R}}_t \times \omega_t(t) + \widehat{\mathbf{R}}_r \times \omega_r(t) = \Theta \times \omega_\Sigma(t) \tag{13}$$

由左手定则可知, 依模型 II, 转台模型的成像结果中方位向 Ξ 与距离向 Θ 必然正交。由式(13)还

可知, 当且仅当 $\omega_t(t) = \omega_r(t)$ 时, 方位向 Ξ 与距离向 Θ 正交, 一般情况下, 双基地 ISAR 的方位向与距离向并不正交。

为检验模型正确性, 进行了双基地转台成像仿真。由于 BP 算法是基于相参累加得到不同坐标下散射点的幅相分布, 可以无畸变重建目标散射点分布, 因此可以利用该特点, 通过比较得到 RD, RID 算法重建图像的畸变模式。此外 BP 算法得到的 ISAR 图像中, 散射点距离旁瓣、方位旁瓣方向分别与方位轴、距离轴正交, 从而可以确定成像面中距离向、方位向。因此不妨假定收发双站无误差理想同步, 使用 BP 算法进行图像重建。由于单散射点的旁瓣分布已能够反映整个成像面距离轴与方位轴的夹角情况, 这里仅针对单散射点模型进行仿真。

图 5 给出了两组参数下对单散射点目标转台成像的对数等高线图结果, 图中距离旁瓣附近的黑色直线显示了模型 I 计算得到的距离旁瓣方向。仿真结果显示, 转台模型下方位轴与距离轴正交, 与模型 II 吻合。

为了进一步验证模型 II 正确性, 本文进行了运动目标的成像仿真。仿真场景如图 6 所示, 轨道上粗线分别表示 4 次仿真对应的航迹段。雷达参数同表 1 所示, 仿真参数及仿真结果统计如表 2 所示, 仿真目标轨道信息如表 3 所示。散射点模型为 xOy 平面内的 5 个散射点 $OABCD$, 坐标分别为 $(0,0), (10,0), (0,10), (-10,0), (0,-10)$ 。

表 1 转台双基地 ISAR 成像仿真双基地雷达参数

载波频率	10 GHz	脉冲宽度	50 μ s	基线长度	650 km
脉冲重复频率	50 Hz	信号带宽	200 MHz	采样频率	250 MHz

表 2 转台目标双基地 ISAR 成像仿真参数及结果统计

序号	积累时间	累积转角	双基地角	转台位置	双基地距离分辨率	双基地方位分辨率	模型 I 夹角	模型 II 夹角	仿真结果夹角
1	2.00 s	1.18°	18.44°	$R_t = 540.9$ km	0.76 m	0.75 m	85.91°	90°	90°
				$R_r = 1140.7$ km					
2	2.00 s	1.24°	35.78°	$R_t = 366.2$ km	0.79 m	0.75 m	82.16°	90°	90°
				$R_r = 911.4$ km					

表 3 仿真轨道信息

目标航迹高度	运动假定	目标运动速度
300 km	匀速直线	4 km/s 沿发射站 \rightarrow 接收站方向

图 7 给出了第 4 段轨道对散射点模型成像结果的对数等高线图。从图中可以看到由于方位轴-距离轴不正交导致的 BP 算法重建图像旁瓣倾斜; RD 算法重建图像发生畸变的情况。使用 BP 算法对 4 个

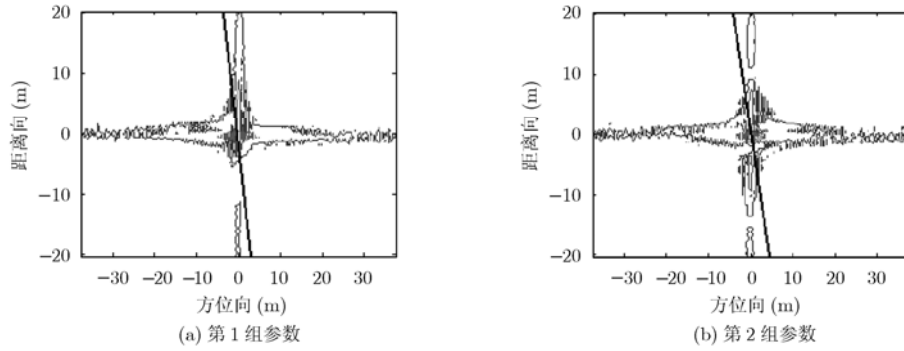


图 5 散射点目标转台成像仿真结果

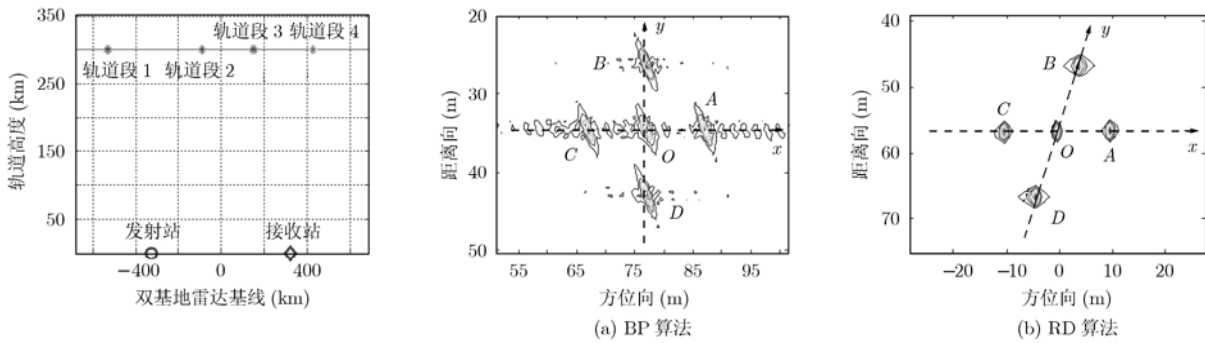


图 6 仿真场景

图 7 两种不同算法对散射点模型的二维重建结果

轨道段分别成像, 并统计两轴夹角。从表 4 给出的统计结果可以看到, 仿真结果与模型 II 计算结果接近, 进一步验证了模型 II 的正确性。实际上, 比较式(9)与式(12)可知, 两个模型的区别在于, 前者认为目标转动具有绝对性; 而后者认为转动是相对的: 需用雷达站距离对有效转动速度“标准化”。从这个角度看, 后者也更为科学。

从表 4 给出的统计结果可以知道, 从轨道段 1-轨道段 4, 虽然目标飞行的速度大小、方向均相同, 但成像结果发生了较大变化: 除了由于双基地角改变导致雷达分辨率发生变化外, 距离轴-方位轴的夹角也发生了明显改变。距离轴是等距离椭球面的梯度方向, 方位轴是转动多普勒的投影方向, 因此距离轴-方位轴的夹角的变化, 体现了双基地雷达收发位置造成的目标相对发射站、接收站相对转动的差异。该差异导致成像面内散射点转动多普勒发生了

整体变化, 并最终体现为双基地 ISAR 的方位轴与距离轴互不正交。这就是轨道段 1-轨道段 4 仿真中成像结果差异巨大的原因, 也是双基地 ISAR 距离轴-方位轴存在夹角的原因。

5 双基地 ISAR 散射点回波模型修正及成像平面估计

双基地 ISAR 成像平面分析的主要目的是为了进行双基地 ISAR 图像畸变校正。由于距离轴是等距离线的投影轴, 方位轴是目标散射点转动多普勒的投影轴, 因此图像畸变角度 ε 可以通过计算成像平面距离轴-方位轴的夹角 θ 得到

$$\varepsilon = \theta - \pi/2 \tag{14}$$

按照前面分析, 确定距离轴-方位轴夹角 θ 需要首先确定距离轴、方位轴矢量。对于转动情况明确的目标, 距离轴, 方位轴矢量可以按照式(5), 式(6)

表 4 运动目标双基地 ISAR 成像仿真参数及结果统计

序号	成像方法	积累脉冲	累积转角(°)	成像积累时间(s)	平均双基地角(°)	双基地距离分辨率(m)	双基地方位分辨率(m)	模型 I 两轴夹角(°)	模型 II 两轴夹角(°)	仿真结果两轴夹角统计(°)
1	BP 算法	151 PRT	0.92	3.02	36.45	0.7896	0.9952	98.463	103.837	103.5
2	BP 算法	171 PRT	1.24	3.42	92.35	1.0829	0.9943	99.173	106.94	107.1
3	BP 算法	153 PRT	1.20	3.06	87.96	1.0423	0.9971	77.716	67.185	66.8
4	BP 算法	123 PRT	0.96	2.46	49.6	0.8247	0.9860	79.154	71.901	72.1

估计；对于平稳目标，其成像需要的转动分量主要由雷达视角改变提供，也可以按照式(5)，式(9)计算。上述方法涉及复杂的运动矢量确定与计算，在实际使用中较为复杂，需要寻找更便于操作的方法。

考虑到 ISAR 成像的本质是目标散射点距离-多普勒二维分辨，因此 ISAR 成像平面的变化反映出坐标平面内散射点转动多普勒发生了整体变化。双基地 ISAR 回波应该能够反映这样的变化，并可能利用回波对成像平面进行估计。下面首先分析双基地 ISAR 回波模型。

目前双基地 ISAR 研究中使用的回波模型可以分为矢量回波模型和散射点回波模型两类。其中广泛使用的散射点回波模型可描述如下：

图 8 所示为运动目标双基地 ISAR 几何模型， T 为发射站， R 为接收站。 O 为目标散射中心， c_i 为目标上的散射点， r_i 为 c_i 到散射点中心的距离。 OM 为目标双基地角平分线， $|OM| = (|TO| + |OR|)/2$ ，即 M 为等效单基地雷达位置。如图建立目标惯性坐标系 Oxy ， θ_i 为位矢 $\mathbf{r}_i = \mathbf{OC}_i$ 与 y 轴负方向的夹角。目标以速度 \mathbf{V} 在很短的观测时间内由 O 运动至 O' 。目标运动过程中坐标系 Oxy 只进行平动，不发生转动。观测时间内双基地角 β 变化很小，可视为不变。 $\psi(t)$ 是成像过程中双基地角平分线转动角，也是等效转动转角。

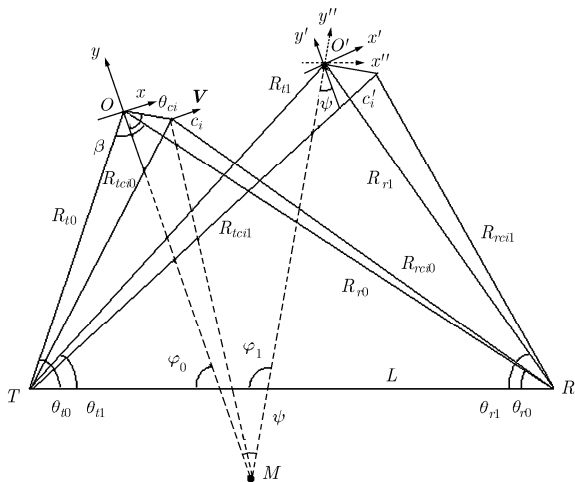


图 8 运动目标双基地 ISAR 成像几何模型

若 $a(t)$ 为雷达复包络，雷达发射信号为 $s_T(t) = a(t) \exp(j2\pi f_0 t)$ (15)

则散射点 c_i 的中频回波为

$$s_T(t - \tau_i) = a(t - \tau_i) \exp(j2\pi f_0 \tau_i) \quad (16)$$

其中 τ_i 为散射点至收发双站的双程时延为

$$\tau_i = [R_t(t) + R_r(t) + 2y_i \cos[\psi(t)] \cos(\beta/2) - 2x_i \sin[\psi(t)] \cos(\beta/2)]/c \quad (17)$$

该表达式前两项为散射中心运动带来的平动项，后两项是与方位分辨相关的转动项。对应散射点转动速度为

$$v_{roti} = 2r_i \sin(\theta_{ci} + \psi(t)) \cos(\beta/2) \omega(t) \approx 2x_i \cos(\beta/2) \omega(t) \quad (18)$$

上述回波模型能直观反映成像过程中散射点相位的变化，因此在目前的双基地 ISAR 研究中被广泛使用。

由式(18)可知，当目标转动速度 $\omega = 0$ 或散射点横坐标 $x_i = 0$ 时，散射点的转动多普勒为零。因此，在该模型下，无论目标向何方向运动， y 轴即距离轴上的散射点具有零转动多普勒。

而由式(1)，式(4)可知，无论单基地 ISAR 还是双基地 ISAR，只有位矢 $\mathbf{r}(t)$ 与方位轴正交的散射点，其在方位轴的投影即转动多普勒才为零。距离轴上的散射点具有零转动多普勒意味着该回波模型下距离轴与方位轴正交。按照成像平面分析及仿真的结果，双基地 ISAR 中方位轴与距离轴大多数情况下并不正交。因此上述模型不能反映目标散射点双基地多普勒的实际情况。

考察上述模型推导过程，其证明并使用了结论：两雷达视线的夹角(双基地角)在观测时间内可视为不变。由图 8 易见，双基地三角形满足以下角度关系：

$$\theta_t(t) + \theta_r(t) + \beta(t) = \pi \quad (19)$$

若成像过程中双基地角可视为不变，则

$$\theta_t(t) + \theta_r(t) = \pi - \beta = \text{const} \quad (20)$$

即

$$\theta'_t(t) = -\theta'_r(t), \omega_t(t) = \omega_r(t) \quad (21)$$

由式(21)可知，双基地角不变，则收发双站相对目标的转动速度相同，这实际是双基地转台模型满足的条件。而双基地转台模型下，成像方位轴和距离轴正交。这就可以解释上述模型中方位轴、距离轴相互正交的结果。

在绝大多数情况下，目标相对发射站、接收站的转动并不相等，对于平稳目标，转动的不均等反映在成像过程中双基地角的变化上。因此，双基地转台模型是双基地成像的特例，并非所有运动情况都可以等效为双基地转台模型。当且仅当目标相对发射站、接收站的等效转动转角相等时，才能等效为双基地转台模型。当目标为机动目标，成像主要依靠机动产生的目标转动，成像时间极短，成像过程中的双基地角基本不变；或目标延双基地雷达角等值曲面运动时，才可以认为目标相对收发双站的转动相同，距离轴、方位轴正交。目标运动、成像

结果才能与转台模型完全等效。

上述回波模型实际上就是成像过程中双基地角不变,或变化极小情况下的特例。而当目标主要依靠雷达视角变化成像时,除了极特殊的运动轨迹外,认为成像过程中双基地角不变是不合适的。经过统计,平稳目标在成像时间内双基地角变化即不均等转动一般不足 1° - 2° ,但这足以影响散射点的转动多普勒。

因此,精确的成像模型中必须考虑双基地角的变化。将转角、双基地角均表示为时间的函数,由此可以得到修正后转动距离的一般形式。

$$R_{\text{roti}} = -2r_i \cos[\theta_{ci} + \psi(t)] \cos \frac{\beta(t)}{2} \quad (22)$$

对应的散射点回波双程时延应满足

$$\tau_i = \left[R_t(t) + R_r(t) - 2r_i \cos[\theta_{ci} + \psi(t)] \cos \frac{\beta(t)}{2} \right] / c \quad (23)$$

转动速度为

$$\begin{aligned} v_{\text{roti}} &= \frac{dR_{\text{roti}}}{dt} = 2r_i \left\{ \sin[\theta_{ci} + \psi(t)] \cos \frac{\beta(t)}{2} \omega(t) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \cos[\theta_{ci} + \psi(t)] \sin \frac{\beta(t)}{2} \beta'(t) \right\} \\ &\approx 2x_i \cos \frac{\beta(t)}{2} \omega(t) + y_i \sin \frac{\beta(t)}{2} \beta'(t) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\omega(t) = \psi'(t) \quad (25)$$

转动多普勒为零的散射点应满足

$$\theta_{ci} = \tan^{-1} \left[\frac{-\beta'(t) \tan \frac{\beta(t)}{2}}{2\omega(t)} \right] - \psi(t) \quad (26)$$

可以看到转动速度、零多普勒散射点的位置是转动角以及目标位置的函数。这与成像平面分析所得结论一致。

通过式(26)估计平稳目标的 θ_{ci} 需要知道目标在一次观测过程中的双基地角 $\beta(t)$ 及目标转动角度 $\psi(t)$,这可以方便地通过目标的位置信息得到。对于空间目标,还可以通过目标轨道信息获得。

如果考虑到零多普勒线与方位向之间的正交关系,式(26)实际上又提供了一种计算平稳目标双基地 ISAR 方位轴-距离轴夹角 θ 的方法:

$$\theta = \pi/2 - \theta_{ci} \Big|_{fd=0} \quad (27)$$

按照本文第3节匀速直线轨道双基地 ISAR 成像仿真参数,我们统计了4个成像轨道段内转动角 $\psi(t)$,双基地角 $\beta(t)$ 的变化,按照式(26),式(27)计算4个成像轨道段对应的距离轴-方位轴夹角,结果如表5所示。该结果表明,按照式(26),式(27)得到的夹角与仿真统计结果一致,由此证明了成像平面模型 II 正确性,也验证了修正模型的正确性。

表5 运动目标双基地 ISAR 仿真结果与回波模型计算结果比较

序号	模型 II 两轴夹角($^{\circ}$)	修正模型计算 夹角($^{\circ}$)	成像过程双基地角 变化量($^{\circ}$)
1	103.837	103.409	1.31
2	106.94	106.508	0.71
3	67.185	66.588	1.08
4	71.901	71.411	1.41

6 结论

双基地 ISAR 成像平面的距离向是目标双基地角的角平分线方向,方位向由目标相对发射站、接收站的有效旋转矢量及雷达视线单位矢量共同确定。当目标不存在复杂机动时,方位向等效为目标有效速度矢量按照目标至发射站、接收站距离标准化后的矢量和方向。成像平面的变化反映了双基地情况下目标转动多普勒的整体变化,这一变化主要由于成像过程中目标相对收发双站转动的不均等造成。双基地转台模型是目标相对收发站转动相等时的特例,并非所有运动情况都可以等效为双基地转台模型描述,精确的双基地 ISAR 回波模型需要考虑转动的不均等性。基于双基地转台模型的成像仿真,基于模拟目标航迹的 BP 算法成像仿真,以及基于散射点回波模型的成像轴估计,均表明了旋转矢量分析法所建立双基地 ISAR 成像平面模型的正确性与有效性,并提供了相应的成像平面估计方法。

参考文献

- [1] 杨振起,张永顺,骆永军.双(多)基地雷达系统[M].第一版.北京:国防工业出版社,1998:14-15.
Yang Zhen-qi, Zhang Yong-shun, and Luo Yong-jun. Bistatic (Multistatic) Radar System[M]. Beijing: Defense Industry Press: 1998: 14-15.
- [2] Palmer J, Homer J, and Longstaff I D. ISAR imaging using an emulated multistatic radar system [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2005, 41(4): 1464-1472.
- [3] Palmer J, Homer J, and Mojarrabi B. Improving on the monostatic radar cross section of targets by employing sea clutter to emulate a bistatic radar[C]. IGARSS 2003, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toulouse, France, 2003. Vol.1: 324-326.
- [4] Oyvind Overrein, et al.. Geometrical and signal processing aspects using a bistatic hitchhiking radar system[C]. 2005 IEEE International Radar Conference, Arlington, Virginia, USA, 2005: 332-336.
- [5] 赵亦工.双基地逆合成孔径雷达成像及信号外推方法的研究和应用.[学位论文],北京:北京理工大学,1989:1-4,26-38.
Zhao Yi-gong. The research and application of bistatic ISAR imaging and signal extrapolation method[D]. [Ph.D.

- dissertation], Beijing: Beijing Institute of Technology, 1989: 1-4, 26-38.
- [6] 吴勇. 双基地逆合成孔径雷达二维成像算法研究. [硕士论文], 长沙: 国防科学技术大学, 2005: 34-37.
Wu Yong. Study of bistatic ISAR 2-D imaging algorithm[D]. [MA dissertation], Changsha: National University of Defense Technology, 2005: 34-37.
- [7] 黄艺毅. 双站逆合成孔径雷达的成像算法研究. [硕士论文], 上海: 上海交通大学, 2008.
Huang Yi-yi. Research on principles of bistatic inverse synthetic aperture radar imaging [D]. [MA. dissertation], Shanghai: Shanghai Jiao Tong University. Jan. 2008.
- [8] 张亚标, 朱振波, 汤子跃, 等. 双站逆合成孔径雷达成像理论研究[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(6): 969-972.
Zhang Ya-biao, Zhu Zhen-bo, and Tang Zi-yue, *et al.* Bistatic inverse synthetic aperture radar image formation[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2006, 28(6): 969-972.
- [9] 郑泽星, 姜义成. 双基地ISAR成像及其影响因素分析[J]. 中国雷达, 2007, (1): 20-26.
Zheng Ze-xing and Jiang Yi-cheng. Analysis of bistatic ISAR imaging and imaging influence factor[J]. *China Radar*, 2007, (1): 20-26.
- [10] 高昭昭, 梁毅, 邢孟道, 等. 双基地逆合成孔径雷达成像分析[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(5): 1055-1059.
Gao Zhao-zhao, Liang Yi, Xing and Meng-dao, *et al.* Analysis of ISAR imagery for bistatic radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(5): 1055-1059.
- [11] 朱玉鹏, 张月辉, 王宏强, 等. 运动目标双基地ISAR成像建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(9): 2696-2704.
Zhu Yu-peng, Zhang Yue-hui, Wang Hong-qiang, and Li Xiang. Modeling and simulation of bistatic ISAR imaging for moving target[J]. *Journal of System Simulation*. 2009, 21(9): 2696-2704.
- [12] Zhang Cai-sheng and Ding Jia-hui. An experimental independent bistatic radar system for wideband application[C]. APSAR 2007. 1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, 2007: 630-633.
- [13] Comblet F, Khenchaf A, and Baussard A, *et al.* Bistatic synthetic aperture radar imaging: theory, simulations, and validations[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2006, 54(11): 3529-3540.
- [14] Wehner, Donald R, 著. 刘谦雷译. 高分辨力雷达[M]. 南京: 电子工业部14所, 1997: 273-276.
- 董 健: 男, 1982年生, 博士, 讲师, 研究方向为雷达信号处理、SAR/ISAR 成像技术、雷达组网技术.
- 尚朝轩: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为电子装备性能检测与故障诊断、雷达信号处理.
- 高梅国: 男, 1965年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达电子对抗与反对抗、高速实时信号处理、雷达成像技术等.
- 傅雄军: 男, 1978年生, 博士, 讲师, 研究方向为 SAR/ISAR 信号处理、模式识别、系统仿真等.