

doi:10.3788/gzxb20154403.0328002

# 双基地雷达两极区 ISAR 超分辨成像

张龙<sup>1,2</sup>, 苏涛<sup>1</sup>, 刘峥<sup>1</sup>, 贺小慧<sup>1,2</sup>, 段永强<sup>3</sup>

(1 西安电子科技大学 雷达信号处理国家重点实验室, 西安 710071)

(2 西安工程大学 电子与信息学院, 西安 710048)

(3 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

**摘 要:**由于双基地雷达中两极区双基地角的时变特性,传统 ISAR 成像法无法获取高分辨的目标像。分析了两极区双基地角的时变性及对距离包络和方位的影响,就两极区目标运动模型中目标方位高次项提出了 Radon-TCDS-Relax 超分辨成像算法,对每个距离单元进行调频率和调频率变化率搜索并补偿其所对应的方位高次相位误差,用 Radon-TCDS-Relax 提取散射点实现 TCD-RID 成像。仿真实验与分析验证了本文方法的有效性。

**关键词:** ISAR 成像;双基地雷达;时间调频率分布搜索;超分辨;Radon 变换

中图分类号:TN959.1

文献标识码:A

文章编号:1004-421(2015)03-0328002-8

## Super Resolution ISAR Imaging in Receiver Centered Region Area in Bistatic Radar

ZHANG Long<sup>1,2</sup>, SU Tao<sup>1</sup>, LIU Zheng<sup>1</sup>, HE Xiao-hui<sup>1,2</sup>, DUAN Yong-qiang

(1 National key lab. of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(2 College of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

(3 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy Sciences, Xi'an 710068, China)

**Abstract:** For the time-variant property of bistatic angles in Receiver Centered Region Area in bistatic radar system, it's difficult to obtain high resolution ISAR image of target in by using the conventional imaging methods. The signal model for bistatic ISAR was presented, then the time-variant property of the bistatic angles and its influence on range envelope and azimuth was analyzed. A Radon-TCDS-Relax super-resolution imaging method was brought up for eliminate the effect from high-order azimuth terms of target motion model in receiver centered areas. The chirp rate and its changing rate corresponding to high-order phase terms in cross range was estimated by the proposed method. Scatterers extracting and imaging were achieved by Radon-TCDS-RELAX and TCD-RID respectively. Accuracy analysis and the experimental results with real data both demonstrate the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** ISAR imaging; Bistatic radar; Time chirp distribution search; Super resolution; Radon transform

**OCIS Codes:** 280.6730; 280.5600; 070.4790; 100.3010; 080.2575

## 0 引言

传统高分辨成像雷达是有源单基地雷达,具有隐蔽性差、抗干扰能力弱及易受欺骗等缺点,在使用中面临着巨大的威胁和挑战<sup>[1]</sup>。双基地雷达是利用两个或

多个分离基地,即发射机被安置在某个基地,响应接收设备则安置在另一个或多个基地,接收基地与发射基地分开,根据接收基地接收到的目标反射进行观测。相对于常规单基地雷达,双多基地雷达安全性隐蔽性高、抗干扰能力强、作用距离远、获取的信息丰富。双基地

**基金项目:**国家自然科学基金(No. 61001204)、国家部委预研基金项目(No. 9140A07030211DZ0113)、中国博士后科学基金(No. 2013M542329)、陕西省自然科学基金基础研究计划项目(No. 2012JM8015)、陕西省教育厅专项计划项目(Nos. 12JK0530, 12JK0557)和西安工程大学博士科研启动基金(No. BS1119)资助

**第一作者:**张龙(1975—),男,副教授,博士后,主要研究方向为雷达成像、实时信号处理。Email: zhanglong@mail.xidian.edu.cn

**导 师:**刘峥(1964—),男,教授,博士,主要研究方向为智能雷达探测系统和多源协同探测与信息融合。Email: Lz@xidian.edu.cn

**收稿日期:**2014-07-31; **录用日期:**2014-11-07

<http://www.photon.ac.cn>

雷达比单基地雷达获取的信息更可靠、丰富,系统也更安全,成为现代雷达技术研究的热点.

双基地逆合成孔径雷达成像(Bistatic Inverse Synthetic Aperture Rader, Bistatic ISAR)在空间监测、导航制导、国土防空等方面有广阔的应用前景,然而双多基地雷达 ISAR 成像的研究成果未见报道.文献[2]研究了利用水面反射波进行双基 ISAR 成像的可能性.文献[1]讨论了双基地 ISAR 成像原理,然而文中模型为没有径向运动的转台目标,没有体现出运动目标的收发分置效应.文献[3]提出了双基地 ISAR 成像回波模型,具有一定的普遍意义.文献[4]讨论了一种目标运动方向与基线平行时的特殊情况.文献[5]建立了双多基地雷达 ISAR 成像模型,但仅对平稳运动目标且不考虑双基地角时变效应下的低分辨率要求下 ISAR 的传统 RD 成像,具有一定的局限性.

目前,双基地 ISAR 成像面临的困难有以下几点:

1) 双基地雷达系统的复杂性,目标回波延迟与目标相对收、发站位置、运动速度和方向有关,要建立一个精准的 ISAR 回波模型解析表达式较困难<sup>[6]</sup>;

2) ISAR 回波数据的支撑区与半双基角有关,对于不同位置录取的回波,不仅波束谱在距离向的分辨率与半双基地角有关,而且波束谱方位向上的间隔也不均匀的.与单基地雷达相比,双基地雷达 ISAR 成像的距离和方位向分辨率要低于相同参数的单基地雷达.随着双基地角增大,系统的分辨率逐渐变低.对这样的波束谱进行二维快速傅里叶逆变换(Inverse Fast Fourier Transformation, IFFT)运算无法获得高质量散射点空间分布<sup>[7]</sup>.

3) 由于收发分置,使收发系统工作同步(包括时间、相位和空间同步)实现技术难度较大,且在双基地雷达大部分区域,雷达散射截面比视线角在双基地角平分线上的单基地雷达截面积小,使双基地成像雷达系统的有效工作范围缩小,提取各种信息难度相应增加<sup>[4]</sup>.

虽然,双基地成像雷达有诸多不足,但具有单基地雷达无法替代的优点,是一种具有潜在优越性的雷达体制,成为当前雷达的重要发展方向之一.

本文给出了双基地 ISAR 的信号模型,分析了两极区双基地角的时变性及对距离包络和方位的影响,就两极区目标运动模型中目标方位高次项的影响提出了用 Radon-TCDS-Relax 超分辨成像算法,对每个距离单元进行方位高次项的调频率的变化率和调频率的补偿,用 Radon-TCDS-RELAX 搜索散射点,进行 TCD-RID 高分辨成像,仿真实验结果验证了所提方法的有效性.

## 1 双基地 ISAR 信号模型

### 1.1 几何模型

图 1 为双基地 ISAR 几何模型.发射、接收站所在

坐标系为  $U-V$  直角坐标系,以  $x$  轴为起点,逆时针旋转为角度正方向.基线长度为  $L$ ,发射站和接收站的坐标分别为  $T_X(-L/2, 0)$ ,  $R_X(L/2, 0)$ .发射站  $T_X$ 、接收站  $R_X$  与目标  $P_0$  之间的距离分别为  $R_T$ 、 $R_R$ ,斜距和为  $R=R_R+R_T$ .收发视线的单位向量为  $\hat{R}_T=[\cos \theta_T, \sin \theta_T]^T$ ,  $\hat{R}_R=[\cos \theta_R, \sin \theta_R]^T$ ,则收发斜距向量表示为  $\vec{R}_R=R_R \cdot \hat{R}_R$ ,  $\vec{R}_T=R_T \cdot \hat{R}_T$ .收发视线  $\hat{R}_R$ 、 $\hat{R}_T$  的和向量(即角分线向量)为  $\vec{R}_e=\vec{R}_R+\vec{R}_T=2\cos \beta \cdot [\cos \theta_e, \sin \theta_e]^T$ ,其中  $\beta=(\theta_R-\theta_T)/2$  为双基地角的一半,称为半双基地角,  $\theta_e=(\theta_R+\theta_T)/2$  为角平分线向量  $R_e$  与  $x$  轴的夹角.为方便分析,令角分线的单位向量为  $\hat{R}_e=[\cos \theta_e, \sin \theta_e]^T$ .目标速度矢量为  $V=v \cdot [\cos \theta_v, \sin \theta_v]^T$ .目标所在坐标系为直角坐标系  $X-Y$ ,原点位于目标的重心  $P_0$ ,其中  $X$  轴与射线  $R_{e0}$  重合,目标上的第  $n$  个散射点  $P_n$  的坐标为  $(x_n, y_n)$ .半双基地角  $\beta$  的变化会导致各次回波数据在距离方向上的支撑区长度的变化.即对应距离向的分辨率,谱的方位分布与各次波数向量的方向  $\theta_{em}$  有关,即直接影响方位分辨率.由此可知,参数  $\beta_m$ 、 $\theta_{em}$  是双基地雷达 ISAR 成像中最关键的两个参数,其大小以及变化规律直接影响回波信号的特性<sup>[5]</sup>.

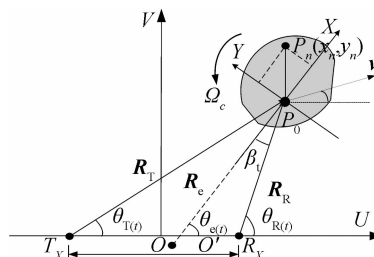


图 1 双基 ISAR 几何模型

Fig. 1 Geometry of bistatic ISAR model

### 1.2 两极成像工作区

半双基地角是双基地雷达的关键参数,半双基地角越大,雷达收发分置的影响就越显著.半双基地角等值线是圆心位于  $(0, L \cot 2\beta/2)$ ,半径为  $r=L/2 \sin 2\beta$  的一组圆,如图 2 所示,其表达式为

$$x^2 + \left(y - \frac{L \cot 2\beta}{2}\right)^2 = \left(\frac{L}{2 \sin 2\beta}\right)^2 \quad (1)$$

双基地雷达感兴趣的区域一般以接收站为中心.根据半双基地角等值线分布,将双基地雷达 ISAR 成像的工作区划分为 4 种类型<sup>[5]</sup>,即以接收机为中心的两极区  $2(R_R \ll R_T, R_R < L/2)$ .工作区为以接收基地为中心的小圆,系统有超长的作用距离和较好的测量准确度,但作用范围减小.半双基地角  $\beta=(\theta_R-\theta_T)/2$  较大,分辨率会受到比较明显的影响,由于接收站与目标距离  $R_R \ll R_T$ ,得  $\omega_{e0} \approx v \sin(\theta_R-\theta_v)/2R_R$ ,对应比较高的方位分辨率<sup>[15]</sup>,有  $|\theta_R-\theta_v| \rightarrow 90^\circ$ ,得

$$|\omega_{\beta 0}| = \frac{v}{2R_R} |\sin(\theta_R - \theta_v)| \rightarrow \frac{v}{2R_R} \quad (2)$$

$$|\omega'_e| = \frac{v^2}{2R_R^2} |\sin 2(\theta_R - \theta_v)| \rightarrow \frac{v^2}{2R_R^2} \quad (3)$$

当  $v$  与  $R_R$  相比不是很小时,半双基地角  $\beta$  变化较大,  $\theta_e$  的加速度也是可观的,目标可看作非匀速转动.因而首先需校正各次回波距离像,然后针对非匀速转动目标,应用距离-瞬时多普勒(Range Instantaneous Doppler, RID)算法<sup>[8]</sup>.其他工作区端视区 1,共基区 3,前向散射区 4 对应的探测和成像方法可见文献<sup>[5]</sup>.

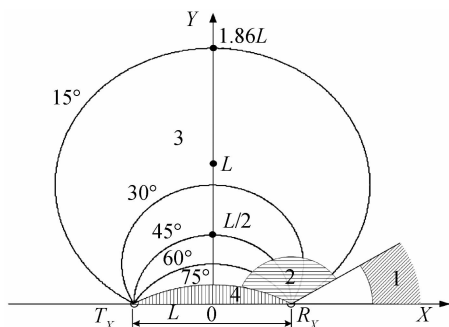


图 2 半双基角等值线

Fig. 2 Isoline of bistatic angle

### 1.3 回波信号模型

假设发射的宽带周期性调制脉冲信号为

$$s(\hat{t}, t_m) = u_c(\hat{t}) e^{j2\pi f_c(\hat{t} + t_m)} \quad (4)$$

式中  $u_c(\hat{t}) = A_c \text{rect}(\hat{t}/T_p) e^{j\pi\mu\hat{t}^2}$  为 chirp 子脉冲,  $\hat{t}$  表示快时间,  $\mu = \frac{B}{T_p}$  为其调频斜率,  $B$  为带宽,  $T_p$  为脉冲宽度.慢时间  $t_m = mT_r$  ( $m=0, 1, 2, \dots, M-1$ ).  $T_r$  为脉冲重复周期.

令目标速度矢量为  $\mathbf{v} = v \cdot [\cos \theta_v, \sin \theta_v]^T$ . 发射站  $T_x$ 、接收站  $R_x$  与目标中心  $P_0$  之间的距离分别为  $R_T(t_m)$ 、 $R_R(t_m)$ ,  $\theta_T(t_m)$ 、 $\theta_R(t_m)$  分别表示  $t_m$  时刻的发射站、接收站与目标间的视线角度,  $\theta_e(t_m) = [\theta_R(t_m) + \theta_T(t_m)]/2$  和  $\beta(t_m) = [\theta_R(t_m) - \theta_T(t_m)]/2$  分别表示  $t_m$  时刻的合成视角和半双基地角.  $t_m=0$  时刻  $P_n$  与发射和接收站之间的距离分别为

$$R_{nT}(0) = [(R_{T0} \cos \theta_{T0} + x_n \cos \theta_{e0} - y_n \sin \theta_{e0})^2 + (R_{T0} \sin \theta_{T0} + x_n \sin \theta_{e0} + y_n \cos \theta_{e0})^2]^{1/2} \approx R_{T0} + x_n \cos(\theta_{e0} - \theta_{T0}) - y_n \sin(\theta_{e0} - \theta_{T0}) \quad (5)$$

$$R_{nR}(0) = [(R_{R0} \cos \theta_{R0} + x_n \cos \theta_{e0} - y_n \sin \theta_{e0})^2 + (R_{R0} \sin \theta_{R0} + x_n \sin \theta_{e0} + y_n \cos \theta_{e0})^2]^{1/2} \approx R_{R0} + x_n \cos(\theta_{e0} - \theta_{R0}) - y_n \sin(\theta_{e0} - \theta_{R0}) \quad (6)$$

式中  $\theta_{e0}$ 、 $\theta_{T0}$ 、 $\theta_{R0}$ 、 $R_{T0}$  和  $R_{R0}$  分别表示零时刻  $\theta_e$ 、 $\theta_T$ 、 $\theta_R$ 、 $R_T$  和  $R_R$  的值.那么在  $t_m$  时刻,目标的等效斜距为

$$R_n(t_m) = [R_{nT}(t_m) + R_{nR}(t_m)]/2 = R_V(t_m) + R_{n\Omega}(t_m) \quad (7)$$

$$R_V(t_m) = [R_T(t_m) + R_R(t_m)]/2 \quad (8)$$

$$R_{n\Omega}(t_m) = \{x_n \cos[\theta_{e0} - \theta_e(t_m)] - y_n \sin[\theta_{e0} - \theta_e(t_m)]\} \cdot \cos \beta(t_m) \quad (9)$$

式(7)中的  $R_V(t_m)$  表示目标整体的径向运动,称为平动,其二阶泰勒展开可以表示为

$$R_V(t_m) \approx R_0 + V \cdot t_m + \frac{1}{2} \dot{V} \cdot t_m^2 \quad (10)$$

$R_0 = [R_R(0) + R_T(0)]/2$  表示初始斜距,  $V$ 、 $\dot{V}$  分别表示平动的一阶和二阶运动参数.式(7)中  $R_{n\Omega}(t_m)$  表示目标相对于合成视线的转动分量,当两极区的  $V$  与  $R_R$  相比不是很小时,半双基地角  $\beta$  的变化较大,  $\theta_e$  的加速度也是可观的,目标要看作非匀速转动.将半双基地角  $\beta(t_m)$  和合成视角  $\theta_e(t_m)$  用泰勒二阶展开近似为

$$\beta(t_m) \approx \beta_0 + \Omega_\beta \cdot t_m + \frac{1}{2} \dot{\Omega}_\beta \cdot t_m^2 \quad (11)$$

$$\theta_e(t_m) = \theta_{e0} + \Omega_e \cdot t_m + \frac{1}{2} \dot{\Omega}_e \cdot t_m^2 \quad (12)$$

将式(11)、(12)代入式(9)得

$$R_{n\Omega}(t_m) \approx \{x_n \cos[\theta_{e0} - \theta_e(t_m)] - y_n \cos[\theta_{e0} - \theta_e(t_m)]\} \cos(\beta_e(t_m)) = x_n \cos \beta_0 - (y_n \cos \beta_0 \Omega_e + x_n \sin \beta_0 \Omega_\beta) t_m + \left\{ \left[ \frac{1}{2} x_n (\Omega_e^2 + \Omega_\beta^2) - y_n \dot{\Omega}_e \right] \cos \beta_0 + \left( y_n \Omega_e \Omega_\beta - \frac{1}{2} x_n \dot{\Omega}_\beta \right) \sin \beta_0 \right\} t_m^2 - \left[ \frac{1}{2} y_n \cos \beta_0 \Omega_e \dot{\Omega}_\beta + \frac{1}{2} (x_n \dot{\Omega}_e \Omega_\beta - y_n \dot{\Omega}_e \Omega_\beta + y_n \Omega_e \dot{\Omega}_\beta) \sin \beta_0 \right] t_m^3 + O(t_m^4) \quad (13)$$

式中,  $O(t_m^3)$  关于  $t_m^3$  的高次项部分,可以忽略.回波基带信号可以写为

$$s(\hat{t}, t_m) = \sum_n A_n \cdot u_c \left( \hat{t} - \frac{2R_n(t_m)}{c} \right) \cdot \exp \left[ -j \frac{4\pi}{c} f_c R_n(t_m) \right] \quad (14)$$

式中  $A_n$  为散射点幅度.对回波信号进行匹配滤波,得到脉冲压缩后的数据

$$s(\hat{t}, t_m) = \sum_n A_n \cdot \text{Sinc} \left[ B \left( \hat{t} - \frac{2R_n(t_m)}{c} \right) \right] \cdot \exp \left[ -j \frac{4\pi}{c} f_c R_n(t_m) \right] \quad (15)$$

在单基地 ISAR 成像中,目标运动可以等效分解为沿着视线方向径向运动和与相对于雷达视线的转动,径向运动引起了包络移动是需要补偿掉的,而转动则是 ISAR 成像所需要的.对于双基地雷达来说,情况变得较为复杂,式(14)中的双基地角不再为零,而且其大小和变化规律与目标所处的位置以及速度的大小和方向有关,其中双基地角主要影响  $R_n(t_m)$  中的转动项  $R_{n\Omega}(t_m)$ ,对平动  $R_V(t_m)$  没有影响,因此,双基地 ISAR 成像中的平动补偿与单基地 ISAR 成像没有区别,完全可以利用已有的单基地 ISAR 成像的平动补偿方法来

实现<sup>[9]</sup>.

## 2 两极区目标回波包络与相位的影响

在系统分辨率要求不高的场合,对于平稳运动目标来说不用考虑双基地角的变化,即  $\Omega_\beta = 0$ , 此时  $R_{n\alpha}(t_m) = (x_n - y_n \Omega_e \cdot t_m) \cdot \cos \beta_0$ , 对运动补偿后的数据直接做方位 FFT 就可以得到目标的 ISAR 图像. 然而, 在高分辨率 ISAR 成像应用中, 必须研究  $\Omega_\beta \neq 0$  时对双基 ISAR 成像的影响. 目标越大、运动速度越快和距离雷达越近时, 双基地 ISAR 成像的情况就会变得越复杂, 其中散射点的越距离单元走动就是一个典型问题. 而由于两极区的半双基地角  $\beta$  和波束向量的方向  $\theta_{em}$  变化较大, 故转动的高次项对越距离单元徙动 (MTRC) 不能忽略. 完成平动补偿的双基 ISAR 回波数据在距离频域 - 方位时域可以表示为

$$s(f, t_m) = \sum_n A_n \exp \left[ -j \frac{4\pi}{c} (f_c + f_r) R_{n\alpha}(t_m) \right] \quad (16)$$

式中  $f \in [-B/2, B/2]$ . 忽略  $R_{n\alpha}(t_m)$  关于  $t_m^3$  高次项展开得到

$$R_{n\alpha}(t_m) = R_\alpha + R'_\alpha t_m + R''_\alpha t_m^2 + R'''_\alpha t_m^3 \quad (17)$$

式中

$$R_\alpha = x_n \cos \beta_0 \quad (18)$$

$$R'_\alpha = - (y_n \cos \beta_0 \Omega_e + x_n \sin \beta_0 \Omega_\beta) \quad (19)$$

$$R'_\alpha = \left\{ \left[ \frac{1}{2} x_n (\Omega_e^2 + \Omega_\beta^2) - y_n \dot{\Omega}_e \right] \cdot \cos \beta_0 + \left( y_n \Omega_e \Omega_\beta - \frac{1}{2} x_n \dot{\Omega}_\beta \right) \cdot \sin \beta_0 \right\} \quad (20)$$

$$R''_\alpha = - \left[ \frac{1}{2} y_n \cos \beta_0 \Omega_e \Omega_\beta^2 + \frac{1}{2} (x_n \Omega_e^2 \Omega_\beta - y_n \dot{\Omega}_e \Omega_\beta + y_n \Omega_e \dot{\Omega}_\beta) \sin \beta_0 \right] \quad (21)$$

将(17)式代入式(16)式得

$$s(f, t_m) = \sum_n A_n \exp \left[ -j \frac{4\pi}{c} (f_c + f_r) \cdot (R_\alpha + R'_\alpha t_m + R''_\alpha t_m^2 + R'''_\alpha t_m^3) \right] \quad (22)$$

以点目标在两极区的半双基角与合成视线角度的仿真为例, 系统为 L 波段雷达, 带宽为  $B = 400$  MHz, 系统构型如图 3(a) 所示, 基线长度  $D = 100$  Km. 其中目标距离接收雷达 6 km, 目标水平方向运动, 目标整体沿与基线水平方向运动, 运动速度为  $V = 400$  m/s. 合成视角变化曲线如图 3(b) 所示,  $\Delta\theta = -10.97^\circ$ , 双基地角变化曲线如图 3(b) 所示,  $\Delta\beta = -10.84^\circ$ , 由图 3(c) 和图 3(d) 可以看出, 虽然观测时间只有 3 s 中, 但是半双基角速度  $\omega_\beta$  与合成视线角的角速度  $\omega_e$  明显呈现出非线性的高次变化, 最小值分别达到  $0.099$  rad/s 和  $0.098$  rad/s. 而故在式(17)中由于转动高次项引起的 MTRC 现象不能忽略.

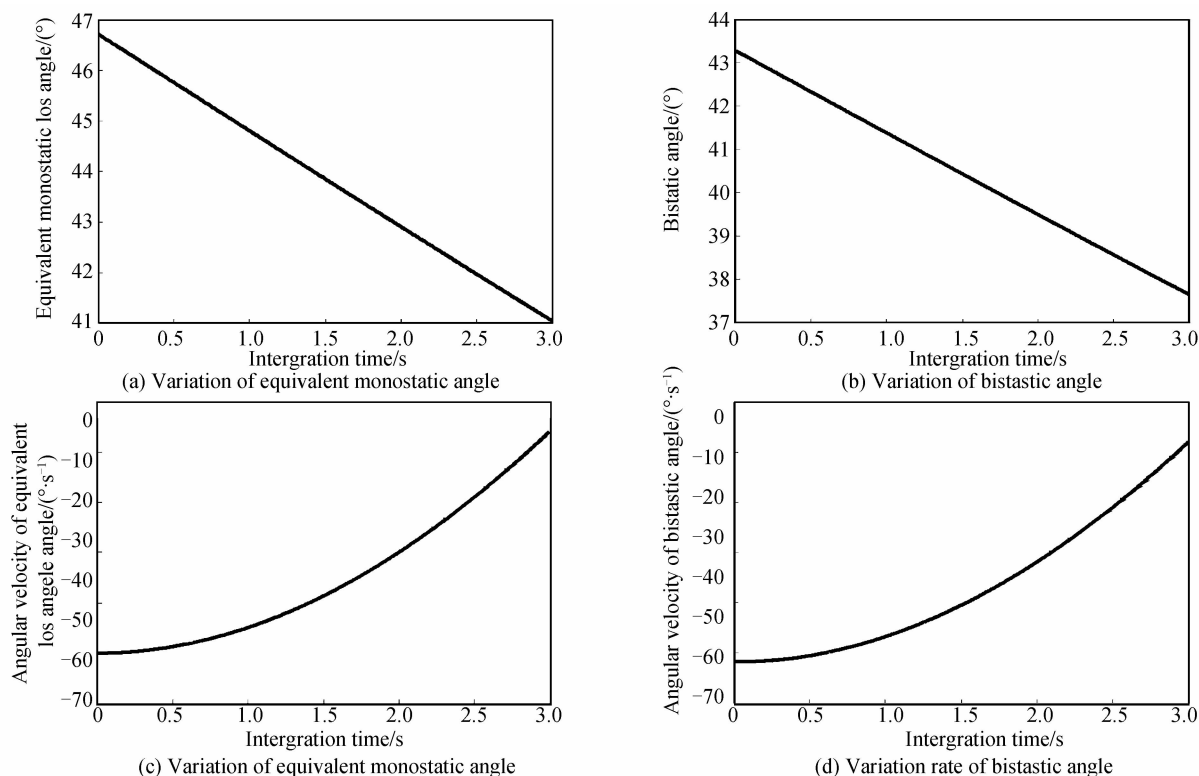


图 3 半双基角与合成视线角度及角速度变化

Fig. 3 Bistatic/ Equivalent Monostatic angle variation

以下来讨论散射点发生越距离单元徙动的条件.

1) 半双基地角引起的距离徙动. 假设目标在雷达

合成视线方向上的最大的纵向距离为  $D_r$ , 目标最大的横向距离为  $D_a$ . 由于  $\theta_e$  变化, 用一次项进行近似的条件为<sup>[10]</sup>

$$D_r < 32\rho_a^2\rho_r/\lambda^2 \quad (23)$$

由文献[5]可知, 越靠近发射站或者接收站, 双基地角等值线越密集, 因而变化也就越快, 这也印证了本文开始讨论的问题, 即当系统的分辨率越高、目标越大、运动速度越快和距离雷达越近时, 双基地效应越明显. 不满足式(23)这一条件时, 散射点就会发生越距离单元徙动.

2) 而方位引起的越单元徙动, 由于  $\theta_e$  变化, 用二次项进行近似的条件为<sup>[8]</sup>

$$D_a < 24\rho_a^3/\lambda^2 \quad (24)$$

当  $B = 400$  MHz,  $f_c = 10$  GHz,  $\omega = 0.09$  rad/s 时, 由式(24)得  $D_r < 37.56$  m,  $D_a < 39.87$  m, 可以看出当目标为小型尺寸的飞机时, 这时式(24)的条件都是不能满足的, 必须考虑 3 次相位对方位成像的影响, 传统针对 2 次项的 RID 成像算法是不能消除其影响<sup>[10]</sup>.

### 3 两极区超分辨算法

#### 3.1 时间 - 调频率分布与 Radon 变换

时间 - 调频率分布 (Time-Chirp Distribution, TCD) 最早由 O'Neill 提出<sup>[11]</sup>. 令二次调频率信号 (Quadratic Frequency Modulation, QFM) 表示为

$$s(t) = \exp [j\Phi(t)] = \exp \left[ j(\Phi_0 + f \cdot t + \frac{1}{2}\mu \cdot t^2 + \frac{1}{6}\dot{\mu} \cdot t^3) \right] \quad (25)$$

式中  $\Phi_0$  表示初相,  $f$  为初始频率,  $\mu$  代表调频率,  $\dot{\mu}$  是频率的二次项, 称为二次调频率 (或调频率变化率). 则式(25)中的 QFM 的时间 - 调频率分布可写为

$$\text{TCD}_s(t, c) = \int Z_s(t, \tau) \exp(-j\tau) d\tau = \int \exp \{ -j\tau [c - \dot{\mu}(t)] \} d\tau = 2\pi\delta [c - \dot{\mu}(t)] \quad (26)$$

$$Z_s(t, \tau) = \begin{cases} s(t + \sqrt{\tau})s^*(t)s^*(t)s(t - \sqrt{\tau}), \tau \geq 0 \\ Z_s^*(t, -\tau), \tau < 0 \end{cases} \quad (27)$$

式中  $\mu(t) = \mu + \dot{\mu} \cdot t$  为瞬时刻频率,  $\delta(\cdot)$  为冲击函数. 显然, QFM 信号的 TCD 分布为沿着瞬时刻频率  $\gamma(t)$  集聚的一条直线. 对 TCD 平面上进行 Radon 搜索, 根据其峰值位置可以确定  $\mu$  和  $\dot{\mu}$  的估计值. 以下以单分量具有式(27)形式的信号为例来说明, 具体细节可参考文献[10]. 若为多分量线性调频信号, 其中交叉项影响的消除可参考文献[13].

#### 3.2 Radon-TCDS-Relax 成像流程

据以上分析, 经过平动补偿和越距离单元走动校正和初相误差校正处理之后, 就要开始对方位向进行

成像处理了<sup>[14]</sup>. 常用的方位成像处理包括方位快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transformation, FFT)、维纳格 - 威利分布 (Wegner Viller Distribution, WVD) 瞬时成像方法、Radon-WVD 变换去交叉项瞬时成像方法和基于 DechirpClean 成像方法. 当目标的复杂运动产生方位相位的二次和三次项时, 方位 FFT 的方法将会造成图像的严重散焦. 对于 WVD 瞬时成像方法来说, 由于目标信号在时频面上分布存在严重的交叉项, 将造成成像质量严重下降; 而对于 Radon-WVD 变换去交叉项瞬时成像方法来说, 它是在时频面上对信号特性进行线积分累积能量进行去交叉项, 对于三次项所表现的曲线特性, 即对线积分累积能量将会失效, 同时, 也会影响去交叉项的效果和成像质量; 而基于 DechirpClean 的成像方法, 由于是通过匹配信号的最优调频率值, 并采用 FFT 后, 以信号峰值能量最大来搜索信号的中心频率、调频率和幅度的参数信息, 然后, 重构回波信号并最终成像的. 但当两极区机动目标产生相位的三次项时, 将严重影响最优调频率值的搜索, 从而影响信号的重构, 就难以得到质量更好的图像. 所以, 在对目标进行瞬时成像之前, 必须对方位向的三次项进行估计和校正. 因此, 在本步骤中提出了一种同时对信号二次和三次项估计, 并最终提取信号的幅度、中心频率、调频率以及调频率变化率的 Radon-TCDS-Relax 的瞬时成像方法.

对于一个确定的距离单元, 假设这个距离单元存在  $K$  个散射点. 那么这个单元回波信号可表示为

$$s(n) = \sum_{k=1}^K \alpha_k \exp (j2\pi f_k n + j\pi\mu_k n^2 + 1/3j\pi \dot{\mu}_k n^3) + e(n) \quad (28)$$

式中:  $n = 0, 1, \dots, N - 1$ ,  $N$  为方位采样点数,  $e(n)$  为 AR 噪声.

Relax 算法是一种加性色噪声中估计正弦波频率和复幅度的算法, 它具有渐近统计有效性. 为了将 Relax 算法推广到线性调频信号模型<sup>[15]</sup>, 首先将  $y(n)$  排成向量, 即

$$y = [y(0) y(1) \dots y(N-1)]^T \quad (29)$$

令

$$\psi_k = \left[ \exp \left( j2\pi f_k + j\pi\mu_k + \frac{1}{3}j\pi \dot{\mu}_k \right) \dots \exp (j2\pi f_k (N-1) + j\pi\mu_k (N-1)^2) + \frac{1}{3}j\pi \dot{\mu}_k (N-1)^3 \right]^T \quad (30)$$

式(30)中,  $(\cdot)^T$  表示向量转置.

参量  $\{\alpha_k, f_k, \mu_k, \dot{\mu}_k\}$  ( $k = 1, 2, \dots, K$ ) 的估计值可通过极小化以下的非线性最小二乘 (NLS) 代价函数得到, 即

$$C_1 (\{\alpha_k, f_k, \mu_k, \dot{\mu}_k\}_{k=1}^K) = \| y - \sum_{k=1}^K \alpha_k \psi_k \|^2 \quad (31)$$

式(31)中,  $\| \cdot \|$  表示欧几里德范数.

式(31)中  $C_1$  的最优化是一个多维空间的寻优问题,较为复杂. 这里将原始的 Relax 算法推广,以求解  $C_1$  的寻优问题. 为此,令

$$y_k = y - \sum_{i=1, i \neq k}^K \hat{\alpha}_i \hat{\psi}_i \quad (32)$$

同时假设  $\{\hat{\alpha}_i, \hat{f}_i, \hat{\mu}_i, \hat{\dot{\mu}}_i\} (i = 1, 2 \dots K, i \neq k)$  已经求出,则式(31)的极小化等效于下式的极小化,即

$$C_2(\alpha_k, f_k, \mu_k, \dot{\mu}_k) = \|y_k - \alpha_k \psi_k\|^2 \quad (33)$$

对式(33)关于  $\alpha_k$  求极小值就获得  $\alpha_k$  的估计值为

$$\hat{\alpha}_k = (\psi_k^H \psi_k)^{-1} \psi_k^H y_k = \psi_k^H y_k / N \quad (34)$$

令

$$\begin{aligned} \tilde{y}_k &= \left[ y_k(0) y_k(1) \exp(-j\pi\mu_k - \frac{1}{3}j\pi\dot{\mu}_k) \dots \right. \\ &\left. y_k(N-1) \exp(-j\pi\mu_k(N-1)^2 - \frac{1}{3}j\pi\dot{\mu}_k(N-1)^3) \right]^T \end{aligned} \quad (35)$$

$$\tilde{\psi}_k = [1 \exp(j2\pi f_k) \dots \exp(j2\pi f_k(N-1))]^T \quad (36)$$

则

$$\hat{\alpha}_k = \tilde{\psi}_k^H \tilde{y}_k / N \quad (37)$$

从式(37)可以看出:  $\hat{\alpha}_k$  是  $y_k$  归一化的离散傅里叶变换,所以只要得到  $f_k, \mu_k, \dot{\mu}_k$  的估计值  $\hat{f}_k, \hat{\mu}_k, \hat{\dot{\mu}}_k$ , 就可以通过 FFT 获得  $\hat{\alpha}_k$ . 式(13)的物理意义十分明显,假如  $y_k$  只包含单分量的线性调频信号,则  $\tilde{y}_k$  是经过(去高次项后)解线调频(dechirping)后得到的非时变的单频信号,所以用傅里叶分析即可获得其参数.

将估计值  $\hat{\alpha}_k$  代入式(33),  $f_k, \mu_k, \dot{\mu}_k$  的估计值  $\hat{f}_k, \hat{\mu}_k, \hat{\dot{\mu}}_k$  可以由以下的式子寻优得到,即

$$C_3(f_k, \mu_k, \dot{\mu}_k) = \| (I - \psi_k \psi_k^H / N) y_k \|^2 = y_k^H y_k - y_k^H \psi_k \psi_k^H y_k / N \quad (38)$$

式中  $I$  为单位阵. 上式的最小化等效于下式的最大化,即

$$C_4(f_k, \mu_k, \dot{\mu}_k) = (\psi_k^H y_k)^H \psi_k^H y_k / N \quad (39)$$

这样,  $f_k, \mu_k, \dot{\mu}_k$  的估计值为

$$\{\hat{f}_k, \hat{\mu}_k, \hat{\dot{\mu}}_k\} = \arg \max_{f_k, \mu_k, \dot{\mu}_k} \{ |\tilde{\psi}_k^H \tilde{y}_k|^2 / N \} \quad (40)$$

对于固定的  $\mu_k$  取值,  $f_k$  的估计值  $\hat{f}_k$  为归一化的周期图  $|\tilde{\psi}_k^H \tilde{y}_k|^2 / N$  主峰处的频率值. 这样,式(39)的优化问题就归结为:在  $\mu_k$  的可能的取值范围内寻找参数  $(\hat{\mu}_k, \hat{\dot{\mu}}_k)$ , 在该点处周期图  $|\tilde{\psi}_k^H \tilde{y}_k(\mu_k, \dot{\mu}_k)|^2 / N$  的主峰值比其它各点处的主峰值都大,其中:  $\tilde{y}_k(\mu_k, \dot{\mu}_k)$  表示  $\tilde{y}_k$  是  $(\mu_k, \dot{\mu}_k)$  的函数. 所以,可以通过 Radon-TCDS 搜索寻优获得  $\mu_k, \dot{\mu}_k$  的估计值  $\hat{\mu}_k, \hat{\dot{\mu}}_k$ , 再由式(40)得到  $f_k$  的估计值  $\hat{f}_k$ .

其中用 Radon-TCDS 搜索第  $k$  个信号的  $\mu_k, \dot{\mu}_k$  的估计值  $\hat{\mu}_k, \hat{\dot{\mu}}_k$  可以先将求其信时间 - 调频率分布函数  $TCD_s(t, c)$ , 然后做 Radon 变换,由其峰值确定起始调频率  $\mu_k$  和二次调频率  $\dot{\mu}_k$ , 如 3.1 小节中所述.

Radon-TCDS-Relax 算法的线性调频信号估计步骤为:

1) 假设信号数为  $K = 1$ , 分别利用式(40)和式(37)计算  $\{\hat{f}_1, \hat{\mu}_1, \hat{\dot{\mu}}_1, \hat{\alpha}_1\}$ .

2) 假设信号数为  $K = 2$ , 首先利用第一步计算得到的  $\{\hat{f}_1, \hat{\mu}_1, \hat{\dot{\mu}}_1, \hat{\alpha}_1\}$  代入式(32)求出  $y_2$ , 再分别利用式(40)和式(37)计算  $\{\hat{f}_2, \hat{\mu}_2, \hat{\dot{\mu}}_2, \hat{\alpha}_2\}$ ; 将计算的  $\{\hat{f}_2, \hat{\mu}_2, \hat{\dot{\mu}}_2, \hat{\alpha}_2\}$  代入式(32)求出  $y_1$ , 然后利用  $y_1$  和式(40)及式(37)重新计算  $\{\hat{f}_1, \hat{\mu}_1, \hat{\dot{\mu}}_1, \hat{\alpha}_1\}$ , 这个过程反复迭代,直至收敛.

3) 假设信号数为  $K = 3$ , 首先将第二步计算所得到的  $\{\hat{f}_1, \hat{\mu}_1, \hat{\dot{\mu}}_1, \hat{\alpha}_1\}$  和  $\{\hat{f}_2, \hat{\mu}_2, \hat{\dot{\mu}}_2, \hat{\alpha}_2\}$  代入式(32)求出  $y_3$ , 再分别利用式(40)和式(37)计算  $\{\hat{f}_3, \hat{\mu}_3, \hat{\dot{\mu}}_3, \hat{\alpha}_3\}$ ; 将计算得到的  $\{\hat{f}_2, \hat{\mu}_2, \hat{\dot{\mu}}_2, \hat{\alpha}_2\}$  和  $\{\hat{f}_3, \hat{\mu}_3, \hat{\dot{\mu}}_3, \hat{\alpha}_3\}$  代入式(32)求出  $y_1$ , 然后利用  $y_1$  和式(40)及式(37)重新计算  $\{\hat{f}_1, \hat{\mu}_1, \hat{\dot{\mu}}_1, \hat{\alpha}_1\}$ ; 将计算得到的  $\{\hat{f}_1, \hat{\mu}_1, \hat{\dot{\mu}}_1, \hat{\alpha}_1\}$  和  $\{\hat{f}_3, \hat{\mu}_3, \hat{\dot{\mu}}_3, \hat{\alpha}_3\}$  代入式(35)求出  $y_2$ , 然后利用  $y_2$  和式(40)及式(37)重新计算  $\{\hat{f}_2, \hat{\mu}_2, \hat{\dot{\mu}}_2, \hat{\alpha}_2\}$ , 这个过程反复迭代,直至收敛.

4) 令  $K = K + 1$ , 上述步骤持续进行,直到  $K$  等于待估计的信号数.

运算过程中收敛判据与 Relax 算法的收敛判据相同,即比较代价函数  $C_1$  在两次迭代过程中的变化值,如果变化值小于某个值,如  $\epsilon = 10^{-4}$ ,则认为过程收敛.

对于宽带雷达来说,目标在距离向往往占了十几个距离单元,因此需要对距离单元分别进行分析,将其组合成二维矩阵,就可以获得目标的二维像.

图 4 为两极区整个 ISAR 成像处理过程流程图.

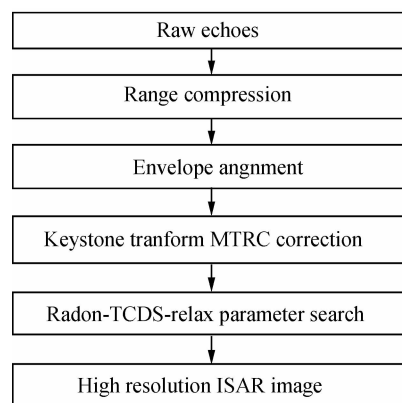


图 4 成像处理流程

Fig. 4 Flowchart of imaging procedure

### 4 仿真试验结果

收发站见图 5 设置. 基线长度  $L = 100 \text{ km}$ , 收发站与目标之间的距离  $R_T = 100 \text{ km}$ ,  $R_R = 6 \text{ km}$ , 发射带宽  $B = 400 \text{ MHz}$ , 系统为  $L$  波段雷达, 中心频率为  $f_0 = 1200 \text{ MHz}$ , 基线长度  $D = 100 \text{ km}$ . 目标与发射、接收站间的初始距离分别为  $R_i = 100 \text{ km}$ ,  $R_r = 6 \text{ km}$ . 接收站视线角度为  $\theta_R = 90^\circ$ ,  $\theta_T = 3.43^\circ$ , 合成视线初始角度  $\theta_c = 46.78^\circ$ , 初始半双基角  $\beta = 43.28^\circ$ . 发射信号波长  $\lambda = 0.03 \text{ m}$ , 积累时间为  $3 \text{ s}$ .

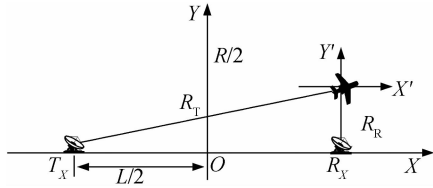


图 5 仿真飞机两极区几何模型

Fig. 5 The plane and Bistatic model geometry

实验用 330 个点的雅克 42 飞机模型, 其中模型如图 6(a) 所示, 可以看出飞机的横向大约为  $80 \text{ m}$ , 纵向为  $80 \text{ m}$ , 从以上讨论可知, 飞机由于转动效应引起的 MTRC 在这里假设已经消除, 而 3 次项引起的方位单元的徙动必须要考虑. 经平动补偿和 keystone 校正后

的包络如图 6(b) 所示, 可以看出包络已经得到基本校正. 图 6(c) 为经过包络校正后的某个距离单元的时频分布, 可以很明显看出方位相位中存在较明显的三次项影响, 使得信号在  $t-f$  平面上呈二次曲线分布. 图 6(d) 为该孤立散射单元在  $t-c$  (时间-调频率) 平面上的分布, 可以看出, 其所表现的特性呈线性变化. 图 6(e) 单元经过本文方法校正后在  $t-c$  平面上的分布, 可以看出经过由 Radon 变换搜索的调频率校正后的时间调频率分布基本平行于调频率轴. 调频图 6(f) 为在图 6(b) 基础上直接 RD 的成像结果, 可以看出由于没有校正方位相位三次项直接成像结果, 目标只能看出轮廓, 其上的散射点有较明显的散焦现象, 无法分辨目标细节特征, 成像质量下降. 图 6(g) 为运用传统的 DechirpClean 方法成像结果, 由于未对方位信号三此项进行有效处理, 目标像的虚假点较多, 而丢失较多的目标信息, 如机首、机尾和机翼等部分无法分辨. 图 6(h) 为利用本文提出的 Radon-TCDS-Relax 成像结果, 对比图 6(g) 可以看出, 模型上的各个细节在该图上得到了较为理想的表示, 该方法很好地对回波数据中各散射点的信号进行了参数估计、提取和校正, 图像上的虚假点较少, 最终获得了质量较好的 ISAR 图像, 证明了本文所提出方法的有效性.

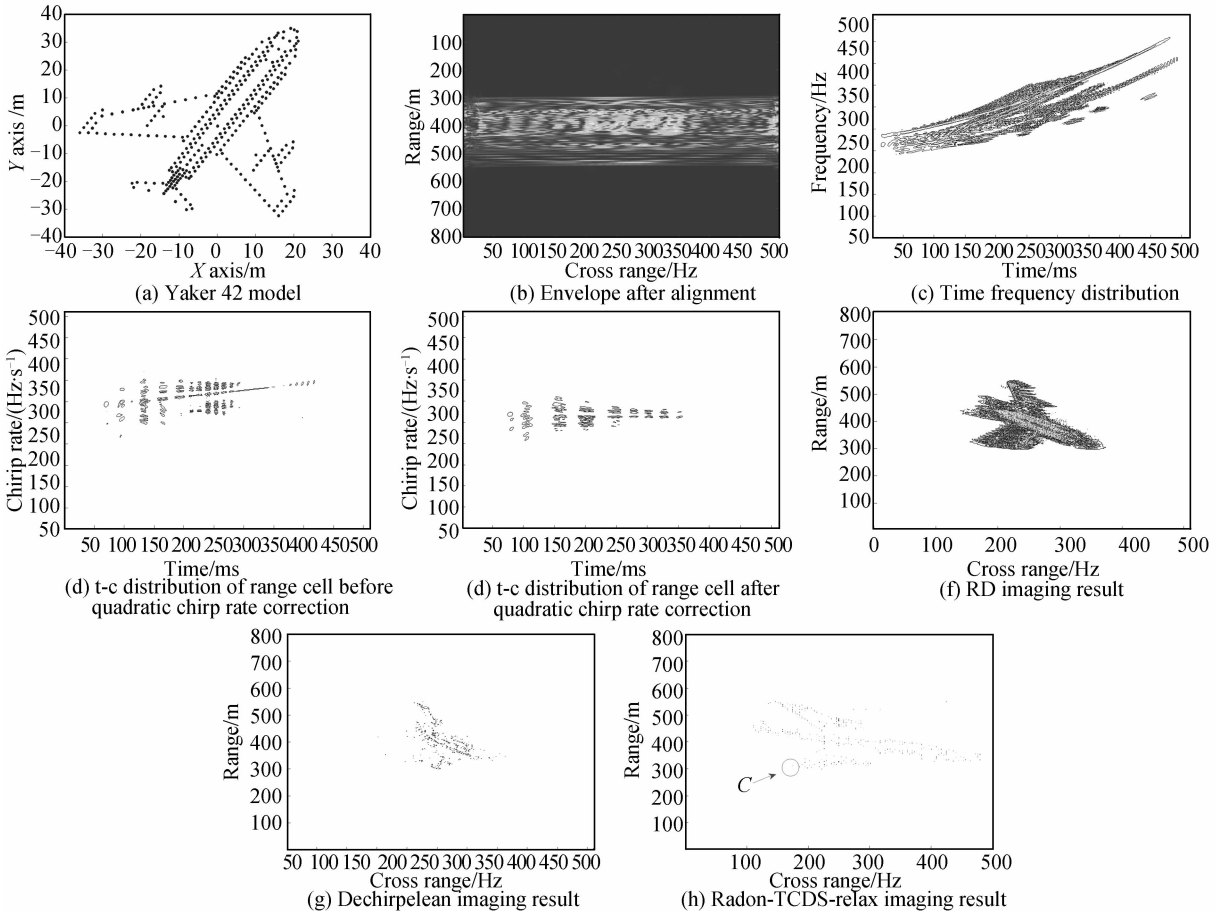


图 6 Radon-TCDS-Relax 方法实验结果对比

Fig. 6 Radon-TCDS-Relax Simulation results comparison

表 1 为本文所提的 Radon-TCDS-Relax 与传统 RD 和 Dechirp 对所成目标像中的机翼特显点 C 的峰值旁瓣比(PLSR)、积分旁瓣比(ILSR)对比<sup>[16]</sup>。从表 1 中可以对对比看出, DechirpClean 性能略优于 RD 方法, 而 Radon-TCDS-Relax 由于进行了调频率和调频率变化率的搜索并校正其产生的方位向高次相位误差, 获得的积分旁瓣比和峰值旁瓣比分别低于 DechirpClean 15.33 dB 和 11.43 dB。所获得的目标像的聚焦效果要明显优于 DechirpClean 和 RD 成像方法。

表 1 成像结果性能对比

Method	PLSR/dB	ILSR/dB
RD	-10.516 3	-9.203 0
DechirpClean	-13.290 9	-9.745 8
Radon-TCDS-Relax	-28.624 0	-21.182 1

## 5 结论

本文针对双基地雷达中两极区由于双基地角的时变特性, 传统的 ISAR 成像方法无法获取高分辨的目标像, 提出了一种 Radon 变换结合 TCDS 的超分辨成像算法。给出了双基地 ISAR 的信号模型, 分析了两极区双基地角的时变性及对距离包络和方位的影响, 就两极区目标运动模型中目标方位高次项提出了 Radon-TCDS-Relax 超分辨成像算法, 对每个距离单元进行调频率和调频率变化率搜索, 并补偿其所对应的方位高次项相位误差, 用 Radon-TCDS-Relax 提取散射点, 最后进行 TCD-RID 成像, 通过仿真试验验证了本文方法的有效性。

### 参考文献

- [1] ZHANG Ya-biao, ZHU Zhen-bo, TANG Zi-yue. Bistatic inverse synthetic aperture radar image formation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, **28**(6): 969-972.  
张亚标, 朱振波, 汤子跃. 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.
- [2] PALMER J, HOMER J, LONGSTAFF I D, *et al.* ISAR imaging using an emulated multistatic radar system[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic systems*, 2005, **41**(4): 1464-1472.
- [3] DONG Jian, SHANG Chao-xuan. The image plane analysis and echo model amendment of bistatic ISAR [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, **32**(8): 1855-1862.  
董健, 尚朝轩等. 双基地 ISAR 成像平面研究及目标回波模型修正[J]. *电子与信息学报*, 2010, **32**(8): 1855-1862.
- [4] GUO Qiang, LI Wei-feng, TAO Ran. Establishing model and plotting zero Doppler regions for moving targets along bistatic baseline[J]. *Acta Armamentarii*, 2007, **28**(6): 661-666.  
郭强, 李伟峰, 陶然. 双基地雷达沿基线目标模型的建立及零多普勒区的划分[J]. *兵工学报*, 2007, **28**(6): 661-666.
- [5] GAO Zhao-zhao, LIANG Yi, XING Meng-dao. Analysis of ISAR imagery for bistatic radar [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, **31**(5): 1055-1059.  
高昭昭, 梁毅, 邢孟道. 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.
- [6] MICHAEL A, ZHOU H, ZENG Z. Passive bistatic synthetic aperture radar imaging with Galileo transmitters and a moving receiver: experimental demonstration[J]. *IEEE Proceeding of Radar, Sonar Navig*, 2013, **7**(9): 985-993.
- [7] MOHAMMAD Z, MAHMOOD M H. Using omega-K algorithm for bistatic synthetic aperture radar image formation based on modified extended Loffeld's bistatic formula [J]. *IEEE Proceeding of Radar, Sonar Navig*, 2013, **7**(4): 383-392.
- [8] LIU Zhi-chao, YANG Jin-hua. Research on three-dimensional target reconstruction based on spotlight mode inverse synthetic aperture imaging radar group[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(8): 973-977.  
刘智超, 杨进华. 基于聚束逆合成孔径激光成像雷达组的三维目标重构的研究[J]. *光子学报*, 2013, **42**(8): 973-977.
- [9] ZANG Bo, GUO Rui, TANG Yu, *et al.* Real envelope imaging algorithm for inverse synthetic aperture imaging lidar[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(12): 2152-2157.  
臧博, 郭睿, 唐禹, 等. 逆合成孔径成像激光雷达实包络成像算法[J]. *光子学报*, 2013, **39**(12): 2152-2157.
- [10] LU G Y, BAO Z. Compensation of scatterers migration through resolution cell in inverse synthetic aperture radar imaging[J]. *IEEE Proceeding of Radar, Sonar Navig*, 2000, **147**(2): 80 - 85.
- [11] O'Neill J C, FLANDRIN P. Virtues and vices of quartic time-frequency distributions [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2000, **48**(9): 2641-2650.
- [12] GAO Zhao-zhao, LI Ya-chao, XING Meng-dao. ISAR imaging of manoeuvring targets with the range instantaneous chirp rate technique[J]. *IET Radar Sonar Navigation*, 2009, **3**(5): 449 - 460.
- [13] LI Ya-chao, SU Jun-hai, XING Meng-dao. Research on ISAR imaging of the complexly moving target based on the time-chirp distribution[J]. *Journal of Xidian University*, 2008, **35**(1): 1-7.  
李亚超, 苏军海, 邢孟道, 保铮. 利用时间-调频率分布特性的复杂运动目标 ISAR 成像研究[J]. *西安电子科技大学学报*, 2008, **35**(1): 1-7.
- [14] ZHU D, LI Y, ZHU Z. A keystone transform without interpolation for SAR ground moving-target imaging [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, **4**(1): 18-22.
- [15] ZHANG Long, LI Ya-chao, SU Jun-hai. Research on the ISAR imaging used statistical RELAX method[J]. *Journal of Xidian University*, 2010, **37**(6): 1067-1070.  
张龙, 李亚超, 苏军海. 一种统计 RELAX 方法的 ISAR 成像研究[J]. *西安电子科技大学学报*, 2010, **37**(6): 1067-1070.
- [16] LÜ X, XING M D, WAN C R. ISAR imaging of maneuvering targets based on the range centroid doppler technique [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, **19**(1): 141-153.