

## 匀加速转动目标转动参数联合估计

贺思三\* 赵会宁 张永顺

(空军工程大学防空反导学院 西安 710051)

**摘要:** 匀加速转动目标运动参数估计是逆合成孔径雷达(ISAR)成像中的一类常见问题。该文在给出匀加速转动目标雷达回波信号模型的基础上,推导了利用线性调频信号对匀加速转动目标雷达回波进行拟合时所得参数与目标转动速度参数之间的关系。在此基础上,进一步提出一种匀加速转动目标转动参数联合估计方法,实现了转动参数的无偏估计。仿真结果验证了该算法的有效性。

**关键词:** 逆合成孔径雷达; 非均匀转动; 参数估计; 无偏估计

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)09-2187-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01486

## Combined Rotating Parameters Estimation for Uniformly Accelerated Rotation Targets

He Si-san Zhao Hui-ning Zhang Yong-shun

(The Aerial Defence and Antimissile Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** A common problem in Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) imaging is to estimate the rotating parameters for uniformly accelerated rotation target. At first, the radar echo model for uniformly accelerated rotation target is introduced. Then, the relationship between the extracted polynomial phase parameters and rotation parameters is deduced when the Linear Frequency Modulation (LFM) model is utilized to extract the prominent scattering centers from profile sequences. An algorithm is proposed on this basis which can estimate the rotating parameters unbiased for uniformly accelerated rotation target. Simulation results verify the effectiveness of the proposed algorithm.

**Key words:** Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR); Non-uniform rotation; Parameters estimation; Unbiased estimation

### 1 引言

雷达通过发射宽带信号获得目标距离向高分辨,通过目标相对雷达转动导致的多普勒信息获得目标的横向高分辨,从而得到2维高分辨逆合成孔径雷达(ISAR)像。传统的ISAR成像算法是在小角度匀速转动假设条件下通过多普勒分析实现距离-多普勒(Range Doppler, RD)成像。在实际中利用RD成像算法对非合作目标进行成像时存在如下两个问题:(1)RD成像算法是基于匀速转动模型的,而实际目标存在机动,难以满足匀速转动模型。目标的非均匀转动将在回波信号中引入新的相位误差,从而使得散射点的多普勒频谱展宽,ISAR像变得模糊。(2)RD成像算法所获得的ISAR像是目标回波在RD平面上的投影,在多普勒维存在横向定标模糊。

估计出目标转角变化函数,通过信号匹配分解或重采样得到聚焦的ISAR像是对非均匀转动目标成像的常用方法<sup>[1-5]</sup>。文献[1]对匀加速转动目标成像进行研究,通过对转动角速度与角加速度比值的估计得到聚焦的ISAR像;文献[2]通过对回波信号中强散射中心相位函数的分析估计目标转角变化函数,并据此对回波进行重采样得到聚焦ISAR像;文献[3]选择目标角度变化可近似为匀速转动的时段进行成像;文献[4]利用调频傅里叶变换对匀加速旋转目标进行成像。上述算法所估计的角度变化函数并不包含绝对角度信息,它们只能得到聚焦的ISAR像,而不能对所得像进行横向定标。

ISAR像的横向分辨率可表示为 $\lambda/2\Delta\theta$ ,其中 $\lambda$ 为发射信号波长, $\Delta\theta$ 为成像期间目标的转动角度。因此,横向定标的核心是估计出 $\Delta\theta$ 或转动角速度。基于回波信号高次相位信息对转动角速度进行估计是ISAR像横向定标的一类常用方法。文献[6-8]根据散射中心调频率参数与目标转速之间的对应关系估

2013-09-26 收到, 2014-02-18 改回

国家自然科学基金(61372166)资助课题

\*通信作者: 贺思三 hesisan@163.com

计转速；文献[9]根据散射中心三次相位系数与目标转速之间的对应关系估计转速。需要指出的是，上述算法均是针对匀速转动模型而提出的，当目标非均匀转动时，可在估计出目标转角变化函数的基础上通过重采样使得目标回波近似为匀速转动模型，从而进一步利用上述算法实现横向定标<sup>[10]</sup>。但角度变化函数估计误差将导致重采样后的信号包含较大的高阶相位残差，从而影响ISAR像定标算法性能，使得定标结果出现较大偏差。

综上所述可以看出，对非匀速转动目标 ISAR 成像的关键是估计出目标转角变化函数，但并不要求转角的绝对大小；而横向定标则进一步要求知道转角变化的绝对大小。若能对目标实际的转动参数进行估计，则能同时解决非均匀转动目标成像及定标问题。本文基于匀加速转动模型，对非平稳运动目标的转动参数估计展开研究。首先分析了利用线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)分量对匀加速转动目标距离像序列进行拟合时的性能，在此基础上提出了一种转动角速度与角加速度参数联合估计算法，实现了转动角速度与角加速度的无偏估计，从而可进一步获得聚焦且标定好的 ISAR 像。仿真结果验证了本文算法的有效性。

## 2 匀加速转动目标回波信号特性分析

### 2.1 匀加速转动目标回波信号模型

在光学区，目标回波可认为是多个等效散射中心后向散射的叠加。假设已对目标平动进行补偿且在成像时间内没有发生越距离单元走动，距离压缩后第  $k$  个散射中心的信号可表示为

$$s_k(r_k, n) = a_k \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_c}{c} [x_k \sin(\theta(n)) + y_k \cos(\theta(n))] \right\}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

其中  $n$  表示脉冲数， $N$  表示总的脉冲数， $f_c$  表示雷达中心频率， $c$  为光速， $a_k$  表示散射中心散射幅度， $(x_k, y_k)$  表示散射中心相对于旋转中心的坐标， $r_k$  表示散射中心所在距离单元。设目标旋转中心对应的纵坐标为  $y_c$ ，在距离像上能获得  $r_k = y_c + y_k$  的大小，但不能获得  $y_k$  的绝对大小。

在较短的观测时间内非均匀转动目标可用匀加速转动模型近似，则  $\theta(n)$  可表示为

$$\theta(n) = \omega_0 T_r n + \dot{\omega}_0 T_r^2 n^2 / 2 = \omega_0 (T_r n + \eta T_r^2 n^2) \quad (2)$$

其中设  $\omega_0$  为角速度， $\dot{\omega}_0$  为角加速度， $T_r$  为脉冲重复周期， $n$  为脉冲数， $\eta = \dot{\omega}_0 / 2\omega_0$ 。将式(2)代入式(1)，并对  $\sin(\theta(n))$  与  $\cos(\theta(n))$  进行二阶泰勒展开，可得

$$s_k(r_k, n) = \delta_k \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_c}{c} \left[ x_k \omega_0 (T_r n + \eta T_r^2 n^2) + y_k - \frac{1}{2} y_k \omega_0^2 (T_r n + \eta T_r^2 n^2)^2 \right] \right\} \quad (3)$$

式(3)表明，匀加速转动目标的距离像序列可表示为多个四次多项式相位信号和。考虑到  $\omega_0^2$  一般很小，其三次与四次项系数非常小，为了减少参数估计的运算量，可利用 LFM 信号提取距离像序列中的强散射中心<sup>[1,10]</sup>。下面进一步分析利用 LFM 分量对式(3)所示信号进行拟合时的性能。

### 2.2 LFM 信号对匀加速转动目标回波拟合的性能分析

四次多项式相位信号可表示为

$$y(n) = a \exp \left( -j \left( \alpha_0 n T_r + \beta_0 n^2 T_r^2 + \gamma_0 n^3 T_r^3 + \kappa_0 n^4 T_r^4 \right) \right) + w(n) \quad (4)$$

其中  $n$  为采样序列，其范围为 0 到  $N-1$ ； $w(n)$  表示方差为  $\delta^2$  的高斯白噪声； $\alpha_0$ ， $\beta_0$  分别为频率中心与调频率参数； $\gamma_0$ ， $\kappa_0$  为三次及四次相位项系数，它们是一个绝对值较小的量。将式(4)与式(3)进行对比，可得

$$\left. \begin{aligned} \alpha_0 &= f_{kx} \omega_0, & \beta_0 &= f_{kx} \omega_0 \eta - \frac{f_{ky}}{2} \omega_0^2 \\ \gamma_0 &= -f_{ky} \omega_0^2 \eta, & \kappa_0 &= -\frac{f_{ky}}{2} \omega_0^2 \eta^2 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中  $f_{kx} = (4\pi f_c / c) x_k$ ， $f_{ky} = (4\pi f_c / c) y_k$ 。将  $y(n)$  在  $[\alpha_0, \beta_0]$  处进行一阶泰勒展开，式(4)可近似为

$$y(n) \approx s(n) + m(n) + w(n) \quad (6)$$

其中  $s(n)$  表示需要估计的 LFM 信号， $m(n)$  表示用 LFM 信号来拟合四次多项式相位信号造成的模型失配误差。

$$\left. \begin{aligned} s(n) &= a \exp \left[ -j \left( \alpha_0 n T_r + \beta_0 n^2 T_r^2 \right) \right] \\ m(n) &= -aj \left( \gamma_0 n^3 T_r^3 + \kappa_0 n^4 T_r^4 \right) \\ &\quad \cdot \exp \left[ -j \left( \alpha_0 n T_r + \beta_0 n^2 T_r^2 \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

设  $\mathbf{X} = [\alpha, \beta]^T$  为待估计的频率中心与调频率，根据最大似然估计可知：

$$\hat{\mathbf{X}} = \arg \max_{\mathbf{X}} f(\mathbf{X}) \quad (8)$$

其中

$$f(\mathbf{X}) = \left| \sum_{n=0}^{N-1} y(n) \exp \left( j \left( \alpha n T_r + \beta n^2 T_r^2 \right) \right) \right|^2 \quad (9)$$

将式(6)带入式(9)， $f(\mathbf{X})$  可进一步表示为

$$\begin{aligned} f(\mathbf{X}) &\approx f_N(\mathbf{X}) + \delta f_N(\mathbf{X}) \\ &= g_N(\mathbf{X}) g_N^*(\mathbf{X}) + g_N(\mathbf{X}) \delta g_N^*(\mathbf{X}) \\ &\quad + g_N^*(\mathbf{X}) \delta g_N(\mathbf{X}) \end{aligned} \quad (10)$$

其中  $f_N(\mathbf{X}) = g_N(\mathbf{X})g_N^*(\mathbf{X})$  对应为信号分量,  $\delta f_N(\mathbf{X}) = g_N(\mathbf{X})\delta g_N^*(\mathbf{X}) + g_N^*(\mathbf{X})\delta g_N(\mathbf{X})$  对应为扰动分量。将式(8)展开, 可得  $g_N(\mathbf{X})$  与  $\delta g_N(\mathbf{X})$  定义为

$$\left. \begin{aligned} g_N(\mathbf{X}) &= \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \exp(j(\alpha n T_r + \beta n^2 T_r^2)) \\ \delta g_N(\mathbf{X}) &= \sum_{n=0}^{N-1} (m(n) + w(n)) \exp(j(\alpha n T_r + \beta n^2 T_r^2)) \end{aligned} \right\} (11)$$

根据一阶扰动理论<sup>[11]</sup>, 可得  $\mathbf{X}_0$  的估计结果为

$$\hat{\mathbf{X}}_0 = \mathbf{X}_0 + \delta \mathbf{X} \quad (12)$$

其中  $\delta \mathbf{X}$  表示相对于理论值  $\mathbf{X}_0 = [\alpha_0, \beta_0]^T$  的误差, 具体可表示为

$$\delta \mathbf{X} = [\delta \alpha_0, \delta \beta_0]^T = - \left[ \frac{\partial^2 f_N(\mathbf{X}_0)}{\partial \mathbf{X}^2} \right]^{-1} \frac{\partial \delta f_N(\mathbf{X}_0)}{\partial \mathbf{X}} \quad (13)$$

其中

$$\frac{\partial^2 f_N(\mathbf{X}_0)}{\partial \mathbf{X}^2} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f_N(\mathbf{X}_0)}{\partial \alpha^2} & \frac{\partial^2 f_N(\mathbf{X}_0)}{\partial \alpha \partial \beta} \\ \frac{\partial^2 f_N(\mathbf{X}_0)}{\partial \alpha \partial \beta} & \frac{\partial^2 f_N(\mathbf{X}_0)}{\partial \beta^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & C \\ C & B \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\frac{\partial^2 f_N(\mathbf{X}_0)}{\partial \mathbf{X}} = \left[ \frac{\partial \delta f_N(\mathbf{X}_0)}{\partial \alpha}, \frac{\partial \delta f_N(\mathbf{X}_0)}{\partial \beta} \right]^T = [U, V]^T \quad (15)$$

通过简单计算, 并只保留各项中  $N$  的最高次项系数, 符号  $A, B, C, U, V$  可表示为

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{\partial^2 f_N(\mathbf{X}_0)}{\partial \alpha^2} \approx -\frac{1}{6} |a|^2 N^4 T_r^2 \\ B &= \frac{\partial^2 f_N(\mathbf{X}_0)}{\partial \beta^2} \approx -\frac{8}{45} |a|^2 N^6 T_r^4 \\ C &= \frac{\partial^2 f_N(\mathbf{X}_0)}{\partial \alpha \partial \beta} \approx -\frac{1}{6} |a|^2 N^5 T_r^3 \\ U &= \frac{\partial \delta f_N(\mathbf{X}_0)}{\partial \alpha} \approx |a|^2 N^6 T_r^4 \left[ \frac{3}{20} \gamma_0 + |a|^2 N^7 T_r^5 \frac{2}{15} \kappa_0 + u_w \right] \\ V &= \frac{\partial \delta f_N(\mathbf{X}_0)}{\partial \beta} \approx |a|^2 N^7 T_r^5 \left[ \frac{1}{6} \gamma_0 + |a|^2 N^8 T_r^6 \frac{16}{105} \kappa_0 + v_w T_r^2 \right] \end{aligned} \right\} (16)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} u_w &= 2 \operatorname{Re} \left\{ j N a T_r \sum_{n=0}^{N-1} \left( n - \frac{N}{2} \right) w^*(n) \cdot \exp(j(\alpha n T_r + \beta n^2 T_r^2)) \right\} \\ v_w &= 2 \operatorname{Re} \left\{ j N a^* T_r^2 \sum_{n=0}^{N-1} \left( n^2 - \frac{N^2}{3} \right) w(n) \cdot \exp(j(\alpha n T_r + \beta n^2 T_r^2)) \right\} \end{aligned} \right\} (18)$$

将式(16)、式(17)代入式(13), 可得  $\alpha_0$  与  $\beta_0$  的估计误差为

$$\left. \begin{aligned} \delta \alpha_0 &= \frac{CV - BU}{AB - C^2} \\ &= -\frac{21}{35} N^2 T_r^2 \gamma_0 - \frac{32}{35} N^3 T_r^3 \kappa_0 + \delta \alpha_w \\ \delta \beta_0 &= \frac{CU - AV}{AB - C^2} = \frac{3}{2} N T_r \gamma_0 + \frac{12}{7} N^2 T_r^2 \kappa_0 + \delta \beta_w \end{aligned} \right\} (19)$$

其中  $\delta \alpha_w, \delta \beta_w$  表示由于噪声引起的估计误差, 其大小为

$$\delta \alpha_w = \frac{Cv_w - Bu_w}{AB - C^2}, \quad \delta \beta_w = \frac{Cu_w - Av_w}{AB - C^2} \quad (20)$$

将式(16)、式(18)代入式(20), 可得

$$\left. \begin{aligned} E\{\delta \alpha_w \delta \alpha_w^*\} &= \frac{\delta^2 96}{a^2 N^3 T_r^2} \\ E\{\delta \beta_w \delta \beta_w^*\} &= \frac{\delta^2 90}{a^2 N^4 T_r^3} \\ E\{\delta \beta_w \delta \alpha_w^*\} &= E\{\delta \alpha_w \delta \beta_w^*\} = -\frac{\delta^2 90}{a^2 N^4 T_r^3} \end{aligned} \right\} (21)$$

式(19)表明, 当利用 LFM 信号去拟合四次多项式相位调制信号时, 其频率中心与调频率参数估计的方差分别为  $\frac{\delta^2 96}{a^2 N^3 T_r^2}$  与  $\frac{\delta^2 90}{a^2 N^4 T_r^3}$ , 估计偏差分别为

$-\frac{21}{35} N^2 T_r^2 \gamma_0 - \frac{32}{35} N^3 T_r^3 \kappa_0$  与  $\frac{3}{2} N T_r \gamma_0 + \frac{12}{7} N^2 T_r^2 \kappa_0$ 。具体到雷达的 1 维距离像序列信号, 将式(5)代入式(19), 并设总处理时间为  $T = N T_r$ , 可得

$$\left. \begin{aligned} \hat{\alpha}_0 &= f_{kx} \omega_0 + f_{ky} \omega_0^2 T \left( \frac{3}{5} \eta T + \frac{32}{70} \eta^2 T^2 \right) + \delta \alpha_w \\ \hat{\beta}_0 &= \left( f_{kx} \omega_0 \eta - \frac{1}{2} f_{ky} \omega_0^2 \right) - f_{ky} \omega_0^2 \cdot \left( \frac{3}{2} \eta T + \frac{6}{7} \eta^2 T^2 \right) + \delta \beta_w \end{aligned} \right\} (22)$$

式(22)表明, 当利用 LFM 信号对匀加速转动目标回波信号进行拟合时, 估计所得频率中心与调频率参数与回波信号相位中的一次及二次项系数存在偏差。偏差大小是  $\eta T$  的二次多项式函数, 且与  $f_{ky} \omega_0^2$  成正比。

### 3 匀加速转动目标转动参数联合估计

根据式(22), 假设从距离像序列中得到第  $k$  个散射中心对应的频率中心与调频率估计值为

$$\left. \begin{aligned} \hat{\alpha}_k &= f_{kx} \omega_0 + f_{ky} \omega_0^2 \left( \frac{3}{5} \eta T^2 + \frac{16}{35} \eta^2 T^3 \right) \\ &+ \delta \alpha_k = \alpha_k + \Delta \alpha_k + \delta \alpha_k \\ \hat{\beta}_k &= f_{kx} \omega_0 \eta - f_{ky} \omega_0^2 \left( \frac{1}{2} + \frac{3}{2} \eta T + \frac{6}{7} \eta^2 T^2 \right) \\ &+ \delta \beta_k = \beta_k + \Delta \beta_k + \delta \beta_k \end{aligned} \right\} (23)$$

其中  $\alpha_k = f_{kx}\omega_0$ ,  $\beta_k = f_{ky}\omega_0\eta$ ,  $\Delta\alpha_k = f_{ky}\omega_0^2\left(\frac{3}{5}\eta T^2 + \frac{16}{35}\eta^2 T^3\right)$ ,  $\Delta\beta_k = -f_{ky}\omega_0^2\left(\frac{1}{2} + \frac{3}{2}\eta T + \frac{6}{7}\eta^2 T^2\right)$ 。考虑到  $\beta_k = \eta\alpha_k$ ,  $\hat{\beta}_k$  可进一步表示为

$$\hat{\beta}_k = \eta\hat{\alpha}_k - f_{ky}\omega_0^2\left(\frac{1}{2} + \frac{3}{2}\eta T + \frac{102}{70}\eta^2 T^2 + \frac{32}{70}\eta^3 T^3\right) + w_{k\beta\alpha} \quad (24)$$

其中  $w_{k\beta\alpha} = \delta\beta_k - \eta\delta\alpha_k$ 。

从距离像序列中可得到散射中心所在位置单元的估计  $r_k$ , 散射中心相对于旋转中心的距离  $y_k$  可表示为  $y_k = r_k - y_c$ , 其中  $y_c$  表示旋转中心的坐标, 为未知量。将  $f_{ky} = (4\pi f_c/c)y_k$  代入式(24), 可得

$$\hat{\beta}_k = \eta\hat{\alpha}_k - K_{w\eta}(r_k - y_c) + w_{k\beta\alpha} \quad (25)$$

其中  $K_{w\eta}$  的定义为

$$K_{w\eta} = \frac{4\pi f_c}{c}\omega_0^2\left(\frac{1}{2} + \frac{3}{2}\eta + \frac{102}{70}\eta^2 T^2 + \frac{32}{70}\eta^3 T^3\right) \quad (26)$$

假设从距离像序列中估计出了  $K$  个 LFM 分量, 各分量的幅度、调频率与频率中心分别组成向量  $\mathbf{a} = [\hat{a}_0, \hat{a}_1, \dots, \hat{a}_{K-1}]^T$ ,  $\mathbf{\beta} = [\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_{K-1}]^T$ ,  $\mathbf{\alpha} = [\hat{\alpha}_0, \hat{\alpha}_1, \dots, \hat{\alpha}_{K-1}]^T$ , 各分量所在距离单元对应的距离为  $\mathbf{r} = [r_0, r_1, \dots, r_{K-1}]^T$ 。定义  $\boldsymbol{\theta}_3 = [\eta, K_{w\eta}, K_y]^T$ , 其中  $K_y = K_{w\eta}y_c$ 。根据式(25)可知,  $\mathbf{\beta}$  与  $\mathbf{\alpha}$  的关系为

$$\mathbf{\beta} = \mathbf{H}\boldsymbol{\theta} + \mathbf{w} \quad (27)$$

其中  $\mathbf{H} = [\boldsymbol{\alpha}, -\mathbf{r}, \mathbf{1}_{K-1}]$ ,  $\mathbf{w} = [w_{0\beta\alpha}, w_{1\beta\alpha}, \dots, w_{(K-1)\beta\alpha}]^T$ 。

根据加权最小二乘估计, 可得式(27)中  $\boldsymbol{\theta}$  的估计结果为

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W} \boldsymbol{\beta} \quad (28)$$

其中

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \delta_{0\eta}^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \delta_{1\eta}^2 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \delta_{(K-1)\eta}^2 \end{bmatrix}^{-1} \quad (29)$$

$$\delta_{k\eta}^2 = E[w_{k\beta\alpha} w_{k\beta\alpha}^*] = E[(\delta\beta_w - \eta\delta\alpha_w)(\delta\beta_w - \eta\delta\alpha_w)^*] \quad (30)$$

将式(21)代入式(30), 可得

$$\delta_{k\eta}^2 = \frac{6\delta_k^2(15 + 30T\eta + 16T^2\eta^2)}{|a_k|^2 NT^4} \quad (31)$$

对同一批数据而言, 可以认为对每一散射中心而言其对应的噪声方差是一致的, 即  $\delta_k^2 = \delta^2$ , 此时  $\delta_{k\eta}^2$  与  $1/|\hat{a}_k|^2$  成正比。 $\delta_{k\eta}^2$  的统一缩放对式(28)所示估计结果没有影响, 因此式(29)中的  $\delta_{k\eta}^2$  可以用  $1/|\hat{a}_k|^2$  来代替。从而可根据式(28)计算得到  $\hat{\boldsymbol{\theta}} = [\hat{\eta}, \hat{K}_{w\eta}, \hat{K}_y]^T$ 。

在利用式(28)得到  $\hat{\eta}$  与  $\hat{K}_{w\eta}$  的估计后, 根据式(26)可得角速度估计表达式为

$$\hat{\omega}_0 = \sqrt{\frac{c\hat{K}_{w\eta}}{4\pi f_c\left(\frac{1}{2} + \frac{3}{2}\hat{\eta}T + \frac{102}{70}\hat{\eta}^2 T^2 + \frac{32}{70}\hat{\eta}^3 T^3\right)}} \quad (32)$$

根据上述分析, 可得匀加速转动目标转动参数估计步骤如下:

步骤 1 对距离像序列进行求和, 提取能量较强的距离单元;

步骤 2 在强距离单元中提取 LFM 信号分量, 得到  $K$  个分量对应的幅度、频率中心、调频率参数及所在距离单元, 形成  $\mathbf{a} = [\hat{a}_0, \hat{a}_1, \dots, \hat{a}_{K-1}]^T$ ,  $\mathbf{\beta} = [\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_{K-1}]^T$ ,  $\mathbf{\alpha} = [\hat{\alpha}_0, \hat{\alpha}_1, \dots, \hat{\alpha}_{K-1}]^T$ ,  $\mathbf{r} = [r_0, r_1, \dots, r_{K-1}]^T$ ;

步骤 3 根据式(28)计算得到  $\hat{\eta}$ ,  $\hat{K}_{w\eta}$ ; 根据式(32)得到  $\hat{\omega}_0$ ;

设距离像序列包含  $N$  个采样时刻、 $M$  个距离单元, 可知步骤 1 主要对应了  $M \times N$  个加法运算。步骤 2 估计  $K$  个 LFM 分量, 本文中采用文献[12]所提多分量 LFM 信号参数估计方法, 提取一个 LFM 信号的运算量级为  $O(N \log_2 N)$ , 估计  $K$  个 LFM 分量对应计算量为  $O(KN \log_2 N)$ ; 步骤 3 的运算量主要集中在式(28)的求解, 其运算量级为  $O(K^2)$ 。由于在参数估计过程中仅提取信号能量较强的散射中心, 因此  $K$  会远小于  $N$ , 整个算法运算量可近似为  $O(KN \log_2 N)$ 。

在得到  $\hat{\eta}$  和  $\hat{\omega}_0$  的基础上, 可基于  $T + \hat{\eta}T^2$  函数对回波进行重采样, 从而使得重采样信号等效为匀速转动模型, 进一步可利用传统 RD 成像算法得到聚焦的 ISAR 像, 重采样的具体算法可参考文献[1]。根据  $\hat{\omega}_0$ ,  $\hat{\eta}$  估计结果可计算出成像时间段对应的角度:

$$\Delta\theta = \hat{\omega}_0(T + \eta T^2) \quad (33)$$

从而可得重采样后所得 ISAR 像的横向分辨率为  $\lambda/2\Delta\theta$ , 实现重采样图像的横向定标。

## 4 仿真分析

### 4.1 利用 LFM 信号对匀加速转动目标回波拟合的仿真

设雷达中心频率为 10 GHz, 带宽 500 MHz, 等效散射中心的纵、横坐标均为 5 m, 转动角速度为  $3^\circ/\text{s}$ , 成像时间为 1 s。总体信噪比为 0 dB,  $\eta$  在  $[-0.4, 0.5]$  区间遍历, 对回波信号进行 LFM 分解,

得到参数估计性能曲线如图1所示。图1(a)中“一次系数”表示根据式(5)计算所得一次相位系数，“估计理论值”表示根据式(22)计算所得的频率中心，“估计均值”表示100次蒙特卡罗仿真估计所得的频率中心均值；图1(b)为调频率参数对应结果。从图可以看出，“估计理论值”与“估计均值”重合，验证了本文2.2小节推导的正确性：对匀加速转动目标回波进行LFM分解时，由于高次系数的影响，其频率中心与调频率参数估计结果与回波信号对应的一次系数及二次系数之间存在偏差。

4.2 匀加速转动目标参数联合估计仿真

设目标包含9个散射中心，9个散射中心排成横向、纵向均间隔均为3 m的3×3的矩阵，各散射中心系数均为1。雷达中心频率为9.25 GHz，带宽为500 MHz，观测时间为1 s，目标转动参数为 $\omega_0 = 4^\circ/s$ ，

$\eta = 0.25$ 。产生目标回波信号后加入噪声到信噪比等于0 dB，直接利用RD算法进行成像所得结果如图2(a)所示。利用LFM信号提取各强距离单元散射中心，根据式(28)和式(32)计算得到 $\hat{\eta} = 0.245$ ， $\hat{\omega}_0 = 0.0689 \text{ rad/s}$ 。根据 $\hat{\eta}_0$ 对回波进行重采样，利用RD算法对重采样信号进行成像得到结果如图2(b)所示，从图可以看出，所得结果聚焦良好。根据 $\hat{\omega}_0$ 和 $\hat{\eta}$ 可得成像时间内对应转角为 $4.91^\circ$ ，根据转角得到定标结果如图2(b)所示。根据图2(b)可知横向定标结果与实际设定值基本一致。

在不同信噪比条件下进行100次蒙特卡罗仿真，得到 $\eta$ 和 $\omega_0$ 的估计结果如图3所示。从图3(a)、图3(b)可以看出， $\eta$ 和 $\omega_0$ 的估计值与理论值非常接近，可认为是无偏的。从图3(c)可以看出 $\eta$ 和 $\omega_0$ 的估计精度随着信噪比的增加而提高。

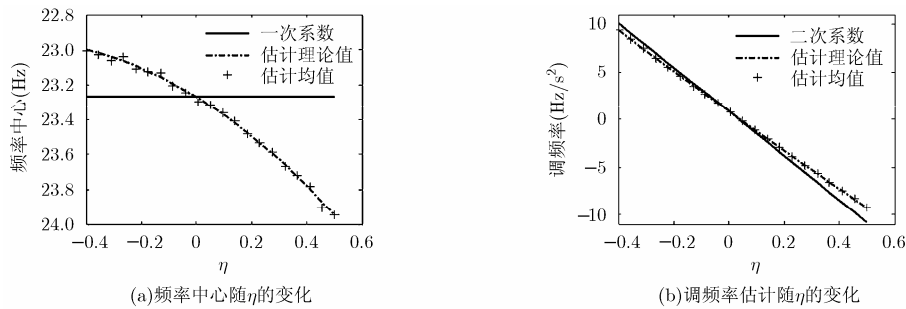


图1 匀加速转动目标LFM分解的性能分析

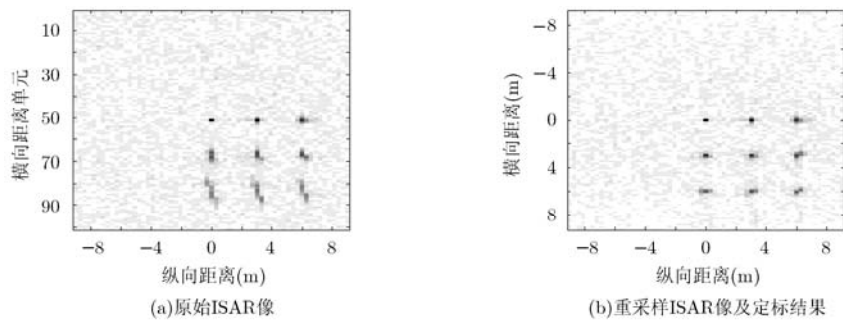


图2 点散射模型匀加速转动参数估计

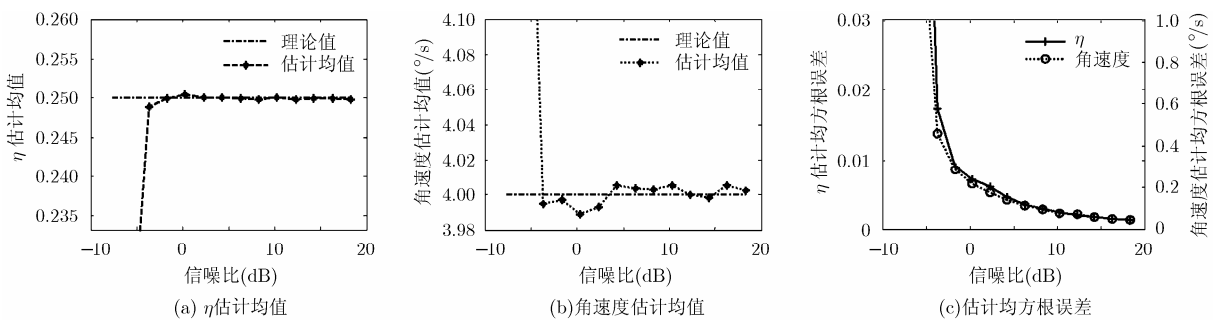


图3 点散射模型转动参数估计性能

### 4.3 实测数据成像结果分析

所用雷达为频率步进雷达, 雷达频率范围为34.000~34.512 GHz, 频率步进间隔为2 MHz, 一帧对应256个频点, 脉冲重复频率为50 kHz, 对应帧重频为195.3 Hz。目标为一放置在转台上的四面体角反射器阵列, 它的底面是一个边长为2.5 m的等边三角形, 顶点到底面距离1.5 m, 在4个顶点各有一个角反射器, 如图4(a)所示。试验时调整转台转速使其转动角速度发生忽快忽慢的变化, 对其中一段数据进行2维成像所得结果如图4(b)所示, 在图像中可以看到4个角反射器对应的4个点, 但成像结果模糊。基于联合估计算法得到的估计结果为 $\hat{\eta} = -0.4702$ ,

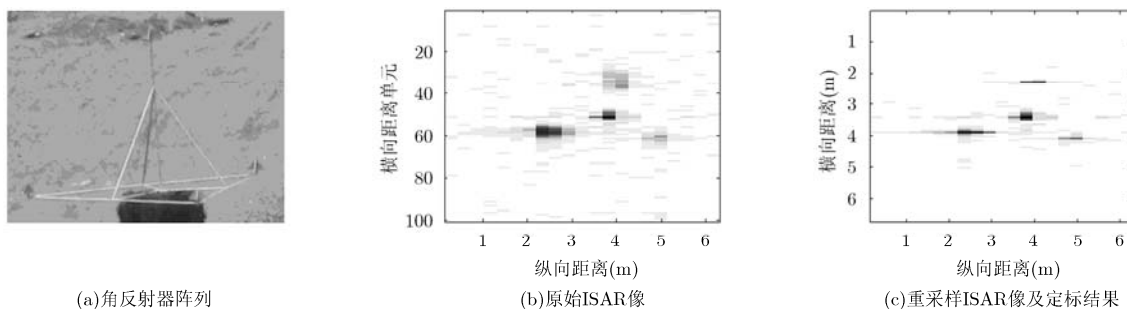


图4 角反射器阵列匀加速转动参数估计

## 5 结束语

根据本文分析可得到如下结论: (1)利用 LFM 信号对匀加速转动目标距离像序列信号进行拟合时, 由于三次、四次项相位系数的影响, 所得频率中心与调频率参数估计与信号相位中对应的一次项及二次项相位系数存在偏差。(2)通过推导 LFM 信号对匀加速转动目标回波进行拟合所得频率中心参数、调频率参数与目标转动参数的关系, 提出了一种匀加速转动目标转动参数联合估计方法。理论推导及仿真结果表明, 本文所提算法是无偏的。需要指出的是, 本文推导是在匀加速转动模型的基础上进行的, 而实际上当观测时间较长时目标转动模型与匀加速转动模型之间存在失配误差, 失配误差对转动角速度参数估计性能的影响有待在后续工作中进一步研究。

### 参考文献

[1] 韩兴斌, 胡卫东, 郁文贤, 等. 一种非均匀转动目标的 ISAR 自聚焦算法[J]. 信号处理, 2006, 23(6): 844-848.  
Han Xing-bin, Hu Wei-dong, Yu Wen-xian, et al. An ISAR autofocus algorithm for the target with non-uniform Rotation[J]. *Signal Processing*, 2006, 23(6): 844-848.

[2] 贺思三, 赵会宁, 冯存前, 等. 基于奇异值分解的复杂转动目标成像[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(6): 1199-1205.

$\hat{\omega}_0 = 9.8678^\circ/\text{s}$ ; 基于 $\hat{\eta}$ 对信号进行重采样后所得 ISAR 像及定标结果如图4(c)所示, 其外围3个散射中心峰值之间的距离为[2.48 m, 2.39 m, 2.40 m], 与它们之间的实际距离非常接近。此部分所用数据与文献[10]所用数据一致, 文献[10]所得3个散射中心之间的距离为[2.38 m, 2.34 m, 2.23 m], 可见本文所提算法估计精度更高。这是由于文献[10]采用的是一种分步估计的转动参数估计算法: 先估计出转动角加速度相对于角速度的比值 $\eta$ , 然后再估计出转动角速度 $\omega_0$ 。在上述过程中 $\eta$ 估计误差所导致的二阶及高阶相位残差将影响 $\omega_0$ 的估计性能, 使其估计误差增大。

He Si-san, Zhao Hui-ning, Feng Cun-qian, et al. Imaging for complex rotation target based on singular value decomposition[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(6): 1199-1205.

[3] 李宁, 汪玲, 张弓. 多基地 ISAR 舰船侧视及俯视高分辨率成像方法[J]. 雷达学报, 2012, 1(2): 163-170.  
Li Ning, Wang Ling, and Zhang Gong. High-resolution side-view and top-view imaging method of ship targets using multistatic ISAR[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(2): 163-170.

[4] 付耀文, 胡杰民, 黎湘. 基于调频傅里叶变换的匀加速转动目标 ISAR 成像[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(12): 2608-2612.  
Fu Yao-wen, Hu Jie-min, and Li Xiang. ISAR imaging of uniformly accelerative rotating targets based on chirp-Fourier transform[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(12): 2608-2612.

[5] 胡杰民, 占荣辉, 牛威, 等. 基于后向投影变换的进动旋转对称目标成像新方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(8): 1847-1852.  
Hu Jie-min, Zhan Rong-hui, Niu Wei, et al. A novel imaging method for precession targets with rotational symmetry based on back projection transform[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(8): 1847-1852.

[6] Martorella M. Novel approach for ISAR image cross-range scaling[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic*

- Systems*, 2008, 44(1): 281-294.
- [7] Huang Ya-jing, Wang Xue-zhi, Li Xiang, *et al.* Target rotation rate estimation via ISAR frame processing[J]. *Electronics Letters*, 2013, 49(6): 424-425.
- [8] 胡杰民, 张军, 占荣辉, 等. 一种基于相位对消的转角估计新方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2012, 34(5): 899-902.  
Hu Jie-ming, Zhang Jun, Zhan Rong-hui, *et al.* Novel method for estimating rotation angle based on phase cancellation[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(5): 899-902.
- [9] Wang Yong and Jiang Yi-cheng. A novel algorithm for estimating the rotation angle in ISAR imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(4): 608-609.
- [10] 贺思三, 龙戈农, 赵会宁, 等. ISAR 成像中非均匀转动目标转动参数估计[J]. *空军工程大学自然科学学报*, 2012, 13(4): 36-40.  
He Si-san, Long Ge-nong, Zhao Hui-ning, *et al.* ISAR imaging and cross scaling for non-uniform rotating targets[J]. *Journal of Air Force Engineering University (Science Edition)*, 2012, 13(4): 36-40.
- [11] Frederic B J and Alexander S. *Perturbation Analysis of Optimization Problems*[M]. USA, Springer, 2000: 198-260.
- [12] 李利, 司锡才, 张雯雯, 等. 改进的多分量 LFM 信号参数估计算法及其快速实现[J]. *系统工程与电子技术*, 2009, 31(11): 2560-2562.  
Li Li, Si Xi-cai, Zhang Wen-wen, *et al.* Improved estimation algorithm of multi-component LFM signal parameters and its fast implementation[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(11): 2560-2562.
- 贺思三: 男, 1981年生, 博士, 讲师, 研究方向为高分辨雷达成像及微多普勒信号处理。  
赵会宁: 女, 1979年生, 硕士, 讲师, 研究方向为高分辨雷达信号处理及电子信息对抗技术。  
张永顺: 男, 1961年生, 博士生导师, 教授, 研究方向为多基地雷达信号处理及电子信息对抗技术。

## 《雷达学报》“太赫兹雷达技术”专题征文通知

太赫兹波是国际科技界公认的一个非常重要的前沿技术领域, 是极具研究和开发价值的新频率资源, 它具有波束宽度窄、系统带宽大和多普勒效应显著等独特优点。太赫兹雷达探测系统融合了微波和红外可见光的优点, 在物体成像、环境监测、医疗诊断、射电天文、安全检查、反恐探测等领域具有重大的科学价值和广阔的应用前景, 特别对于高分辨雷达成像有着巨大的发展潜力。

尽管太赫兹雷达探测系统还处于理论与验证阶段, 但是其重要的科学价值和广泛的应用前景已经引起了学术界的普遍关注和极大兴趣。为及时总结太赫兹雷达研究与应用的最新进展, 《雷达学报》拟在 2015 年上半年出版“太赫兹雷达技术”专题, 专题主编为电子科技大学电子工程学院皮亦鸣教授。

现公开征集专题论文, 诚挚欢迎国内外专家、学者和科研人员积极投稿, 具体征文事项如下。

### 一. 征文方向

1. 太赫兹雷达探测系统理论
2. 太赫兹雷达目标探测技术
3. 太赫兹雷达高分辨成像技术
4. 太赫兹雷达系统应用

### 二. 征文要求

1. 来稿必须进行脱密处理, 发表前应提交保密审查表(盖章)。
2. 观点明确, 论据充分, 引证准确; 尚未公开发表; 中英文皆可。
3. 题目、作者姓名及单位、摘要、关键词应给出中英文; 单位和物理量使用符合国家标准。
4. 稿件请采用 Office Word 97~2003 版本通栏排版。
5. 投稿请在《雷达学报》网站(<http://radars.ie.ac.cn>)“作者投/查稿”处注册、上传, 在作者留言中注明“太赫兹雷达技术”专题论文。
6. 投稿截止日期: 2014 年 11 月 1 日。
7. 联系人: 贾守新、高华, 电话: 010-58887062, 邮箱: radars@mail.ie.ac.cn。