

一种估计 ISAR 成像转角的新方法

王 勇 姜义成

(哈尔滨工业大学电子工程技术研究所 哈尔滨 150001)

摘 要: ISAR 成像中的转角估计是进行正确成像的先决条件。该文从分析目标回波信号入手提出了一种新的转角估计方法,对目标转动时不同距离单元回波数据近似为多分量三次相位信号,通过理论推导,得出每个信号分量的三次相位系数与一次相位系数成正比的结论,其比例系数为目标转动的角速度平方,然后采用最大似然方法估计三次相位信号参数,进而得到总转角。外场实测数据结果验证了该文方法的有效性。

关键词: ISAR 成像; 转角估计; 最大似然

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)03-0521-03

A New Method for Estimating the Rotation Angle of ISAR Image

Wang Yong Jiang Yi-cheng

(Research Institute of Electronic Engineering Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The estimation of rotation angle is the precondition for ISAR imaging. In this passage, a new method based on the analysis of the echo signals is proposed. The signals in different range bin are approximated as the multi-component third-order polynomial signals, and the proportion of third-order phase coefficient to first-order phase coefficient is constant just equal to the square of the rotation rate. Then the parameters of the third-order polynomial signal are estimated by the maximum likelihood method. The results of real data show the validity of the method proposed.

Key words: ISAR imaging; Estimation of rotation angle; Maximum Likelihood(ML)

1 引言

逆合成孔径雷达(ISAR)成像的基本方法是距离-多普勒法^[1],纵向距离分辨率依靠宽带信号,横向分辨率依靠回波的多普勒频率。ISAR成像首先对目标回波进行运动补偿,使之成为以“自聚焦点”为轴心的转台目标,然后对每个距离单元的数据作频谱分析,得到散射点的横向分布。采用这种成像方法需要预先知道目标相对于雷达视线的总转角 $\Delta\theta$,这样才能完成对目标的横向定标,否则横向尺寸仅为多普勒频率信息,无法反映目标的横向维大小。

目前估计转角的方法很少,主要包括轨迹拟合法^[2],利用雷达对目标跟踪的窄带数据,计算出目标的飞行轨迹,然后得到运动目标相对雷达的转角变化,但由于窄带数据的误差比较大,导致这种方法的估计精度非常低;特显点跟踪法^[3],分别跟踪目标上3个不同的孤立散射点,但在实际情况下很难找到高质量的孤立点;图像熵法^[4]采用评价函数来优化未知的转角参数,当图像评价函数获得极值,即图像最聚焦时,得到相应的转角,但这种方法需要在解空间内反复搜索,计算量非常大。文献[5]提出一种基于Radon-ambiguity变换,在不同纵向距离单元信号的模糊平面上检测线性调频

信号的调制率,进而估计出转角的方法,但计算信号的模糊函数和Radon变换实现起来比较困难,计算量很大。

本文从回波信号的精确模型出发,对目标转动时不同距离单元回波数据近似为多分量三次相位信号,对于小角度成像,这种近似程度是相当高的。通过理论推导,得出每个信号分量的三次相位系数与一次相位系数成正比的结论,其比例系数恰好是目标转动的角速度平方。所以,对每个距离单元回波数据计算其最强信号分量的三次相位系数和一次相位系数,得到目标转动的角速度,进而通过已知的积累时间,得到目标相对雷达的总转角。对于三次相位信号的参数估计,本文提出了一种基于最大似然函数的方法,只估计三次相位系数和一次相位系数即可,很容易实现。下面,第2节进行理论分析,第3节应用最大似然方法进行转角估计,第4节通过实测数据说明新方法的性能,最后为结束语。

2 回波信号分析

如图1所示,分析目标的回波信号特点,这里假定回波已经过运动补偿。目标以均匀角速度 ω 旋转,雷达与目标旋转中心之间的距离为 r_a ,在起始时刻($t=0$)目标上某一点(r_0, θ_0)到雷达的距离为

$$r = [r_0^2 + r_a^2 + 2r_0r_a \sin(\theta_0 + \omega t)]^{1/2} \quad (1)$$

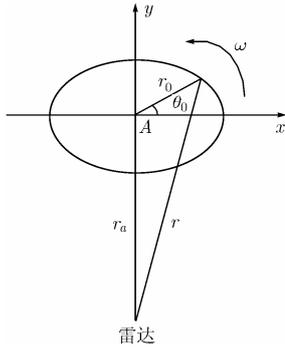


图1 ISAR 成像机理

在远场条件下:

$$\left. \begin{aligned} r &\approx r_a + x_0 \sin(\omega t) + y_0 \cos(\omega t) \\ x_0 &= r_0 \cos \theta_0 \\ y_0 &= r_0 \sin \theta_0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

于是, 回波信号的多普勒频率为

$$f = \frac{2}{\lambda} \frac{dr}{dt} = \frac{2x_0\omega}{\lambda} \cos \omega t - \frac{2y_0\omega}{\lambda} \sin \omega t \quad (3)$$

其中 λ 为雷达信号波长。

分别计算式(3)的一阶导数和二阶导数, 得到回波信号的二次相位系数和三次相位系数为

$$\beta = \frac{df}{dt} = -\frac{2x_0\omega^2}{\lambda} \sin \omega t - \frac{2y_0\omega^2}{\lambda} \cos \omega t \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{d\beta}{dt} = -\frac{2x_0\omega^3}{\lambda} \cos \omega t + \frac{2y_0\omega^3}{\lambda} \sin \omega t \quad (5)$$

由式(3), 式(4)得到

$$\frac{f^2}{(4\omega^2/\lambda^2)(x_0^2 + y_0^2)} + \frac{\beta^2}{(4\omega^4/\lambda^2)(x_0^2 + y_0^2)} = 1 \quad (6)$$

可见, 对于某一散射点 (x_0, y_0) , 其回波信号的初始频率与调频率成椭圆关系, 对于不同的散射点, 椭圆的大小不同, 无法通过椭圆的几何关系得到 ω 。

由式(3)、式(5)得到

$$\gamma = -\omega^2 f \quad (7)$$

由式(7)可见, 回波信号的三次相位系数与初始频率呈简单的线性关系, 而且与散射点的位置无关, 所以可通过对不同距离单元回波数据进行参数估计, 而且只估计出其中一个信号分量的参数即可得到 ω 的估计值。

3 基于最大似然方法的转角估计

对于三次相位信号参数估计, 目前常用的方法包括PT(Polynomial Transform)变换法^[6]和最大似然法。其中PT变换是从最高项系数开始估计, 通过逐步降低信号阶次得到所有相位系数, 在这个过程中不可避免会出现误差传播特性, 尤其是对最高项系数估计不准, 会直接影响后面参数的估计。最大似然法^[7]是基于匹配原理, 通过多维搜索的方法

进行参数估计, 它的性能可以达到克拉美-罗限。本文针对待分析信号的特点, 只需进行二维搜索, 然后通过解二阶调频得到信号的相位系数。

对于单分量三次相位信号

$$s(t) = A e^{j(f t + (1/2)\beta t^2 + (1/6)\gamma t^3)} \quad (8)$$

其二阶瞬时相关函数

$$\begin{aligned} K_1(t, \tau_1) &= s(t + (\tau_1/2))s^*(t - (\tau_1/2)) \\ &= A^2 \exp[j(f\tau_1 + \beta t\tau_1 + (1/2)\gamma t^2\tau_1 + (1/4)\tau_1^3)] \quad (9) \end{aligned}$$

其中(*)代表信号的复共轭。式(9)表明 $K_1(t, \tau_1)$ 对 t 是二阶的, 对 τ_1 是三阶的。但进一步求三阶瞬时相关函数得

$$\begin{aligned} K_2(t, \tau_2, \tau_1) &= K_1(t + (\tau_2/2), \tau_1)K_1^*(t - (\tau_2/2), \tau_1) \\ &= A^4 \exp[j(\beta\tau_1\tau_2 + (1/2)\gamma t\tau_1\tau_2)] \quad (10) \end{aligned}$$

从式(10)可求出时变的双谱函数, 但当 τ_1 为某定值时, 相当于三阶瞬时相关函数的切片, 则在任意时刻 t , $K_2(t, \tau_2, \tau_1)$ 均为 τ_2 的复正弦函数, 由此可求出 β 和 γ 。

对于多分量情况, 可采用解二阶调频的方法来实现参数估计, 假设雷达目标某一距离单元的回波信号为

$$s(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \sigma_i e^{j(f_i t + (1/2)\beta_i t^2 + (1/2)\gamma_i t^3)} \quad (11)$$

其中 σ_i 为各散射点的反射强度, N 为散射点个数。

由以上分析可知, 只需估计式(11)中能量最大信号分量的参数 (f, γ) 即可, 得 ω 的估值为

$$\hat{\omega} = \sqrt{|\gamma/(6f)|} \quad (12)$$

其中最大信号分量的参数 (f, β, γ) 由下式得到

$$\begin{aligned} (f, \beta, \gamma) &= \arg \max_{f, \beta, \gamma} \int |s(t) \exp(-j((1/6)\gamma t^3 \\ &\quad + (1/2)\beta t^2)) \exp(-j2\pi ft)| dt \quad (13) \end{aligned}$$

实际计算时, 只需令 β 和 γ 在一定范围内变化, 然后采用FFT提高计算效率, 通过峰值搜索首先得到 β 和 γ 的估计值 $(\hat{\beta}, \hat{\gamma})$, 然后对原信号 $s(t)$ 解调频得到 f 的估值

$$\hat{f} = \max_f \left(\text{FFT} \left(s(t) \times e^{-j((1/2)\hat{\beta}t^2 + (1/6)\hat{\gamma}t^3)} \right) \right) \quad (14)$$

实际上, 由于各种复杂因素, 使得单独计算一个距离单元存在较大误差, 所以应该计算多个不同距离单元的 $\hat{\omega}$, 并采用最小二乘拟合, 得到最优的 $\hat{\omega}$ 。由于积累时间 T 事先已知, 所以积累角度 $\Delta\theta = \hat{\omega}T$ 。整个转角估计步骤为

- (1) 回波数据的运动补偿。
- (2) 选择某一距离单元数据, 由式(13)计算出 $(\hat{\beta}, \hat{\gamma})$ 。
- (3) 由式(14)计算 \hat{f} , 再由式(12)计算出 $\hat{\omega}$ 。
- (4) 计算多个距离单元, 并根据最优准则得到最优的 $\hat{\omega}$, 进而得到转角 $\Delta\theta = \hat{\omega}T$ 。

4 外场实测数据处理结果

选取一段外场实测数据, 目标为雅克-42 飞机, 其平面

图如图 2 所示。图 3(a)为应用距离-多普勒算法得到的 ISAR 像, 没有经过转角估计来进行横向定标, 此时所得 ISAR 像与目标的真实形状有很大出入。图 4 为采用本文方法估计 $\hat{\omega}$ 的曲线, 其中直线为拟合后的结果 $\hat{\omega} = 0.0236(\text{rad/s})$, 进而得估计转角为 $\Delta\theta = 3.46^\circ$ 。根据估计的 $\Delta\theta$ 进行横向定标后的 ISAR 像如图 3(b)所示, 可见此时的 ISAR 像与目标的真实形状基本吻合, 这说明了本文方法的有效性。

由图 4 可见, 对于某一距离单元的估计结果误差往往很大, 这除了计算误差外, 还由于目标上的非理想散射点效应以及各种干扰等许多复杂因素所导致, 因此, 必须计算多个距离单元拟合的结果才是有效的。



图 2 雅克-42 飞机平面图

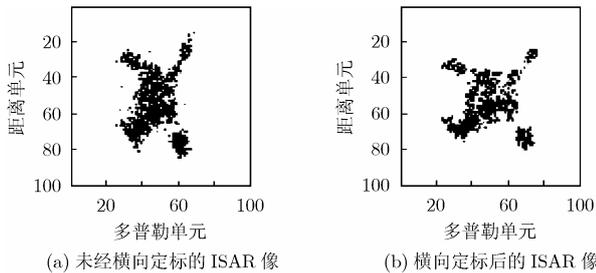


图 3 雅克-42 飞机成像结果

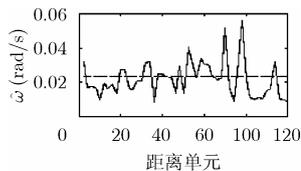


图 4 $\hat{\omega}$ 值估计曲线(直线为拟合结果)

5 结束语

ISAR 成像中的转角估计是进行正确成像的先决条件。文中从分析目标回波信号入手提出了一种新的转角估计方法, 对目标转动时不同距离单元回波数据近似为多分量三次相位信号, 通过理论推导, 得出每个信号分量的三次相位系数与一次相位系数成正比的结论, 其比例系数恰好是目标转动的角速度平方, 然后采用最大似然法估计三次相位信号参数。与传统的方法相比, 文中方法具有更高的精度, 而且是直接从宽带回波信号直接计算转角, 不需要窄带跟踪信号, 同时也不必隔离孤立散射点, 具有很好的稳健性。外场实测数据结果验证了本文方法的有效性。

参考文献

- [1] Chen C C and Andrews H C. Targets-motion-induced radar imaging. *IEEE Trans. on AES*, 1980, 16(1): 2-14.
- [2] 王国林. 逆合成孔径雷达运动补偿和系统补偿的研究. [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1996, 1.
- [3] Werness S, et al. Moving target imaging algorithm for SAR data. *IEEE Trans. on AES*, 1990, 26(1): 57-67.
- [4] Benjamin C and Ugarte Alberto. Refinement of range-doppler imagery by feedback control. *SPIE Automatic Object Recognition III*, 1993, 1960: 36-46.
- [5] 李玺, 顾红, 刘国岁. ISAR 成像中转角估计的新方法. *电子学报*, 2000, 28(6): 44-47.
Li Xi, Gu Hong, and Liu Guo-sui. A method for estimating the rotation angle of the ISAR image. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(6): 44-47.
- [6] Peleg S and Porat B. The discrete polynomial-phase transform[J]. *IEEE Trans. on SP*, 1995, 43(8): 1901-1914.
- [7] Peleg S and Porat B. The Cramer-Rao lower bound for signals with constant amplitude and polynomial phase[J]. *IEEE Trans. on SP*, 1991, 39(3): 749-752.

王 勇: 男, 1979 年生, 博士生, 研究方向为非平稳信号的时频分析及其在合成孔径雷达成像中的应用。

姜义成: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号处理、目标识别技术等。