

高速旋转目标旋转速度估计方法

胡杰民 付耀文 胡志刚 黎湘
(国防科技大学空间电子信息技术研究所 长沙 410073)

摘要: 旋转速度估计是高速旋转目标成像的基础, 论文提出一种新的旋转速度估计方法, 该算法基于旋转目标在距离时间域所具有的特性, 在利用傅里叶变换粗略估计旋转速度的基础上, 利用计算图像熵的方法在特定范围内对角度估计值进行调整, 以获得很高的估计精度。该方法直接计算整幅图像的熵值, 从而不依赖单个的散射点。使用仿真数据演示了算法的性能, 证明了算法的有效性。

关键词: 逆合成孔径雷达; 转动目标; 旋转速度估计; 离散傅里叶变换

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)09-2069-05

Spinning-Rate Estimate of Rapidly Spinning Target

Hu Jie-min Fu Yao-wen Hu Zhi-gang Li Xiang

(Institute of Space Electronics Information Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Spinning-rate estimate is the base of rapidly spinning target imaging. A new spinning-rate estimating method is proposed in this paper. Base on the characteristic of rapidly spinning target in the range-time image, a primary estimate using Fourier transform is put forward. And it is refined in specified range by calculating the entropy of the whole image, which is independent of single scatter point. Simulations with synthetic data demonstrate the performance of the new method. The results confirm its effectiveness.

Key words: ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar); Spinning target; Estimation of spinning-rate; Discrete Fourier transform

1 引言

雷达目标的二维 ISAR 像为目标散射点在雷达扫描平面的投影, 能够反映目标二维等效电磁散射分布和结构特征, 是雷达目标识别的重要途径之一。高速旋转物体普遍存在, 如飞机的引擎、直升机的旋翼、导弹的自旋等。对于高速旋转目标, 在成像时间内, 回波信号不能近似为线性变化, 因此不满足传统成像方法的成像条件。

文献[1-7]分别对运动补偿方法进行了研究; 文献[8]研究了目标非均匀转动时的转动参数估计, 首先估计出两个特显点在两个不同时间的距离和径向速度, 通过这两个参数的估计值来估计目标的运动参数, 从而实现目标的 ISAR 成像; 文献[10]利用自相关技术估计高速旋转目标的旋转周期, 进而得到旋转速度, 这种方法估计出旋转周期和脉冲重复时间是倍数关系, 因而精度受到限制。

本文从线性调频信号的精确模型出发, 推导了高速旋转目标回波相位随时间正弦变化, 然后提出一种新的旋转速度估计方法, 该算法基于旋转目标在距离时间域所具有的特性, 在利用傅里叶变换粗

略估计旋转速度的基础上, 利用计算图像熵的方法在小范围内对旋转速度估计值进行调整, 以获得很高的估计精度。该方法直接计算整幅图像的熵值, 从而不依赖单个的散射点。仿真数据结果证明了算法的稳健性。

2 旋转目标回波建模

如图 1 所示, 设雷达坐标系为 (U, V, W) , 附于目标的坐标系为 (x, y, z) , 为描述目标的转动, 将雷达坐标系平移至与目标坐标系 (x, y, z) 原点重合, 并记为 (X, Y, Z) , 目标质心的平动规律为 $R(t)$, 转动规律为 $\theta(t)$, 设雷达发射载频为 f 的单频信号, 脉冲重复间隔为 T_{PRI} , 目标上任意一点 P 在坐标系 (x, y, z) 的位置记为 $P(x, y, z)$, 其散射强度记为 $\rho(x, y, z)$, t 时刻与雷达相位中心距离记为

$$R_p(t) = R(t) + x \cos \theta(t) - y \sin \theta(t) \quad (1)$$

目标回波信号的相位经过时间变量 t 的二阶近似后, 回波信号变为^[1]

$$u(t) = \exp \left\{ -j4\pi f \frac{R(t)}{c} \right\} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \rho(x, y, z) \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi f}{c} [x \cos \theta(t) - y \sin \theta(t)] \right\} dx dy dz, \quad 2R_p(t)/c \leq t \leq T_{PRI} + 2R_p(t)/c \quad (2)$$

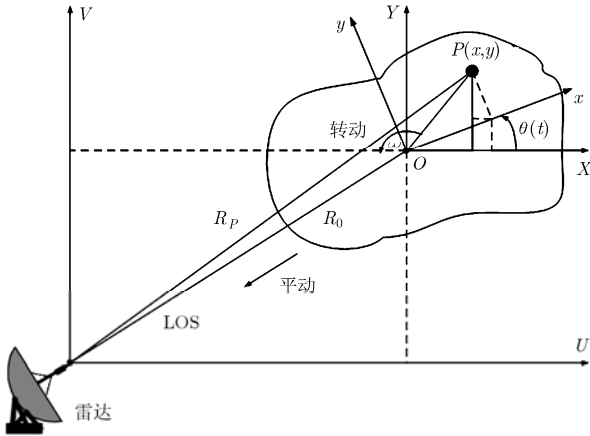


图1 雷达成像几何示意图

假设目标由 N 个散射点组成, 第 n 个散射点的坐标为 (x_n, y_n, z_n) , 散射强度为 δ_n 。ISAR 成像等效为目标散射点为雷达扫描平面 xoy 中的投影, 则式(2)可改写为离散形式:

$$u(t) = \exp\left\{-j4\pi f \frac{R(t)}{c}\right\} \sum_{n=1}^N \delta_n \exp\left\{-j4\pi f \frac{R_n(t)}{c}\right\}, \quad (3)$$

$$2R_p(t)/c \leq t \leq T_{\text{PRI}} + 2R_p(t)/c$$

$$R_n(t) = x_n \cos \theta(t) - y_n \sin \theta(t), \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

关于 ISAR 像刚体平动补偿已有许多文献研究。为研究方便, 假定目标平动已被有效补偿。式(4)简化为

$$u(t, f) = \sum_{n=1}^N \delta_n \exp\left\{-j4\pi f \frac{R_n(t)}{c}\right\} \quad (5)$$

ISAR 成像通过让频率覆盖一定的带宽来获得距离分辨率, 通过让时间覆盖一定的时宽来获得方位分辨率^[10]。假定雷达发射线性调频信号, 起始频率为 f_0 , 带宽为 B , 脉冲周期为 T , 相干脉冲数为 M , 脉冲内的采样点数为 S , 忽略一个脉冲内目标的运动, 则回波改写为

$$u(i, k) = \sum_{n=1}^N \delta_n \exp\left\{-j4\pi\left(f_0 + \frac{kB}{S}\right) \frac{R_n(iT)}{c}\right\}, \quad (6)$$

$$i = 1, 2, \dots, M, \quad k = 1, 2, \dots, S$$

关于频率作傅里叶变换进行距离压缩后结果为

$$H(i, s) = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^S u(i, k) \exp\left\{-\frac{j2\pi ks}{S}\right\}$$

$$= \sum_{n=1}^N A_n \exp\left\{-\frac{j4\pi f_0 R_n(iT)}{c}\right\}$$

$$\cdot \text{sinc}\left\{\frac{2\pi B}{c} \left[\frac{c}{2B} s - R_n(iT)\right]\right\}$$

$$\cdot \exp\left\{\frac{S-1}{S} \frac{j2\pi B}{c} \left[\frac{c}{2B} s - R_n(iT)\right]\right\} \quad (7)$$

再对方位向作离散傅里叶变换即得到 ISAR 像, 这种成像方法必须满足两个条件: (1) 在成像时间内, 目标散射点不发生越距离单元移动(MTRC),

即 $\Delta R_n < c/(2B)$; (2) 在成像时间内, 回波信号相位线性变化, 即

$$R_n(t) = x_n \cos \omega t - y_n \sin \omega t \approx x_n - y_n \omega t \quad (8)$$

实际情况下, 当目标中含有高速旋转部件(如直升机的旋翼, 飞机的引擎, 进动的弹道目标等)时, 雷达的脉冲重复频率很低, 上述条件无法满足, 针对传统成像方法的不足, 文献[10]在基于目标旋转速度正确估计的基础上, 研究了基于广义约旦变换的成像方法取得了较好的效果。但是由于该方法利用自相关技术估计高速旋转目标的旋转周期, 这种方法估计出旋转周期和脉冲重复时间是倍数关系, 因而精度受到限制。下文提出一种新的旋转速度估计方法, 基于旋转目标在距离时间域所具有的特性, 首先通过离散傅里叶变换估计旋转速度初值, 通过补零的方法提高角速度估计初值精度。然后利用计算图像熵的方法在小范围内对角速度估计值进行调整, 以获得高的估计精度。

3 旋转速度估计

当目标存在复杂运动时, 成像会出现模糊, 甚至无法成像。对于高速旋转目标的成像问题, 旋转速度的估计是重点也是难点。电磁散射仿真表明, 高速旋转目标回波多普勒随时间正弦变化性质明显。文献[9]中估计旋转速度的方法必须以目标有特显点为前提, 然而实际情况中目标不一定存在特显点, 因此需要考虑在目标无特显点时对旋转速度进行估计。

3.1 旋转速度初值的估计方法

实验证明, 目标散射点在高分辨距离像中的位置随旋转呈周期性变化, 因此可以通过计算目标散射点位置的周期性变换来估计目标旋转速度, 由式(7)取模:

$$|H(i, s)| = \sum_{n=1}^N A_n \text{sinc}\left\{\frac{2\pi B}{c} \left[\frac{c}{2B} s - R_n(iT)\right]\right\}$$

$$= \sum_{n=1}^N A_n \sigma\left[s - \frac{2BR_n(iT)}{c}\right]$$

$$+ \sum_{n=1}^N A_n \left\{ \text{sinc}\left\{\frac{2\pi B}{c} \left[\frac{c}{2B} s - R_n(iT)\right]\right\} \right.$$

$$\left. - \sigma\left[s - \frac{2BR_n(iT)}{c}\right] \right\} \quad (9)$$

其中 $\sigma(\bullet)$ 为冲击函数, 构造序列 $F_1(i)$:

$$F_1(i) = \sum_{s=1}^N s |H(i, s)| = \sum_{n=1}^N A_n \sum_{s=1}^N s \sigma\left[s - \frac{2BR_n(iT)}{c}\right]$$

$$+ \sum_{n=1}^N A_n \sum_{s=1}^N s \left\{ \text{sinc}\left\{\frac{2\pi B}{c} \left[\frac{c}{2B} s - R_n(iT)\right]\right\} \right.$$

$$\left. - \sigma\left[s - \frac{2BR_n(iT)}{c}\right] \right\} \quad (10)$$

其中第2项为将 $\text{sinc}(\bullet)$ 近似为 $\sigma(\bullet)$ 所带来的误差, 相比于第1项可以忽略, 将式(6)代入, $F_1(i)$ 可以近似为

$$\begin{aligned} F_1(i) &\approx \sum_{n=0}^{N-1} A_n \frac{2BR_n(iT)}{c} \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} A_n \frac{2B(x_n \cos i\omega T - y_n \sin i\omega T)}{c} \end{aligned} \quad (11)$$

$F_1(i)$ 为正弦序列, 对 $F_1(i)$ 作傅里叶变换即可估计出旋转速度初值, 记为 ω_0 。

3.2 旋转速度最优值的估计方法

对与上述方法估计出的旋转速度初值 ω_0 , 结合雷达参数和目标观测时间确定起最大估计误差为 $\Delta\omega$, 因此下面从区间 $[\omega_0 - \Delta\omega, \omega_0 + \Delta\omega]$ 中搜索旋转速度的真值。对于目标上任意一点 (x, y) 。假定当前旋转速度估计值为 $\hat{\omega} \in [\omega_0 - \Delta\omega, \omega_0 + \Delta\omega]$, 将式(7)乘以相位补偿因子 $\exp\left\{\frac{j4\pi f_0 R(x, y, iT)}{c}\right\}$ 后, 按时间进行累加可以得到:

$$\begin{aligned} P(x, y) &= \sum_{i=1}^M H \left[i, \frac{2BR(x, y, iT)}{c} \right] \exp \left\{ \frac{j4\pi f_0 R(x, y, iT)}{c} \right\} \\ &= \sum_{i=1}^M \sum_{n=1}^N A_n \text{sinc} \left\{ \frac{2\pi B}{c} [R(x, y, iT) - R_n(iT)] \right\} \\ &\quad \cdot \exp \left\{ \frac{j2\pi \left(2f_0 - \frac{S-1}{S} B \right)}{c} [R(x, y, iT) - R_n(iT)] \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

其中

$$\begin{aligned} R(x, y, iT) &= x \cos i\hat{\omega}T - y \sin i\hat{\omega}T, \\ x &= 1, 2, \dots, M, \quad y = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (13)$$

当估计值 $\hat{\omega}$ 与真实值相符时, 式(12)中各分量随时间相干累加, 若 (x, y) 处有散射点, 则 $P(x, y)$ 将该散射点的能量聚积于一点, 图像对比度将达到最大值; 当估计值 $\hat{\omega}$ 与真实值不相符时, 式(12)中各分量相位不同, 会出现互相抵消的现象, 因而信号能量不能正确聚焦, 图像对比度不高。引入最小熵准则来衡量信号能量的聚焦程度, 图像熵 $Q(\hat{\omega})$ 和旋转速度最佳估计值 $\hat{\omega}_{\text{opt}}$ 的定义分别为

$$Q(\hat{\omega}) = - \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [P(x, y) \ln |P(x, y)|], \quad \hat{\omega} \in [\omega_0 - \Delta\omega, \omega_0 + \Delta\omega] \quad (14)$$

$$\hat{\omega}_{\text{opt}} = \min\{Q(\hat{\omega})\} \quad (15)$$

3.3 搜索过程收敛条件分析

当旋转速度估计值与真值相同时, 补偿后的信号在各时刻相位相同, 而在搜索过程中旋转速度的估计不够准确, 导致补偿后的信号相位随时间发生

变化。在观测时间内, 目标上任意一点 (x, y) 回波经过补偿后的相位最大变化量为

$$\begin{aligned} \Phi(x, y)_{\max} &= \frac{2\pi f_0}{c} [(x \cos \omega NT - y \sin \omega MT) \\ &\quad - (x \cos \hat{\omega} MT - y \sin \hat{\omega} MT)] \\ &\leq \frac{2\pi f_0 \delta_\omega MT}{c} \sqrt{x^2 + y^2} \end{aligned} \quad (16)$$

其中 $\delta_\omega = \omega - \hat{\omega}$ 。假设目标的最大半径为 L , 则目标上散射点回波经过补偿后的相位最大变化量为

$$\Phi_{\max} \leq \frac{2\pi f_0 \delta_\omega MTL}{c} \quad (17)$$

式(12)将信号补偿后累加, 通过搜索最小熵值来估计旋转速度, 因而要求在 $[\omega_0 - \Delta\omega, \omega_0 + \Delta\omega]$ 中搜索过程收敛。收敛的条件是式(12)中所有项的最大相差小于 π 。结合式(17), 可得到如下关系式:

$$\Delta\omega \leq \frac{c}{2f_0 MTL} \quad (18)$$

当旋转初速度的估计误差满足式(18)时, 旋转速度的最优值在区间 $[\omega_0 - \Delta\omega, \omega_0 + \Delta\omega]$ 中的搜索过程收敛。因此, 通过增加观测时间可以获取高的旋转初速度估计, 而利用短时间的回波搜索最优值以保证搜索过程的收敛。

3.4 数学本质及物理含义

式(12)具有全新的物理含义, 它基于目标旋转速度固定的情况下, 信号的回波随散射点位置按特定规律变化这一事实, 将目标散射点的信号进行聚焦, 相当于将信号进行补偿后再作 IFFT。式(14)计算图像的熵值时考虑到了目标所有可能存在的散射点, 因而避免了目标不存在特显点或者只计算某些散射点信号带来的误差。式(15)通过衡量图像的熵值来调整旋转速度的估计值。由于回波相位误差随时间的变化不断累加, 因而在误差精度固定的情况下, 随着观测时间的累加旋转速度的估计值可以越来越接近真值。

4 仿真计算及结果分析

假设雷达工作在 X-波段, 其中心频率为 10 GHz, 发射线性调频信号, 带宽为 500 MHz, 脉冲重复频率为 1 kHz, 相干脉冲数为 1024, 脉冲内的采样点数为 128。目标模型如图 2 所示, 目标包含 11 个散射点, 相对强度分别为 $h(0, 0) = h(3, 0) = h(4, 4) = h(4, 6) = h(6, 4) = 1$, $h(-4, -4) = h(-4, -7) = h(-7, -4) = 1$, $h(-3, 0) = 0.5$, $h(3, 0) = h(0, 3) = 2$ 。如图 3 给出回波在距离时间域的表现形式。

本文利用 1024 个相干脉冲估计目标旋转初速度以提高估计精度, 通过 64 个相干脉冲进行旋转速度最优值的搜索以保证其在搜索范围内收敛。对回波加高斯白噪声, 角速度的估计结果如表 1 所示。

表 1 加噪声时旋转角速度估计实验结果

真值(rad/s)	SNR									
	22		15		10		5		0	
	初值	最优值	初值	最优值	初值	最优值	初值	最优值	初值	最优值
5π	15.780	15.70	15.787	15.70	15.793	15.70	15.772	15.70	15.772	15.70
10π	31.471	31.41	31.471	31.41	31.470	31.41	31.450	31.41	31.398	31.41
15π	47.156	47.08	47.164	47.08	47.178	47.08	47.163	47.08	47.193	47.08
18π	56.566	56.56	56.569	56.56	56.575	56.56	56.585	56.56	56.557	56.56

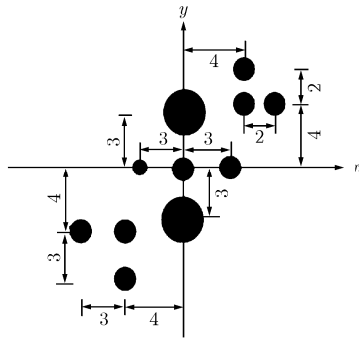


图 2 目标模型

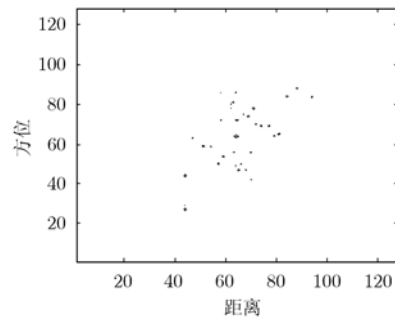


图 4 利用自相关方法估计值的成像结果

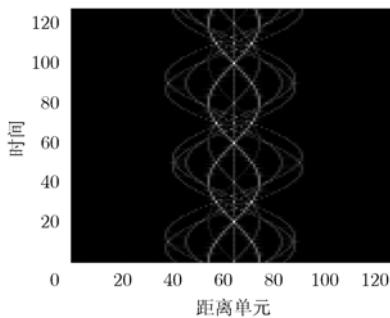


图 3 回波距离时间域的表现形式

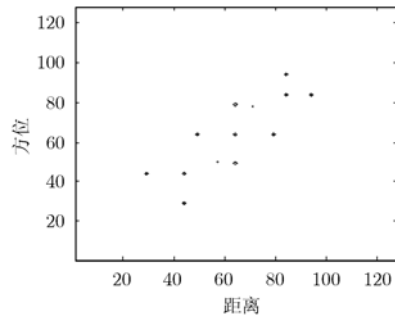


图 5 利用本文方法的成像结果

由表 1 仿真结果可以看出，本文方法能够准确的估计出目标的旋转速度。为比较算法的性能，表 2 给出了分别利用本方法和自相关方法的估计结果，从表中可以看出，自相关方法由于受到脉冲重复频率的限制，估计结果有较大误差，而本文提出的方法不受脉冲重复频率的影响，具有较高的准确性。

假定目标旋转速度为 10π rad/s，信噪比为 10 dB，图 4 和图 5 分别给出利用自相关方法估计值和本文方法估计值进行成像的结果。由图 4 和图

5 可以看出，对于高速旋转目标，当旋转速度估计不够精确时，大部分散射点军出现严重散焦。而利用本文方法所估计出的旋转速度进行成像时，散焦现象能够得到较大的改善。

5 结束语

对目标旋转速度的估计是高速旋转目标成像的基础，本文提出一种估计目标旋转速度的新方法，该方法利用较多相干脉冲进行估计以获得较高精度的旋转初速度，用较少的相干脉冲进行旋转速度精确值的搜索以保证搜索过程收敛。仿真结果证实了该方法具有良好的准确性和抗噪性能。在实际过程中，由于目标存在复杂运动的情况，这还有待于进一步研究复杂运动目标的成像识别。

参考文献

[1] Rihaczek A W and Hershkowitz S J. Radar Resolution and

表 2 与自相关方法估计结果的比较

真值 (rad/s)	5π	10π	15π	18π
本文方法	15.70	31.41	47.08	56.55
自相关方法	15.67	31.57	47.60	56.60

- Complex-Image Analysis[M]. Boston: Artech House, 1996: 280-293.
- [2] Liu A F, Zhu X H, and Lu J H. The ISAR range profile compensation of fast-moving target using the dechirp method[C]. Proceedings of International Conference on Neural Networks & Signal Processing, Nanjing, China, Dec. 2003: 1619-1623.
- [3] Xiao H and Qiu Y Z. Maximum likelihood based range alignment for ISAR imaging[C]. IEEE Antennas and Propagation Society Symposium, Monterey, CA, USA, Jun. 2004, 2: 2013-2016.
- [4] Luigi C D and Jauffret C. Estimation and classification of FM signals using time frequency transforms[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2005, 41(2): 421-437.
- [5] Xu R Q, Cao Z D, and Liu Y T. Motion compensation for ISAR and noise effect[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 1990, 5(6): 20-22.
- [6] Yau D, Berry P E, and Haywood B. Eigenspace-based motion compensation for ISAR Target Imaging. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, Volume 2006, Article ID: 90716.
- [7] Berizzi F, Mese E D, and Martorella M. Performance analysis of a contrast-based ISAR autofocusing algorithm, Proceedings of the 2002 IEEE Radar Conference, LongBeach, CA. April. 2002: 200-205.
- [8] Ferreras J M M and Martinez F P. Non-uniform rotation rate estimation for ISAR in case of slant range migration induced by angular motion. *Radar, Sonar & Navigation, IET*. 2007, 1(4): 251-260.
- [9] Wang Qi, Xing Meng-dao, Lu Guang-yue, and Bao Zheng. High-resolution three-dimensional radar imaging for rapidly spinning targets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 22-30.
- [10] 陈行勇, 姜卫东, 刘永祥, 黎湘, 郭桂蓉. 相位匹配处理微动目标ISAR成像[J]. *电子学报*, 2007, 35(3): 435-440.
- Chen Hang-yong, Jiang Wei-dong, Liu Yong-xiang, Li Xiang, and Guo Gui-rong. Phase matching processing for ISAR imaging of target with Micro-Motion[J]. *Acta Electronic Sinica*, 2007, 35(3): 435-440.
- 胡杰民: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为自动目标识别、雷达信息处理.
- 付耀文: 男, 1976年生, 副教授, 研究方向为雷达目标识别、信息融合等.
- 胡志刚: 男, 1981年生, 博士生, 研究方向为目标特性反演、雷达特征提取等.
- 黎湘: 男, 1967年生, 教授, 博士生导师, 国防科技大学空间电子信息技术研究所所长, 研究方向为空间信息处理、自动目标识别、非线性信号处理等.