

基于自旋运动的高速弹头成像方法

郑建成^{*①} 王党卫^② 马晓岩^② 宣泽平^① 丰孝兵^①

^①(解放军 95246 部队 南宁 530007)

^②(空军预警学院三系 武汉 430019)

摘要: 高速弹头目标成像是雷达领域的研究热点与难点。不同于常规目标,高速弹头在沿弹道运动的同时常伴随特定的自旋运动,使得雷达回波包含的多普勒信息更为复杂,对雷达高分辨成像提出了更为严峻的挑战。针对这一难题,该文从3个层面对基于自旋运动的高速弹头成像方法进行了研究。首先研究了具有轨道运动并伴随自旋运动高速弹头的雷达回波特性,揭示了回波相位信息的变化特点;其次,基于回波特性分析结果,提出了一种基于Wigner-Hough变换(WHT)的自旋弹头目标回波轨道运动补偿方法以及基于自旋运动的成像方法;最后,利用仿真数据对提出方法的有效性以及基于自旋运动成像方案的优势进行了测试,结果表明:在达到一定信噪比时该文成像算法性能稳健,较好地解决了高速弹头的速度估计难题和成像算法的复杂性问题。

关键词: Wigner-Hough变换(WHT);弹头;高分辨成像

中图分类号: TN951

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2013)03-0300-09

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2013.13070

Study on Spin-based Imaging of High-speed Warhead

Zheng Jian-cheng^① Wang Dang-wei^② Ma Xiao-yan^② Xuan Ze-ping^① Feng Xiao-bing^①

^①(The Unit 95246 of PLA, Nanning 530007, China)

^②(No.3 Department of Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: Currently, high-resolution imaging of a high-speed warhead is a popular topic in the field of radar technology. In contrast with regular targets, a high-speed warhead often moves along its trajectory and simultaneously exhibits a special spinning movement. The echoes from a radar sensor can contain complex Doppler information presenting a severe challenge to the high-resolution imaging procedure. This paper investigates imaging methods for a high-speed warhead considering the spinning movement. First, the radar echo characteristics of the spinning warhead are studied and the echo phase characteristics are revealed. Next, the chirp-rate estimation method using the Wigner-Hough Transform (WHT) for the trajectory movement compensation and the imaging method based on spinning are proposed. Finally, the validity and the advantage of the spin-based imaging method are tested with simulation data. Test results indicate that the imaging algorithm is robust when the data reaches a certain SNR, and this paper provides a better solution to the issue of speed estimation and the complexity of imaging algorithm of a high-speed warhead.

Key words: Wigner-Hough Transform (WHT); Warhead; High-resolution imaging

1 引言

二十世纪以来,随着新技术革命的不断深入,弹道导弹高速目标的出现与发展极大改变了传统的作战理念。不同于传统作战武器,这类新型武器普遍具有了三大能力:一是数公里/秒的高速巡航能力,二是可达数千公里的远距离攻击能力,三是直接毁伤与高速撞击所造成的高毁伤能力。由于上述能力的具备,使得远程闪击作战逐渐成为现代战争

新的作战方式,这对国土防御提出了新的挑战。如何有效实现这类目标的预警探测已成为关乎国家战略安全的重要课题。

雷达由于所具有的全天候、全天时、远距离等特点,使得自第二次世界大战问世以来一直是感知和获取目标信息的重要手段。不同于光学和红外两种无源传感器,雷达是一种有源探测装备,其对目标的探测主要得益于入射电磁波激励下目标表面感应电流二次辐射所产生的散射波。由于散射波本质上是目标本身与电磁波相互作用的结果,利用其成像结果可反演出目标形状、体积、材质等本原物理特性,因此,弹道导弹目标雷达成像,尤其是其中

2013-07-25 收到, 2013-08-29 改回; 2013-09-03 网络优先出版

国家自然科学基金(61179015)资助课题

*通信作者: 郑建成 13100686812@163.com

段飞行时脱离弹体的高速弹头的雷达成像一直是雷达预警探测领域的研究热点。然而，不同于常规目标，中段飞行弹头目标的运动方式更为复杂，其在沿轨道高速运动的同时常会以特定的角速度绕其质心进行翻滚自旋运动^[1]。由于这两种运动的共同作用，弹头目标雷达回波特性更为复杂，常包含两种具有不同变化规律的多普勒分量，这导致了高速弹头目标雷达成像更为困难。

目前，结合目标特性，利用自旋运动对其进行高分辨成像是一种较为有效的新方法^[2-4]。一般说来，基于自旋运动的高分辨成像首先要解决轨道运动补偿问题，而有关这一问题的解决，虽然文献[5]将回波信号调频率 K 近似为 $K \approx 4v_r k / c$ 并利用测得的目标速度对其进行补偿，但补偿误差较大；而文献[6]基于最小熵准则搜索目标速度从而完成高速目标的 ISAR 成像运动补偿，但其计算过程比较繁琐。针对这些问题，本文首先研究了具有轨道运动并伴随自旋运动高速弹头的雷达回波特性，揭示了回波相位信息的变化特点；其次，基于回波特性分析结果，提出了一种基于 Wigner-Hough 变换 (Wigner-Hough Transform, WHT) 的自旋弹头目标回波轨道运动补偿方法以及相应的成像方法流程。不同于已有方法，本文所提方法利用高速运动自旋弹头目标的 ISAR 回波为调频率相同的多分量线性调频信号这一特点，通过 Wigner-Hough 变换估计 LFM 信号弹头回波的 2 次项系数，并消除回波相位 2 次项的影响。由于该方法直接估计弹头回波的相位 2 次项系数，因此，可避免先估计弹头运动速度再得到回波相位 2 次项系数时对其近似处理所带来的误差。

2 自旋弹头的雷达回波模型

线性调频 (Linear Frequency Modulation, LFM) 信号是目前宽带雷达普遍采用的发射信号，若设载频为 f_c ，信号带宽为 B ，信号脉冲重复周期为 T (各脉冲发射时刻 $t_m = mT$, $m = 0, 1, 2, \dots$ ，称为慢时间)，发射时刻为起点的时间记为 \hat{t} (称为快时间，用来计量电波传播的时间)，则 t_m 时刻雷达发射的 LFM 信号形式可写为^[7]：

$$s(\hat{t}, t_m) = a_r(\hat{t}) \exp \left[j2\pi \left(f_c t + \frac{1}{2} k t^2 \right) \right] \quad (1)$$

其中 $a_r(\bullet)$ 为发射 LFM 信号的窗函数， $t = t_m + \hat{t}$ 为全时间， $t_m = mT_p$ ($m = 0, 1, 2, \dots$)， T_p 为脉宽， k 为调频率。

又，高频段时弹头目标可用散射中心模型近似，

若设其由 n 个散射中心构成，则总的回波信号可表示为：

$$s_r(\hat{t}, t_m) = \sum_{i=1}^n A_i a_r \left[\hat{t} - \frac{2R_i(t_m)}{c} \right] a_a(t_m) \cdot \exp \left[j2\pi \left(f_c(t - \tau_i) + \frac{1}{2} k(\hat{t} - \tau_i)^2 \right) \right] \quad (2)$$

其中 R_i 为第 i 个散射中心到雷达的瞬时距离， c 为光速， $\tau_i = (2R_i)/c$ 为第 i 个散射中心的延迟时间， $a_a(t_m)$ 为方位窗函数， A_i 为第 i 个散射中心的散射强度。

与常规目标不同，自旋弹头目标散射中心至雷达的瞬时距离除了与目标本身沿轨道的运动有关之外还与其自旋运动有关。更进一步，若设弹头中心在雷达坐标系 (X, Y, Z) 中的坐标为 $\mathbf{R}_0 = (X_0, Y_0, Z_0)$ ，则与雷达的径向距离可表示为：

$$R_0 = \sqrt{X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2} \quad (3)$$

而散射中心与雷达的瞬时距离为：

$$R_i = \sqrt{(X_0 + x_i)^2 + (Y_0 + y_i)^2 + (Z_0 + z_i)^2} \quad (4)$$

其中 (x_i, y_i, z_i) 为第 i 个散射中心偏离弹头中心瞬时坐标。

若进一步设解线频调处理的参考距离为 R_{ref} ，参考点取为弹头中心，在不考虑跟踪误差的条件下，利用其定义的参考信号为：

$$s_{\text{ref}}(\hat{t}, t_m) = \exp \left\{ j2\pi \left[f_c(t - \tau_0) + \frac{1}{2} k(\hat{t} - \tau_0)^2 \right] \right\} \quad (5)$$

其中 $\tau_0 = 2R_{\text{ref}}/c$ 。

则回波信号与参考信号共轭相乘后，可得：

$$s_{\text{if}}(\hat{t}, t_m) = \sum_{i=1}^n A_i a_r \left[\hat{t} - \frac{2R_i(t_m)}{c} \right] a_a(t_m) \cdot \exp \left\{ j2\pi \left[f_c(\tau_0 - \tau_i) + k(\tau_0 - \tau_i)\hat{t} - \frac{1}{2} k(\tau_0^2 - \tau_i^2) \right] \right\} \quad (6)$$

根据文献[8]所述的“停-走-停”假设，当目标运动速度较低时，可认为在脉冲作用期间目标到雷达的距离不变。然而，对高速运动的弹头来说，在距离快时间中也需要考虑弹头径向速度的影响，此时“停-走-停”模型不再适用于对回波进行处理，需要对回波进行脉内相干化才能做常规的成像处理^[9]。因此，脉冲作用期间第 i 个散射中心到雷达的瞬时距离可写为：

$$R_i(t) = R_i(t_m) + v_r \hat{t} \quad (7)$$

代入式(6)中可得：

$$s_{\text{if}}(\hat{t}, t_m) = \sum_{i=1}^n A_i a_r \left[\hat{t} - \frac{2R_i(t)}{c} \right] a_a(t_m) \cdot \exp \left[j2\pi \left(\varphi_i + f_i \hat{t} + \frac{1}{2} K \hat{t}^2 \right) \right] \quad (8)$$

其中 φ_i, f_i, K 分别为回波信号指数项关于快时间 \hat{t} 的 0 阶、1 阶、2 阶多项式系数, 分别表示为:

$$\varphi_i = f_c \frac{2[R_{\text{ref}} - R_i(t_m)]}{c} - k \frac{2[R_{\text{ref}}^2 - R_i^2(t_m)]}{c^2} \quad (9)$$

$$f_i = -\frac{2v_r}{c} f_c + k \frac{2[R_{\text{ref}} - R_i(t_m)]}{c} + \frac{4kv_r}{c^2} R_i(t_m) \quad (10)$$

$$K = -k \frac{4v_r}{c} \left(1 - \frac{v_r}{c} \right) \quad (11)$$

很明显, 由式(8)可知, 径向速度分量对雷达回波信号将产生 1 个 1 次相位项和 1 个 2 次相位项。1 次项会导致距离上的平移, 但它不会影响最终的成像质量。由于弹头径向速度较大, 其 2 次相位项不可忽略, 这使得弹头的 ISAR 回波信号经解线频调处理后子回波近似为 1 个线性调频信号, 且回波中各散射中心子回波的调频斜率 K 相同。这也就是说, 弹头目标的 ISAR 回波信号可等价为调频斜率 K 相等的多分量线性调频信号。

更进一步地, 若将参考点选为弹头的中心, 并且不考虑参考点跟踪误差的影响, 则式(9)可写为:

$$\varphi_i = f_c \frac{2[R_{\text{ref}} - R_i(t_m)]}{c} - k \frac{2[R_{\text{ref}}^2 - R_i^2(t_m)]}{c^2} \approx \frac{2f_c}{c} [R_{\text{ref}} - R_i(t_m)] \quad (12)$$

按照文献[10], 弹头的自旋产生的径向速度为 v_e , 弹头的自旋在距离向上的影响较小, 在多普勒域的影响较大。因而纵向处理时可不考虑自旋的影响, 即 $R_i(t_m)$ 只与弹头轨道运动和散射中心的位置分布有关, 而横向处理时需要考虑弹头自旋的影响, 此时 $R_{\text{ref}} - R_i(t_m) = -v_e^{(i)} t_m$, $v_e^{(i)}$ 为第 i 个散射中心相对于弹头重心自旋时所产生的径向速度, 所以式(9)和式(10)可分别写为:

$$\varphi_i \approx \frac{2f_c}{c} [R_{\text{ref}} - R_i(t_m)] = -\frac{2f_c}{c} v_e^{(i)} t_m \quad (13)$$

$$f_i = -\frac{2v_r}{c} f_c + k \frac{2[R_{\text{ref}} - R_i(t_m)]}{c} + \frac{4kv_r}{c^2} R_i(t_m) = -\frac{2v_r}{c} f_c - \frac{2k}{c} v_e^{(i)} t_m + \frac{4kv_r}{c^2} R_i(t_m) \quad (14)$$

3 基于 Wigner-Hough 变换的参数估计与运动补偿

3.1 算法原理

单分量 LFM 信号 $x(t)$ 的 Wigner-Ville 分布可写为^[11]:

$$W_x(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j\omega\tau} d\tau = |A|^2 \delta[f - (f_0 + kt)] \quad (15)$$

其中 A 为 LFM 信号幅度的大小, f_0 为初始频率, k 为调频率。

由式(15)可以看出, 单分量 LFM 信号的 Wigner-Ville 分布为沿直线 $f = f_0 + kt$ 分布的冲激线谱, 即分布的能量集中出现在表示信号的瞬时频率变化律的直线上, 其时频聚集性较强。

而, 对于调频率相同的多分量 LFM 信号

$$x(t) = \sum_{i=1}^p A_i \exp[j2\pi(a_i + b_i t + kt^2)] \quad (16)$$

其中 $0 \leq t \leq T$, T 为脉冲持续时间, p 为信号的个数, A_i, a_i, b_i 分别为第 i 分量的信号幅度、相位项和频率项参数, k 为调频率, 其 Wigner-Ville 分布可表示为^[12]:

$$W_x(t, \omega) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p A_i A_j \exp\left\{j2\pi\left[(a_i - a_j) + (b_i - b_j)t\right]\right\} \times 2(T - |2t - T|) \text{sinc}\left[2\pi\left(\frac{b_i + b_j}{2} + 2kt - \frac{\omega}{2\pi}\right)(T - |2t - T|)\right] \quad (17)$$

即在时间 t 和频率 ω 组成的平面上, 多个同调频率的 LFM 信号自项和交叉项均是 与载波频率 b_i 有关的直线, 自项和交叉项直线为:

$$\frac{b_i + b_j}{2} + 2kt - \frac{\omega}{2\pi} = 0 \quad (18)$$

当 $i = j$ 时, 式(18)表示自项直线; 而当 $i \neq j$ 时, 式(18)表示交叉项直线, 且交叉项相位为:

$$\exp\left\{j2\pi\left[(a_i - a_j) + (b_i - b_j)t\right]\right\} \quad (19)$$

即交叉项相位是随着时间变化的, 因此, 根据交叉项的相位波动特点, 按照各种可能的直线积分就可以对自项进行积累, 而使交叉项得到抑制, 并能利用积累峰值的位置估计线性调频信号的参数, 这就是下面本文采用 Wigner-Hough 变换调频参数估计方法的原理。

3.2 算法实现

信号 $x(t)$ 的 WHT 的积分形式可写为^[13]:

$$\text{WH}(\rho, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_x(t, \omega) \delta(\omega - \omega_0 - mt) dt d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} W_x(t, \omega_0 + mt) dt \quad (20)$$

其中 $m = -\cot\theta, \omega_0 = \rho / \sin\theta$ 。

由式(20)可得式(8)所示回波信号的 Wigner-Ville 分布为:

$$W_s(t, \omega) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n A_i A_j \exp \left\{ j2\pi \left[(\varphi_i - \varphi_j) + (f_i - f_j)t \right] \right\} \\ \times 2(T - |2t - T|) \operatorname{sinc} \left[2\pi \left(\frac{f_i + f_j}{2} + 2Kt - \frac{\omega}{2\pi} \right) (T - |2t - T|) \right] \quad (21)$$

将式(21)代入式(20)可得式(8)所示回波信号的WHT为：

$$\operatorname{WH}(\rho, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} 2 \sum_{i=1}^n A_i^2 (T - |2t - T|) \operatorname{sinc} \left\{ [(4\pi K - m)t - (\omega_0 - 2\pi f_i)] (T - |2t - T|) \right\} dt \quad (22)$$

这表明反映 LFM 信号调频规律的直线 $\rho_0 = x \cos \theta_0 + y \sin \theta_0$ 经过 WHT 后在参数空间 (ρ, θ) 会出现积分峰值 (ρ_0, θ_0) ，而该峰值的位置与线性调频信号的参数具有对应关系，可用来估计 LFM 信号的调频率。按照文献[14]，其估计值为：

$$\hat{K} = \frac{\tan(\theta_0)}{2L\Delta T^2} \quad (23)$$

其中 L 为 LFM 信号的 WVD 的频率单元长度， ΔT 为信号采样周期。

一旦得到 \hat{K} 后，即可定义补偿函数为：

$$s_1(\hat{t}) = \exp(j\pi \hat{K} \hat{t}^2) \quad (24)$$

则将其共轭与式(8)相乘进行 2 阶项补偿后可得：

$$s_{r4}(\hat{t}, t_m) = \sum_{i=1}^n A_i \operatorname{rect} \left[\frac{\hat{t} - \tau_i}{T_p} \right] \exp[j2\pi(\varphi_i + f_i \hat{t})] \quad (25)$$

即轨道运动补偿后自旋弹头目标的回波信号近似为单频信号，利用 WHT 能够较好地消除轨道运动径向速度导致的 2 阶项的影响。

4 基于自旋运动的 ISAR 成像

4.1 成像算法

弹头参考点坐标 (X_0, Y_0, Z_0) 和散射中心坐标 (x_i, y_i, z_i) 随观测时间的变化而变化，它们在各次回波中各不相同。又由第 2 节的分析可知，弹头的运动形式，即自旋主要影响弹头散射中心坐标，对自旋弹头而言，弹头散射中心坐标 (x_i, y_i, z_i) 由弹头轨道运动方程和其自旋矢量共同决定，参考点坐标 (X_0, Y_0, Z_0) 由弹头运动方程确定。

另一方面，对 ISAR 成像来说，目标成像积累角决定了其方位分辨率，由于自旋弹头目标本身自旋运动的影响，其成像积累角由自旋旋转角和轨道运动旋转角决定，而且一般情况下前者所占比重更大。在成像观测时间内，弹头的轨道运动旋转角 $\Delta\theta_t$ 由其轨道运动旋转分量 ω_t 决定，自旋旋转角 $\Delta\theta_s$ 由有效自旋分量 ω_e [10] 决定，因而合成转角可写为：

$$\Delta\theta = \Delta\theta_t + \Delta\theta_s \quad (26)$$

对高速运动自旋弹头目标而言，弹头自旋矢量 ω 与其轨道运动旋转分量 ω_t 互不干涉，而自旋矢量对目标成像有意义的仅仅是其有效分量 ω_e ，利用自旋对导弹目标成像实际上是利用其有效自旋分量 ω_e ，因此，目标自旋旋转角 $\Delta\theta_s$ 可表示为：

$$\Delta\theta_s = \omega_e \times t \quad (27)$$

其中， t 为雷达成像观测时间。

由以上分析可知，目标的合成有效旋转矢量 ω_i 为其轨道运动旋转分量 ω_t 与有效自旋分量 ω_e 之和，且可表示为：

$$\omega_i = \omega_t + \omega_e \quad (28)$$

合成有效旋转矢量 ω_i 描述了弹头相对雷达的有效转动，它与弹头的 ISAR 成像平面垂直，相当于转台目标成像的旋转轴， ω_i 真实反映了目标运动补偿后的有效转动，它对目标成像有直接的意义， ω_i 的大小决定了成像所需要的积累时间。又弹头的自旋角速度会达到几弧度每秒甚至是几十弧度每秒^[15,16]，成像积累时间较短，常在亚秒量级，而利用其轨道运动旋转分量成像时为小角度成像，一般为 $3^\circ \sim 5^\circ$ ，其旋转分量不到十分之一弧度每秒，因而一般情况下均满足 $\omega_e \gg \omega_t$ ，即轨道高速运动补偿后合成有效旋转矢量 ω_i 中的轨道运动旋转分量可以忽略不计，且有 $\omega_i \approx \omega_e$ 。因此，即使轨道运动旋转分量没有被补偿掉，在利用自旋对导弹目标进行 ISAR 成像时也可以忽略它对成像结果的影响。这就意味着，对自旋弹头目标运动补偿后，依据合成有效旋转矢量 ω_i 可直接利用 FFT 算法就实现对弹头的 ISAR 成像。

根据第 2 节的分析，式(8)所示的回波信号距离向脉压后可得：

$$s_{if}(\hat{t}, t_m) = \sum_{i=1}^n A_i' \operatorname{sinc} [B(\hat{t} - \tau_i)] a_a(t_m) \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi f_c}{c} v_e^{(i)} t_m \right] \quad (29)$$

其中， $\tau_i = -(2/c)v_e^{(i)}t_m$ 表征了散射点位置的距离分布。又由于利用自旋分量成像所用的积累时间 t_m 较短，且 $v_e^{(i)}$ 较小，因此，成像过程中来自同一散射中心的回波信号中心常位于同一距离单元中，即无需包络对齐处理。于是，若方位窗函数也是矩形函数，则对式(29)直接进行方位向的 FFT 变换之后就能获取目标的高分辨图像为：

$$s_{if}(\hat{t}, t_m) = \sum_{i=1}^n A_i' \operatorname{sinc} [B(\hat{t} - \tau_i)] \operatorname{sinc} \left[\frac{T_a}{2} \left(f_a + \frac{2f_c}{c} v_e^{(i)} \right) \right] \quad (30)$$

其中, f_a 为弹头重心自旋速度对应的多普勒频率, T_a 为方位相干积累时间。

由以上分析和第2节对弹头回波模型的研究可知, 基于自旋运动的弹头目标 ISAR 成像主要包括以下步骤:

(1) 根据式(8)计算出自旋弹头目标的宽带雷达回波数据, 然后利用式(21)求自旋弹头目标宽带雷达回波的 Wigner-Ville 分布;

(2) 根据式(20)对弹头雷达回波的 Wigner-Ville 分布进行 Hough 变换, 然后利用式(23)估计 LFM 信号的调频率 \hat{K} ;

(3) 将 $\exp(-j\pi\hat{K}t^2)$ 与式(8)相乘校正弹头高速轨道运动所产生的 2 次相位项的影响, 从而完成基于 WHT 的轨道高速运动补偿;

(4) 按照式(29)和式(30)对弹头的距离向和方位向进行 FFT 压缩成像。

4.2 性能分析

ISAR 是一种高分辨率成像雷达, 它利用发射宽带波形与脉冲压缩技术获得良好的距离分辨率, 而通过雷达与目标之间的相对运动产生大的等效天线孔径获得高的方位向分辨率。ISAR 成像的方位分辨率可以由多普勒分辨率转化得到, 其表达式可写为^[17]:

$$\rho_a = \frac{\lambda}{2\Delta\theta} = \frac{\lambda}{2\omega T} \quad (31)$$

其中, $\Delta\theta$ 为成像观测时间内目标散射点绕转台中心旋转的角度, ω 为旋转角速度, T 为成像积累时间。

由式(31)可知, 雷达发射信号波长一定时, ISAR 成像的方位分辨率由成像积累角决定, 在一定条件下成像积累角越大, 目标的方位分辨率越高。距离-多普勒算法适用于小角度成像^[18], 而对基于自旋分量的高速自旋弹头成像而言, 由 4.1 节成像算法的分析可知其成像所利用的有效自旋分量 ω_e 是比较大的, 因而在较短的成像积累时间内它就能获取足够的方位分辨率。

5 仿真与分析

本节将结合弹头雷达回波信号模型对基于自旋运动的弹头目标进行 ISAR 成像的仿真及性能分析。仿真实验中采用平底锥自旋弹头目标, 其几何模型如图 1 所示。目标由 5 个散射中心组成, 图 1 中给出了它们在目标坐标系中的坐标。目标与雷达的几何运动关系如图 2 所示, 雷达位于雷达坐标系的原点, 目标在 YOZ 平面沿平行于 Y 轴的轨迹以速度 $v = 7 \text{ km/s}$ 作匀速直线运动, 观测起始时刻目标速度与雷达视线的夹角 $\theta = 60^\circ$, 目标与雷达的初始距离 $R_0 = 1000 \text{ km}$, 自旋矢量在雷达坐标系中的方位

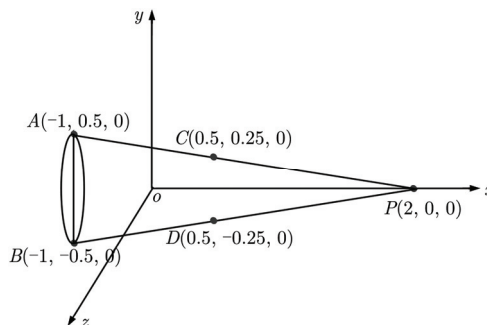


图 1 弹头的几何模型

Fig. 1 Geometrical model of warhead

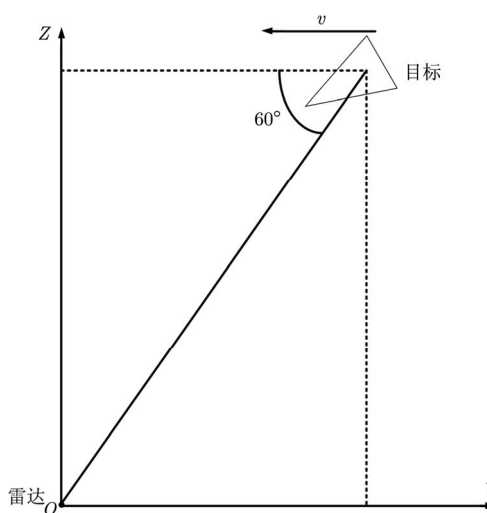


图 2 雷达与弹头的几何运动关系

Fig. 2 Geometrical movement relationship between radar and warhead

角为 15° 、俯仰角为 75° , 自旋角速度的大小为 $0.5\pi \text{ rad/s}$, 仿真中设发射信号载频为 10 GHz , 带宽为 1.3 GHz , 脉冲宽度为 $25.6 \mu\text{s}$, 脉冲重复频率为 3000 Hz , 成像积累角为 4.5° , Stretch 采样率为 10 MHz , 仿真中的成像算法为距离-多普勒算法。

实验 1 算法仿真

与基于轨道运动旋转分量 ω_t 的 ISAR 成像不同, 研究自旋弹头基于有效自旋分量 ω_e 的 ISAR 成像需要先对其轨道运动进行补偿, 补偿的精度会直接影响到弹头基于 ω_e 的 ISAR 成像的效果。设信噪比 $\text{SNR}=4 \text{ dB}$, 图 3 和图 4 分别给出了回波信号的 WVD 和 Wigner-Hough 变换在 $t=0.01 \text{ s}$ 时刻的仿真结果, 图 5 给出了轨道高速运动补偿前的 ISAR 成像结果。由图 3 中 5 条平行的直线可知回波信号是调频率相同的 5 个分量 LFM 信号, 但是不易较精确地求出回波的调频率。由图 4 回波信号 Wigner-Hough 变换的仿真结果可得到幅度最强点的坐标, 然后通过式(23)可计算出回波信号相位 2 次项系数

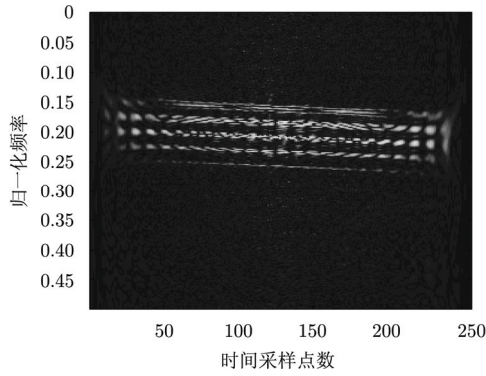


图 3 $t=0.01$ s 时回波信号的 WVD

Fig. 3 WVD of echo signal at the time of $t=0.01$ s

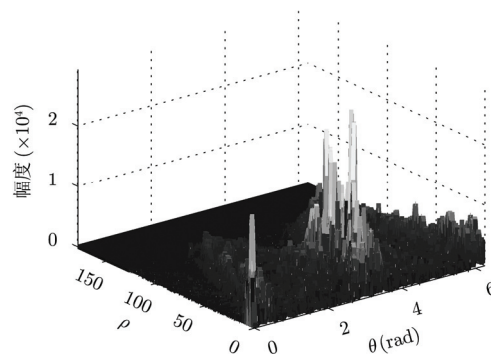


图 4 $t=0.01$ s 时回波信号的 Wigner-Hough 变换

Fig. 4 WHT of echo signal at the time of $t=0.01$ s

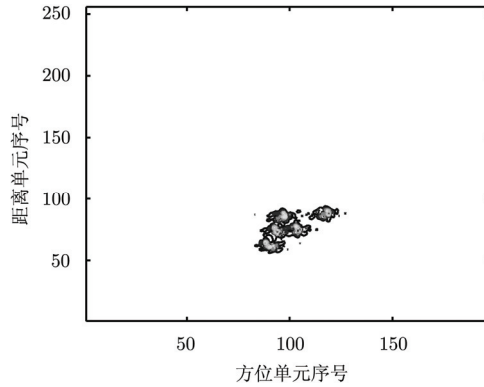


图 5 轨道运动补偿前基于 ω_e 的 ISAR 成像结果

Fig. 5 ISAR imaging before orbital motion compensation based on ω_e

的估计值，而由式(11)可计算出回波信号相位 2 次项系数的真值为 $K = -2.3698 \times 10^9$ Hz/s，那么估计误差的绝对值 $\Delta K = |K - \hat{K}|$ 可以看作是对 2 次项系数估计精度的一种反映。表 1 给出了不同信噪比条件下的 2 次项系数的估计值及估计误差的绝对值，图 6 是采用本文算法对弹头轨道运动进行补偿后对应表 1 信噪比的 ISAR 成像结果。

对比图 5 和图 6 (c) 的仿真结果可知，相同信噪比条件下轨道高速运动补偿前弹头目标的 ISAR 成像结果产生了严重的散焦和模糊，弹头散射中心之间发生了重叠，并且噪声对成像的影响也较大，而基于 Wigner-Hough 变换的轨道运动补偿方法可有效地消除轨道高速运动对回波信号的影响，得到了较为清晰的成像结果。

由表 1 可以看出，随着信噪比的增大，2 次项系数的估计值 \hat{K} 越来越接近真值 K ，而估计误差的绝对值 ΔK 逐渐减小。由图 6 也可以看出，随着信噪比的增大，弹头各散射点的聚焦性能越来越好，其 ISAR 2 维成像效果逐渐变得清晰，这与 2 次项系数的估计精度是一致的，估计精度越高，成像效果越好，二者是相辅相成的。

表 1 不同信噪比时 K 的估计值及估计误差的绝对值
Tab. 1 Estimated value of K and absolute value of estimated error under different SNR

SNR(dB)	K 的估计值 \hat{K} ($\times 10^9$ Hz/s)	估计误差的绝对值 ΔK ($\times 10^8$ Hz/s)
0	-2.5402	1.7041
2	-2.4326	0.6282
4	-2.3919	0.2213

实验 2 性能分析

为验证本文算法的优越性，下面将文献[6]描述的算法与本文算法进行仿真比较分析，文献[6]的算法对速度的估计在仿真时采用其描述的精度与实时性兼顾的 2 次曲线拟合法。文献[6]描述的算法与本文算法的共同点是对回波信号相位项的 2 次项系数进行补偿，成像算法的不同点有两点：一是文献[6]是先估计目标速度再补偿回波信号相位项的 2 次项系数，本文是直接估计回波信号相位项的 2 次项系数；二是文献[6]是基于轨道运动旋转分量 ω_t 的 ISAR 成像，而本文是基于自旋运动矢量的有效自旋分量 ω_e 进行 ISAR 成像。设 SNB=4 dB，表 2 给出

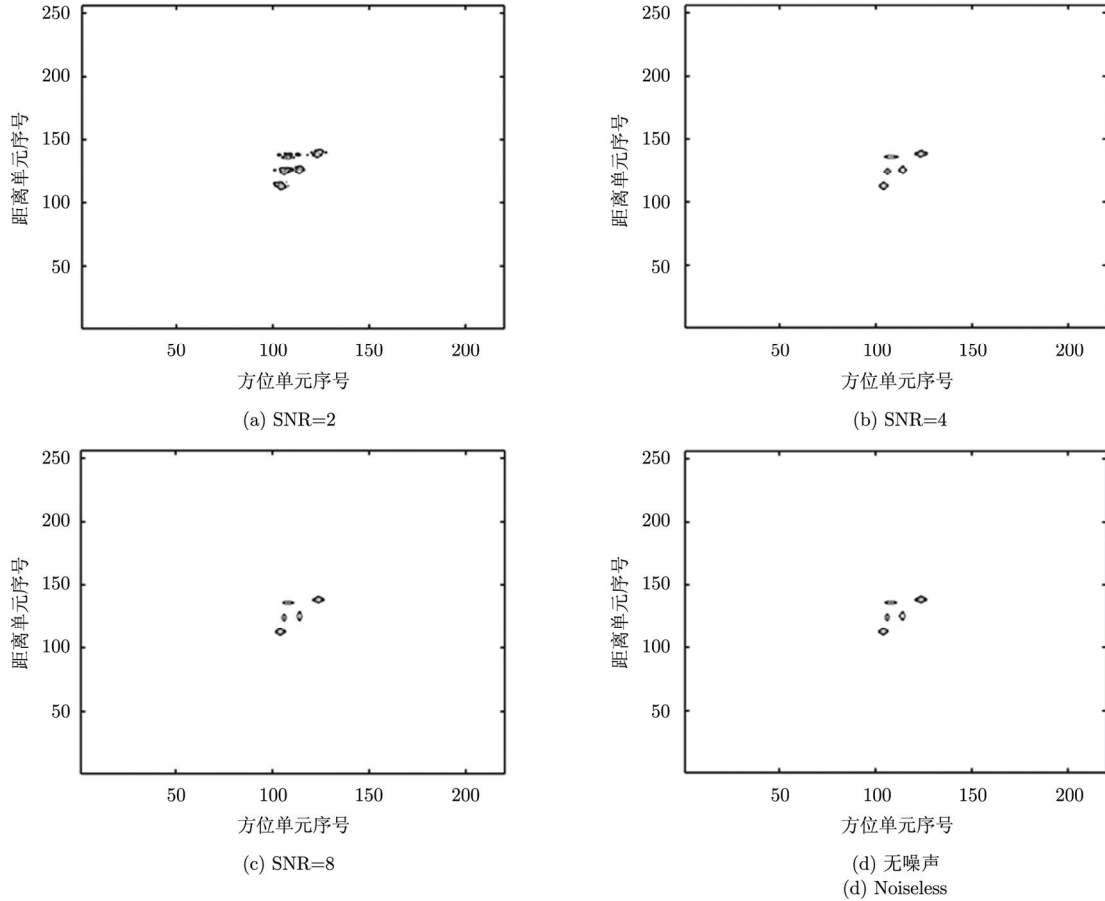


图6 轨道运动补偿后基于 ω_e 的 ISAR 成像结果

Fig. 6 ISAR imaging after orbital motion compensation based on ω_e .

了两种算法 2 次项系数的估计值及运行时间的仿真结果，图 7 是本文建立的模型利用文献[6]的算法所成 ISAR 像的仿真结果。

表 2 K 的估计值及运行时间的比较
Tab. 2 Estimated value of K and comparison of performance period

算法	K 的估计值(Hz/s)	运行时间(s)
文献[6]的算法	-2.2746×10^9	2.2236
本文算法	-2.3919×10^9	2.3795

由式(8)可以看出，消除弹头回波信号相位 2 次项的影响需要对 2 次项系数 K 进行估计，而由式(11)可知，2 次项系数 K 是弹头径向速度 v_r 的 2 次函数，由于估计算法一般都是存在误差的，采用估计目标速度的方法来得到 K 的估计值增加了 1 次 2 次运算，这在一般情况下势必增大估计误差。另外，文献[6]的算法在对回波信号相位 2 次项进行补偿后在方位向还要进行包络对齐等相位补偿处理，而本文算法

在对回波信号相位 2 次项进行补偿后在方位向可以直接压缩成像。由本实验的仿真结果也可以看出：在相同的仿真条件下，文献[6]基于最小熵准则的高速目标 ISAR 成像运动补偿在搜索目标速度时计算过程比较复杂，本文补偿算法中的 Hough 变换需要对不同角度分别进行积分，因而两者完成补偿所需时间相差不大，然而本文算法的补偿精度要优于文

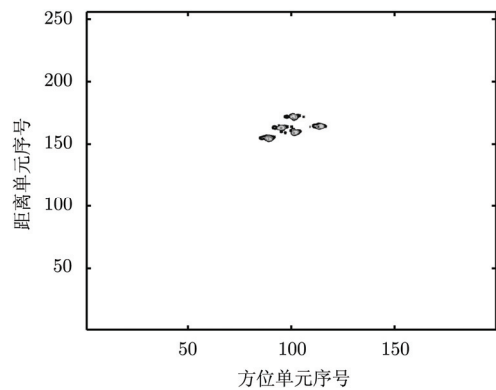


图7 文献[6]的算法所成 ISAR 像

Fig. 7 ISAR imaging of Ref. [6]'s algorithm

献[6]算法的补偿精度; 对比图 6(c)和图 7 可知, 文献[6]的成像算法对本文目标模型成像时能够分辨目标散射点的个数, 但是仍存在较明显的散焦现象, 相同条件下本文成像算法的鲁棒性要优于文献[6]的成像算法。

6 结论

根据高速运动自旋弹头的 ISAR 回波为调频率相同的多分量线性调频信号的特点, 本文将 Wigner-Hough 变换估计 LFM 信号调频率的方法引入到对弹头 ISAR 成像的轨道高速运动补偿中, 通过它首先估计出弹头回波表达式相位项的 2 次项系数, 然后补偿掉回波相位 2 次项的影响, 从而完成弹头的轨道高速运动补偿, 最后再利用弹头的有效自旋分量进行 ISAR 成像。研究表明, 提出的成像方法在达到一定信噪比时性能稳健, 能够直接估计弹头回波的相位 2 次项系数, 不需要对弹头的速度作参数估计且在方位向直接压缩成像而不需要作包络对齐等相位补偿处理, 算法实现过程相对简单, 相同条件下脉冲积累时间较短, 较好的解决了高速运动弹头的速度估计难题和成像算法的复杂性问题, 为高速弹头目标实时成像提供了一条新的方法途径。

参 考 文 献

- [1] 张毅, 杨辉耀, 李俊莉. 弹道导弹弹道学[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1999: 1-2.
Zhang Yi, Yang Hui-yao, and Li Jun-li. Ballistic Missiles[M]. Changsha: National University of Defense Technology, 1999: 1-2.
- [2] 杨予昊. 自旋目标运动成像与静止目标凝视成像方法及关键技术研究[D]. [博士学位论文], 中国科学技术大学, 2011.
Yang Yu-hao. Research on the spinning target moving imaging and static target staring imaging[D]. [Ph.D. dissertation], University of Science and Technology of China, 2011.
- [3] 杨予昊, 陈卫东, 王东进. 基于 RBF 网络与 OMP 重构算法的空间自旋目标成像[J]. 中国科学技术大学学报, 2011, 41(11): 941-949.
Yang Yu-hao, Chen Wei-dong, and Wang Dong-jin. Space spinning targets imaging based on RBF network and OMP algorithm[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2011, 41(11): 941-949.
- [4] 曹攀. 高分辨 ISAR 成像中运动补偿技术研究[D]. [硕士学位论文], 西安电子科技大学, 2011.
Cao Pan. Study of motion compensation for high resolution ISAR imaging[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2011.
- [5] 黄小红, 邱兆坤, 王伟. 目标高速运动对宽带一维距离像的影响及补偿方法研究[J]. 信号处理, 2002, 18(6): 487-490.
Huang Xiao-hong, Qiu Zhao-kun, and Wang Wei. The study of the influence on broadband range profile of a high speed target and compensation method[J]. *Signal Processing*, 2002, 18(6): 487-490.
- [6] 杨剑, 许人灿, 鲍庆龙. 基于熵最小准则的 ISAR 成像高速运动补偿实现方法[J]. 信号处理, 2009, 25(12): 1861-1866.
Yang Jian, Xu Ren-can, and Bao Qing-long. The realization of high velocity compensation of ISAR imaging based on minimum entropy criterion[J]. *Signal Processing*, 2009, 25(12): 1861-1866.
- [7] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 1.
Bao Zheng, Xing Meng-dao, and Wang Tong. Radar Imaging Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 1.
- [8] Mark A Richards 著, 邢孟道, 王彤, 李真芳, 等译. 雷达信号处理基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 69-75.
Mark A Richards, Translated by Xing Meng-dao, Wang Tong, Li Zhen-fang, et al. Fundamentals of Radar Signal Processing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 69-75.
- [9] Xing M, Wu R, and Bao Z. High resolution ISAR imaging of high speed moving targets[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2005, 152(2): 58-67.
- [10] 郑建成, 王党卫, 马晓岩, 等. 弹头目标的 ISAR 回波特性分析[J]. 空军雷达学院学报, 2011, 25(6): 399-403.
Zheng Jian-cheng, Wang Dang-wei, Ma Xiao-yan, et al. The echo characteristics analysis of a warhead[J]. *Journal of Air Force Radar Academy*, 2011, 25(6): 399-403.
- [11] 龚海健, 黄伟国, 赵凯, 等. 基于 Wigner-Ville 分布与小波尺度谱融合的时频特征提取方法[J]. 振动与冲击, 2011, 30(12): 35-38.
Gong Hai-jian, Huang Wei-guo, Zhao Kai, et al. Time-frequency feature extraction based on fusion of Wigner-Ville distribution and wavelet scalogram[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(12): 35-38.
- [12] 李文臣. 高速机动目标雷达信号参数估计与成像处理[D]. [博士学位论文], 国防科学技术大学, 2009.
Li Wen-chen. Radar signal parameter estimation and imaging processing of a high speed maneuvering target[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2009.
- [13] 徐灿, 李智, 张斌. 基于点斜式 Wigner-Hough 变换的多普勒参数快速估计算法[J]. 装备指挥技术学院学报, 2011, 22(3): 124-129.
Xu Can, Li Zhi, and Zhang Bin. Fast estimation algorithm for

- Doppler parameters based on Wigner-Hough transformation of point and inclination pattern[J]. *Journal of the Academy of Equipment Command & Technology*, 2011, 22(3): 124-129.
- [14] 刘建成, 王雪松, 肖顺平, 等. 基于 Wigner-Hough 变换的径向加速度估计[J]. *电子学报*, 2005, 33(12): 2235-2238.
Liu Jian-cheng, Wang Xue-song, Xiao Shun-ping, *et al.* The estimation of radial acceleration based on Wigner-Hough transformation[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(12): 2235-2238.
- [15] 陈建文, 李士国. 基于目标运动分辨技术提取导弹目标运动特征[J]. *现代雷达*, 2003, 25(6): 5-7.
Chen Jian-wen and Li Shi-guo. The extraction of missile movement characteristics based on motion resolution technologies[J]. *Modern Radar*, 2003, 25(6): 5-7.
- [16] 邹汝平, 张延风. 旋转导弹自旋频率设计[J]. *兵工学报*, 2007, 28(2): 220-222.
Zou Ru-ping and Zhang Yan-feng. Rotating missile spin frequency design[J]. *Acta Armamentarii*, 2007, 28(2): 220-222.
- [17] Ausherman Dale A, Adam Kozma, Walker Jack L, *et al.* Developments in radar imaging[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1984, 20(4): 363-400.
- [18] 马晓岩. 现代雷达信号处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 201-217.
Ma Xiao-yan. *Modern Radar Signal Processing*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2013: 201-217.

作者简介



郑建成(1986-), 男, 湖北红安人, 2011年于空军预警学院获得硕士学位, 现任职于解放军 95246 部队, 助理工程师, 研究方向为雷达装备保障和雷达信号检测与处理。

E-mail: 13100686812@163.com



王党卫(1976-), 男, 陕西杨凌人, 2006年于国防科技大学获得博士学位, 现任职于空军预警学院, 讲师。已在《IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation》、《Microwave and Optical Technology Letters》、《自然科学进展》、《电子学报》等国内外期刊和会议上发表

表论文二十余篇, 十余篇被国际三大检索收录, 目前主要从事多通道雷达信号设计、目标检测、成像与识别的研究。

E-mail: wdwjane@tom.com



马晓岩(1962-), 男, 湖北赤壁人, 2006年于清华大学获得博士学位, 教授、博士生导师, 中国电子学会高级会员, 在国内外重要期刊及会议上发表学术论文五十余篇, 其中二十余篇被国际三大检索收录, 主要从事雷达系统、目标检测及高分辨成像的研究。

E-mail: kjldmaxy@sina.com



宣泽平(1976-), 男, 广西合浦人, 1999年于电子工程学院获得学士学位, 现任职于解放军 95246 部队, 工程师, 主要从事雷达系统和雷达装备保障研究。

E-mail: xuanzeping2008@163.com

丰孝兵(1970-), 男, 山东沂水人, 2008年于桂林空军学院获得硕士学位, 现任职于解放军 95246 部队, 总工程师, 主要从事雷达工程和雷达装备保障研究。

E-mail: Fengxb6688@126.com