

ISAR 非平稳目标成像时间和转速联合估计方法

彭石宝^{1,2}, 许稼^{2,*}, 夏斌², 冷毅³, 向家彬¹

1. 空军雷达学院 雷达成像中心, 湖北 武汉 430019

2. 清华大学 电子工程系, 北京 100084

3. 空军雷达学院 信息对抗系, 湖北 武汉 430019

摘要: 针对逆合成孔径雷达(ISAR)非平稳目标成像, 提出基于两特显点相位联合估计成像时间和转速的方法, 并得到了转速与相位斜率差(PSD)的解析表达式。首先, 基于两个特显点距离单元估计目标转动相位, 根据不同时间段转动相位线性度(PLD)选择成像时间。其次, 在适合成像的时间段, 将成像时间等分成两段, 分别提取两段时间内转动相位的斜率。最后, 基于两段观测数据 PSD 估计目标的转速, 从而实现目标距离-多普勒(RD)图像的横向定标。仿真和实测数据均验证了本文方法的有效性。

关键词: 逆合成孔径雷达; 非平稳目标; 成像时间; 转速; 横向定标

中图分类号: V243.2; TN958 **文献标识码:** A

逆合成孔径雷达(ISAR)非平稳目标成像是现今 ISAR 研究的热点和难点。目标非平稳旋转时, 长时间积累存在多个瞬时投影平面的相互叠加, 使图像模糊^[1-3]。如果减小成像观测时间, 虽然可以保证在观测时间内转速近似匀速, 但这又会因有效转动角太小, 使图像的横向分辨率降低, 所以需要成对成像时间加以分析选择。通过对成像时间进行分析选择, 可以获取目标清晰的距离-多普勒(RD)图像。但是, 该图像只是目标在 RD 平面的投影, 不能真实地反映目标的形状、尺寸信息。因此, 为了获得正确目标尺寸和几何形状等特征信息, 必须对 RD 图像进行距离向和方位向定标。距离向定标可根据距离分辨率实现, 方位向定标由目标相对于雷达转过的角度决定。遗憾的是, 目标相对于雷达的旋转是非合作的, 目标的转速及在成像积累时间内转过的角度是

未知的。

针对非平稳目标, 选择成像时间^[4-7]以获得高质量 ISAR 图像, 以及估计转动速度^[8-11]对非平稳目标 RD 图像进行横向定标是近年来 ISAR 研究的两个热点难题。然而, 现有文献大多将这两个问题当成两个独立的技术进行研究, 没有提出联合的估计方法。最近, 文献[12]提出了一种基于两特显点相位线性度(PLD)准则的非平稳目标成像时间选择新算法。本文在文献[12]的基础上, 进一步分析散射点相位与目标转速的关系, 提出了一种成像时间和转速联合估计方法。在评价转动相位线性度和选择成像时间的同时, 该方法基于两特显点相邻时刻的相位斜率差(PSD)估计目标的转动速度。该方法只利用了两个特显点距离单元信息, 实现过程简单高效。最后, 通过仿真和实测数据验证了该方法的有效性。

收稿日期: 2010-07-14; 退修日期: 2010-08-31; 录用日期: 2010-10-21; 网络出版时间: 2010-10-29 17:48

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20101029.1748.000.html

DOI: CNKI: 11-1929/V.20101029.1748.000

基金项目: 国家自然科学基金(60971087); 空装项目(kj05131)

* 通讯作者. Tel.: 010-62797132 E-mail: xujia@tsinghua.edu.cn

引用格式: 彭石宝, 许稼, 夏斌, 等. ISAR 非平稳目标成像时间和转速联合估计方法[J]. 航空学报, 2011, 32(4): 702-709. Peng Shibao, Xu Jia, Xia Bin, et al. Joint estimation of suitable imaging time and rotation velocity for ISAR maneuvering target[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(4): 702-709.

1 信号模型

经过平动补偿后, ISAR 目标可视为旋转体。在较短的成像间隔以及目标机动性不强的情况下, 可进一步将其视为平面旋转模型, 如图 1 所示, 目标的旋转中心置于目标坐标系 Oxy 的原点 O 处, 且成像起始时刻雷达视线(LOS)与 y 轴同向, 在目标转过时间 t 之后目标上任意点 $p(x_p, y_p)$ 相对于雷达的距离可表示为

$$r_p(t) = r_0 + x_p \sin \theta(t) + y_p \cos \theta(t) \quad (1)$$

式中: r_p 为散射点与目标转动中心的距离; r_0 为目标转动中心起始时刻相对于雷达的距离; $x_p = r_p \cos \theta_0, y_p = r_p \sin \theta_0$, 其中 θ_0 为散射点的水平角; $\theta(t)$ 为目标相对于雷达转过的角度。当目标绕固定转轴平稳旋转时, $\theta(t)$ 随时间线性变化, 可表示为

$$\theta(t) = \omega_v t \quad (2)$$

式中: ω_v 为转速。

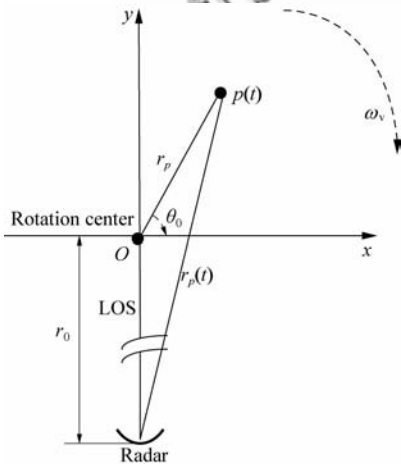


图 1 ISAR 成像模型

Fig. 1 ISAR imaging model

此时散射点 p 的转动相位可表示为

$$\varphi_p(t) = -4\pi[r_0 + x_p \sin(\omega_v t) + y_p \cos(\omega_v t)]/\lambda \quad (3)$$

式中: λ 为雷达波长。 ω_v 通常很小, 则在短的积累时间内, $\omega_v t \rightarrow 0$, 有

$$\varphi_p(t) \approx -4\pi(r_0 + y_p + x_p \omega_v t)/\lambda \quad (4)$$

即目标平稳匀速旋转时, 散射点转动相位随时间

线性变化。对该散射点做多普勒分析, 得到其多普勒频率为

$$f_{d,p} = -\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\varphi_p(t)}{dt} = \frac{2}{\lambda} x_p \omega_v \quad (5)$$

因为不同散射点横坐标不同, 所以它们在多普勒轴上分开。将式(5)中 x_p 用 $f_{d,p}$ 表示为

$$x_p = \frac{\lambda f_{d,p}}{2\omega_v} \quad (6)$$

可见, 对目标 RD 图像进行横向定标的关键在于估计目标的转速 ω_v 。当目标转轴不固定或是目标转速随时间改变时, $\theta(t)$ 随时间非线性变化, 可表示为

$$\theta(t) = \omega_v t + 0.5\omega_a t^2 + O(t^2) \quad (7)$$

式中: ω_a 为转动加速度; $O(t^2)$ 为高于 2 的高次项。此时散射点 p 的转动相位可表示为

$$\varphi_p(t) = -4\pi[r_0 + x_p \sin(\omega_v t + 0.5\omega_a t^2 + O(t^2)) + y_p \cos(\omega_v t + 0.5\omega_a t^2 + O(t^2))]/\lambda \quad (8)$$

在短的积累时间内, 将式(8)中正弦函数展开并化简得

$$\varphi_p(t) = -4\pi(r_0 + x_p \omega_v t + r_p^{nl}(t))/\lambda \quad (9)$$

式中: $r_p^{nl}(t)$ 为 p 点非平稳转动引入的距离, 呈非线性变化, 且可表示为

$$r_p^{nl}(t) = 0.5(x_p \omega_a - y_p \omega_v^2)t^2 + O(t^2) \quad (10)$$

由式(4)和式(9)可知, 在短的积累时间内, 目标绕固定轴平稳旋转时, 散射点相位随时间线性变化。否则, 散射点相位随时间非线性变化。为了后面分析的方便, 可将散射点转动相位统一表示为

$$\varphi_p(t) = \varphi_p^0 + \varphi_p^l(t) + \varphi_p^{nl}(t) \quad (11)$$

式中: $\varphi_p^0 = -4\pi r_0/\lambda$ 为散射点初始相位; $\varphi_p^l(t)$ 为线性相位, $\varphi_p^{nl}(t)$ 为非线性相位, 有

$$\left. \begin{aligned} \varphi_p^l(t) &= -4\pi x_p \omega_v t/\lambda \\ \varphi_p^{nl}(t) &= -4\pi r_p^{nl}(t)/\lambda \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

当目标平稳旋转时 $\varphi_p^{nl}(t) = 0$, 散射点转动相位线性变化, 否则, 非线性变化。因此, 基于散射点转动相位特性, 可以对适合成像的时间段进行判断选择。通常, 在适合成像的时间段, 目标绕固定转轴匀速旋转, 散射点相位线性变化。基于以上散射点相位特性, 文献[12]提出

了基于两特显点相位线性度的成像时间选择新算法。本文在文献[12]基础上,进一步分析散射点相位与转速的内在关系,提出成像时间和转速联合估计方法。

2 成像时间选择

判断目标是否线性匀速旋转的关键在于是否正确提取散射点的转动相位。而散射点的转动相位在长时间观测时,呈多项式变化。由文献[13]知,当某多项式相位复信号的信噪比大于 8 dB 时,可采用相位解缠并对解缠后的相位进行曲线拟合的方法估计信号的多项式相位。因此,可基于特显点距离单元恢复目标的转动相位。基于特显点距离单元完成(逆)合成孔径雷达(SAR/ISAR)运动补偿,是人们常常采用的一个思路,如基于特显点距离单元的目标时频参数估计^[14-15]。实际中,目标结构存在局部的角散射点,而这些角散射点容易形成特显点。特显点距离单元在成像时间内具有散射强、散射系数波动小的特点。因此可将目标包络对齐后的距离单元进行非相参积累,得到目标的平均距离像。特显点通过非相参积累后信噪比大大增加,因此可提取平均距离像幅度大的距离单元作为特显点距离单元。

提取特显点距离单元的目的是为了提取落在该距离单元中的散射点的转动相位。为了去除平动相位影响,可提取两个特显点距离单元,通过二者的共轭相乘实现平动相位补偿。忽略噪声影响,设存在两个特显点 $p_1(x_{p_1}, y_{p_1})$ 和 $p_2(x_{p_2}, y_{p_2})$ 的散射信号为

$$s_{p_1}(t) = \sigma_{p_1} \exp[j(\varphi_i(t) + \varphi_{p_1}(t))] \quad (13)$$

$$s_{p_2}(t) = \sigma_{p_2} \exp[j(\varphi_i(t) + \varphi_{p_2}(t))] \quad (14)$$

式中: σ_{p_1} 和 σ_{p_2} 分别为点 p_1 和 p_2 的幅度; $\varphi_{p_1}(t)$ 和 $\varphi_{p_2}(t)$ 分别为点 p_1 和 p_2 的转动相位; $\varphi_i(t)$ 为平动相位。平动相位对成像没有贡献,去平动后的信号可表示为

$$s(t) = s_{p_1}(t) \cdot s_{p_2}^*(t) = \sigma \exp(j\Delta\varphi_{p_1, p_2}(t)) \quad (15)$$

式中: $*$ 为共轭算子; $\sigma = \sigma_{p_1} \sigma_{p_2}$; 相位差 $\Delta\varphi_{p_1, p_2}(t)$ 为

$$\Delta\varphi_{p_1, p_2}(t) = \varphi_{p_1}(t) - \varphi_{p_2}(t) =$$

$$\Delta\varphi_{p_1, p_2}^1(t) + \Delta\varphi_{p_1, p_2}^{nl}(t) \quad (16)$$

$$\Delta\varphi_{p_1, p_2}^1(t) = -4\pi\Delta x_{p_1, p_2}\omega_v t/\lambda \quad (17a)$$

$$\Delta\varphi_{p_1, p_2}^{nl}(t) = -2\pi[(\Delta x_{p_1, p_2}\omega_a - \Delta y_{p_1, p_2}\omega_v^2)t^2 + O(t^2)]/\lambda \quad (17b)$$

式中: $\Delta x_{p_1, p_2} = x_{p_1} - x_{p_2}$; $\Delta y_{p_1, p_2} = y_{p_1} - y_{p_2}$ 。显然,去平动后信号 $s(t)$ 的相位 $\Delta\varphi_{p_1, p_2}(t)$ 特性同样能够表征目标的转动变化特性。 $\Delta\varphi_{p_1, p_2}(t)$ 为多项式相位,在信噪比高于 8 dB 时,可采用文献[13]的相位解缠并对解缠后的相位进行曲线拟合的方法恢复。

基于相位解缠并对解缠后的相位进行曲线拟合得到转动相位 $\Delta\varphi_{p_1, p_2}(t)$, 并评价其在不同时间段的相位线性度。线性度越高,线性相位分量 $\Delta\varphi_{p_1, p_2}^1(t)$ 越占主要成份,目标越接近匀速线性旋转。设时间分析窗为 T' , 观测积累时间为 T , $T' \ll T$, 则 τ 时刻的线性度用线性相位分量 $\Delta\varphi_{p_1, p_2}^1(t)$ 与 $\Delta\varphi_{p_1, p_2}(t)$ 的互相关值为^[12]

$$R(\tau) = \int_{\tau-T'/2}^{\tau+T'/2} \Delta\varphi_{p_1, p_2}^1(t) \Delta\varphi_{p_1, p_2}(t-\tau) dt \quad (18)$$

式中: $\tau \in [T-T'/2, T+T'/2]$, 线性相位分量 $\Delta\varphi_{p_1, p_2}^1(t)$ 可基于该段时间的转动相位 $\Delta\varphi_{p_1, p_2}(t)$ 直线拟合获得。若时间窗以步长 $T'/2$ 滑动, 则可得不同帧的相位线性度为

$$0 < R(\tau) \leq 1 \quad T-T'/2 < \tau < T+T'/2 \quad (19)$$

满足成像要求的成像时刻可表示为

$$\tau = \{R(\tau) \geq R_{\text{thrs}} \mid T-T'/2 < \tau < T+T'/2\} \quad (20)$$

式中: R_{thrs} 为线性度门限。在长观测时间内,满足式(20)成像时刻的观测数据都可用来成像。当选定某一个时刻 τ_0 进行成像时,从 τ_0 减少和增大的方向分别改变时间窗的长度,重新评价不同时间长度下的线性度。当线性度减少至 $R'_{\text{thrs}} = (1-\eta)R_{\text{thrs}}$ 时,停止窗长变化。其中 η 为线性度减少百分比。最后,确定最佳成像时间长度 $T_{\text{opt}} = \tau_H - \tau_L$, 其中 τ_L 为成像起始时刻, τ_H 为成像截至时刻。

需要指出的是, R_{thrs} 与 $\Delta\varphi_{p_1, p_2}(t)$ 的信噪比及 T' 有关。文献[12]给出了在高相位信噪比条件下线性度门限的经验值 $R_{\text{thrs}} = 0.995$ 和线性度减

少百分比 $\eta=0.001$ 。

3 转动速度估计

在前面选择成像时间长度的过程中,以相位线性度的减少量为准则。为什么目标绕固定转轴匀速转动,散射点相位线性度会随着积累时间的增加而减少呢?这是因为目标平稳旋转时,散射点精确的相位变化如式(3)所示。当积累时间 T_{opt} 增加时, $\sin(\omega_v T_{\text{opt}}) \approx \omega_v T_{\text{opt}}$ 不再成立。因此,去平动后适合目标成像时间段散射点的真实相位变化为

$$\Delta\varphi_{p_1, p_2}(t) = \varphi_{p_1}(t) - \varphi_{p_2}(t) = \Delta\varphi_{p_1, p_2}^1(t) = -4\pi[\Delta x_{p_1, p_2} \sin(\omega_v t) + \Delta y_{p_1, p_2} \cos(\omega_v t)]/\lambda \quad (21)$$

将得到的最佳成像时间窗长度等分成两段,第1段的积累时间为 $\tau_1 \leq t \leq \tau_1 + T_h$, 其中 $T_h = T_{\text{opt}}/2$ 。则第2段信号的积累时间为 $\tau_1 + T_h < t \leq \tau_1$ 。令 $t' = t - \tau_1$, 则这两段时间内信号的相位可分别表示为

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{p_1, p_2}(t') &= -4\pi[\Delta x_{p_1, p_2} \sin(\omega_v t') + \Delta y_{p_1, p_2} \cos(\omega_v t')] / \lambda \quad 0 \leq t' \leq T_h \quad (22) \\ \Delta\varphi_{p_1, p_2}(t' + T_h) &= -4\pi\{\Delta x_{p_1, p_2} \sin[\omega_v(t' + T_h)] + \Delta y_{p_1, p_2} \cos[\omega_v(t' + T_h)]\} / \lambda \quad 0 \leq t' \leq T_h \quad (23) \end{aligned}$$

将式(23)展开,得

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{p_1, p_2}(t' + T_h) &= -4\pi\{\Delta x_{p_1, p_2} \cos(\omega_v T_h) - \Delta y_{p_1, p_2} \sin(\omega_v T_h)\} \sin(\omega_v t') + [\Delta x_{p_1, p_2} \sin(\omega_v T_h) + \Delta y_{p_1, p_2} \cos(\omega_v T_h)] \cos(\omega_v t') / \lambda \quad (24) \end{aligned}$$

因为在 $0 \leq t' \leq T_h$ 内, 积累时间减少一半, 则正弦函数又可简化为

$$\left. \begin{aligned} \sin(\omega_v t') &\approx \omega_v t', \sin(\omega_v T_h) \approx \omega_v T_h \\ \cos(\omega_v T_h) &\approx 1, \cos(\omega_v t') \approx 1 \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

将式(25)代入式(22)和式(24), 得

$$\Delta\varphi_{p_1, p_2}(t') = -4\pi(\Delta y_{p_1, p_2} + \Delta x_{p_1, p_2} \omega_v t') / \lambda \quad (26)$$

$$\Delta\varphi_{p_1, p_2}(t' + T_h) = -4\pi[(\Delta x_{p_1, p_2} \omega_v T_h + \Delta y_{p_1, p_2}) + (\Delta x_{p_1, p_2} - \Delta y_{p_1, p_2} \omega_v T_h) \omega_v t'] / \lambda \quad (27)$$

式(26)和式(27)中右边第1项为常数项, 第2项

为关于时间的一次项, 提取相位斜率:

$$k_1 = -4\pi \Delta x_{p_1, p_2} \omega_v / \lambda \quad (28)$$

$$k_2 = -4\pi(\Delta x_{p_1, p_2} - \Delta y_{p_1, p_2} \omega_v T_h) \omega_v / \lambda \quad (29)$$

进一步可得

$$k_2 = k_1 + 4\pi \Delta y_{p_1, p_2} \omega_v^2 T_h / \lambda \quad (30)$$

因此有相邻两段时间 PSD 的 Δk 满足

$$4\pi \Delta y_{p_1, p_2} \omega_v^2 T_h / \lambda = k_2 - k_1 = \Delta k \quad (31)$$

转速估计是为了横向定标, 而横向定标是为了得到目标横向尺寸大小, 因此可忽略转动角速度的符号影响, 由式(31)可得

$$\omega_v = \sqrt{\frac{\lambda |\Delta k|}{4\pi \Delta y_{p_1, p_2} T_h}} \quad (32)$$

式中: $\Delta y_{p_1, p_2}$ 可以通过两特显点的距离单元间隔获得, 若两特显点间隔 Δn 个距离单元, 则有

$$\Delta y_{p_1, p_2} = \Delta n C / (2f_s) \quad (33)$$

式中: C 为光速; f_s 为系统采样频率。

由上述分析可知, 在适合成像的时间段内, 将成像时间等分成两段, 分别采用直线拟合的方法获取相位斜率 k_1 和 k_2 , 进而得到 $\Delta k = k_2 - k_1$ 。将 Δk 、 $\Delta y_{p_1, p_2}$ 和 T_h 代入式(32)可得到目标在该成像时间段内的转速 ω_v 。将 ω_v 代入式(6)可对目标 RD 图像进行横向定标。

4 实验

4.1 仿真验证

雷达发射线性调频信号, 系统参数为: 载频 $f_c = 10$ GHz, 信号带宽 $B = 200$ MHz, 脉宽 $T_p = 10$ μ s, 脉冲重复频率 PRF = 200 Hz, 采样频率 $F_s = 250$ MHz。目标为舰船, 散射点模型如图 2(a) 所示, 船体纵向长 65 m (y 轴), 横向宽 17 m (x 轴), 高 7.5 m (z 轴)。切向速度为 3 m/s, 径向速度为 1 m/s, 在 5 级海情下, 舰船存在偏航、纵摇和横摇三维正弦转动。积累 1 024 个脉冲, 回波信噪比 SNR = 10 dB。船桅杆位置 A(1.0, 8.5, 3.5), 船首位置 B(0, 16.5, 1.0) 处散射系数均为 10, 其他地方点散射系数为 1。

匹配滤波并包络对齐后目标高分辨距离像 (High Resolution Range Profile, HRRP) 如图 2(b) 所示。A 和 B 分别位于第 147 个距离单元和第 160 个距离单元。取出两单元复信号共轭相

乘去除平动相位,然后相位解缠并曲线拟合得到目标的转动相位,如图 2(c)所示。基于拟合后的转动相位,估计目标在不同时刻的相位线性度,窗长为 128 个脉冲。一个窗的数据称为一帧,以 64 为步长滑动,相邻帧之间重叠 64 个脉冲,共有 15 帧数据,评价这 15 帧的相位线性度,结果如图 2(d)所示,图中的直线为门限,大小为 0.995。高于门限的帧有 {4,5,6,7,8,9,10}。因此这 7 帧数据均可用来对目标成像。图 3(a)和图 3(b)分别为目标第 3 帧和第 7 帧的成像结果,可以看出第 7 帧的目标像比第 3 帧的清晰。因此,基于线性度的成像时间选择方法是有效的。

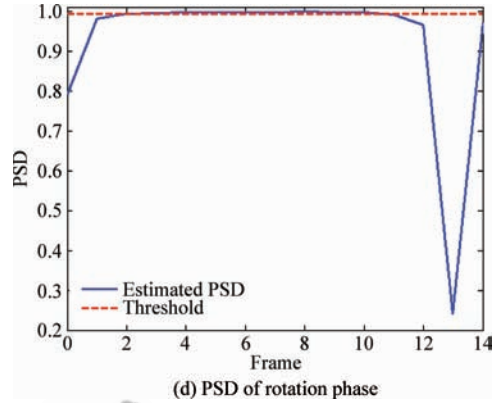


图 2 仿真模型及散射点相位特性

Fig. 2 Simulation model and scatterer phase property

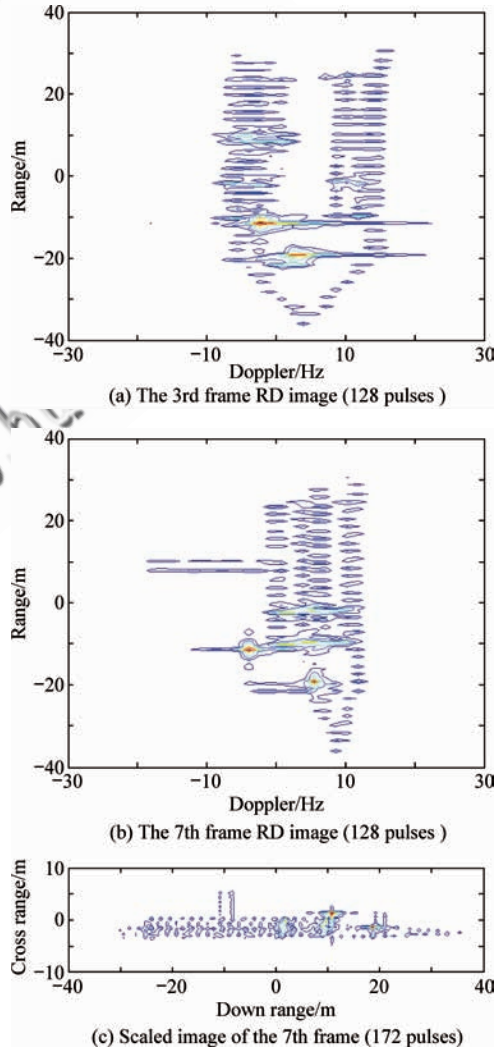
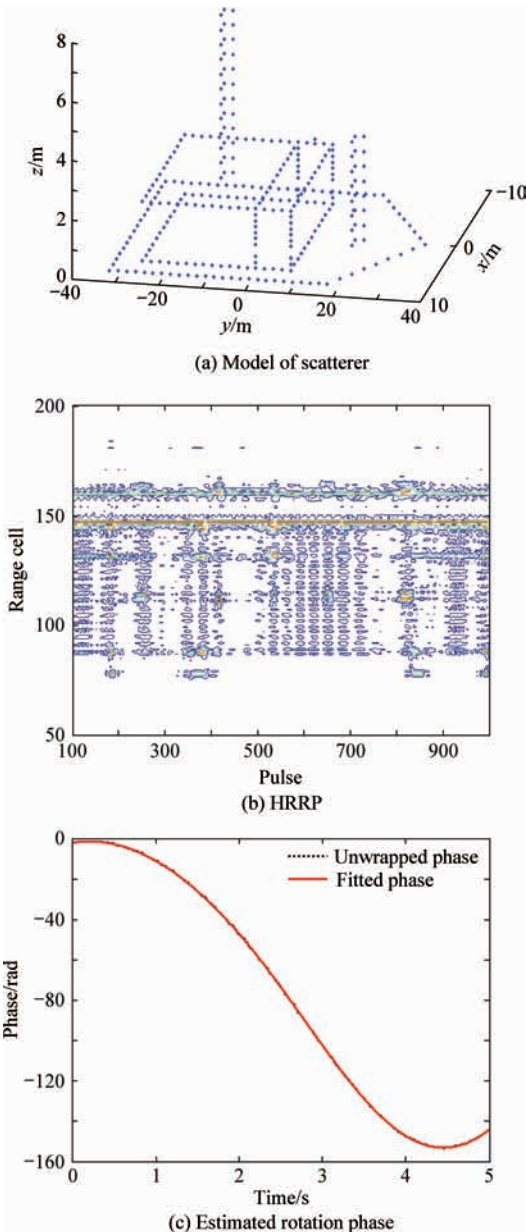


图 3 仿真模型成像时间选择及横向定标结果

Fig. 3 Imaging time selection and cross range scaling results of simulation model

对于第 7 帧数据, 成像起始时刻 $\tau_l = 7 \times 64 / \text{PRF} = 2.24 \text{ s}$, 终止时刻 $\tau_h = (7 \times 64 + 128) / \text{PRF} = 2.88 \text{ s}$, 这段时间内线性度为 0.999 9。固定 τ_h 不变, 将 τ_l 向左移动, 步长为 1 个脉冲, 当线性度减少到门限 $0.999 9 \times 0.999 0 = 0.998 9$ 时停止, 得 $\tau_{l1} = (7 \times 64 - 22) / \text{PRF} = 2.13 \text{ s}$ 。同样固定 τ_{l1} 不变, 变化 τ_h , 门限为 $0.998 9 \times 0.999 0 = 0.997 9$, 在 $\tau_{h1} = (7 \times 64 + 128 + 22) / \text{PRF} = 2.99 \text{ s}$ 时线性度达到门限值。因此, 第 1 帧数据的最佳成像时间起始时刻为 2.13 s, 终止时刻为 2.99 s, 积累时间为 0.86 s, 合计 172 个脉冲。

将这 172 个脉冲等分成两段, 估计得到第 1 段的相位斜率 $k_1 = -58.201 7$, 第 2 段相位斜率 $k_2 = -54.599 7$ 。则 $|\Delta k| = 3.602 1$, 且 $\Delta y = (160 - 147) \times 0.375 = 7.8$ 。将 $|\Delta k|$ 和 Δy 代入式 (32) 得 $\omega_v = 0.050 6 \text{ rad/s}$ 。将此 172 个脉冲 RD 图像横向定标, 定标后如图 3(c) 所示, 相比于图 3(a), 目标像更清晰, 轮廓更清楚。显然, RD 图像为目标侧视图, 横向坐标反映目标的高程信息。将 RD 图像两横向端点放大后观测其坐标, 测得定标后横向尺寸为 7.65 m (真实横向间距为 7.5 m)。因此, 基于两散射点相位特性联合估计成像时间和转速的方法准确有效。

4.2 实测数据

选取某 ISAR 实验系统对舰船的观测数据进行测试, 该系统发射线性调频步进信号, 工作在 C 波段, 合成 620 MHz 带宽。目标为海上舰船, 观测时间为 41.932 8 s, 共 4 096 个合成脉冲。包络对齐后选取分别位于第 515 个距离单元和第 553 个距离单元的两个特显点。将这两个距离单元信号共轭相乘, 相位解缠并对解缠后的相位进行曲线拟合得到转动相位如图 4(a) 所示。基于转动相位估计目标在不同帧的相位线性度, 窗长 256 个脉冲, 且窗以 128 为步长滑动, 相邻帧之间重叠 128 个脉冲, 共有 32 帧数据, 评价前 29 帧的相位线性度, 结果如图 4(b) 所示, 图中的虚线为门限, 大小为 0.995。从图 4(b) 中可以看出, 小于门限不适合成像的帧有 {0, 1, 2, 3, 5, 6, 12, 28}, 此 8 帧数据均不适合用来对目标成像。

图 5(a) 和图 5(b) 分别为目标第 5 帧和第 25 帧的成像结果。可以看出第 25 帧的目标像比第

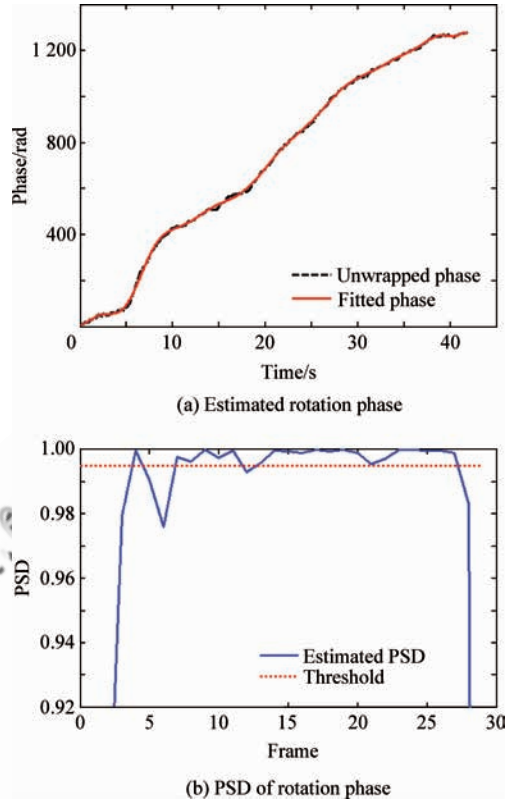
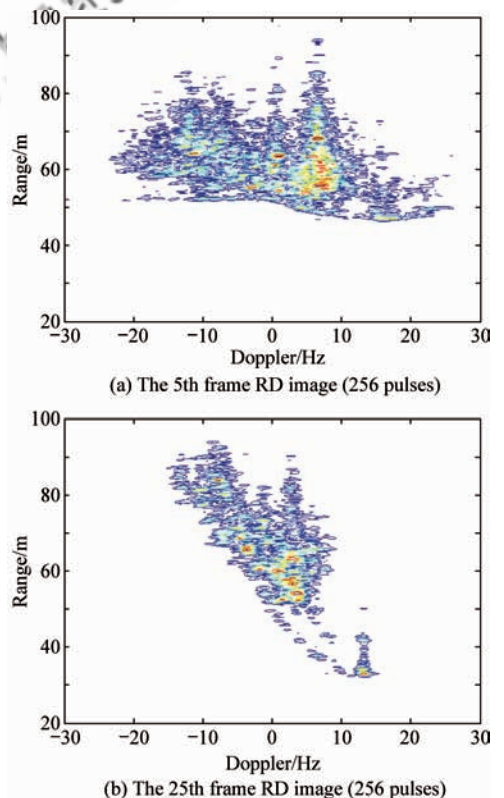


图 4 实测数据散射点相位特性分析
Fig. 4 Scatterer-phase property of real data



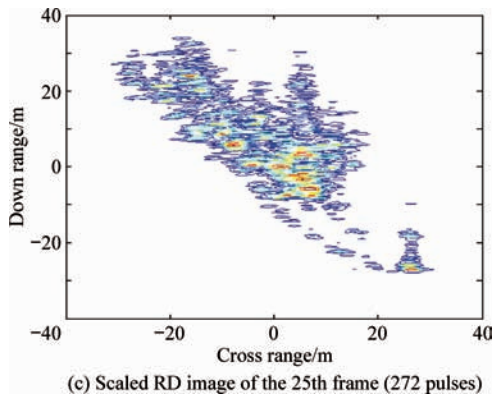


图5 实测数据成像时间选择及横向定标结果

Fig. 5 Imaging time selection and cross range scaling results of real data

5 帧的像清晰。因此,本文提出的线性度成像时间选择算法对该实测数据是有效的。对于第 25 帧数据,成像起始时刻 $\tau_l = (25 \times 128) / \text{PRF} = 32.7680 \text{ s}$,终止时刻 $\tau_h = (25 \times 128 + 256) / \text{PRF} = 35.3894 \text{ s}$,该段时间内线性度为 0.9998 , $\tau_l = 32.7680 \text{ s}$ 。固定 τ_h 不变,将 τ_l 向左移动,步长为 1 个脉冲,当线性度减少到门限 $0.9998 \times 0.9990 = 0.9988$ 时停止,得 $\tau_l = (25 \times 128 - 10) / \text{PRF} = 32.6656 \text{ s}$ 。同样,固定 τ_l 不变而变化 τ_h ,门限为 $0.9988 \times 0.9990 = 0.9978$,在 $\tau_h = (25 \times 128 + 256 + 6) / \text{PRF} = 35.4509 \text{ s}$ 时线性度达到门限值。因此,第 25 帧数据的最佳成像时间起始时刻为 32.6656 s ,终止时刻为 35.4509 s ,积累时间为 2.7853 s ,合计 272 个脉冲。

将这 272 个脉冲等分成两段,估计得到第 1 段的相位斜率 $k_1 = 28.1365$,第 2 段相位斜率 $k_2 = 28.7016$ 。则 $|\Delta k| = 0.5651$, $\Delta y = (553 - 515) \times 0.2419 = 9.1935$ 。将 $|\Delta k|$ 和 Δy 代入式 (32) 得 $\omega_v = 0.0142 \text{ rad/s}$ 。将此 172 个脉冲的 RD 图像横向定标,定标后的图像如图 5(c) 所示。相比于图 5(a),目标像更清晰,轮廓更清楚。将 RD 图像两横向端点放大后观测其坐标,发现定标后横向尺寸接近 60 m ,且纵向距离延展为 60 m ,因此船身长为 $\sqrt{60^2 + 60^2} = 84.8528 \text{ m}$ 。虽然,船体真正的尺寸未知,但从定标后图像的比例可以看出,基于 PSD 的转速估计是有效的。

5 结论

针对 ISAR 非平稳目标成像时间选择和转速

估计问题,提出了一种基于两特显点相位特性的联合估计方法。该方法在选择成像时间的同时,能够估计目标在积累时间内的转动角速度,得到角速度与两点 PSD 的解析表达式。该方法只用到两个特显点距离单元信息,实现过程简单高效。仿真和实测数据均验证了该方法的有效性。下一步,将进一步研究该方法对信噪比的适应特性,分析转速估计的极限性能。

参 考 文 献

- [1] 王勇, 许小剑. 海上舰船目标的宽带雷达散射特征信号仿真[J]. 航空学报, 2009, 30(2): 337-342.
Wang Yong, Xu Xiaojian. On wideband radar signature simulation of ships over sea surface[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(2): 337-342. (in Chinese)
- [2] Munoz-Ferreras J M, Perez-Martinez F. Uniform rotational motion compensation for inverse synthetic aperture radar with non-cooperative targets[J]. IET Radar Sonar Navigation, 2008, 2(1): 25-34.
- [3] Gao Z Z, Li Y C, Xing M D, et al. ISAR imaging of manoeuvring targets with the range instantaneous chirp rate technique[J]. IET Radar Sonar Navigation, 2009, 3(5): 449-460.
- [4] 汪玲, 朱兆达, 朱岱寅. 机载 ISAR 舰船侧视和俯视成像时间段选择[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(12): 2835-2839.
Wang Ling, Zhu Zhaoda, Zhu Daiyin. Interval selections for side-view or top-view imaging of ship targets with airborne ISAR[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(12): 2835-2839. (in Chinese)
- [5] Pastina D, Spina C. Slope-based frame selection and scaling technique for ship ISAR imaging[J]. IET Signal Processing, 2008, 2(3): 265-276.
- [6] Martorella M, Berizzi F. Time windowing for highly focused ISAR image reconstruction[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2005, 41(3): 992-1007.
- [7] 韩兴斌, 胡卫东, 郁文贤. 基于散射点信号特性的 ISAR 成像时间选择算法[J]. 信号处理, 2007, 23(5): 705-709.
Han Xingbin, Hu Weidong, Yu Wenxian. An algorithm for selecting ISAR imaging intervals based on the scatter-signal property[J]. Signal Processing, 2007, 23(5): 705-709. (in Chinese)
- [8] Martorella M. A novel approach for isar image cross-range scaling[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(1): 281-294.
- [9] 李玺, 顾红, 刘国岁. ISAR 成像中转角估计的新方法[J].

- 电子学报, 2000, 28(6):44-47.
- Li Xi, Gu Hong, Liu Guosui. A method for estimating the rotation angle of the ISAR image[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(6): 44-47. (in Chinese)
- [10] Wang Y, Jiang Y C. A novel algorithm for estimating the rotation angle in ISAR imaging[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2008, 5(4): 608-609.
- [11] Yeh C M, Xu J, Peng Y N, et al. Cross-range scaling for ISAR based on image rotation correlation[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(3): 597-601.
- [12] 彭石宝, 许稼, 向家彬, 等. 基于相位线性度的 ISAR 非平稳目标成像时间选择新算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12):2637-2640.
- Peng Shibao, Xu Jia, Xiang Jiabin, et al. A novel ISAR imaging time selection method for maneuvering target based on phase linear degree[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(12): 2637-2640. (in Chinese)
- [13] Djuric P M, Kay S M. Parameter estimation of chirp signals[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1990, 38(12): 2118-2162.
- [14] Wang Y X, Ling H, Chen V C. ISAR motion compensation via adaptive joint time-frequency technique[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(2): 670-676.
- [15] Li J F, Ling H, Chen V C. An algorithm to detect the presence of 3D target motion from ISAR data[J]. Multidimensional Systems and Signal Processing, 2003, 14(1/2/3): 223-240.

作者简介:

彭石宝(1982—) 男,博士研究生。主要研究方向:雷达成像与目标识别。

Tel: 010-62797132

E-mail: pengshitou@yahoo.com.cn

许稼(1975—) 男,博士后,副教授。主要研究方向:信号检测与估计理论,SAR/ISAR 成像技术,目标识别,阵列信号处理及自适应信号处理等。

Tel: 010-62797132

E-mail: xujia@tsinghua.edu.cn

Joint Estimation of Suitable Imaging Time and Rotation Velocity for ISAR Maneuvering Target

PENG Shibao^{1,2}, XU Jia^{2,*}, XIA Bin², LENG Yi³, XIANG Jiabin¹

1. Radar Imaging Center, Airforce Radar Academy, Wuhan 430019, China

2. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

3. Department of Information Counter, Airforce Radar Academy, Wuhan 430019, China

Abstract: In this paper, a method of joint estimation of imaging time and rotation velocity is proposed for inverse synthetic aperture radar (ISAR) maneuvering targets, and the closed expression form of rotation velocity with phase slope difference (PSD) is derived in detail. First, the target rotation phase is retrieved based on two prominent scatterers, and the suitable imaging times are selected as the intervals with high phase linearity degree (PLD). Second, the rotation phase during the suitable imaging time is divided into two half segments, and the PSD between the two half segments is estimated by their difference. Accordingly, the rotation velocity can be obtained based on the PSD, and the range-Doppler(RD) image cross range scaling can be realized by using the estimated rotation velocity. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by using simulated as well as real data.

Key words: inverse synthetic aperture radar; maneuvering target; imaging time; rotation velocity; cross range scaling

Received: 2010-07-14; Revised: 2010-08-31; Accepted: 2010-10-21; Published online: 2010-10-29 17:48

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20101029.1748.000.html DOI:CNKI:11-1929/V.20101029.1748.000

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (60971087); Air Force General Project (kj05131)

* Corresponding author. Tel.: 010-62797132 E-mail: xujia@tsinghua.edu.cn