

doi:10.3788/gzxb20184711.1128003

机动目标逆合成孔径激光雷达成像算法

吕亚昆¹, 吴彦鸿¹, 薛俊诗², 王宏艳²

(1 航天工程大学 电子与光学工程系, 北京 101416)

(2 航天工程大学 航天信息学院, 北京 101416)

摘要:针对逆合成孔径激光雷达对机动目标成像时,其回波信号存在距离向色散和方位向多普勒时变的问题,在建立机动目标精确回波信号模型的基础上,提出一种基于积分立方次相位函数-分数阶傅里叶变换的成像算法.在距离压缩时,首先采用积分立方次相位函数快速估计出回波脉冲的调频率,进而在最佳旋转角下采用分数阶傅里叶变换实现距离像压缩,消除距离色散.经过运动补偿后,在方位压缩时结合积分立方次相位函数-分数阶傅里叶变换与 Clean 技术实现对每一距离单元上强弱散射点的分离成像,解决由于机动运动产生的方位多普勒时变而形成的图像散焦问题.最后,通过散射点模型的仿真实验,验证了所提方法的有效性.

关键词:逆合成孔径激光雷达;机动目标成像;积分立方次相位函数;分数阶傅里叶变换;Clean 技术

中图分类号:TN958

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)11-1128003-11

Inverse Synthetic Aperture Ladar Imaging Algorithm for Maneuvering Target

LÜ Ya-kun¹, WU Yan-hong¹, XUE Jun-shi², WANG Hong-yan²

(1 Department of Electronic and Optical Engineering, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

(2 School of Space Information, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

Abstract: To solve the problem of range dispersion and azimuth Doppler time-variation in echo when imaging maneuvering target with inverse synthetic aperture ladar, the accurate echo model of maneuvering target is built, and an imaging algorithm based on integral cubic phase function-fractional Fourier transform is proposed. In range compression, the integral cubic phase function is used to estimate the modulation frequency of the echo pulse quickly, and then the fractional Fourier transform is used to realize the range compression at the optimal rotation angle. In this way, the range dispersion is eliminated. After motion compensation, the integral cubic phase function-fractional Fourier transform is combined with the Clean technique to achieve the separation imaging of the strong and weak scattering points on each range cell, solving the problem of image defocusing due to the azimuth Doppler time-varying. Finally, the validity of the proposed method is verified by the simulation experiment of scatter point model.

Key words: Inverse synthetic aperture ladar; Maneuvering target imaging; Integral cubic phase function; Fractional Fourier transform; Clean technique

OCIS Codes: 280.6730; 280.3640; 280.4750; 280.5600

0 引言

随着雷达探测技术的发展,目标的高精度成像已成为探测任务的重要组成部分.逆合成孔径激光雷达(Inverse Synthetic Aperture Ladar, ISAL)结合了相干激光技术和逆合成孔径技术,突破了实际孔径和衍射

基金项目:军队探索项目(No.7131145)资助

第一作者:吕亚昆(1989-),男,博士研究生,主要研究方向为逆合成孔径激光雷达成像.Email:lyke123@sina.com

导师:吴彦鸿(1971-),男,教授,博士,主要研究方向为信息获取与处理、信息对抗等.Email:mail2wyh@163.com

收稿日期:2018-06-06;录用日期:2018-09-05

<http://www.photon.ac.cn>

的限制,既克服了传统微波成像雷达不能为远距离目标、小目标成像提供足够距离分辨率的缺点,又解决了传统成像激光雷达无法实现对运动目标高分辨实时成像的问题^[1,2],是理论上能够在上千公里距离获取厘米级分辨率的唯一光学手段^[3].因此,ISAL 成像能够满足对于目标监视领域高精度成像、准实时成像需求.

ISAL 采用激光作为辐射源,具有超高载频、超大带宽、极短波长的特点,当其对机动目标成像时,会产生距离向色散和方位多普勒时变的问题.目前对机动目标的成像方法主要分为参数估计法和时频分析法.参数估计法是将信号回波建模为多分量模型,估计出信号的机动参数,再对信号进行补偿后成像,常用估计方法有最大似然法^[4]、高阶模糊函数^[5]、离散调频傅里叶变换^[6]以及多种改进算法等^[7],此类方法普遍需要进行参数搜索,高精度估计时计算量较大.时频分析法是通过时频分析获得信号的瞬时多普勒,进而利用距离-瞬时多普勒进行成像,常用方法有魏格纳分布 (Wigner Ville Distribution, WVD)^[8]、Chirplet 分解法^[9]等,此类方法的缺点是前者存在交叉项,影响成像质量,后者需要多维搜索,计算量较大.另外还有将两类方法相结合的瞬时多普勒重构成像方法^[10],在时频分析的基础上,通过参数估计法得到信号的调频率和中心频率,然后重构瞬时多普勒进而成像,但是依然存在两类算法的缺点.由于 ISAL 的高分辨能力会产生大数据量,为此需要寻找一种适合于 ISAL 的快速高效成像方法.

本文首先建立了机动目标的精确回波模型,将信号回波按其相位特征分别在距离向和方位向建模成调频率相同和不同的多分量线性调频信号;然后,在距离压缩时,利用基于非均匀傅里叶变换 (Non-Uniform Fast Fourier Transform, NUFFT) 的积分立方次相位函数 (Integral Cubic Phase Function, ICPF) 快速估计出回波信号的调频率,进而在最佳旋转角下采用分数阶傅里叶变换 (Fractional Fourier Transform, FRFT) 实现距离像压缩,消除距离色散;在方位压缩时,将 ICPF-FRFT 与 Clean 技术相结合,实现对距离单元上强弱散射点的分离成像,解决方位散焦问题;最后,通过散射点模型的仿真实验,验证了方法的有效性.

1 ISAL 目标回波信号模型

建立如图 1 所示的 ISAL 转台目标成像几何模型^[11].其中, O 为目标质心, XOY 为相对于目标的直角坐标系.假设 t 时刻 (t 为全时间且满足 $t = t_k + t_m$, 其中 t_k 为距离向快时间, t_m 为方位慢时间, $m = 1, 2, \dots, M$), 目标几何中心相对雷达距离为 $R_0(t)$, 目标相对雷达的旋转角度为 $\theta(t)$, 目标上任意点目标 $P(x, y)$ 与雷达之间的距离斜距 $R_p(t)$ 为

$$R_p(t) = \sqrt{R_0(t)^2 + r_p^2 - 2R_0(t)r_p \cos[\theta(t) + \frac{\pi}{2}]} \approx R_0(t) + x \sin\theta(t) + y \cos\theta(t) \quad (1)$$

当目标做机动运动时, $R_0(t)$ 和 $\theta(t)$ 可按泰勒展开成时间 t 的函数.对于机动目标由于具有一定的惯性,并且 ISAL 成像时间较短、成像所需要的累计转角较小,因此目标和雷达的相对运动可近似到二阶分量,即

$$R_0(t) = R_0 + v_0 t + \frac{1}{2!} a t^2 \quad (2)$$

$$\theta(t) = \theta_0 + \omega t + \frac{1}{2!} \Omega t^2 \quad (3)$$

式中, R_0 为初始距离, v_0 为径向速度, a 为径向加速度; θ_0 为初始旋转角, ω 为旋转角速度, Ω 为旋转角加速度.

由于 ISAL 的波长在微米量级,对目标的运动及其敏感,因此快时间对于距离像的影响不能忽略,而对转动角的影响可以忽略^[12],所以式(2)、(3)可分别化解为

$$R_0(t) = R_0 + v_0(t_m + t_k) + \frac{1}{2} a (t_m + t_k)^2 = R_0 + v_0 t_m + \frac{1}{2} a t_m^2 + (v_0 + a t_m) t_k + \frac{1}{2} a t_k^2 = R_0(t_m) + v(t_m) t_k + \frac{1}{2} a t_k^2 \quad (4)$$

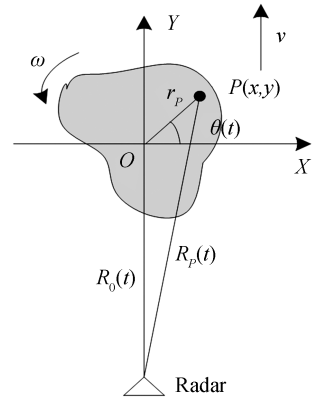


图 1 ISAL 成像几何
Fig.1 ISAL imaging geometry

$$\theta(t) \approx \theta(t_m) = \theta_0 + \omega t_m + \frac{1}{2} \Omega t_m^2 \quad (5)$$

式中, $R_0(t_m)$ 和 $v(t_m)$ 分别表示随方位时间变化的径向距离和速度。

根据式(1)~(5), 令 $R_d(t_m) = x \sin\theta(t_m) + y \cos\theta(t_m)$ 可将式(1)重新写为

$$R_p(t) \approx R_0(t_m) + R_d(t_m) + v(t_m)t_k + \frac{1}{2} a t_k^2 \quad (6)$$

ISAL 通常采用超大带宽的线性调频激光信号来实现距离向的高分辨率, 发射信号 s_t 可表示为

$$s_t(t_k, t_m) = \text{rect}\left(\frac{t_k}{T_p}\right) \exp(j2\pi f_c t + j\pi k t_k^2) \quad (7)$$

$$\text{rect}\left(\frac{t_k}{T_p}\right) = \begin{cases} 1, & |t_k| \leq T_p/2 \\ 0, & |t_k| > T_p/2 \end{cases} \quad (8)$$

式中, T_p 为脉冲宽度, f_c 为发射信号载频, k 为调频率。

雷达经过时间延迟 $\tau = 2R(t)/c$ 接收到点 P 的回波信号, 则回波信号 s_r 表示为

$$s_r(t_k, t_m) = \sigma \text{rect}\left(\frac{t_k - \tau}{T_p}\right) \exp[j2\pi f_c (t - \tau) + j\pi k (t_k - \tau)^2] \quad (9)$$

当 ISAL 采用光外差相干探测接收回波信号时, 假设参考时延为 $\tau_{\text{ref}} = 2R_{\text{ref}}(t_m)/c$, 则参考信号 s_{ref} 可表示为

$$s_{\text{ref}}(t_k, t_m) = \text{rect}\left(\frac{t_k - \tau_{\text{ref}}}{T_p}\right) \exp[j2\pi f_c (t - \tau_{\text{ref}}) + j\pi k (t_k - \tau_{\text{ref}})^2] \quad (10)$$

则经过外差探测输出后的信号为

$$s_o(t_k, t_m) = s_r(t_k, t_m) \cdot s_{\text{ref}}^*(t_k, t_m) = \sigma_p \text{rect}\left(\frac{t_k - \tau}{T_p}\right) \exp[j2\pi f_c (\tau_{\text{ref}} - \tau) - j\pi k (\tau_{\text{ref}}^2 - \tau^2) + j2\pi k (\tau_{\text{ref}} - \tau) t_k] \quad (11)$$

令 $R_\Delta = R_p(t) - R_{\text{ref}}(t_m) = \Delta R_{mP} + v(t_m)t_k + \frac{1}{2} a t_k^2$, 其中 $\Delta R_{mP} = R_0(t_m) + R_d(t_m) - R_{\text{ref}}(t_m)$, 在单次脉冲回波内方位时间为固定值。

将式(4)、(5)、(6)代入式(11)中, 并将结果化解为快时间的多项式形式得

$$s_o(t_k, t_m) = \sigma_p \text{rect}\left(\frac{t_k - \tau}{T_p}\right) \cdot \exp[j2\pi (P_0 + P_1 t_k + P_2 t_k^2 + P_3 t_k^3 + P_4 t_k^4)] \quad (12)$$

其中,

$$P_0 = 2k \frac{\Delta R_{mP} (\Delta R_{mP} + 2R_{\text{ref}})}{c^2} - 2f_c \frac{\Delta R_{mP}}{c} \quad (13)$$

$$P_1 = v(t_m) \left(4k \frac{\Delta R_{mP} + R_{\text{ref}}(t_m)}{c^2} - \frac{2f_c}{c} \right) - \frac{2k}{c} \Delta R_{mP} \quad (14)$$

$$P_2 = -\frac{a f_c}{c} + 2ak \frac{R_0(t_m) + R_d(t_m)}{c^2} + 2k \frac{v(t_m)^2}{c^2} - 2k \frac{v(t_m)}{c} \quad (15)$$

$$P_3 = 2ak \frac{v(t_m)}{c^2} - \frac{ak}{c} \quad (16)$$

$$P_4 = \frac{ka^2}{2c^2} \quad (17)$$

式中, $\Delta R_{mP} = R_0(t_m) + R_d(t_m) - R_{\text{ref}}(t_m)$, 当 $R_{\text{ref}}(t_m)$ 精确估计时近似等于 $R_0(t_m)$, $\Delta R_{mP} = R_d(t_m)$ 只与目标上散射点在方位时间上有关。多项式系数的具体解释为:

- 1) P_0 是只与方位慢时间相关的相位项, $2f_c \Delta R_{mP}/c$ 是实现方位压缩所必须的项, 不影响距离向压缩;
- 2) P_1 中包含距离向信息 $2k \Delta R_{mP}/c$, 是实现距离向压缩的项;
- 3) P_2 为线性调频项, 影响距离向成像结果, 如果采用常规 DFT 进行距离向的压缩处理时, P_2 的存在会导致压缩后出现距离像谱峰分裂和展宽, 形成距离色散效应, 因此需要对线性调频项进行相位补偿;
- 4) P_3 和 P_4 为目标速度和加速度引起的三次和四次相位项, 由于在一个脉冲周期 T_p 内, $c \gg av(t_m)$,

$T_p^2 \ll c/2kT_p, T_p^3 a^2 \ll c^2/2kT_p$, 所以 P_3 和 P_4 对频谱展宽的影响可以忽略。

由以上分析可知在较短的成像时间内,二阶多项式近似就可以较好地反映出机动目标的相对径向运动状态,满足成像需求,因此忽略三次及以上高阶项的影响,同时由式(15)可见,单次脉冲回波内所有散射点的线性调频项近似是相同的固定值,而不同脉冲回波调频率随慢时间 t_m 变化,因此需要对脉冲回波序列逐一进行处理。

2 基于 ICPF-FRFT 的距离向成像

FRFT 是一种广义傅里叶变换,可以较好地实现对线性调频信号的聚焦^[13],信号 $s(t)$ 的 FRFT 定义为

$$S_\alpha(u) = F^p[s(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) K_\alpha(t, u) dt \quad (18)$$

式中, p 为 FRFT 的阶数,可以为任意实数, α 为旋转角且 $\alpha = p\pi/2$, $K_\alpha(t, u)$ 为变换算子,表达式为

$$K_\alpha(u, t) = \begin{cases} \sqrt{1 - j \cot \alpha} \exp\{j\pi[(t^2 + u^2) \cot \alpha - 2ut \csc \alpha]\}, & \alpha \neq n\pi \\ \delta(u - t), & \alpha = 2n\pi \\ \delta(u + t), & \alpha = (2n + 1)\pi \end{cases} \quad (19)$$

FRFT 相当于将信号在时频面上逆时针旋转角度 α 后在频率轴上进行投影,当 FRFT 的 u 轴旋转到与信号的时频脊线垂直时,信号投影到分数阶频率 u 轴上的幅值最大,此时的旋转角称为最佳旋转角度,记为 α_k 。因此,可以利用 FRFT 在最佳旋转角度下的投影进行距离向成像,其成像原理如图 2 所示^[11]。

FRFT 需要进行二维峰值搜索来实现距离像压缩,精度与计算量难以兼顾。文献[14,15]提出一种快速估计信号调频率的立方相位函数(Cubic Phase Function, CPF)方法以及积分形式的 ICPF 方法,该方法仅需要一维搜索和一次双线性变换就可以估计出信号的调频率,具有更好的抗噪性能。因此,本文首先采用 ICPF 估计出光外差输出信号的调频率,进而计算出 FRFT 的最佳旋转角和阶数,最后用最佳阶数的 FRFT 完成距离向的成像。FRFT 需要在 (α, u) 二维平面进行峰值搜索来获取最优旋转角。因此,距离像压缩效果取决于 α_k 的取值,其精度容易受到搜索角度分辨率的影响,高精度搜索时运算量较大。

信号 $s(t)$ 的 CPF 定义为

$$C_{CPF}(t, \mu) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t + \tau) s(t - \tau) \exp(-j\mu\tau^2) d\tau \quad (20)$$

将距离像信号式(12)带入式(20)中可得

$$C_{CPF}(t, \mu) = \sigma_p^2 \exp[\varphi(t_k)] \int_0^{T_p} \exp[-j2\pi(\mu - 2P_2)\tau^2] d\tau = \sigma_p^2 \exp[j2\pi(P_0 + P_1 t_k + P_2 t_k^2)] \delta(\mu - 2P_2) \quad (21)$$

式中, $\varphi(t_k) = j2\pi(P_0 + P_1 t_k + P_2 t_k^2)$, δ 是狄拉克函数。可以看出,信号能量将沿着调频斜率分布,搜索峰值即可得到调频斜率 $\mu = 2P_2$ 。由于 CPF 属于双线性变换,当信号为多分量信号时会产生交叉项和虚假伪峰,影响算法的估计性能。因此,可以将 CPF 沿着时间轴进行积分,则其能量将会在调频斜率上进行积累,有效抑制交叉项和伪峰。信号的 ICPF 变换只会在其调频斜率处呈现尖峰,只要检测信号回波的 ICPF 的峰值,即可获得调频率的估计值,记为 μ_k ,即

$$C_{ICPF}(\mu) = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} |CPF(t, \mu)|^2 dt \quad (22)$$

$$\mu_k = \arg \max_{\mu} |ICPF(\mu)| \quad (23)$$

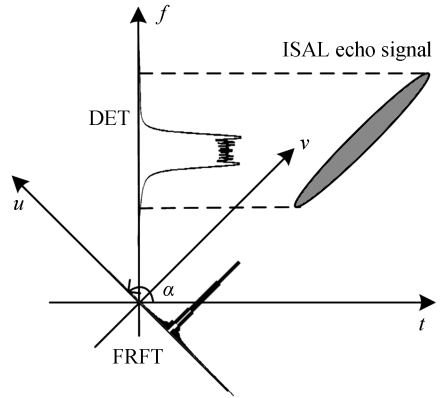


图2 DFT与FRFT实现距离压缩原理
Fig.2 Range compression via DFT and FRFT

由于 ICPF 需要对信号的 τ^2 进行计算,因此可以采用文献[16]提出的 NUFFT 实现算法的快速计算能力.假设单次脉冲回波的采样点为 N ,变换域的采样点数 M ,则直接计算形式的 ICPF 复杂度为 $O(N^2M)$,而采用 NUFFT 计算方式的 ICPF 复杂度为 $O(NM\log_2(N))$,有效降低了算法的复杂度,这对于数据量较大的 ISAL 有较好的适应性.

利用离散 FRFT 计算时,需要对信号参数进行量纲归一化^[13],调频率与旋转角之间的关系式为

$$\mu_k = -\cot(\alpha_k) \cdot \frac{f_s^2}{N} \quad (24)$$

此时的 FRFT 阶数 p_k 为

$$p_k = \frac{2\alpha_k}{\pi} = \frac{2}{\pi} \operatorname{arccot} \left(-\frac{\mu_k f_s^2}{N} \right) \quad (25)$$

对光外差后的信号回波(式(14))进行 p_k 阶的 FRFT,得到距离向压缩为

$$S_o(u, t_m) = F^{p_k} [s_o(t_k, t_m)] = \sigma_p A(u) \cdot \exp(j2\pi P_0) \int_{-\infty}^{\infty} \operatorname{rect} \left(\frac{t_k - \tau}{T_p} \right) \cdot \exp[j2\pi(P_1 - u \operatorname{csc}\alpha)t_k] \cdot \exp[j\pi(2P_2 + \cot\alpha)t_k^2] dt_k \Big|_{\alpha=\alpha_k} = \sigma_p T_p A(u) \exp(j2\pi P_0) \cdot \operatorname{sinc} \left[T_p \left(\frac{u}{\sin\alpha_k} - P_1 \right) \right] \quad (26)$$

式中, $A(u) = \sqrt{1+j2P_2} \exp(-j2\pi P_2 u^2)$.

ICPF 是非搜索方法,当信号信噪比大于 3 dB 时,估计精度接近克拉美罗界^[17],能够准确计算出信号真实调频率,而当信噪比小于 3 dB,估计精度有所下降,因此为防止在低信噪比下计算得到的旋转角并非最佳旋转角,可以将 ICPF 计算得到的旋转角作为初始值,并结合最小熵来进一步得到最佳旋转角.其依据是,旋转角度越接近最佳旋转角时,FRFT 变换后目标各散射点回波能量聚集性就越好,距离像的波形锐化度也越高,包络波形熵也就越小.

假设某次回波在旋转角度 α_k 进行 FRFT 变换后的实包络序列可表示为

$$|S_{\alpha_k}(u)| = |S_{\alpha_k}(1), S_{\alpha_k}(2), \dots, S_{\alpha_k}(N)| \quad (27)$$

式中, N 为距离采样点数.则包络熵定义为

$$H_{\alpha_k}(n) = -\sum_{n=1}^N p_{\alpha_k}(n) \ln[p_{\alpha_k}(n)] \quad (28)$$

式中, $p_{\alpha_k}(n) = |S_{\alpha_k}(n)| / \sum_{n=1}^N |S_{\alpha_k}(n)|$.

具体可以在旋转角度区间 $[\alpha_k - \Delta\alpha, \alpha_k + \Delta\alpha]$ 内以步长 Δ 进行搜索,角度区间中 $\Delta\alpha$ 和步长 Δ 可根据经验设置,例如 $\Delta\alpha = \alpha_k/10$ 和 $\Delta = 100$.最佳旋转角的取值为

$$\{\alpha\} = \arg \min_{\alpha} [H_{\alpha_k}(n)] \quad (29)$$

3 基于 ICPF-FRFT 的方位向成像

3.1 方位向回波信号特征

为便于分析,假设距离压缩后的信号已完成平动补偿,因此回波信号可以转换成以质心为参考点的转台模型,则对于 p 点处方位子回波信号可表示为

$$s_p(t) \approx \sigma \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} R_d(t) \right] = \sigma \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} [x_p \sin\theta(t) + y_p \cos\theta(t)] \right\} \quad (30)$$

式中, $t \approx t_m$, $\lambda = \frac{f_c}{c}$ 为发射信号波长, σ 为平补偿后的信号幅度.

由于 ISAL 波长在 μm 量级,要实现 mm 量级的成像分辨率,所需要的转动积累角在 mrad 量级,因此 ISAL 成像时间很短,机动目标的转动可以只考虑到二阶分量,即用式(31)的小角度近似条件将式(30)展开成时间的二次函数

$$s_p(t) = \sigma \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} \left(\varphi_0 + f_a t + \frac{1}{2} k_a t^2 \right) \right] \quad (31)$$

$$\begin{cases} \sin\theta(t) = \sin\left(\theta_0 + \omega t + \frac{1}{2}\Omega t^2\right) \approx \theta_0 + \omega t + \frac{1}{2}\Omega t^2 \\ \cos\theta(t) = \cos\left(\theta_0 + \omega t + \frac{1}{2}\Omega t^2\right) \approx 1 - \left(\theta_0 + \omega t + \frac{1}{2}\Omega t^2\right)^2 \end{cases} \quad (32)$$

其中

$$\phi_0 = x_p \theta_0 + y_p \left(1 - \frac{1}{2}\theta_0^2\right) \quad (33)$$

$$f_a = x_p \omega - y_p \theta_0 \omega \quad (34)$$

$$k_a = \frac{1}{2}(x_p \Omega - y_p \omega^2 - y_p \theta_0 \Omega) \quad (35)$$

因此,实际情况中,对于单一散射点方位回波为单分量的线性调频信号,同一距离单元上分布着多个强度不同的散射点,因此方位回波变为线性调频率不相同的多分量线性调频信号,即

$$\hat{s}(t_m) = \sum_{i=1}^I \sigma_i \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} \left(\phi_{0i} + f_{ai} t_m + \frac{1}{2} k_{ai} t_m^2\right)\right] \quad (36)$$

式中, ϕ_{0i} 、 k_{ai} 、 f_{ai} 满足式(33)~(35)。

3.2 基于 ICPF-FRFT 的方位向压缩

ICPF 能够有效抑制多分量信号之间因互扰产生的交叉项和伪峰,所以依然可以采用 ICPF-FRFT 对方位向信号进行成像,但是强信号分量会影响弱信号分量的检测^[18],因此,结合 Clean 技术与 ICPF-FRFT,把信号由强到弱排列,逐次估计出信号的调频斜率,然后再用 FRFT 针对不同调频斜率下的信号分量进行成像.具体步骤为:

1) 计算某一距离单元回波信号的 ICPF,估计出最强信号的调频斜率 k_{ai} ,即

$$\hat{s}(t_m) = \hat{s}(\phi_{0i}, f_{ai}, k_{ai}, t_m) + \sum_{l=1, l \neq i}^I \hat{s}(\phi_{0l}, f_{al}, k_{al}, t_m) \quad (37)$$

$$k_{ai} = \arg \max_{k_a} |\text{ICPF}[\hat{s}(t_m)]| = \text{ICPF}[\hat{s}(\phi_{0i}, f_{ai}, k_{ai}, t_m)] \quad (38)$$

式中, $\hat{s}(\phi_{0i}, f_{ai}, k_{ai}, t_m)$ 表示第 i 个子回波分量。

2) 由式(24)和式(25)计算最佳旋转角度 α_i 和对应的阶数 p_{ki} ,进行 FRFT,搜索峰值得到对应位置 u_i ,即

$$\hat{S}_a(u) = F^{p_{ki}} [\hat{s}(\phi_{0i}, f_{ai}, k_{ai}, t_m)] + \sum_{l=1, l \neq i}^I F^{p_{kl}} [\hat{s}(\phi_{0l}, f_{al}, k_{al}, t_m)] = \hat{S}_{a_i}^i(u) + \sum_{l=1, l \neq i}^I \hat{S}_{a,l}(u) \quad (39)$$

$$\{u_i\} = \arg \max_u [|\hat{S}_{a_i}^i(u)|] \quad (40)$$

3) 运用 Clean 技术将峰值点分离,即构造一个以 u_i 为中心的窄带滤波器 $W(u_i)$,分离出第 i 个最强分量,将该峰值点作为第 i 个分量的横向聚焦像 $\hat{S}_{a_i}^i(u)$,即

$$\hat{S}_{a_i}^i(u) = \hat{S}_{a_i}^i(u) W(u_i) \quad (41)$$

$$\hat{S}_{a,i}(u) = A(u) \sigma_i \exp(j2\pi\phi_{0i}) \text{sinc}\left[T_p \left(\frac{u}{\sin\alpha} - f_{ai}\right)\right] \quad (42)$$

式中, $A(u) = \sqrt{1 - j \cot\alpha} \exp(j\pi u^2 \cot\alpha)$ 。

4) 对剩下的滤波器带外部分做旋转角度为 $-\alpha_i$ 的 FRFT,将信号变换到时域,即

$$\hat{s}_{i+1}(t_m) = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{S}_{a_i}^i(u) [1 - W(u_i)] K_{-\alpha_i}(t_m, u) du \quad (43)$$

5) 重复步骤 1)~4),直至当前距离单元内所有散射点横向像被分离出(判断信号分量低于一定幅度,则认为分离完毕);

6) 对分离出的各散射点横向像作变标处理 $u' = u/\sin\alpha$,并进行线性叠加,得到目标方位像;

7) 对各距离单元按照排列序号,采用 1)~6),便可获取二维 ISAL 图像。

由以上步骤可以得到机动目标 ISAL 成像算法流程如图 3 所示。

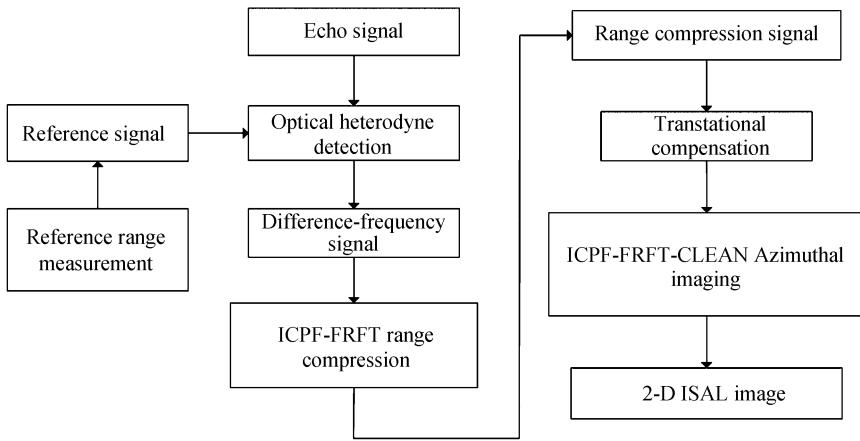


图3 机动目标 ISAL 成像算法流程

Fig.3 ISAL imaging algorithm flow for maneuvering target

4 仿真实验

为验证所提算法的有效性,以飞机散射点模型^[1,11]进行仿真实验,模型如图4所示.雷达和目标的仿真参数设置如表1,其中雷达参数为可实现的典型参数,距离分辨率为0.001 m,目标运动参数设置为相对ISAL转台运动的参数.

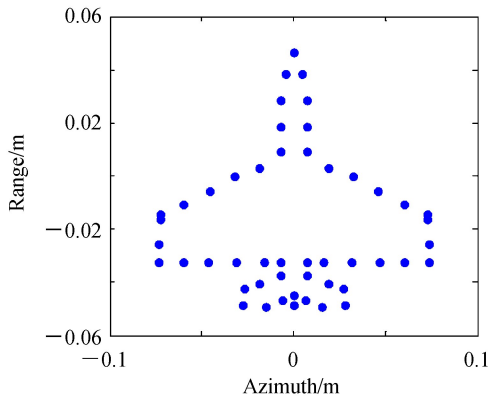


图4 飞机散射点仿真模型

Fig.4 Simulation model of space shuttle

表1 仿真参数

Table1 Simulation parameters

Radar parameter	Value	Target parameter	Value
Wavelength/ μm	1.55	Range/km	100
Bandwidth/GHz	150	Velocity/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	100
Pulse width/ μs	100	Acceleration/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	30
PRF/kHz	3	Angular velocity/ $(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	0.005
Range sampling number	256	Angular acceleration/ $(\text{rad} \cdot \text{s}^{-2})$	0.01
Pulse number	512	Processing time/s	0.155

图5(a)~(c)分别为第128脉冲回波的平滑伪WVD(Smooth Pseudo WVD, SPWVD)时频图和采用传统方法以及本文所提ICPF-FRFT方法的距离压缩结果.从图5(a)可以看出,单次回波脉冲的时频图具有多分量线性调频特征且每一分量的调频率相同,证实了第1节中对于回波信号的分析.因此,对单次回波脉冲通过一次压缩就可以完成所有散射点的压缩.从图5(b)可见采用传统DTF压缩时会导致距离像产生严重的色散效应,并且对于相邻分辨率单元的散射点会形成严重的互扰.从图5(c)可见,采用ICPF-FRFT方法实现了较好的压缩效果,解决了距离像的色散.

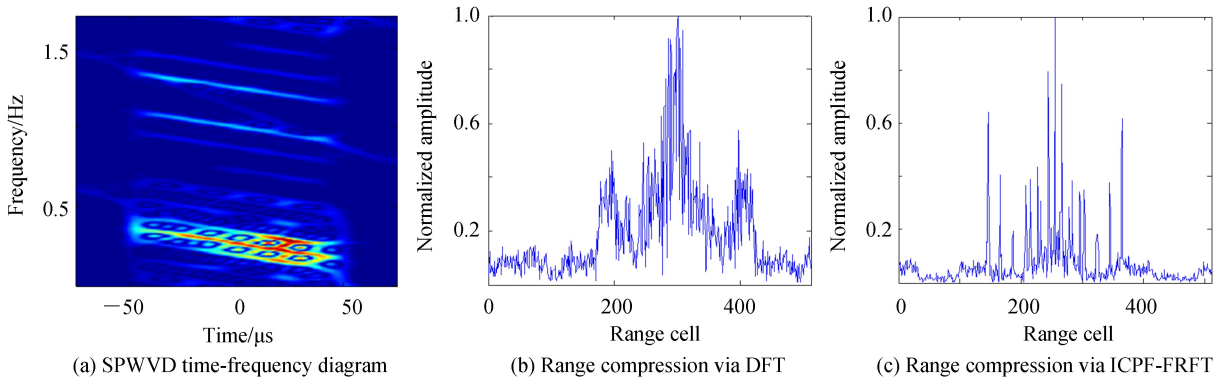


图5 第128脉冲时频图和距离压缩结果
Fig.5 The 128th pulse's SPWVD and range compression

图6为第79(飞机下沿)和第128(飞机距离向中心)距离单元的SPWVD时频图,从图中可以看出不同距离单元回波信号可近似为调频率不同的多分量LFM信号,因此需要对不同距离单元上的各个散射点进行分离成像.

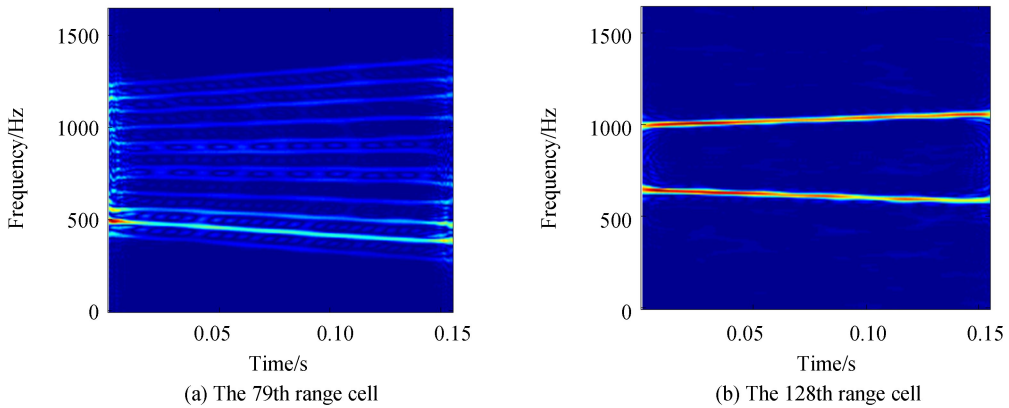
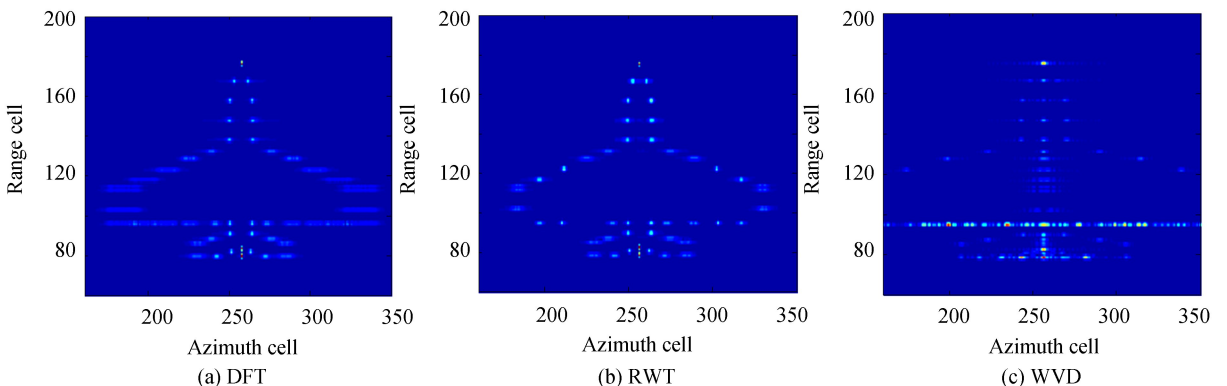


图6 距离单元的SPWVD时频图
Fig.6 Range cell's SPWVD

图7(a)~(f)分别为采用传统方法和本文所提方法的方位压缩结果.从图7(a)中可见,采用DFT方位压缩时,远离方位中心的散射点散焦严重,无法实现较好的成像效果.图7(b)为文献[11]提出的RWT成像结果(文献中并未给出具体时频方法,为方便对比采用WVD方法),从图中可见,方位上依然存在部分散焦;图7(c)为采用WVD方法进行距离-瞬时多普勒成像结果,图中可见虽然WVD的时频分辨率较高,但是会产生交叉项,尤其是方位散射点较多时图像结果将无法分辨;为减少交叉项,实际中经常采用SPWVD,其成像结果如图7(d)所示,与7(c)结果相比虽然去除了交叉项,但是时频分辨率明显下降;另外,从图7(c)和图7(d)的瞬时多普勒成像中还能观察方位多普勒随时间的变化;图7(e)、(f)为采用ICPF-FRFT方法的方位压缩结果,从图7(e)未进行Clean算法时可见,对某一距离单元上只有单一散射点的成像结果良好,当存在



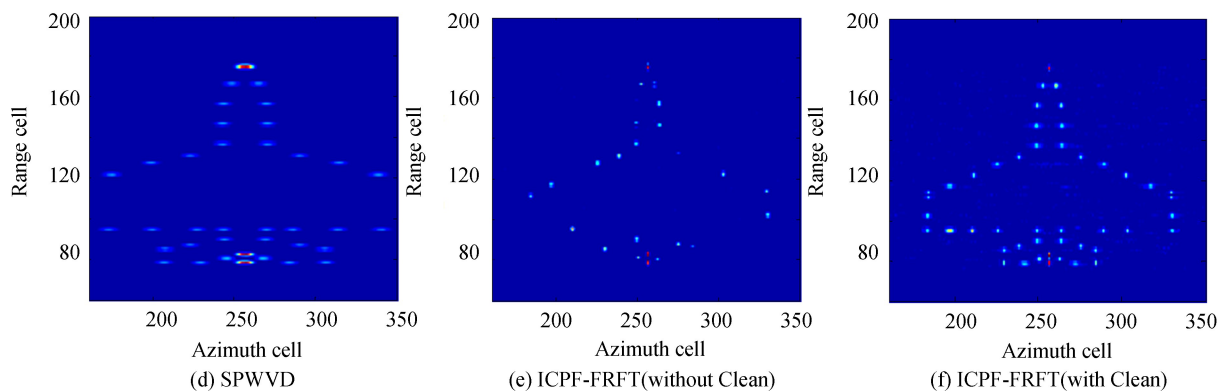


图7 方位压缩结果
Fig.7 Azimuth compression results

多个散射点时由于信号强弱程度不同,强信号会压制弱信号的分离,导致显示的大部分为强信号及其旁瓣分量,部分弱信号会缺失;从图 7(f)中可见,采用 Clean 算法时,对不同距离单元上的散射点逐次由强到弱分离成像,可以取得较好的聚焦效果,且从图中可以看出 ICPF-FRFT 方法能够将相距两个距离单元的散射点有效分离,证明了其有效性,进一步说明了 ISAL 能够实现对空间目标的高精度(毫米级)成像。

图 8(a)~(f)是对 95 距离单元(飞机翅膀下沿)的前三个峰值的分离示意图,其中图 (a)~(c)为 FRFT 峰值的搜索过程,图 (d)~(f)为相对应峰值点的 Clean 处理过程,实线框表示窄带滤波器,峰值表示横向聚焦像 $\hat{S}_{az}^i(u)$,经过这一过程能够很好地将强度不同的方位散射点分离成像。

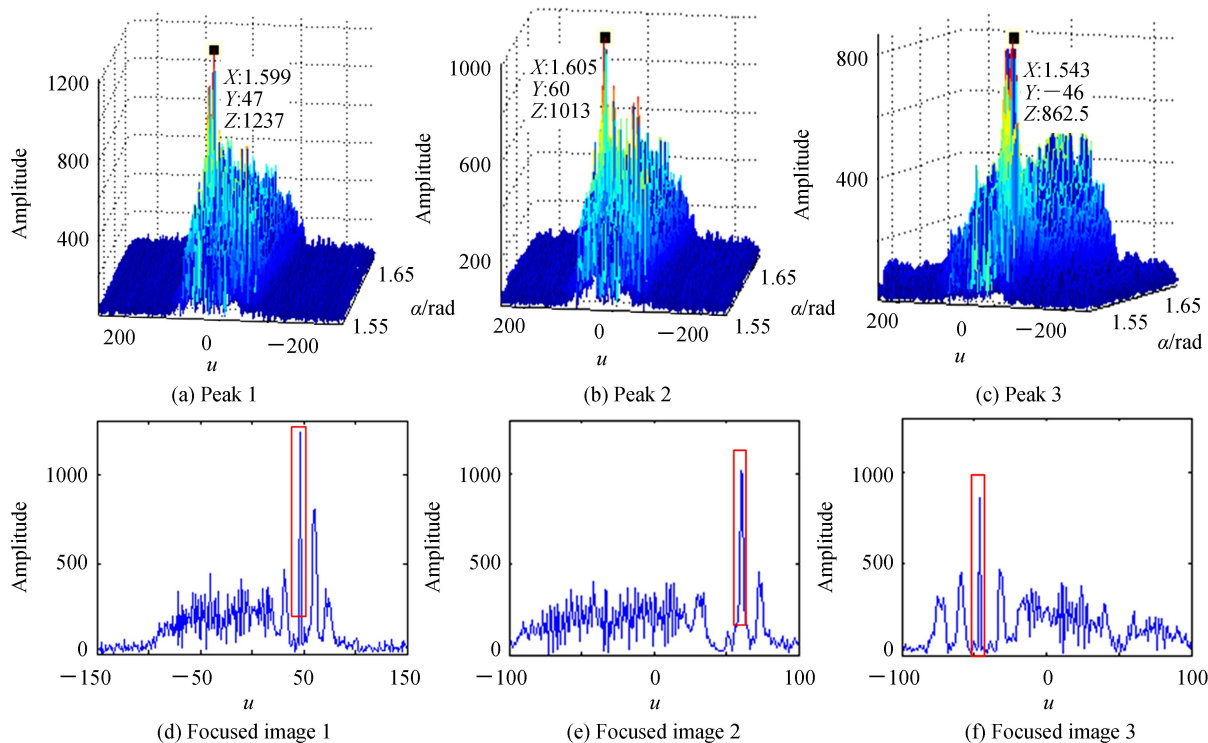


图8 对 95 距离单元的分离成像
Fig.8 Separation imaging of 95th range cell

为定量评价 ICPF-FRFT 算法的有效性,用图像熵、对比度和运行时间三个指标来说明算法的成像质量,分别对图 7 中所提算法进行对比分析,结果见表 2(对比实验中的输入信号为采用 ICPF-FRFT 算法完成距离压缩后的数据)。由表可见,ICPF-FRFT 算法相比其他算法具有更小的图像熵和大的图像对比度,表明其成像质量较好。需要说明的是,虽然无 Clean 算法时的各项指标更优,但存在散射点的丢失,不能正确反映目标散射点的分布情况,所以此时成像质量并不是最好的。ICPF-FRFT 算法所用时间相比 RD 时间长,但是

比其他算法时间短,兼顾了成像质量和成像效率.

表 2 不同算法的对比

Table 2 Comparison of different algorithms

Imaging algorithm	RD	RWT	WVD	SPWVD	ICPF-FRFT without Clean	ICPF-FRFT with Clean
Image entropy	8.054 6	5.688	5.974	5.709	4.137 4	5.262 9
Contrast ratio	1.667 8	13.100 1	10.456	12.025	29.629 4	16.917 4
Running time/s	0.206 6	32.579 1	4.884 8	208.328 2	2.345 3	3.855 4

5 结论

本文提出一种基于 ICPF-FRFT 的 ISAL 成像算法.该算法首先利用 ICPF 算法快速估计出每一回波脉冲的调频率,计算得到最佳旋转角,进而利用 FRFT 实现距离压缩,消除距离色散.在完成距离压缩和平动补偿后,在每一距离单元上再次利用 ICPF-FRFT 算法并结合 Clean 技术,实现对强弱散射点的分离成像,解决方位散焦的问题.最后,通过飞机散射点模型的仿真对比实验,验证了方法的有效性.

参考文献

- [1] HE Jin, ZHANG Qun, YANG Xiao-you, *et al.* High resolution imaging algorithm for inverse synthetic aperture imaging radar[J]. *System Engineering and Electronics*, 2011, **33**(8):1750-1755.
何劲, 张群, 杨小优, 等. 逆合成孔径成像激光雷达高分辨成像算法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, **33**(8):1750-1755.
- [2] LV Ya-kun, WU Yan-hong. Development and key technologies of synthetic aperture radar imaging[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, **54**(10):43-59.
吕亚昆, 吴彦鸿. 合成孔径激光雷达成像发展及关键技术[J]. 激光与光电子学进展, 2017, **54**(10):43-59.
- [3] LU Z, ZHANG N, SUN J, *et al.* Laboratory demonstration of static-mode down-looking synthetic aperture imaging radar[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, **13**(4):89-92.
- [4] WU W, XU S, HU P, *et al.* Inverse synthetic aperture radar imaging of targets with complex motion based on optimized non-uniform rotation transform[J]. *Remote Sensing*, 2018, **10**(4):593.
- [5] WANG B, XU S, WU W, *et al.* Adaptive ISAR imaging of maneuvering targets based on a modified fourier transform[J]. *Sensors*, 2018, **18**(5):1370.
- [6] WU Ren-biao, MA Di, LI Hai. Space maneuvering target detection and parameter estimation based on Radon-MDCFT[J]. *Systems Engineering & Electronics*, 2016, **38**(3):493-500.
吴仁彪, 马颀, 李海. 基于 Radon-MDCFT 的空间高速机动目标检测与参数估计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2016, **38**(3):493-500.
- [7] DJUROVIC I, SIMEUNOVIC M, WANG P. Cubic phase function: a simple solution to polynomial phase signal analysis[J]. *Signal Processing*, 2017, **135**:48-66.
- [8] CHANG Wen, LI Zeng-hui, YANG Jian. Velocity estimation and compensation in FMCW-ISAR based on the iterative Radon Wigner transform[J]. *Journal of Tsinghua University*, 2014, **54**(4):464-468.
常雯, 李增辉, 杨健. 基于迭代 Radon-Wigner 变换的 FMCW-ISAR 目标速度估计及速度补偿[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, **54**(4):464-468.
- [9] WANG Y, ZHAO B, JIANG Y. Inverse synthetic aperture radar imaging of targets with complex motion based on cubic Chirplet decomposition[J]. *Signal Processing*, 2015, **9**(5):419-429.
- [10] GUO Liang, XING Meng-dao, ZENG Xiao-dong. Inverse synthetic aperture lidar imaging of indoor real data[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(4):637-642.
郭亮, 邢孟道, 曾晓东, 等. 室内实测数据的逆合成孔径激光雷达成像[J]. 红外与激光工程, 2011, **40**(4):637-642.
- [11] RUAN Hang, WU Yan-hong, YE Wei. Inverse synthetic aperture radar imaging algorithm for uniform motion targets[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(4):1124-1129.
阮航, 吴彦鸿, 叶伟. 匀速运动目标逆合成孔径激光雷达成像算法[J]. 红外与激光工程, 2014, **43**(4):1124-1129.
- [12] ATTIA E H. Data-adaptive motion compensation for synthetic aperture LADAR[C]. 2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2004, 3:1782-1787.
- [13] HUANG Xiang, TANG Shi-yang, ZHANG Lin-rang. A fast algorithm of LFM signal detection and parameter estimation based on efficient FrFT[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, **39**(12):2905-2911.
黄响, 唐世阳, 张林让, 等. 一种基于高效 FrFT 的 LFM 信号检测与参数估计快速算法[J]. 电子与信息学报, 2017, **39**(12):2905-2911.
- [14] WANG Y, JIANG Y. Inverse synthetic aperture radar imaging of maneuvering target based on the product generalized cubic phase function[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2011, **8**(5):958-962.
- [15] WANG P, LI H B, DJUROVIC H B. Integrated cubic phase function for linear FM signal analysis[J]. *IEEE Trans*

Aerospace and Electronic Systems, 2014, **46**(3): 963-977.

- [16] SIMEUNOVIC M, DJUROVIC I. Non-uniform sampled cubic phase function[J]. *Signal Processing*, 2014, **101**:99-103.
- [17] LI Hong, QIN Yu-liang, LI Yan-peng. Analysis of multi-component LFM signals by the integrated quadratic phase function[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, **31**(6):1363-1366.
李宏,秦玉亮,李彦鹏.基于积分二次相位函数的多分量 LFM 信号分析[J].电子与信息学报. 2009, **31**(6):1363-1366.
- [18] WANG Y, ZHAO B. Inverse synthetic aperture radar imaging of non-uniformly rotating target based on the parameters estimation of multi-component quadratic frequency-modulated signals[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, **15**(7) :4053-4061.

Foundation item: The Exploration Project of the Army (No.7131145)

引用格式:LÜ Ya-kun, WU Yan-hong, XUE Jun-shi, *et al.* Inverse Synthetic Aperture Ladar Imaging Algorithm for Maneuvering Target [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(11):1128003

吕亚昆,吴彦鸿,薛俊诗,等.机动目标逆合成孔径激光雷达成像算法[J].光子学报,2018,**47**(11):1128003