

## 基于自适应最优核时频分布理论的 ISAR 成像方法

芮力, 钱广红, 张国庆, 戴树良  
(中国人民解放军92664部队, 山东青岛 266023)

**摘要:** 由于运动的复杂性,传统的成像方法已无法满足机动目标成像的要求。在分析机动目标复杂运动引起目标回波多普勒相位非线性变化的基础上,提出了一种基于自适应最优核时频分布(AOK TFR)理论的 ISAR 成像方法。通过计算回波数据不同距离单元的 AOK TFR,得到不同时刻目标的瞬态 ISAR 像,且不受交叉项的影响;通过估计距离单元的瞬时多普勒频率并依此对成像时间段进行选择。仿真数据结果验证了该方法的有效性。

**关键词:** 自适应最优核时频分布(AOK TFR); ISAR 成像; 瞬时频率估计; 时间选择

**中图分类号:** V243.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2014)07-0046-05

## ISAR Imaging Based on Adaptive Optimal Kernel Time-Frequency Representation

RUI Li, QIAN Guang-hong, ZHANG Guo-qing, DAI Shu-liang  
(No. 92664 Unit of PLA, Qingdao 266023, China)

**Abstract:** Because of target's complicated movement, conventional ISAR imaging algorithm can not meet the demands of maneuvering target imaging. On the basis of analyzing the echo's non-linear Doppler shifts caused by maneuvering target movements, a new ISAR imaging method based on AOK TFR is proposed. The instantaneous target images can be obtained by calculating the AOK TFR of different range bins. Compared with the classical time frequency distribution, the AOK TRF has no cross item interference from multi-component signals. Meanwhile, the instantaneous Doppler frequencies of echoes in range bins are estimated. According to the estimated Doppler frequencies, imaging time can be selected. The simulation results demonstrate the validity of the proposed method.

**Key words:** adaptive optimal kernel time-frequency representation (AOK TFR); ISAR imaging; instantaneous frequency estimation; time selection

### 0 引言

传统的 ISAR 距离-多普勒(RD)成像算法假定在成像积累时间内目标回波各散射点多普勒频率为常数,因此采用快速傅里叶(FFT)做多普勒分析。这种算法对于平稳运动的目标可以取得较好的成像效果,但对于机动目标,回波的多普勒频率将随时间变化,在观测期间回波的相位具有非线性特性,直接使用 FFT 将导致分辨率下降,图像模糊。因此,许多学者提出了多种有关时频类成像算法<sup>[1-4]</sup>,虽然这些算法使成像效果得到改善,但其在做参数估计时一般采用多维

优化算法,计算量很大,并且基于二次型变换的时频分析(如 WVD)算法虽能达到较高的时间-频率分辨率,但其受信噪比影响较大,加之为了抑制交叉项,更加重了运算负担,同时也或多或少地降低了算法的时频聚集性。此外,机动目标选择最佳成像时间以获得高质量目标图像是近年来 ISAR 研究的热点之一<sup>[5-7]</sup>。文献[5]通过提取若干强散射点的行为,由散射点之间的相互关系判断目标是二维旋转还是三维旋转,确定目标仅做二维旋转的时间段。然而,提取目标上散射点的相位并非易事,加上需要运动补偿,成像过程较为复杂,算法的有效性依赖于散射点信号提取的性能;文献[6-7]以图像质量为标准搜索目标的最佳成像时间时刻和最优成像积累时间,其中,文献[7]提出一种基于最大对比度的自动时窗选择法,对观察得到的长时间的回波数据进行分段,进行 RD 成像处理,然后采

收稿日期:2013-08-27

修回日期:2014-04-01

作者简介:芮力(1969—),男,浙江嘉善人,博士,工程师,主要从事雷达维修工作。

用图像对比度作为成像质量的评价函数,对最佳成像时刻和最佳成像持续时间这两个未知参数进行搜索。由于该方法每次搜索时都要对目标成像质量进行评估,运算量大,不便于实际操作。

自适应最优核时频分布(AOK TFR)是一种基于 Wigner-Ville 分布改进的时频分析理论<sup>[8]</sup>,可实现对多分量 LFM 信号交叉项及噪声的极大抑制,并使信号项的失真达到最小,因此,AOK TFR 可以提供多分量 LFM 信号的近似真实的时频分布<sup>[9]</sup>。本文将 AOK TFR 应用于机动目标 ISAR 成像,得到了目标的瞬态 ISAR 像,同时分析回波信号的瞬时多普勒频率,通过选择多普勒频率近似恒定的时间段作为成像时间段,即使采用距离-多普勒成像算法也可得到效果较好的目标像。由于仅对极少数单元进行时频变换,因此可以在不明显增加运算量的同时,提高成像质量。

### 1 机动目标散射点多普勒频率特性

以舰船为例,它与雷达之间的相对运动可被分解为船上某一参考点沿 RLOS 方向的平动和船上所有其他散射点绕该参考点的转动。假设目标回波已经进行了平动补偿,这里主要研究舰船在三维转动条件下的瞬时成像问题,三维转动模型如图 1 所示。

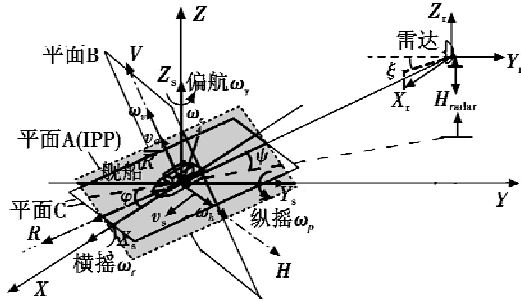


图1 舰船目标三维转动模型

Fig.1 Ship model

图中:XYZ 为固定坐标系; $X_s, Y_s, Z_s$  代表舰船坐标系,其原点为舰船的中心参考点; $X_r, Y_r, Z_r$  为雷达坐标系, $X_r, Y_r, Z_r$  分别与 X 方向相同,方向与 Y、Z 方向同向; $H_{\text{radar}}$  为雷达架高; $\psi, \xi$  分别为擦地角和雷达视角; $RHV$  是从雷达视角定义的固定在舰船上的坐标系。

假设舰船目标由  $N$  个散射点组成,在  $X_s, Y_s, Z_s$  中,  $(x_s^n, y_s^n, z_s^n)$  代表第  $n$  个散射点。对给定时刻  $t_0$ , 散射点  $n$  在坐标系  $RHV$  中的坐标可表示为

$$[r_0^n, h_0^n, v_0^n]' = [R_{\psi, \xi}] \cdot [x_s^n, y_s^n, z_s^n]' \quad (1)$$

式中: $[R_{\psi, \xi}]$  为坐标系  $X_s, Y_s, Z_s$  到坐标系  $RHV$  的转换矩阵; $r_0^n = r_0^n(t_0)$ ;  $h_0^n = h_0^n(t_0)$ ;  $v_0^n = v_0^n(t_0)$ 。  $t$  时刻散射点  $n$  在坐标系  $RHV$  中的瞬时坐标可以用此散射点分别绕  $R$ 、 $H$  和  $V$  轴旋转的旋转矩阵  $R(\theta_R, \theta_V, \theta_H)$  表示,即

$$[r^n(t), h^n(t), v^n(t)]' = R(\theta_R, \theta_V, \theta_H) \cdot [r_0^n, h_0^n, v_0^n]' \quad (2)$$

式中, $\theta_R, \theta_V, \theta_H$  分别为散射点  $n$  绕  $R$ 、 $V$  和  $H$  轴旋转的角度。

散射点  $n$  的相位和多普勒频率分别为<sup>[10]</sup>

$$\phi^n(t) = -\frac{4\pi}{\lambda} \left\{ r_0^n + (v_0^n \omega_{H0} - h_0^n \omega_{V0})(t - t_0) + \frac{1}{2} [v_0^n \dot{\omega}_{H0} - h_0^n \dot{\omega}_{V0} - r_0^n (\omega_{H0}^2 + \omega_{V0}^2)](t - t_0)^2 \right\} \quad (3)$$

$$f_{d,n}(t) \cong -\frac{2}{\lambda} \left\{ v_0^n \omega_{H0} - h_0^n \omega_{V0} + [v_0^n \dot{\omega}_{H0} - h_0^n \dot{\omega}_{V0} - r_0^n (\omega_{H0}^2 + \omega_{V0}^2)](t - t_0) \right\} \quad (4)$$

式中: $\omega_{H0}$  和  $\omega_{V0}$  分别为舰船目标绕  $H$  和  $V$  轴转动的初始转动角速度; $\dot{\omega}_{H0}$  和  $\dot{\omega}_{V0}$  分别为舰船目标绕  $H$  和  $V$  轴转动的初始角加速度。

由式(4)可知,散射点的多普勒频率可近似为线性的,这样,经过平动补偿后各距离单元舰船目标的散射点回波可用多分量 LFM 信号近似表示。

### 2 机动目标瞬时成像

采用外场实测舰船 ISAR 数据,雷达发射线性调频信号,工作于 S 波段,信号带宽  $B$  为 120 MHz,脉冲宽度  $T_p$  为 64  $\mu\text{s}$ ,重复频率为 650 Hz,积累脉冲数 800。对回波数据进行平动补偿,其中包括对齐采用积累互相关法,相位校正采用恒定相位差法。运动补偿后的数据采用 WVD 时频方法得到的 ISAR 图像如图 2a 所示,采用本文提出的 AOK TFR 时频方法得到的图像存在严重的交叉项,AOK TFR 时频方法得到的图像不含交叉项,图像清晰,由于舰船目标的三维转动,不同时刻舰船目标所呈现的姿态略有不同。

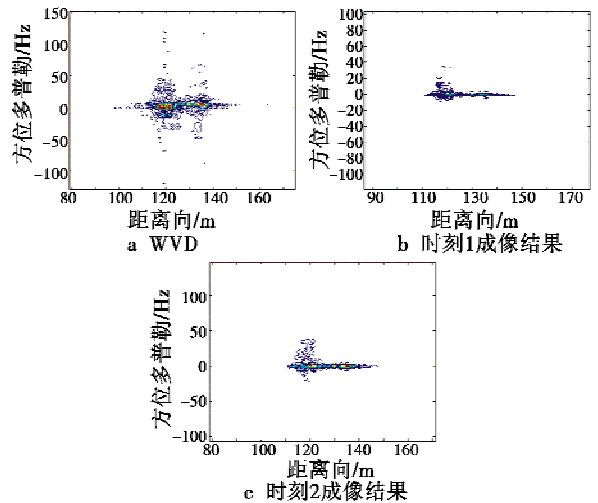


图2 舰船目标实测数据仿真结果

Fig.2 Real ship imaging results

### 3 基于 AOK TFR 时频分析的成像时间段选择

#### 3.1 瞬时频率估计

在对机动目标 ISAR 成像时,经过平动补偿后各距离单元目标散射点的回波可用多分量线性调频信号近似表示。基于 Wigner-Ville 分布的瞬时频率估计的定义为

$$IF(t) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} f W_s(t, f) df}{\int_{-\infty}^{\infty} W_s(t, f) df} \quad (5)$$

式中,  $W_s(t, f)$  为信号  $s(t)$  的 Wigner-Ville 分布。由于基于 Wigner-Ville 分布峰值的瞬时频率估计在低信噪比时性能严重锐化,方差急剧增大,并且对于多分量信号会产生严重的交叉项,瞬时频率估计性能较差,无法直接用于对机动目标成像。

由文献[11]可知,自适应最优核时频分布的核函数随信号而自适应变化,对任意长度和性质的信号都具有适应性,不需要信号的任何先验知识,在时间段  $[t - T, t + T]$  内信号的自适应最优核时频分布为<sup>[11]</sup>

$$P_{\text{AOK}}(t; \omega) = \frac{1}{2\pi} \iint A(t; \theta, \tau) \Phi_{\text{opt}}(t; \theta, \tau) \times e^{-j\theta t - j\omega \tau} d\theta d\tau \quad (6)$$

式中:  $A(t; \theta, \tau)$  为信号  $s(t)$  的短时模糊函数;  $\Phi_{\text{opt}}(t; \theta, \tau)$  为最优核。

将式(6)中的  $P_{\text{AOK}}(t; \omega)$  代替式(5)中的  $W_s(t, f)$ , 即可得到基于信号自适应最优核时频分布的瞬时频率估计。虽然自适应最优核时频分布具有良好的时频分布性能,但其计算量也是所有时频分布中计算量最大的。文献[12]提出利用离散 Gabor 展开在较好地保持时频分辨率的同时抑制交叉项,得到了一种自适应的联合时频分布,即时频分布级数法(TFDS)。

利用 Gabor 展开将信号  $s(t)$  分解为一系列时频原子的组成

$$s(t) = \sum_m \sum_n c_{m,n} h(t - nT) e^{2\pi m F t}, FT \leq 1 \quad (7)$$

式中:  $T$  和  $F$  为时间和频率采样间隔;  $h(t)$  为 Gabor 原子;  $c_{m,n}$  为 Gabor 系数。对式(7)两边进行 Wigner-Ville 变换有

$$W_s(t, f) = \sum_{(m,n)} |c_{m,n}|^2 WVD_h(t, f) + \sum_{(m,n) \neq (m',n')} c_{m,n} \cdot c_{m',n'}^* WVD_{h_{m,n} h_{m',n'}}(t, f) \quad (8)$$

式中:右边的第一项是严格正的 Gabor 原子自项的线性和,这是信号时频特性的近似表示;第二项是 Gabor 分解中不同原子间的交叉项的线性和,相隔较近的原子可以提高信号自项的聚集性,而相隔较远的原子间

交叉项则会对自项产生干扰。根据文献[13],可以得到抑制交叉项的时频分布,为

$$W_s^\delta(t, f) = \sum_{(m,n)} |c_{m,n}|^2 W_h(t, f) + \sum_{0 < d[(m,n), (m',n')] < \delta} c_{m,n} \cdot c_{m',n'}^* W_{h_{m,n} h_{m',n'}}(t, f) \quad (9)$$

式中:  $d[(m, n), (m', n')] = |m - m'| + |n - n'|$ , 为各原子之间的 Manhattan 距离;  $\delta$  决定着上述分布中交叉项和自项聚集性之间的折衷。当  $\delta \rightarrow \infty$  时得到 Wigner-Ville 分布,具有最好的自项聚集度,但交叉项严重。当  $\delta \rightarrow 0$  时得到的是一个正分布,虽然对交叉项的抑制最好,但信号聚集度很低。因此,适当地选择  $\delta$  可以得到与式(6)分辨率相当的时频分布,而计算量则远远低于自适应最优核时频分布。

将式(9)代入式(5)可以得到瞬时频率的估计为

$$IF(t) = \frac{\sum_{m,n,m',n'} c_{m,n} c_{m',n'}^* B_{m,n,m',n'}(t)}{\sum_{m,n,m',n'} c_{m,n} c_{m',n'}^* A_{m,n,m',n'}(t)} \quad (10)$$

式中:  $A_{m,n,m',n'}(t) = \frac{1}{2\pi} \exp[-j2\pi(n - n')Ft] \cdot$

$$\exp\left[-\frac{(t - mT)^2 + (t - m'T)^2}{2\sigma^2}\right]; B_{m,n,m',n'}(t) =$$

$$\left[\frac{-j(m - m')T}{4\pi\sigma^2} - \frac{(n + n')F}{2}\right] \times A_{m,n,m',n'}(t)。$$

在计算式(10)时,  $A_{m,n,m',n'}(t)$  和  $B_{m,n,m',n'}(t)$  与信号是无关的,可提前计算存储在内存中,而由于 Gabor 变换为线性变换,所以计算量将大大低于二次型的时频分布。

#### 3.2 基于瞬时频率估计的成像时间选择

要获得较好的图像,必须要对成像数据段进行选择,即要对成像的时间段进行选择。时间段的选择要求在该段观测时间内,目标上各散射点回波信号的多普勒频率恒定。要从回波数据中提取散射点的瞬时多普勒频率,首先要选定提取瞬时多普勒频率的参考距离单元。设回波数据矩阵大小为  $M \times N$ ,  $M$  横向是脉冲个数,  $N$  纵向为距离采样单元。在不发生越距离单元徙动的情况下,任一个距离单元里存在的散射点数目都不会改变。设在第  $n$  个距离单元里有  $L_n$  个散射点,由于目标机动使得各散射点会发生径向移动,设第  $i$  个散射点在第  $m$  次回波时的位移(与第 0 次回波时比较)为  $\Delta R_i(t_m)$ , 则第  $n$  个距离单元的第  $m$  次回波信号为

$$x_n(m) = \sum_i^{L_n} \sigma_i \exp\left\{-j\left[\frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_i(t_m) - \psi_{i0}\right]\right\} \quad (11)$$

式中:  $\lambda$  为雷达工作波长;  $\sigma_i$  和  $\psi_{i0}$  为第  $i$  个子回波的振幅和起始相位。则第  $n$  个距离单元中第  $i$  个散射点在第  $m$  次回波时的瞬时多普勒频率为

$$f_{d_{ni}}(t_m) = \frac{2}{\lambda} \frac{d[\Delta R_i(t_m)]}{dt}。 \quad (12)$$

假设目标可以看作是一个刚体,当目标向某个方向运动的时候,目标的整体都有向该方向运动的趋向,各个散射点只是由于离目标转动中心的位置不同而造成的位移大小不一样。由式(12)可以看出目标上各个散射点的多普勒频率的变化,在一定程度上可以反映目标的转动情况。

由于散射点的位置不同,各个散射点在转动过程中转动的角度大小不一样,在实际目标中,由于存在杂波和噪声的影响,加上目标机动,散射点越距离单元的可能性相当大,在假设目标可以看成是一个刚体的前提下,选择距离单元中幅度起伏变化最小的距离单元作为参考单元,即目标上稳定的散射点作为参考<sup>[14]</sup>。

### 3.3 基于瞬时频率估计的成像时间选择处理过程

本文提出的成像时间段选择方法处理流程如图3所示。

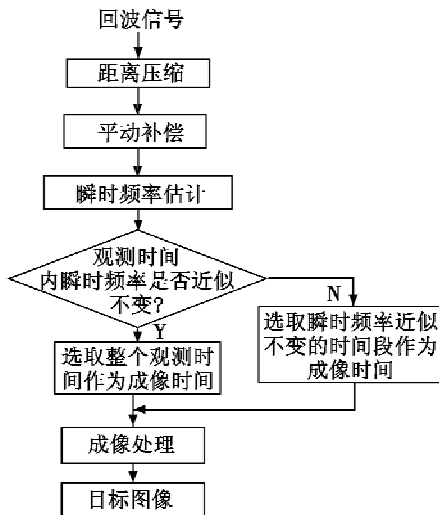


图3 成像时间段选择处理流程

Fig. 3 Processing procedure of imaging time selection

其处理步骤如下:1)对雷达接收的大小为 $M \times N$ 的回波数据矩阵进行距离压缩处理;2)对压缩后的回波数据进行平动补偿,包括包络对齐相位校正;3)对运动补偿后的数据矩阵,依次计算各个距离单元回波信号的归一化幅度方差 $\sigma_n^2$ ,选择方差最小的距离单元作为参考单元,并对该单元进行瞬时频率分析,得到参考单元的瞬时频率曲线;4)选择频率变化近似不变的时间段作为成像时间段;5)采用FFT方法在所得成像时间段内进行成像处理。

### 3.4 算法验证

#### 3.4.1 飞行目标实测数据验证

飞行目标实测数据是在加装了ISAR成像系统的某型对空情报雷达对一架过航机观察得到的。ISAR系统参数如下:工作频率S波段,发射LFM信号,宽带100 MHz,雷达脉冲重复频率为400 Hz,采样频率为

100 MHz,包络对齐采用指数加权积累相关法,相位补偿采用相位梯度自聚焦(PGA)方法。

成像处理结果如图4a~图4d所示。

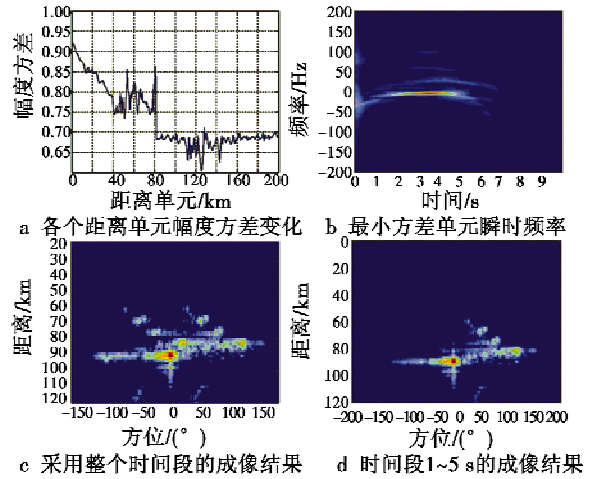


图4 飞行目标实测数据成像结果

Fig. 4 Real plane imaging results

其中:图4a为各个距离单元幅度方差变化;图4b为最小方差所在距离单元的瞬时频率示意图;对整个时间段的成像结果如图4c所示。由图4b可知,在时间段1~5s之间,瞬时频率是近似不变的,选择1~5s作为成像时间段的成像结果如图4d所示。通过选择合适的成像时间段进行成像,得到的目标图像明显优于未进行时间段选择的目标图像,目标的机动对成像的影响明显减少。利用同样的成像时间段选择,采用WVD视频方法和本文提出的AOK TFR时频方法得到的ISAR像如图5所示。

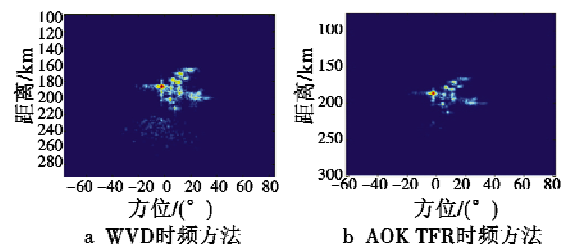


图5 飞行目标成像结果比较

Fig. 5 Imaging result comparison

基于WVD时频方法得到的图像存在严重的交叉项干扰,AOK TFR时频方法不含交叉项,且时频聚集性非常高,得到图像的散射点定位准确。

#### 3.4.2 舰船目标实测数据验证

舰船目标实测数据是通过基于某型雷达设计的宽带ISAR岸基数据采集设备获得的。ISAR系统参数如下:工作频率S波段,发射LFM信号,宽带120 MHz,雷达脉冲重复频率为650 Hz,包络对齐采用互相关法,相位补偿采用恒定相位差法。

成像处理结果如图6a~图6d所示。

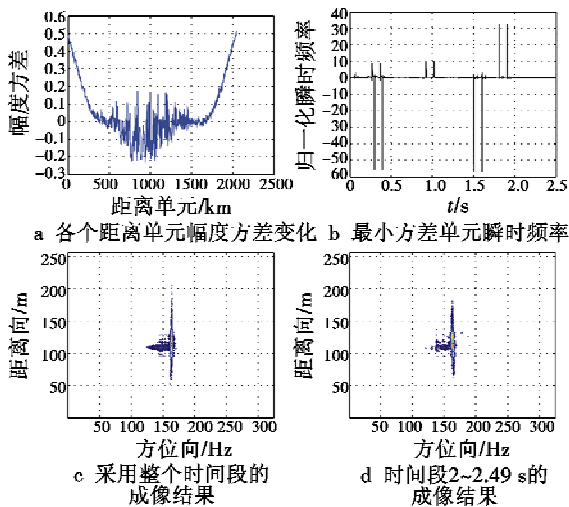


图6 飞行舰船目标实测数据成像结果

Fig.6 Real ship imaging results

其中:图6a为各个距离单元幅度方差变化;图6b为最小方差所在距离单元的瞬时频率示意图;对整个时间段的成像结果如图6c所示。由图6b可知,在时间段0.4~0.9s,1~1.46s以及2~2.49s之间,这3个时间段内瞬时频率是近似不变的,这里选择2~2.49s作为成像时间段,其成像结果如图6d所示。从图6c和图6d可以看出,通过选择合适的成像时间段进行成像,舰船滚动对成像的影响明显减少,得到的目标图像优于未进行时间段选择的目标图像,可得到有关舰船目标更多的细节。

#### 4 结论

由于机动目标运动的复杂性,传统的RD成像算法已不能满足要求。本文根据机动目标回波特性,将同一距离单元内舰船目标的散射点回波近似为多分量LFM信号。在此基础上,提出了基于AOK TFR理论的ISAR成像方法,得到了舰船目标不同时刻的瞬态ISAR像;采用时频分析和瞬时频率估计方法确定目标瞬时多普勒频率近似恒定的时间段为成像时间段,图像可以获得更多的目标细节。与WVD时频方法相比,基于AOK TFR时频方法得到的ISAR像不存在交叉项干扰,时频聚集性高,因而图像更加清晰,散射点定位更加准确。实测数据结果验证了本文方法的有效性、优越性。

#### 参考文献

- [1] HAHN S L, SNOPEK K M. Wigner distributions and ambiguity functions of 2-D quaternionic and monogenic signals [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53 (8):3111-3128.
- [2] 王勇,姜义成. 基于自适应Chirplet分解的舰船目标ISAR

成像[J]. 电子与信息学报, 2006, 28 (6):982-984.

WANG Y, JIANG Y C. The ISAR imaging of ship based on adaptive Chirplet decomposition [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006, 28(6):982-984.

- [3] 王勇,姜义成. 一种新的信号分解算法及其在机动目标ISAR成像中的应用[J]. 电子学报, 2007, 35 (3):445-449.

WANG Y, JIANG Y C. A new algorithm of signal decomposition and its application in ISAR imaging of maneuvering targets [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35 (3):445-449.

- [4] 刘明敬,刘刚. 基于FRFT的机动目标ISAR成像算法[J]. 现代雷达, 2009, 32(12):49-52, 56.

LIU M J, LIU G. ISAR imaging algorithm of maneuvering targets based on FRFT [J]. Modern Radar, 2009, 32 (12):49-52, 56.

- [5] 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 X B, HU W D, YU W X. An algorithm for selecting ISAR imaging intervals based on scatter-signal property [J]. Signal Processing, 2007, 23(5):705-709.

- [6] MARTORELLA M, BERIZZI F. Time windowing for highly focused ISAR image reconstruction [J]. IEEE Transactions on AES, 2005, 41 (3):992-1007.

- [7] HAIPING S, XING M D, ZHOU L J. Division of imaging intervals and selection of optimum imaging time for ship ISAR imaging based on measured data [C]//IEEE Radar Conference, 2006:2790-2794.

- [8] 张德明. 基于自适应时频分析的介质声参数反演及语音信号分析[D]. 北京:中国科学院声学研究所, 2005.

ZHANG D M. Medium acoustical parameters inversion and speech signal analysis based on adaptive time frequency analysis [D]. Beijing: Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, 2005.

- [9] 芮力,蒋涛,王德石,等. 基于自适应最优核时频分布理论的多分量LFM信号参数估计[J]. 海军工程大学学报, 2011, 23(6):91-95.

RUI L, JIANG T, WANG D S, et al. Multicomponent LFM signal parameter estimation based on adaptive optimal kernel time-frequency distribution [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2011, 23(6):91-95.

- [10] PASTINA D, SPINA C. Slope-based frame selection and scaling technique for ship ISAR imaging [J]. IET Signal Process, 2008, 2(3):265-275.

- [11] JONES D L, BARANIUK R G. An adaptive optimal-kernel time-frequency representation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, 43(10):2361-2371.

(下转第102页)

- 仿真研究[J]. 广西科学院学报, 2008, 24(1): 59-62.  
WANG Y X, XIONG C, WEN X Z, et al. Research on photonic crystal negative reflection by computer simulation [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2008, 24(1): 59-62.
- [4] 邓金萍, 李闻, 俞金海, 等. 基于视觉仿真的飞机座舱风挡眩光分布影响研究[J]. 航空工程进展, 2012, 3(3): 284-288.  
DENG J P, LI W, YU J H, et al. Cockpit windshield glare analysis based on optical simulation [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2012, 3(3): 284-288.
- [5] 骆永洁, 杨甬英, 田超, 等. 非球面部分补偿检测系统的误差分析与处理[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2012, 46(4): 636-642, 733.  
LUO Y J, YANG Y Y, TIAN C, et al. Error analysis and processing of partial compensatory aspheric testing system[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science Edition, 2012, 46(4): 636-642, 733.
- [6] 王骏凯, 李俊源, 姜献峰. 基于单曲面迭代计算的曲面透镜设计方法[J]. 光学技术, 2010, 36(6): 807-810.  
WANG J K, LI J Y, JIANG X F. Optical design method based on single-surface iterative method [J]. Optical Technique, 2010, 36(6): 807-810.
- [7] 罗勇. 二次非球面镜参数求解模型及求解算法研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(36): 8968-8971.  
LUO Y. Research on the model and algorithm for computing surface parameter of conic aspheric mirror[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(36): 8968-8971.
- [8] 陈立刚, 孟凡刚, 袁银麟, 等. 航空偏振相机的光学偏振特性实验研究[J]. 光电子·激光, 2011, 22(11): 1629-1632.  
CHEN L G, MENG F G, YUAN Y L, et al. Experimental study for the polarization characteristics of airborne polarization camera[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2011, 22(11): 1629-1632.
- [9] 乔培玉, 何昕, 魏仲慧. 加权整体最小二乘法在光学自准直法测量挠角中的应用[J]. 光学精密工程, 2012, 20(9): 1953-1959.  
QIAO P Y, HE X, WEI Z H. Application of weighted total least squares in measurement of deflection angle with optical self-collimation method[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(9): 1953-1959.
- [10] 伍卫平, 何玉明, 胡而已. 移动最小二乘三次曲面拟合法分析图像亚像素位移[J]. 固体力学学报, 2008, 29(专辑): 224-227.  
WU W P, HE Y M, HU E Y. Sub-pixel displacement analysis based on the moving least-square cubic surface fitting algorithm [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2008, 29 (SI): 224-227.
- (上接第 50 页)
- [12] QIAN S, CHEN D. Decomposition of the Wigner distribution and time-frequency distribution series [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(10): 2836-2842.
- [13] RICHARD G, BARANIUK M C. Hybrid linear/quadratic time-frequency attributes[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001, 49(4): 760-766.
- [14] STEINBERG B D. Microwave imaging of aircraft[J]. Proc. IEEE, 1988, 76(12): 1578-1592.

## 声 明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司等在其网络平台和系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文, 著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我部上述声明。