

基于多普勒频偏估计的单帧图像低速运动目标检测方法

黄聪* 刘寅

(中国舰船研究设计中心 武汉 430064)

摘要: 常用的图像域运动目标检测跟踪方法对虚警率较敏感,当虚警率较高时,目标检测跟踪的实时性受限。为了降低目标初始检测的虚警率,进而提高目标检测跟踪的实时性,该文提出一种基于多普勒频偏估计的单帧图像低速运动目标检测算法,通过发射多普勒不敏感的 LFM 脉冲对,忽略多普勒效应对成像结果的影响,但在图像域检测的同时,利用目标回波的多普勒频偏信息进行静目标和杂波亮点的剔除,基于单帧数据,减小运动目标检测的虚警率,实现单帧图像的运动目标检测,从而为目标跟踪奠定良好基础。该算法首先进行图像域的恒虚警检测,再利用宽带时域波束形成和复相关频率测量法,对检测亮点处的波束输出信号进行多普勒测频,仅通过单帧图像就可有效剔除静目标和杂波亮点。同时为了改善宽带时域波束形成的性能,利用 2 阶锥规划设计滤波器的系数,用 9 阶 FIR 滤波器实现了 0.01 倍采样点的小数时延,提高了多普勒频偏的估计精度。最后通过计算机仿真和水池试验验证了所提算法的有效性。

关键词: 2 维成像; 动目标检测; 多普勒频偏估计; 小数时延

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)07-1638-07

DOI: 10.11999/JEIT151078

Low-speed Moving Target Detection of Single Frame Image Based on Doppler Shift Estimation

HUANG Cong LIU Yin

(China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China)

Abstract: The regular algorithms of target detection and tracking in image domain are very sensitive to the false alarm rate, and the real time performance of target detection and tracking is limited with high false alarm rate. In order to reduce the false alarm rate of original target detection and improve the real time performance, an algorithm of low-speed moving target detection of single frame image based on Doppler shift estimation is proposed. Through transmitting LFM plus pair signal which is non-sensitive to the Doppler shift, the influence on image by Doppler shift can be ignored. But during the detection in image domain, the Doppler shift of target echo is used to remove static targets and clutter highlights. The false alarm rate of moving target detection is reduced based on single frame data, the moving target detection is achieved through a single frame image to make a good foundation for target tracking later. First, the CFAR determination in image domain is carried out in the algorithm. Then, the Doppler shift of the beamforming signal at the highlights detected is estimated through time-domain broadband beamforming and complex correlation frequency measurement. The static targets and clutter highlights are removed effectively through single frame image. In order to improve the performance of time-domain broadband beamforming, the filter coefficients are designed by second order cone programming. The 0.01 times sampling point of the fractional delay is achieved by a 9-order FIR filter and the estimation accuracy of the Doppler shift is improved. The validity of the proposed method is verified by the computer simulation and pool experiment.

Key words: Two-dimensional imaging; Moving target detection; Doppler shift estimation; Fractional delay

1 引言

对于运动目标探测,当发射信号为多普勒敏感信号时,目标回波与本地信号存在多普勒失配,为

了有效进行目标检测,需要对目标回波进行多普勒补偿,但目标速度的不确定性给多普勒补偿带来了困难,因此,通常选用多普勒不敏感信号作为发射信号。例如,对于速度仅为 1~2 m/s 的蛙人^[1,2]等低速目标,选用多普勒不敏感信号进行成像时,多普勒效应对成像结果的影响可以忽略,进而可以进行图像域的目标检测和跟踪。

常用的图像域运动目标检测跟踪方法一般可以分为先检测后跟踪(Detect Before Track, DBT)和检

收稿日期: 2015-09-21; 改回日期: 2016-01-29; 网络出版: 2016-03-30

*通信作者: 黄聪 huangcong32@163.com

基金项目: 国家重点实验室基金(9140C200406110C2001), 国防基础科研计划(B2420132004), 国家 863 计划项目(2012AA 090901-4)

Foundation Items: The National Key Laboratory Foundation (9140C200406110C2001), The National Defense Basic Scientific Research Program of China (B2420132004), The National 863 Program of China (2012AA090901-4)

测前跟踪(Track Before Detect, TBD)^[3,4]两大类。其中, DBT 算法先对单帧图像进行检测, 获取目标亮点, 再通过多帧图像进行点迹关联目标跟踪; 而 TBD 算法先对目标回波进行多帧累积的联合处理, 再利用时间维度上的累积航迹进行目标跟踪。这两种检测方法都是基于多帧图像处理的, 其运算量对目标初始检测的虚警率非常敏感, 当初始检测虚警率较高时, 其运算量会成倍地增加, 无法满足实时性较高的检测跟踪需求。为了提高动目标检测跟踪的实时性, 则有必要降低目标初始检测的虚警率。为此, 本文提出了一种基于多普勒频偏估计的单帧图像低速运动目标检测方法, 发射多普勒不敏感的 LFM 脉冲对, 忽略多普勒效应对成像带来的影响, 在图像域检测的同时, 利用目标回波的多普勒频偏信息对静目标和杂波点进行剔除, 降低单帧图像检测的虚警率, 实现单帧数据的运动目标检测, 从而为目标跟踪奠定良好基础。

2 基于多普勒频偏估计的单帧图像运动目标检测

本文提出了一种基于多普勒频偏估计的单帧图像运动目标检测算法, 在忽略多普勒效应对成像影响的同时, 通过对目标回波的多普勒频偏估计, 进一步减小动目标检测的虚警率, 为后续的目标跟踪带来便利。具体的流程图如图 1 所示。

2.1 宽带 2 维成像算法

对运动目标而言, 目标回波中包含多普勒频偏。为了保证 2 维成像脉冲压缩的相关增益, 同时避免目标速度不确定性给多普勒补偿带来的困难, 并有

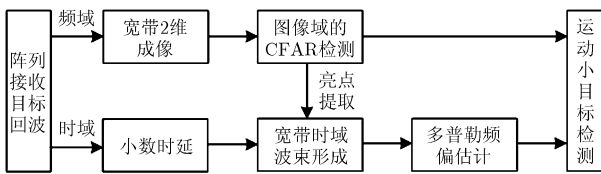


图 1 算法流程图

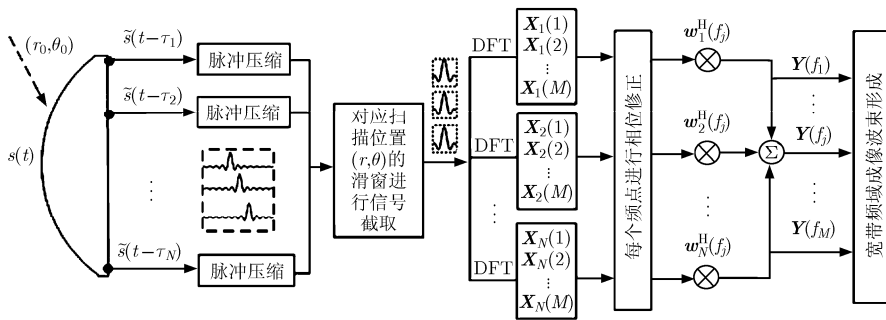


图 3 宽带 2 维成像的流程图

利于后续的宽带多普勒频偏估计, 此处选用多普勒不敏感的 LFM 脉冲对作为发射信号。LFM 脉冲对信号由两个相同的 LFM 脉冲组成, 单个 LFM 的脉宽为 2 ms, 频带为 90~110 kHz, 其模糊函数^[5]如图 2 所示。由图 2 可以看出, LFM 脉冲对信号具有多普勒不敏感的特性, 在多普勒频偏为 ± 100 Hz 时, 相关能量只下降了 2 dB。

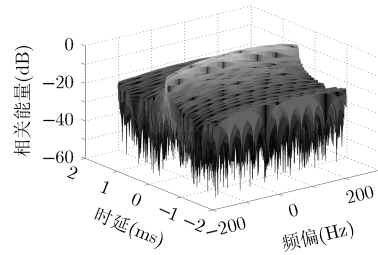


图 2 LFM 脉冲对信号的模糊度图

宽带 2 维成像^[6,7]先根据扫描位置对脉冲压缩后的信号在时域上进行滑动窗处理, 再对滑动窗内截取的信号进行频域波束形成, 得到距离和方位的 2 维声图像, 其流程图如图 3 所示。

首先, 基元接收信号 $\tilde{s}(t - \tau_i)$ 与本地信号 $s(t)$ 进行脉冲压缩处理得到 $R_i(t)$, 脉冲压缩在保留了阵列时延信息的同时提高了 2 维成像的距离分辨率

$$R_i(t) = \tilde{s}(t - \tau_i) \otimes s(t), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

其次, 根据扫描位置 (r, θ) 对应的各阵元时延和脉冲压缩后信号的脉宽来设计滑动窗的中心点 z_1, z_2, \dots, z_N 和窗的长度 L , z_1, z_2, \dots, z_N 为扫描位置对应的各阵元时延的点数, 得到滑动窗截取的信号 $H_i(t)$ 为

$$H_i(t) = R_i(z_i - L/2 : z_i + L/2) \quad (2)$$

然后, 对 $H_i(t)$ 进行 DFT, 得到带宽内每个频点的频域信息 $X_i(f_j)$ 。再对每个频点进行相位修正, 补偿回基元接收信号的频域信息 $S_i(f_j)$ 为

$$S_i(f_j) = X_i(f_j) \cdot \exp(-j2\pi f_j z_i / f_s), \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

最后, 进行宽带频域波束形成, 得到距离和方位的 2 维成像结果为

$$p(r, \theta) = \sum_{j=1}^M \left| \sum_{i=1}^N S_i(f_j) w_i^H(f_j) \right|^2 \quad (4)$$

在低速运动的目标探测中, 利用发射信号多普勒不敏感的特性, 可以忽略目标回波多普勒频偏对 2 维成像的影响, 同时估计出目标的距离和方位。为了获得目标的距离和方位信息, 需要先对 2 维成像结果进行图像域的目标检测。2 维声图像的 CFAR 检测^[8]在检测出目标亮点的同时, 可能产生大量的虚假亮点, 给后续检测跟踪算法的实时性带来较大影响。为进一步减小动目标检测的虚警率, 本文通过检测亮点位置的多普勒频偏估计, 对图像域中的静目标和杂波点进行剔除。

2.2 LFM 脉冲对的多普勒测频算法

本节通过复相关频率测量法对 CFAR 检测亮点处的波束输出信号进行多普勒频偏估计。假设目标正对接收阵的径向速度为 v , 相对于中心频率 f_0 的多普勒频偏 $f_d = 2f_0 v / c$, $s(t)$ 为包含多普勒频偏的回波信号, LFM 脉冲对的多普勒测频流程图如图 4 所示。其中, $A_c(t)$ 和 $A_s(t)$ 分别为正交解调信号, $A_c(t) = [\cos(2\pi f_L t + \pi k t^2), \cos(2\pi f_L t + \pi k t^2)]$, $A_s(t) = [\sin(2\pi f_L t + \pi k t^2), \sin(2\pi f_L t + \pi k t^2)]$ 。

将目标回波进行正交解调和低通滤波处理后, 得到包含有频偏 f_d 的复信号 $x(t)$, 由平均频率和功率谱密度之间的谱矩关系可得 $x(t)$ 的平均频率为

$$\bar{f} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} f \cdot S(f) df}{\int_{-\infty}^{+\infty} S(f) df} \quad (5)$$

由于信号的功率谱 $S(f)$ 与自相关函数 $R(\tau)$ 互为傅里叶变换对, 两边同时对 τ 求导, 并令 $\tau = 0$, 可得

$$\left. \frac{dR(\tau)}{d\tau} \right|_{\tau=0} = j2\pi \int_{-\infty}^{+\infty} f \cdot S(f) df \quad (6)$$

并且当 $\tau = 0$ 时有

$$R(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f) df \quad (7)$$

将式(6), 式(7)代入到式(5)中可得

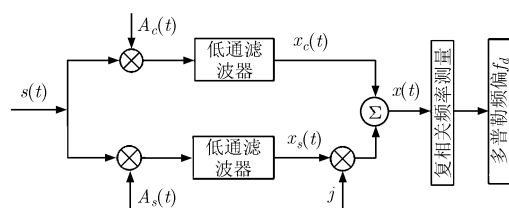


图 4 多普勒测频流程图

$$\bar{f} = \frac{1}{2\pi j} \left. \frac{dR(\tau)}{d\tau} \right|_{\tau=0} \frac{1}{R(0)} \quad (8)$$

令 $R(\tau) = A(\tau)e^{j\psi(\tau)}$, 则

$$\left. \frac{dR(\tau)}{d\tau} \right|_{\tau=0} = jR(0) \left. \frac{d\psi(\tau)}{d\tau} \right|_{\tau=0} \quad (9)$$

由式(9)可以看出, 多普勒频偏估计可以利用复信号相关函数的相位在 $\tau = 0$ 处的导数来计算。由于 $\psi(\tau)$ 为奇函数, 可得

$$\left. \frac{d\psi(\tau)}{d\tau} \right|_{\tau=0} \approx \frac{\psi(\tau_s) - \psi(0)}{\tau_s} = \frac{\psi(\tau_s)}{\tau_s} \quad (10)$$

复信号 $x(t)$ 同样具有脉冲对的特性, 在实际应用中 τ_s 取单个 LFM 脉冲脉宽, 则多普勒频偏 f_d 为

$$f_d = \frac{1}{2\pi\tau_s} \psi(\tau_s) = \frac{1}{2\pi\tau_s} \arctan[R(\tau_s)] \quad (11)$$

由反正切函数的性质可得

$$f_d \in \left[-\frac{1}{2\tau_s}, \frac{1}{2\tau_s} \right] \quad (12)$$

由式(12)可知, 当目标回波信号的多普勒频偏大于 $1/2\tau_s$ 时, 会产生测频模糊现象, 需要进行频率的解模糊^[8,9]。对于中心频率 100 kHz 的信号, 目标速度 $v = 1$ m/s 时的多普勒频偏 $f_d = 133$ Hz, 为了避免测频模糊, 单个 LFM 的脉宽 $\tau_s < 3.8$ ms。给出不同脉宽时多普勒频偏的测量误差随信噪比的变化曲线如图 5 所示, 其中圈线、方线、三角线的单个 LFM 脉宽分别为 1.5 ms, 2.0 ms 和 2.5 ms。可以看出, 多普勒频偏的估计精度随 SNR 和 LFM 脉宽的增加而增加。

下面对算法进行计算机仿真, 仿真条件为: 发射 LFM 脉冲对信号, 单个 LFM 的脉宽为 2.0 ms, 频带为 90~110 kHz, 采样率为 500 kHz。静目标位于 (10 m, 90°), 动目标位于 (9 m, 110°), 正对接收阵运动的径向速度为 1 m/s, 对应中心频率的频偏为 133 Hz, 基元域信噪比 SNR = -5 dB, 2 维成像以及 CFAR 检测后的多普勒频偏估计结果如图 5 所示。

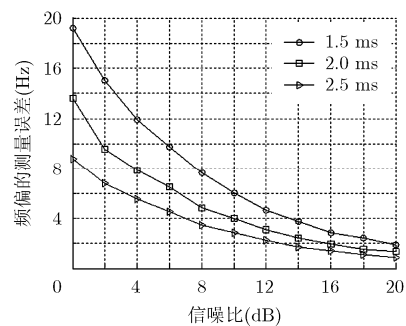


图 5 测频精度随信噪比的变化曲线

图 6(a)为接收信号的 2 维成像结果，由脉冲对信号的特性可知，2 维成像结果会在目标的真实距离前后形成亮点，且前后距离均为单个 LFM 的脉冲长度，能量为目标真实位置的一半。图中椭圆圈出的位置为动目标和静目标亮点，方形圈出的位置为 CFAR 检测出的杂波点。图 6(b)为 CFAR 检测亮点位置处的多普勒频偏估计结果，除去运动目标亮点外，以及脉冲对信号带来的前后虚假点，CFAR 还检测出 5 个虚假亮点。动目标位置处的频偏为 131 Hz，静目标位置处的频偏为 0.7 Hz，而其它的虚假亮点由于波束输出无法得到目标回波信号，所以估计的频偏是杂乱的。若已有运动目标的速度先验信息，约为 0.5~1.5 m/s，选取 60~200 Hz 为动目标频偏估计的置信区间，虚假亮点数可以减小为 2 个。可见利用运动目标的多普勒频偏可以进一步剔除静目标和杂波亮点，减小动目标检测的虚警率。若利用 DBT 算法进行动目标跟踪，在前两帧的航迹初始化过程中，运动目标和虚假亮点个数均为 6 个时，则关联的初始航迹为 36 条，而进行多普勒频偏估计后，前两帧的运动目标和虚假亮点个数均为 3 个，则关联的初始航迹可以减少为 9 条，减少了后续目标跟踪算法轨迹剔除的运算量。

2.3 宽带信号的小数时延 FIR 波束形成

由 2.2 节可知，多普勒频偏估计需要获取 CFAR 检测亮点位置处的目标回波，其中最经典方法的便是常规时域波束形成，通过对接收阵各阵元信号进行数字时延，相加后得到波束输出^[10-12]。目标回波获取的精度决定了多普勒频偏估计的精度，但时域波束形成只能对整数倍采样点进行移位，在低倍采样的情况下，波束形成的输出信号将产生较大误差。而频域波束形成是对各子窄带进行频域波束形成后再通过傅里叶反变换转化为时域输出，这种方式得到的时域信号并不是真正连续的，且时频转换带来

能量损失^[2]。本节通过 2 阶锥规划^[13]，仅利用 9 阶的 FIR 滤波器实现宽带信号的小数时延，小数时延的精度为 $0.01T_s$ ，只牺牲较小的运算量，即可提高时域波束形成器的精度。

假设 FIR 滤波器阶数为 L ，其中 L 为奇数，期望的小数时延为 τ/f_s 。由于 FIR 滤波器具有 $(L-1)/2$ 个采样点的群时延，则滤波器设计所期望的频率响应为

$$H_d(f_k) = e^{-j2\pi f_k[(L-1)/2+\tau]/f_s}, \tau = [-0.5, 0.5) \quad (13)$$

其中， $f_k \in F, k = 1, 2, \dots, K$ ， f_k 为需要设计的离散化频点，一般为信号的频带。

假设 L 阶滤波器的系数为 \mathbf{h} ，则滤波器的频率响应为

$$H_n(f_k) = e^{-j2\pi f_k[0:L-1]/f_s} \cdot \mathbf{h}^T \quad (14)$$

用滤波器的频率响应 $H_n(f)$ 来逼近期望的频率响应 $H_d(f)$ ，约束所有期望频点误差 δ_k 的总和最小，则滤波器系数的设计准则为

$$\left. \begin{aligned} &\delta_k = \lambda(f_k) |H_n(f_k) - H_d(f_k)| \\ &\min_{\mathbf{h}} \sum_{k=1}^K \delta_k \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

其中， $\lambda(f_k)$ 为误差的加权系数， δ_k 为频点 f_k 所对应的误差函数。该约束条件满足凸优化准则，可以利用 2 阶锥规划进行求解^[14]。

下面对宽带信号的小数时延 FIR 滤波器进行仿真，仿真条件为：FIR 滤波器的阶数 $L=9$ ，设计频带为 70~130 kHz，采样频率为 500 kHz，小数时延的精度为 $0.01T_s$ 。FIR 滤波器频率响应的设计误差分布和滤波器的时延分布如图 7 和图 8 所示。可以看出，FIR 滤波器设计频率响应与期望频率响应误差在整个设计频带中均达到 -100 dB 以下，仅用 9 阶 FIR 滤波器便可以实现 $0.01T_s$ 精度的小数时延。

下面给出图 6 中 (9 m, 110°) 处动目标的多普勒

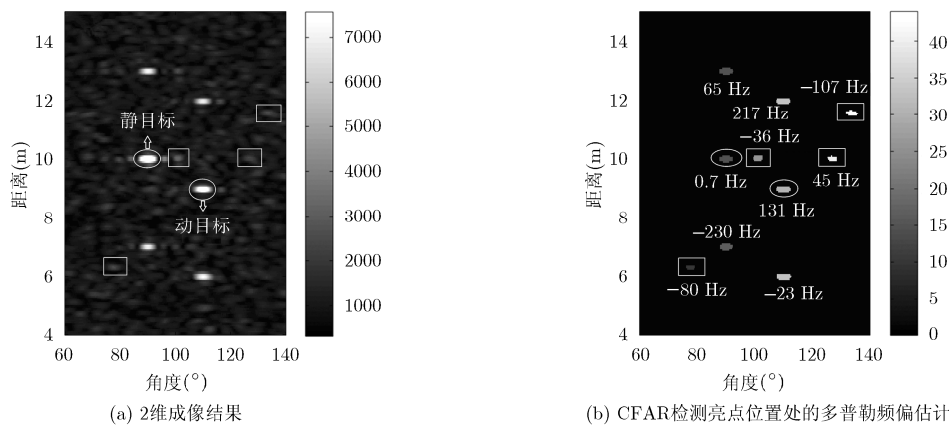


图 6 基于多普勒频偏的动目标检测结果

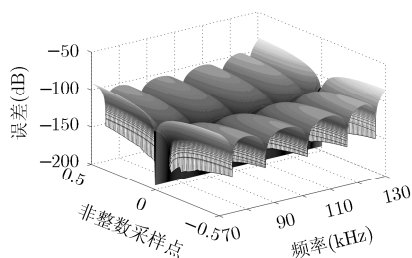


图7 频率响应的误差分布

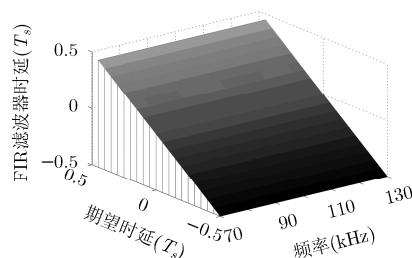


图8 FIR滤波器的时延分布

频偏的估计精度随采样频率的变化曲线, 仿真结果如图9所示。可以看出多普勒频偏估计精度随采样频率的增加而增加, 但在高频的成像声呐系统中, 高倍采样将大大增加系统的设计要求和运算量。

与图6的仿真条件相同, 对(9 m, 110°)处动目标的宽带波束输出信号进行多普勒频偏估计, 在采样频率 f_s 为300 kHz和500 kHz时, 整数时延和小数时延宽带波束输出信号的多普勒频偏估计误差随基元级信噪比的变化曲线如图10所示。可以看出, 在 $f_s=300$ kHz和 $f_s=500$ kHz时, 小数时延波束形成提高了宽带波束形成输出信号的精度, 进而提高了多普勒频偏估计的精度, 在低倍采样 $f_s=300$ kHz时, 多普勒频偏估计的精度提高6 Hz。在 $f_s=500$ kHz时, 多普勒频偏估计的精度提高2.5 Hz。所以小数时延波束形成可以进一步提高基于多普勒频偏估计运动小目标检测的性能。

3 水池试验

水池试验采用收发同置的声呐对运动目标进行探测, 声源 T 发射LFM脉冲对信号, 单个脉冲长度为2 ms, 频带为90~110 kHz, 发射信号的触发周期为0.25 s。接收为阵元间距为1 cm的16元圆弧阵, 采样频率 $f_s=500$ kHz。拉动水杯靠近接收阵做径向运动, 利用基于多普勒频偏估计的单帧图像低速运动目标检测算法对运动水杯进行单帧检测。水池试验配置如图11所示。

图12和图13分别为第14帧和第15帧的成像处理结果, 图中八字形的两串亮点为两侧的池壁, 椭圆圈出的位置分别为水杯和正对接收阵的池壁。

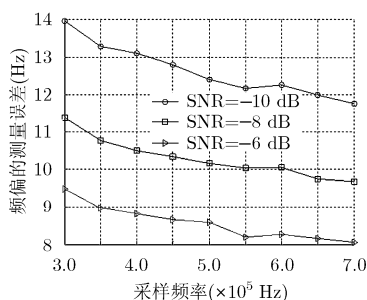


图9 多普勒频偏估计精度随采样频率的变化曲线

池壁为静目标, 连续两帧的成像位置均为(8.4 m, 90°), 多普勒频偏估计结果分别为0.4 Hz和-1.2 Hz。水杯为动目标, 连续两帧的成像位置分别为(6.58 m, 78°)和(6.53 m, 78°), 多普勒频偏估计结果分别为27.6 Hz和27.9 Hz。发射触发周期为0.25 s, 通过声图像可以估算出目标的运动速度为0.2 m/s, 对应中心频率100 kHz的多普勒频偏为26.67 Hz, 与之前的估计值吻合, 而CFAR检测出的其他杂亮点处的多普勒频偏是杂乱的, 实现了单帧图像的运动目标检测。通过水池试验, 验证了基于多普勒频偏估计的单帧图像低速运动目标检测算法的有效性。若此时利用DBT算法进行运动目标跟踪, 在前两帧的航迹初始化过程中, 运动目标和虚假亮点个数均为6个, 则关联的初始航迹为36条。而进行多普勒频偏估计, 以5~55 Hz为动目标频偏估计的置信区间, 两帧的运动目标和虚假亮点个数分别为2个和1个, 则关联的初始航迹可以减少至2条, 减少了后续目标跟踪算法轨迹剔除的运算量。

4 结论

本文提出了一种基于多普勒频偏估计的单帧图像低速运动目标检测算法, 通过发射多普勒不敏感的LFM脉冲对, 忽略多普勒效应对成像结果的影响, 但在图像域检测的同时, 利用宽带时域波束形成和复相关频率测量法, 对检测亮点处的波束输出信号进行多普勒测频。利用目标回波的多普勒频偏信息对静目标和杂波亮点进行剔除, 减小运动目标检测的虚警率, 实现了单帧图像的运动目标检测,

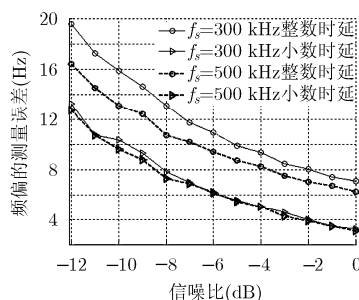


图10 多普勒频偏估计误差随基元级信噪比的变化曲线

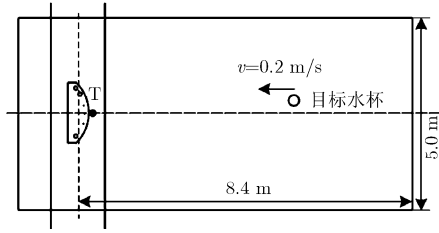


图 11 水池试验配置图

为后续的检测跟踪带来了便利。由于宽带波束形成的性能直接影响多普勒频偏的估计精度，为了改善低倍采样下宽带时域波束形成的性能，本文利用 2 阶锥规划设计滤波器的系数，用 9 阶 FIR 滤波器实现了 0.01 倍采样点的小数时延，提高了多普勒频偏的估计精度。通过计算机仿真和水池试验验证了该算法的有效性。

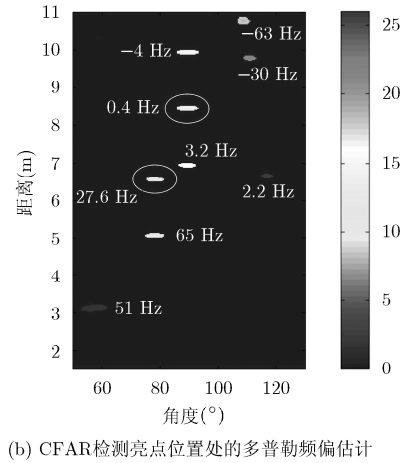
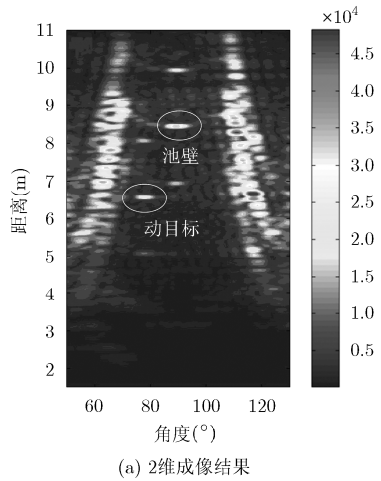


图 12 第 14 帧处理结果

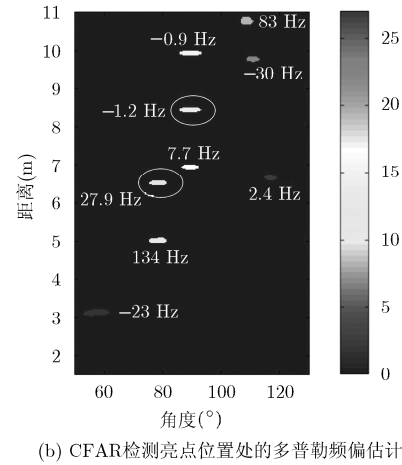
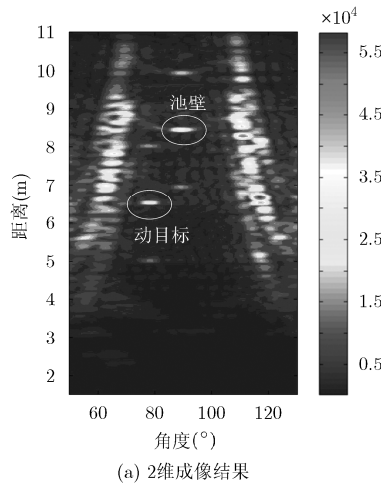


图 13 第 15 帧处理结果

参 考 文 献

[1] 张伟豪, 许枫. 水下蛙人被动探测技术实验研究[J]. 声学学报, 2012, 37(3): 301-307. doi: 10.15949/j.cnki.0371-0025.2012.03.006.
 ZHANG Weihao and XU Feng. Experiment and study for passive acoustic detection of underwater divers[J]. *Acta Acustica*, 2012, 37(3): 301-307. doi: 10.15949/j.cnki.0371-0025.2012.03.006.

[2] BREKKE E, HALLINGSTAD O, and GLATTETRE J. Tracking small targets in heavy-tailed clutter using

amplitude information[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2010, 35(2): 314-392.

[3] 高文, 汤洋, 朱明. 复杂背景下目标检测的级联分类器算法研究[J]. 物理学报, 2014, 63(9): 94204-94207. doi: 10.7498/aps.63.094204.
 GAO Wen, TANG Yang, and ZHU Ming. Study on the cascade classifier in target detection under complex background[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(9): 94204-94207. doi: 10.7498/aps.63.094204.

[4] 易伟. 基于检测前跟踪技术的多目标跟踪算法研究[D]. [博士

- 论文], 电子科技大学, 2012.
- YI Wei. Research on Track-before-detect algorithms for multiple-target detection and tracking[D]. [Ph. D. dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2012.
- [5] YANG T C, SCHINDALL J, and HUANG C F. Clutter reduction using Doppler sonar in a harbor environment[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, 132(5): 3053-3067.
- [6] 黄聪, 孙大军, 张殿伦. 强相干扰下基于二阶锥规划的圆弧阵宽带二维成像[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(11): 2634-2639. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01796.
- HUANG Cong, SUN Dajun, and ZHANG Dianlun. Wideband two-dimensional imaging with arc array based on second-order cone programming under strong coherent interference[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(11): 2634-2639. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01796.
- [7] 黄聪, 孙大军, 张殿伦. 双基地多输入多输出虚拟阵列的稳健低旁瓣波束优化技术[J]. 物理学报, 2014, 63(18): 188401-188406. doi: 10.7498/aps.63.188401.
- HUANG Cong, SUN Dajun, and ZHANG Dianlun. Optimizations for robust low sidelobe beamforming of bistatic MIMO virtual array[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(18): 188401-188406. doi:10.7498/aps.63.188401.
- [8] 陈建军, 黄孟俊, 赵宏钟. 相参雷达时频域 CFAR 检测门限获取方法研究[J]. 电子学报, 2013, 41(8): 1634-1639. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.08.029.
- CHEN Jianjun, HUANG Mengjun, and ZHAO Hongzhong. Research on estimated threshold of CFAR detection in time frequency domain for coherent radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(8): 1634-1639. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.08.029.
- [9] 李想. 水下高速运动目标轨迹测量技术研究[D]. [博士学位论文], 哈尔滨工程大学, 2011.
- LI Xiang. Research on the techniques of underwater high-speed moving target's trace measuring[D]. [Ph.D. dissertation], Harbin Engineering University, 2011.
- [10] 马海涛, 彭东立, 王华亮. 宽带多普勒技术中模糊速度处理方法改进[J]. 声学学报, 2011, 36(2): 226-230. doi: 10.15949/j.cnki.0371-025.2011.02.004.
- MA Haitao, PENG Dongli, and WANG Hualiang. An improvement method to the ambiguous velocity in broad-band Doppler technique[J]. *Acta Acustica*, 2011, 36(2): 226-230. doi: 10.15949/j.cnki.0371-025.2011.02.004.
- [11] 时洁, 杨德森, 时胜国. 基于矢量阵的运动声源柱面聚焦定位方法试验研究[J]. 物理学报, 2012, 61(12): 124302-124307.
- SHI Jie, YANG Desen, and SHI Shengguo. Experimental research on cylindrical focused beamforming localization method of moving sound sources based on vector sensor array[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(12): 124302-124307.
- [12] 梁国龙, 马巍, 范展. 矢量声纳高速运动目标稳健高分辨方位估计[J]. 物理学报, 2013, 62(14): 144302-144307. doi: 10.7498/aps.62.144302.
- LIANG Guolong, MA Wei, and FAN Zhan. A high resolution robust localization approach of high speed target based on vector sonar[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(14): 144302-144307. doi: 10.7498/aps.62.144302.
- [13] 杨涛, 苏涛, 何学辉. 基于波束域导向矢量估计的稳健自适应波束形成方法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(11): 2759-2763. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01334.
- YANG Tao, SU Tao, and HE Xuehui. Robust adaptive beamforming based on beamspace steering vector estimation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(11): 2759-2763. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01334.
- [14] 鄢社锋, 马远良. 基于二阶锥规划的任意传感器阵列时域恒定束宽波束形成[J]. 声学学报, 2005, 30(4): 309-315. doi: 10.15949/j.cnki.0371-025.2005.04.006.
- YAN Shefeng and MA Yuanliang. Broadband constant beamwidth beamforming for arbitrary sensor arrays in time domain via second-order cone programming[J]. *Acta Acustica*, 2005, 30(4): 309-315. doi: 10.15949/j.cnki.0371-025.2005.04.006.
- 黄聪: 男, 1988年生, 博士, 研究方向为水下阵列信号处理.
- 刘寅: 男, 1987年生, 博士, 研究方向为水声信号处理.