

Doppler-warping变换及其应用在声学目标运动速度估计

高德洋 高大治 迟静 王良 宋文华

Doppler-warping transform and its application to estimating acoustic target velocity

Gao De-Yang Gao Da-Zhi Chi Jing Wang Liang Song Wen-Hua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 124302 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201653

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201653>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

warping变换提取单模态反演海底衰减系数

Inversion of seabed attenuation by using single mode extracted by warping transform

物理学报. 2017, 66(20): 204301 <https://doi.org/10.7498/aps.66.204301>

运动目标激光微多普勒效应平动补偿和微动参数估计

Translation compensation and micro-motion parameter estimation of laser micro-Doppler effect

物理学报. 2018, 67(15): 150701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172754>

浅海波导中低频声场干涉简正模态的判别

Identification of interference normal mode pairs of low frequency sound in shallow water

物理学报. 2019, 68(13): 134304 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190221>

基于多角度投影激光吸收光谱技术的两段式速度分布流场测试方法

Two-stage velocity distribution measurement from multiple projections by tunable diode laser absorption spectrum

物理学报. 2019, 68(24): 247801 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191223>

负质量密度声学超材料的反常多普勒效应

Inverse Doppler effect of acoustic metamaterial with negative mass density

物理学报. 2017, 66(2): 024301 <https://doi.org/10.7498/aps.66.024301>

一种基于单水听器的浅海水下声源被动测距方法

A passive range method of underwater source based on single hydrophone

物理学报. 2017, 66(18): 184301 <https://doi.org/10.7498/aps.66.184301>

Doppler-warping 变换及其应用在 声学目标运动速度估计*

高德洋¹⁾ 高大治^{1)†} 迟静¹⁾ 王良¹⁾ 宋文华²⁾

1) (中国海洋大学海洋技术系, 青岛 266100)

2) (中国海洋大学物理系, 青岛 266100)

(2020 年 10 月 7 日收到; 2021 年 2 月 13 日收到修改稿)

当声源和接收器之间存在相对运动时, 接收到的信号会发生多普勒频移, 多普勒频移和目标运动参数有关. 针对声学多普勒频移问题提出 Doppler-warping 变换, 运用该变换可以实现多普勒信号相位的线性化, 推导出 warping 算子, 提出一种利用该变换估计目标运动参数的算法. 首先构造不同运动参数下的 Doppler-warping 算子, 再利用算子对接收的时域信号进行时间重采样, 然后求出变换之后信号的频谱函数, 最后利用频谱函数熵最小来实现目标参数估计. 仿真结果证明了该方法的有效性, 对于低信噪比的海试数据, 渔船真实速度为 4.5 m/s, 采用传统的最小均方误差 (MMSE) 速度估计方法得到的结果为 5.2 m/s, 误差达到 15.56%, 本文提出的 Doppler-warping 变换方法较为准确地估计了目标运动速度, 估计结果为 4.7 m/s, 误差为 4.44%.

关键词: 多普勒效应, warping 变换, 目标运动速度估计

PACS: 43.60.+d, 43.30.+m

DOI: 10.7498/aps.70.20201653

1 引言

汽车、火车、舰船、飞机等机械声源在运动过程中都会产生辐射噪声, 频谱往往由若干离散的单频线谱叠加宽带连续谱组成, 相较于连续谱, 线谱集中在低频, 具有强度高、传播距离远、时间稳定等特点^[1,2]. 当声源运动而接收静止时, 接收到的信号将产生多普勒频移, 线谱信号不再是平稳的单频信号, 而是频率随时间变化的非平稳信号.

利用目标线谱的多普勒频移可以实现对运动目标最近点到达时间、正横距离、运动速度等参数的估计^[3]. 1994 年, Ferguson 和 Quinn^[4]提出了一种利用多普勒频移估计目标运动参数的方法, 这种方法针对经典的目标运动接收器静止问题, 思想是首先利用时频分析的方法提取接收多普勒信号的

瞬时频率, 再通过最小二乘法将瞬时频率和多普勒频移模型进行拟合, 估计运动参数. 随后国内外的学者对这一经典问题提出了很多改进的方法, 一方面在时频分析中引入高阶核函数^[5-8], 提高时频分辨率, 使得提取的瞬时频率更加精准; 另一方面针对不同的应用环境改善参数估计算法^[9-13], 使得参数估计的计算速度更快, 计算结果更加准确. 在仿真或者高信噪比的实验中, 这些方法能够得到较好的结果, 但是在实际应用中, 声源辐射信号的幅度和频率不是固定不变的, 会产生随机的振荡, 加之信道的起伏, 导致接收信号的信噪比往往较低, 应用时频分析方法很难得到理想的结果, 运动参数估计也存在较大误差.

Warping 变换是一种酉等价变换, 由 Baraniuk 和 Jones^[14]在 1995 年首先提出. Bonnel 等^[15]将 Baraniuk 提出的酉等价变换首先应用在水声领域,

* 国家自然科学基金 (批准号: 11874331) 和青岛海洋科学与技术国家实验室开放基金 (批准号: QNLM2016ORP0106) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: dzgao@ouc.edu.cn

将由信道的频散效应引起的非平稳频散信号变换为平稳的准单频信号, 以此来实现各信号简正波分离, 进而实现被动声源探测、地声参数反演、气泡脉动消除^[16–20]等应用, 因此水声领域熟知的这种西等价变换是一种频散-warping 变换 (dispersion-warping), 该研究是水声领域近十年来的热点.

本文将西等价变换应用到经典的声学多普勒问题上, 提出 Doppler-warping 变换, 推导了 Doppler-warping 算子, 利用该算子进行时域重采样可以将非平稳的多普勒信号变换为平稳的准单频信号, 实现多普勒信号相位的线性化, 进而估计目标运动参数. 仿真数据验证了该方法在目标运动速度估计上的可行性, 在海试数据中, 该方法也较为准确地实现了对目标渔船运动速度的估计, 估计精度优于传统的最小均方误差 (MMSE) 速度估计方法.

2 Doppler-warping 变换

2.1 多普勒频移

声源与接收器之间的相对运动会产生多普勒频移, 下面以经典的声源运动接收器静止产生的相对运动为例, 讨论分析多普勒频移问题. 运动模型如图 1 所示, 静止频率为 f_0 的声源以恒定的速度 v 沿着直线 AB 运动, 声源到达距离接收器 C 的最近点 D 的时间记为 t_0 , 称为“最近点时间”, 此时声源与接收器的距离记为 r_0 , 称为“最近距离”, 介质中声速为 c .

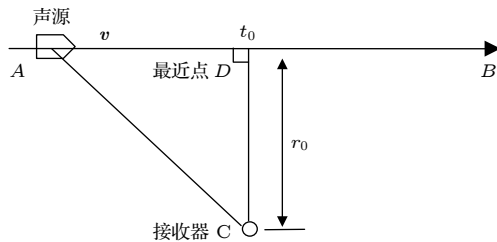


图 1 声源运动接收器静止示意图

Fig. 1. Moving sound source and stationary receiver.

在运动声源的时刻 τ , 声源辐射的信号经过 r_τ/c 时间到达接收器, r_τ 是 τ 时刻声源同接收器之间的距离, 到达接收器的时刻为 t , 显然有 $t = \tau +$

r_τ/c , 接收到的信号 $x(t)$ 可以表示为

$$x(t) = A(\tau) e^{j(2\pi f_0 \tau + \phi_0)}, \quad (1)$$

其中 $A(\tau)$ 表示信号接收到的幅度, ϕ_0 为初始相位. 对于 r_τ 还可以通过几何关系得到:

$$r_\tau = c(t - \tau) = \sqrt{r_0^2 + v^2(t - t_0)^2}, \quad (2)$$

由于 $t > \tau$, 所以利用 (2) 式可求得 τ 为

$$\tau = \frac{c^2 t - v^2 t_0 - \sqrt{r_0^2 (c^2 - v^2) + c^2 v^2 (t - t_0)^2}}{c^2 - v^2}, \quad (3)$$

所以接收信号的瞬时相位 (记为) $\phi(t)$, 可以表示为

$$\begin{aligned} \phi(t) &= 2\pi f_0 \\ &\times \frac{c^2 t - v^2 t_0 - \sqrt{r_0^2 (c^2 - v^2) + c^2 v^2 (t - t_0)^2}}{c^2 - v^2} + \phi_0. \end{aligned} \quad (4)$$

瞬时相位 $\phi(t)$ 对时间 t 求导, 可以得到接收信号的瞬时频率 $f_D(t)$:

$$\begin{aligned} f_D(t) &= \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} = f_0 \frac{c^2}{c^2 - v^2} \\ &\times \left[1 - \frac{v^2 (t - t_0)}{\sqrt{r_0^2 (c^2 - v^2) + c^2 v^2 (t - t_0)^2}} \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

2.2 Doppler-warping 变换

从 (4) 式可以看出, 多普勒信号是瞬时相位随时间变化的非平稳信号. warping 变换的基本思想是: 取信号瞬时相位的反函数作为时域 warping 算子, 然后利用 warping 算子对信号进行时间重采样, 由此使得信号相位线性化. 本文利用运动参数与多普勒频移之间的关系, 提出一种 Doppler-warping 变换, 由于多普勒信号的瞬时相位 $\phi(t)$ 中仅有 $\tau(t)$ 包含随时间 t 变化的部分, 因此, Doppler-warping 算子可以写为

$$h_D(t) = \tau^{-1}(t) = t + \frac{1}{c} \sqrt{r_0^2 + v^2(t - t_0)^2}. \quad (6)$$

将 (6) 式代入 (1) 式, 相当于接收信号的原始采样时刻 t 替换成新的采样时刻 $h_D(t)$, 得到 Doppler-warping 后的结果为

$$\begin{aligned} x_D(t) &= x[h_D(t)] = C(t) e^{j\phi[h_D(t)]} \\ &= C(t) \exp \left\{ 2\pi f_0 \frac{c^2 h_D(t) - v^2 t_0 - \sqrt{r_0^2 (c^2 - v^2) + c^2 v^2 [h_D(t) - t_0]^2}}{c^2 - v^2} + \phi_0 \right\} = C(t) \exp(2\pi f_0 t + \phi_0), \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $C(t) = \sqrt{h_D'(t)}A[h_D(t)]$ 是变换之后的信号幅度, $\sqrt{h_D'(t)}$ 保证了信号变换前后的能量是守恒的. 关于 (6) 式和 (7) 式的详细推导见附录 A, 这里只给出最终结果. 从 (7) 式可以看出, 多普勒信号的原始非线性相位 $\phi(t)$, 经过 Doppler-warping 变换, 实现了相位的线性化.

3 运动参数估计

3.1 Doppler-warping 变换估计速度

假设在短时间内的介质声速变化忽略不计, 即声速 c 已知且不变, 同时假设目标运动的最近距离 r_0 和最近点到达时间 t_0 已知, 由 (7) 式可知: Doppler-warping 算子 $h_D(t)$ 仅与目标运动速度 v 有关. 当目标速度为真实值时, 经过 Doppler-warping 变换, $x_D(t)$ 为准单频信号, 则其频谱能量分布集中; 当速度搜索不准确时, $x_D(t)$ 的相位仍然是非线性的, 则其频谱能量分布比较分散. 由此, 可以通过判断频谱能量分布集中程度来实现对目标速度的估计, 本文采用了频谱能量的熵来衡量分布的集中程度.

Doppler-warping 变换估计速度的具体步骤:

1) 已知目标运动的最近距离 r_0 、最近点到达时间 t_0 和水中声速 c , 同时设定目标速度 v 的搜索范围 $[v_1, v_2, \dots, v_M]$, M 是搜索的速度个数;

2) 将速度搜索值 v_i 代入 (6) 式计算得到 Doppler-warping 算子 $h_D(t)$, 再代入 (7) 式计算 $x_D(t)$, 实现对信号的时域重采样;

3) 对 $x_D(t)$ 做傅里叶变换并取模, 得到信号的频谱函数 $X_D(f)$:

$$X_D(f) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} x_D(t) e^{-j2\pi ft} dt \right|; \quad (8)$$

4) 线谱能量要高于连续谱能量, 因此可根据频谱函数的幅值大小变化, 粗略估计线谱信号中心频率和判断待分析的线谱频率上下限, 分别记为 f_1 和 f_2 , 在频率段 $[f_1, f_2]$ 上计算频谱函数 $X_D(f)$ 的熵 S_D , 作为速度搜索的代价函数:

$$S_D(i) = - \int_{f_1}^{f_2} X_D(f) \log_2 X_D(f) df; \quad (9)$$

5) 将 v_{i+1} 代入步骤 2) 中继续计算, 得到步骤 4) 中的代价函数 $S_D(i+1)$, 直至 $i = M$, 即完成所有设定速度的计算;

6) 确定速度搜索的结果: $\hat{v}_D = \arg \min_v S_D$.

3.2 MMSE 估计速度

前文提到, Ferguson 和 Quinn^[4] 提出的单传感器利用多普勒频移估计目标运动参数方法, 核心思想是时频分析和模型拟合. 为了验证 Doppler-warping 在低信噪比下运动参数估计的优势, 本文将这种方法作为对比, 采用经典的短时傅里叶变换作为时频分析方法, 同时采用 MMSE 法进行速度估计.

接收信号 $x(t)$ 经过短时傅里叶变换得到时频函数 STFT (t, f) , 在时间点 t_n 进行频率峰值提取, 得到瞬时频率估计值 $\hat{f}(t_n)$, 信号共有 N 个时间点. 假设目标运动的静止频率 f_0 、最近距离 r_0 和最近点到达时间 t_0 已知, 由 (5) 式可以得到模型计算的瞬时频率 $f_D(t_n)$, 所以关于目标运动速度 v 的估计可以表示成

$$\hat{v} = \arg \min_v \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [\hat{f}(t_n) - f_D(t_n)]^2 \right\}. \quad (10)$$

4 数值仿真

仿真条件: 假设目标在海水中运动, 运动轨迹如图 1 所示, 目标的静止频率 $f_0 = 150$ Hz, 最近距离 $r_0 = 200$ m, 运动速度 $v = 5$ m/s, 最近点到达时间 $t_0 = 60$ s, 接收信号时间 t 的范围是 0—120 s, 水中声速 $c = 1500$ m/s, 信号采样率为 10 kHz. 在短时傅里叶变换中选用的时间窗函数是 hanning 窗, 窗长 $T = 10$ s, 时间混叠 $T_{\text{overlap}} = 9.5$ s, 时频图像如图 2(a) 所示, 图中黑色实线为瞬时频率真实值; 从时频图可以得到瞬时频率估计值, 将它和理论值对比, 如图 2(b) 所示, 图中估计的瞬时频率呈阶梯状, 原因是短时傅里叶变换的窗长为 10 s, 所以对应的频率分辨率只有 0.1 Hz. 假设目标运动的静止频率 f_0 、最近距离 r_0 和最近点到达时间 t_0 已知, 设定速度搜索范围为 $[0.1, 0.1, 10]$ m/s, MMSE 估计速度搜索结果如图 2(c) 所示, 图中绿色虚线为真实值位置, 红色五角星为搜索的结果, 速度的估计值为 $\hat{v} = 5$ m/s, 和真实值一致.

使用 Doppler-warping 变换的方法对同一个信号做速度估计, 同样假设目标运动的最近距离 r_0 和最近点到达时间 t_0 已知, 速度搜索范围为

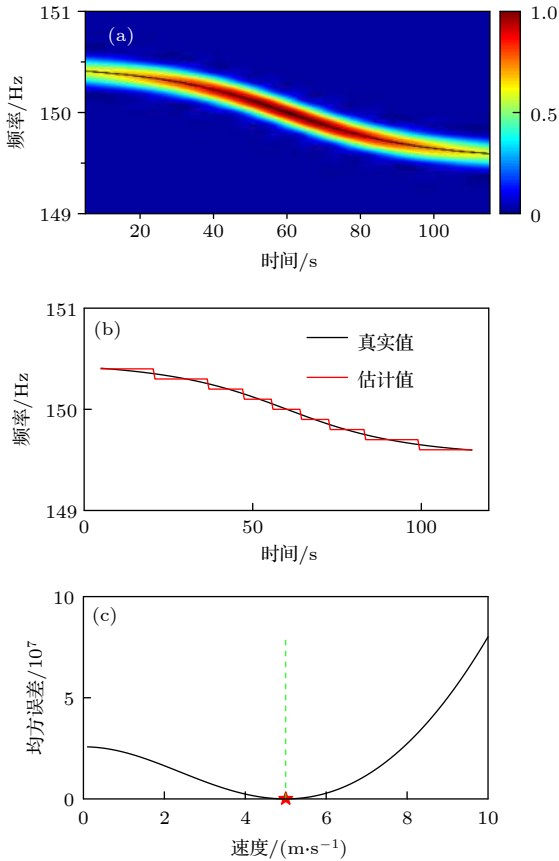


图2 (a) 多普勒信号时频图; (b) 瞬时频率真实值和估计值; (c) 最小均方误差估计的速度值和真实值对比

Fig. 2. (a) Time-frequency distribution of Doppler signal; (b) real and estimated instantaneous frequency; (c) comparison of real velocity and estimation velocity obtained by MMSE.

[0.1, 0.1, 10] m/s. 结果表明: 相较于原始信号的频谱函数, 随着代入速度值的不断增加 ($v = 3$ m/s), 信号的频谱函数逐渐集中; 当速度达到真实值 ($v = 5$ m/s) 时, 频谱函数最尖锐; 而当速度值继续增大 ($v = 10$ m/s), 频谱函数开始变得分散, 这一变化如图 3(a) 所示. 计算所有速度值频谱的熵, 结果如图 3(b) 所示, 图中绿色虚线为真实值位置, 红色五角星为使得熵最小时的速度值 $\hat{v}_D = 5$ m/s, 估计结果和真实值一致.

由以上分析可知, 当不加噪声时, MMSE 估计速度和 Doppler-warping 变换估计速度都能取得理想的效果. 进一步, 加入不同信噪比的高斯白噪声, 再进行速度估计, 估计结果如图 4 所示. 可以看到, 当信噪比大于或等于 0 dB 时, 两种方法都能准确地估计目标速度; 当信噪比小于 0 dB 时, MMSE 估计速度的结果越来越偏离真实值, 估计误差越来越大, 而 Doppler-warping 变换的估计结

果则一直比较稳定, 且估计结果都比较准确.

图 5(a) 给出了当信噪比为 -10 dB 时的时频图像, 图中黑色实线为原信号的瞬时频率, 可以发现, 在低信噪比下, 时频图上出现较多的干扰点, 原有的信号瞬时频率曲线已不再光滑连续. 利用时频图像估计的瞬时频率和真实瞬时频率的对比如图 5(b) 所示, 瞬时频率估计值随着时间存在较大抖动, 而真实值则比较光滑, 两者存在较大区别, 因此 MMSE 估计速度结果不准确. 图 5(c) 给出了 $v = 5$ m/s 时, Doppler-warping 变换后的频谱函数分布和原始信号频谱函数的对比, 可以发现在 $v = 5$ m/s 时频谱信号依然有一个尖锐的峰值, 能量集中分布在 $f_0 = 150$ Hz 处.

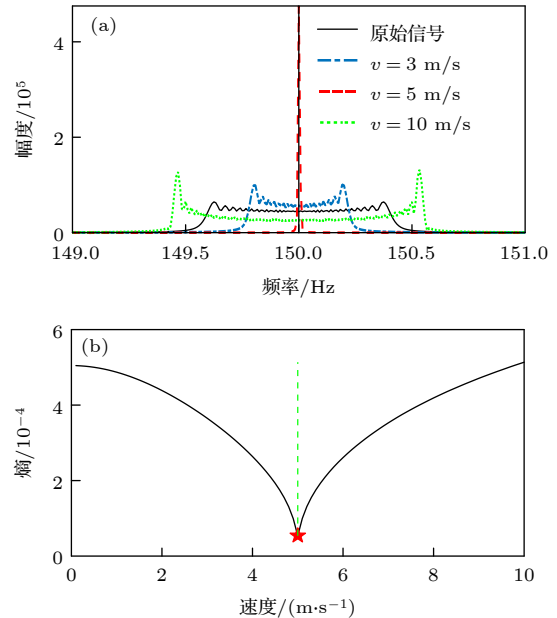


图3 (a) 不同速度值下 Doppler-warping 变换后的信号频谱; (b) Doppler-warping 变换估计速度的结果

Fig. 3. (a) Signal spectra after the Doppler-warping transform under different velocity values; (b) result of velocity estimation by the Doppler-warping transform.

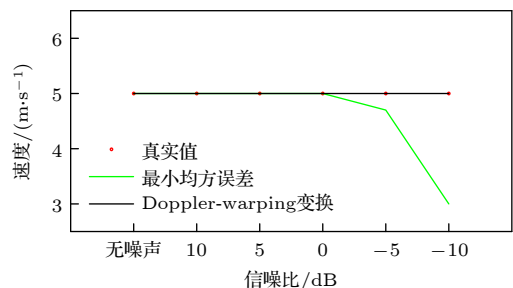


图4 不同信噪比下估计的速度结果

Fig. 4. Estimated velocity results under different SNRs.

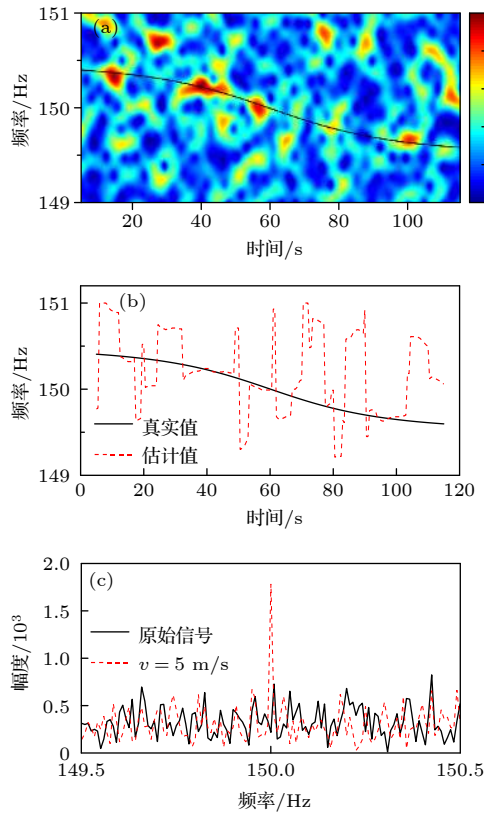


图5 SNR = -10 dB 时的 (a) 时频分布图, (b) 瞬时频率真实值和估计值, 以及 (c) $v = 5$ m/s 条件下 Doppler-warping 变换后的频谱和原始信号频谱的对比

Fig. 5. (a) Time-frequency distribution; (b) real and estimated instantaneous frequency; (c) comparison of signal spectrum after the Doppler-warping transform with $v = 5$ m/s and the spectrum of the original signal. SNR = -10 dB.

5 海试数据分析

2020 年 6 月, 中国海洋大学在青岛近海大公岛以东海域展开了一次水声调查实验, 接收器为加拿大 Ocean Sonics 公司生产的 icListen 自容式水听器, 固定于水面下 3 m 处, 采样率为 64 kHz. 一艘 150 马力的渔船作为目标船, 全速 (4.5 m/s) 从南向北行驶, 经过浮标后继续向北方行驶, 期间航向和速度保持不变, 航行过程中发动机和螺旋桨等辐射噪声作为本次实验的目标声源. 目标船和接收器都安装有差分 GPS, 实时记录位置、运动航向和速度信息, 目标船运动轨迹如图 6(a) 所示. 实验期间为黄海禁渔期且实验海域不在商船航线上, 附近没有其他船只. 实验海域水深约 32 m, 水体声速剖面如图 6(b) 所示, 水体声速变化 Δc 不超过 4 m/s.

通过查看 GPS 数据, 找到以最近点到达时间为中心, 前后各取 70 s, 共计 140 s 的声数据, 目标

船与接收器的最近距离为 174 m, 对这段信号进行短时傅里叶变换, 以中心频率为 124.5 Hz 的线谱信号作为研究对象, 其时频图像如图 7(a) 所示, 图中黑色实线代表了瞬时频率的理论值, 图 7(b) 对比了理论值和估计值的差异. 从图 7(b) 可以看到, 时频图上的曲线有许多断点, 信号在 35 和 110 s 附近的幅度明显高于最近点 70 s 附近的幅度, 说明线谱幅度随时间的变化受到声场干涉的影响. 在 40 和 120 s 附近, 瞬时频率曲线会出现较大的抖动, 偏离模型计算值, 说明声源在运动过程中不稳定. 经过以上分析, 剔除了瞬时频率的异常值, 再利用 MMSE, 即 (10) 式估计速度 (搜索速度的范围为 $[0.1, 0.1, 10]$ m/s), 结果如图 7(c) 所示, 红色五角星为估计的速度值 5.2 m/s, 绿色虚线为真实值 4.5 m/s, 两者相差 0.7 m/s, 误差达到 15.56%. 利用 Doppler-warping 变换的方法处理这段信号, 估计速度的结果如图 7(d) 所示, 红色五角星为估计的速度值 4.7 m/s, 与真实值相差 0.2 m/s, 误差仅为 4.44%, 速度估计的效果要好于 MMSE 方法.

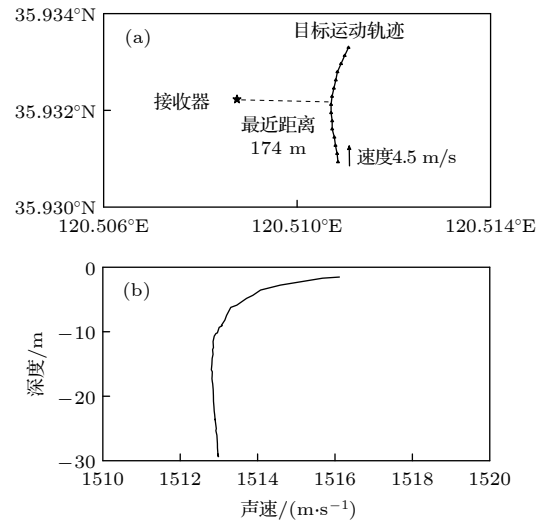


图6 (a) 目标船运动轨迹; (b) 水体声速剖面

Fig. 6. (a) Track of the target ship; (b) sound speed profile.

总结两种方法可以发现: MMSE 估计速度的方法首先利用时频分析手段得到瞬时频率的变化, 然后再和模型计算的频率值进行匹配, 如果当瞬时频率由于环境的变化导致在时间上不连续时, 则会出现许多偏离模型的点, 导致匹配效果变差. 而基于 Doppler-warping 变换的方法首先是通过时间重采样将信号相位线性化, 之后利用变换后的信号在频域的分布进行求解, 由 (6) 式和 (7) 式可知,

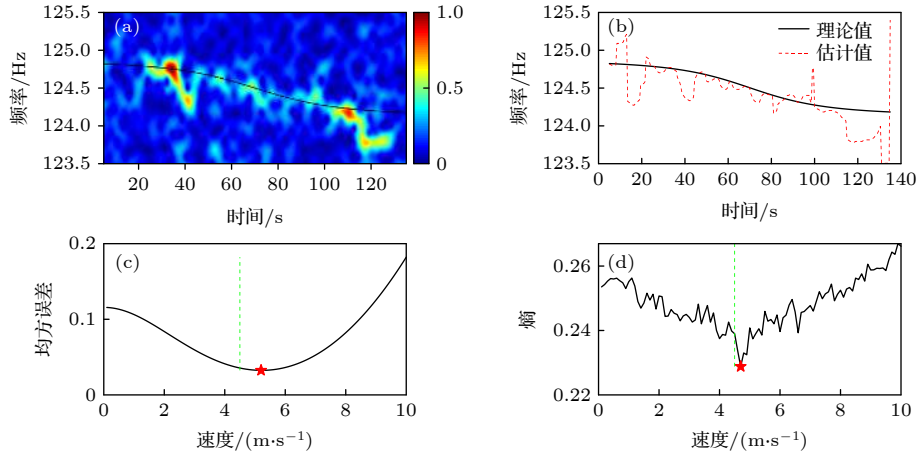


图 7 海试数据分析 (a) 时频图; (b) 瞬时频率理论值和估计值; (c) MMSE 计速度的结果; (d) Doppler-warping 变换估计速度的结果

Fig. 7. Analysis of the sea trial data: (a) Time-frequency distribution; (b) theoretical and estimated instantaneous frequency; (c) result of velocity estimation by MMSE; (d) result of velocity estimation by the Doppler-warping transform.

变换后的频谱函数在中心频率处会存在峰值, 本文利用频谱函数的熵来描述频谱函数分布的集中程度, 是对频谱函数分布的一种统计结果; 同时, 该方法是对整段信号进行傅里叶变换处理, 不关注短时间内的频率变化, 一定程度上抵消了随机噪声产生的影响. 因此, 在目标运动速度的估计中, Doppler-warping 变换的效果要好于 MMSE 估计速度的方法.

6 结 论

本文将声学多普勒问题和 warping 变换方法结合在一起, 推导了 Doppler-warping 变换算子 $h_D(t)$. 提出一种应用该变换进行目标运动参数的估计方法, 在目标运动的最近距离 r_0 和最近点到达时间 t_0 等参数已知时, 这种方法可以实现对目标速度 v 的估计.

在海试数据分析中, 以普通渔船的辐射噪声为运动声源, 由于信噪比较低, MMSE 估计速度的方法估计误差较大. 本文提出的 Doppler-warping 变换方法仍能够较为准确地估计速度, 抗噪声能力高于 MMSE 估计速度的方法.

本文验证了应用 Doppler-warping 变换进行运动目标速度估计的可行性, 实际上该变换方法还

可以应用到其他运动参数的估计问题, 下一步工作计划将本文的方法与水声信道中的宽带声场干涉条纹处理方法相结合, 实现目标最近距离、最近点到达时间等运动参数估计. 另外, 本文将 Doppler-warping 变换应用在声学线谱的测速问题, 该方法同样适用于雷达领域, 可以利用电磁波线谱信号测速.

附录 A Doppler-warping 算子的推导

在 (4) 式中, 多普勒信号的瞬时相位 $\phi(t)$ 中仅有 $\tau(t)$ 包含随时间 t 变化的部分, 因此, Doppler-warping 算子可以写为

$$h_D(t) = \tau^{-1}(t), \quad (A1)$$

显然, 只要求出 $\tau(t)$ 的反函数就可以得到 warping 算子. 由 (2) 式可得

$$t = \tau + \frac{\sqrt{v^2(\tau - t_0)^2 + r_0^2}}{c}, \quad (A2)$$

因此, Doppler-warping 算子 $h_D(t)$ 可以写为

$$h_D(t) = t + \frac{\sqrt{v^2(t - t_0)^2 + r_0^2}}{c}. \quad (A3)$$

用算子 $h_D(t)$ 代替时间 t , 则 (4) 式多普勒信号瞬时相位 $\phi(t)$ 变为

$$\phi_D(t) = 2\pi f_0 \frac{c^2 h_D(t) - v^2 t_0 - \sqrt{r_0^2(c^2 - v^2) + c^2 v^2 [h_D(t) - t_0]^2}}{c^2 - v^2} + \phi_0, \quad (A4)$$

等式右边第一项可以化为

$$\begin{aligned}
 & \frac{c^2 \left[t + \frac{\sqrt{v^2(t-t_0)^2 + r_0^2}}{c} \right] - v^2 t_0 - \sqrt{r_0^2(c^2 - v^2) + c^2 v^2 \left[t + \frac{\sqrt{v^2(t-t_0)^2 + r_0^2}}{c} - t_0 \right]^2}}{c^2 - v^2} \\
 &= \frac{2\pi f_0}{c^2 - v^2} \left\{ c^2 t + c \sqrt{v^2(t-t_0)^2 + r_0^2} - v^2 t_0 - \sqrt{r_0^2(c^2 - v^2) + v^2 \left[c(t-t_0) + \sqrt{v^2(t-t_0)^2 + r_0^2} \right]^2} \right\} \\
 &= \frac{2\pi f_0}{c^2 - v^2} \left\{ c^2 t + c \sqrt{v^2(t-t_0)^2 + r_0^2} - v^2 t_0 \right. \\
 &\quad \left. - \sqrt{r_0^2(c^2 - v^2) + c^2 v^2(t-t_0)^2 + 2c v^2(t-t_0) \sqrt{v^2(t-t_0)^2 + r_0^2} + v^4(t-t_0)^2 + r_0^2 v^2} \right\} \\
 &= \frac{2\pi f_0}{c^2 - v^2} \left\{ c^2 t + c \sqrt{v^2(t-t_0)^2 + r_0^2} - v^2 t_0 \right. \\
 &\quad \left. - \sqrt{v^4(t-t_0)^2 + 2c v^2(t-t_0) \sqrt{v^2(t-t_0)^2 + r_0^2} + c^2 \left[v^2(t-t_0)^2 + r_0^2 \right]} \right\} \\
 &= \frac{2\pi f_0}{c^2 - v^2} \left\{ c^2 t + c \sqrt{v^2(t-t_0)^2 + r_0^2} - v^2 t_0 - \sqrt{\left[v^2(t-t_0) + c \sqrt{v^2(t-t_0)^2 + r_0^2} \right]^2} \right\} \\
 &= \frac{2\pi f_0}{c^2 - v^2} \left\{ c^2 t + c \sqrt{v^2(t-t_0)^2 + r_0^2} - v^2 t_0 - \left[v^2(t-t_0) + c \sqrt{v^2(t-t_0)^2 + r_0^2} \right] \right\} \\
 &= \frac{2\pi f_0}{c^2 - v^2} (c^2 - v^2)t = 2\pi f_0 t, \tag{A5}
 \end{aligned}$$

所以 Doppler-warping 变换之后的瞬时相位 $\phi[h_D(t)]$ 为

$$\phi[h_D(t)] = 2\pi f_0 t + \phi_0. \tag{A6}$$

参考文献

- [1] Wang D Z, Shang E C 2013 *Underwater Acoustics* (Vol. 2) (Beijing: Science Press) pp345–347 (in Chinese) [汪德昭, 尚尔昌 2013 水声学(第二版) (北京: 科学出版社) 第345—347页]
- [2] Wu G Q, Li J, Chen Y M, Yuan Y 1999 *Acta Acustica* **24** 6 (in Chinese) [吴国清, 李靖, 陈耀明, 袁毅 1999 声学学报 **24** 6]
- [3] Yang D S, Wu Y 1996 *J. Harbin Engineering Univ.* **17** 38 (in Chinese) [杨德森, 吴一 1996 哈尔滨工程大学学报 **17** 38]
- [4] Ferguson B G, Quinn B G 1994 *J. Acoust. Soc. Am.* **96** 821
- [5] Reid D C, Zoubir A M, Boashash B 1997 *J. Acoust. Soc. Am.* **102** 207
- [6] Valiere J C, Poisson F, Depollier C, Simon L 1999 *IEEE Signal Process Lett.* **6** 113
- [7] Xu L J, Yang Y X, Yu S D 2015 *J. Acoust. Soc. Am.* **137** 320
- [8] Liang N N, Yang Y X, Guo X J 2019 *J. Acoust. Soc. Am.* **145** 34
- [9] Quinn B G 1998 *J. Acoust. Soc. Am.* **98** 2560
- [10] Zou H X, Zhou X B, Li Y D 2000 *J. Tsinghua Univ. (Sci. & Tech.)* **40** 55 (in Chinese) [邹红星, 周小波, 李衍达 2000 清华大学学报(自然科学版) **40** 55]
- [11] Wu G Q, Chen Y Q 2003 *Acta Acustica* **28** 130 (in Chinese) [吴国清, 陈永强 2003 声学学报 **28** 130]
- [12] Timlelt H, Remram Y, Belouchrani A 2017 *Digital Signal Processing* **63** 35
- [13] Liu K Y, Peng Z H, Zhang L S, Wang G X 2020 *Appl. Acoust.* **39** 236 (in Chinese) [刘凯悦, 彭朝晖, 张灵珊, 王光旭 2020 应用声学 **39** 236]
- [14] Baraniuk R G, Jones D L 1995 *IEEE Trans. Signal Process.* **43** 2269
- [15] Bonnel J, Thode A, Wright D, Chapman R 2020 *J. Acoust. Soc. Am.* **147** 1897
- [16] Le Touze G, Torras J, Nicolas B, Mars J 2008 *IEEE Oceans 2008 Quebec City, Canada, September 15–18, 2008* p1
- [17] Qi Y B, Zhou S H, Zhang R H, Zhang B, Ren Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 044303 (in Chinese) [戚聿波, 周士弘, 张仁和, 张波, 任云 2014 物理学报 **63** 044303]
- [18] Bonnel J, Dosso S, Chapman R 2013 *J. Acoust. Soc. Am.* **134** 120
- [19] Li F H, Zhang B, Guo Y G 2014 *Chin. Phys. Lett.* **31** 024301
- [20] Niu H Q, Zhang R H, Li Z L, Guo Y G, He L 2013 *Chin. Phys. Lett.* **30** 84301

Doppler-warping transform and its application to estimating acoustic target velocity^{*}

Gao De-Yang¹⁾ Gao Da-Zhi^{1)†} Chi Jing¹⁾ Wang Liang¹⁾ Song Wen-Hua²⁾

1) (*Department of Marine Technology, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*)

2) (*Department of Physics, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*)

(Received 7 October 2020; revised manuscript received 13 February 2021)

Abstract

When there appears the relative motion between the sound source and the receiver, the received tonal signal will produce Doppler shift, and the Doppler information is relevant to the motion parameters of the target. According to the acoustic Doppler shift frequency, we propose the Doppler-warping transformation. The phase linearization of the Doppler signal can be realized by using the transformation. Then, we deduce the warping operator and propose an algorithm for estimating the target motion parameters by using the proposed transformation. Firstly, the Doppler-warping operator under different motion parameters is constructed. Secondly, the time resampling of the received time-domain signal is performed by using the operator. Then, the spectral function of the transformed signal is calculated. Finally, the spectral function entropy is minimized to estimate the objective parameter. The simulation results show the effectiveness of the proposed method. For a low signal-to-noise ratio of sea trial data, where the real speed of a fishing boat is 4.5 m/s, the result from the traditional minimum mean square error (MMSE) velocity estimation method is 5.2 m/s, and the estimation error is 15.56%. The proposed Doppler-warping transform method can estimate the target velocity more accurately, specifically, it is 4.7 m/s and its corresponding estimation error is 4.44%.

Keywords: Doppler effect, warping transform, velocity estimation of moving target

PACS: 43.60.+d, 43.30.+m

DOI: 10.7498/aps.70.20201653

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11874331) and the Open Foundation of Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, China (Grant No. QNLM2016ORP0106).

[†] Corresponding author. E-mail: dzgao@ouc.edu.cn