

一种基于互相关字典的水下目标位姿估计方法

杨长生, 高斐宇, 卫艳, 姜紫洋

(西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710072)

摘要:对于水下主动探测, 目标与声呐系统的相对位姿关系对目标识别与跟踪非常重要。现有基于波形字典的水下目标位姿估计方法, 难以在低信噪比下精确估计目标位姿。鉴于互相关处理在目标回波检测中的抗噪性, 提出了一种基于互相关字典的方法, 通过构造互相关字典并结合正交匹配追踪 (OMP) 算法估计目标位姿。利用亮点模型生成不同水平位姿角的回波信号, 进而构造互相关字典并分析不同系统参数对字典相关性能的影响。水池实验表明, 基于互相关字典的目标位姿估计方法低信噪比 (小于 -12 dB) 时, 估计正确率优于波形字典; 通过增加带宽, 在少量阵元条件下仍可在低信噪比下实现准确估计。结合使用 HFM 信号, 基于互相关字典的水下目标位姿估计方法可用于运动弱目标的位姿估计。

关键词:目标位姿估计; 互相关字典; 回波亮点模型; 稀疏表示

中图分类号: TB566

文献标志码: A

文章编号: 1000-2758(2025)04-0677-08

水下目标位姿估计是水下主动探测的难点与热点, 它能够预判目标航行方向, 从而实现更精准的识别与跟踪。现有估计方法主要有基于深度学习的方法^[1]和由距离-方位联合字典^[2]衍生出的波形字典稀疏表达的方法。前类方法达到高分辨估计需要耗费较多算力来训练模型, 不利于实时实现; 后类方法分辨力较好, 但在低信噪比下估计性能会下降。

互相关运算是一种重要的信号处理工具, 广泛应用于含噪信号的检测和提取、目标跟踪和定位等方面。对回波信号与发射信号进行互相关处理, 不仅可以有效地抑制噪声的影响^[3-4], 还能对回波中有效信息进行提取^[4]。对于水下复杂目标, 当入射方位角改变时, 其回波的时序关系也会改变, 因此通过分析其时序关系得出目标各亮点距离分布可以实现对目标位姿的识别^[1]。

本文通过结合互相关和波形字典的优点, 构造出互相关字典, 提出了一种基于互相关字典的水下目标位姿估计方法, 对互相关字典进行相干性分析

预测字典性能, 使用 OMP 算法^[5]实现对目标位姿的估计。

1 互相关字典的构造

1.1 目标回波亮点模型

目标回波亮点模型是对目标声散射近似的一种手段^[6]。在高频情况下, 任何一个复杂目标的回波都可以等效成若干亮点散射回波的叠加^[7]。亮点模型可展现出目标的尺寸、位姿等信息, 不同入射方位角下的各亮点距离分布可作为目标位姿判断的依据。

根据亮点模型理论, 目标的传递函数可等效为各个亮点的传递函数的线性叠加, 如(1)式所示。

$$H(r, \omega) = \sum_{m=1}^N A_m(r, \omega) e^{j\omega\tau_m} e^{j\varphi_m} \quad (1)$$

式中: $A_m(r, \omega)$ 为目标第 m 个亮点的幅度反射因子; r 为声波入射方向矢量; τ_m 为目标第 m 个亮点与接收点间的时延; φ_m 是目标第 m 个亮点的相位因子。

本文研究的目标模型为缩简后的球头柱体模型和潜艇模型, 其结构示意图如图 1 所示。球头柱体模型由部分球体和圆柱体组成; 潜艇模型由半椭球

收稿日期: 2024-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(61771398)资助

作者简介: 杨长生(1978—), 副教授

通信作者: 高斐宇(2000—), 硕士研究生

e-mail: gx7man@mail.nwpu.edu.cn

体舰艏、水滴型柱体指挥台、圆柱体舰体、锥体舰艉和椭圆柱体舵组成。

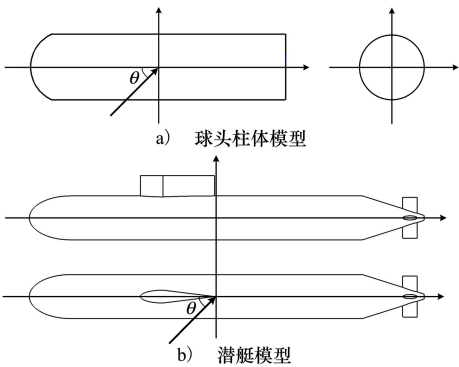


图 1 目标模型结构示意图

2 类模型关于其长轴对称,因此研究单侧的位姿(即声波入射方位角 θ 在 $0^\circ\sim180^\circ$)回波变化情况即可。选取各模型体中心作为目标亮点相对参考点,入射方位角步长取 1° ,对目标模型进行回波仿真。对于球头柱体模型,在入射角 $[0^\circ,90^\circ]$ 范围内为 1 个球头亮点、2 个棱角亮点,在 $(90^\circ,180^\circ]$ 范围内为 3 个棱角亮点。对于潜艇模型,指挥台亮点在所有入射角范围内一直存在,在入射角 $[0^\circ,90^\circ]$ 范围内有舰艉侧和舰艏侧棱角亮点、舰艉亮点,随着入射角的增大,舰艉亮点逐渐进入暗区,舰艏侧棱角亮点逐渐进入亮区;在 $(90^\circ,180^\circ]$ 范围内有舰艉侧和舰艏侧棱角亮点、舰艉亮点,随着入射角的增大,舰艏侧棱角亮点逐渐进入暗区,舰艉亮点逐渐进入亮区。所得 2 种模型在不同入射方位角下的亮点分布如图 2 所示。其中,在每个入射方位角下,亮光处的采样点数对应于目标亮点到声呐系统的距离。可以看出,亮点分布图反映了 2 个模型的结构区别,潜艇模型组成及结构更复杂,其亮点分布更多。

考虑到水声探测时往往存在相对运动,本文使

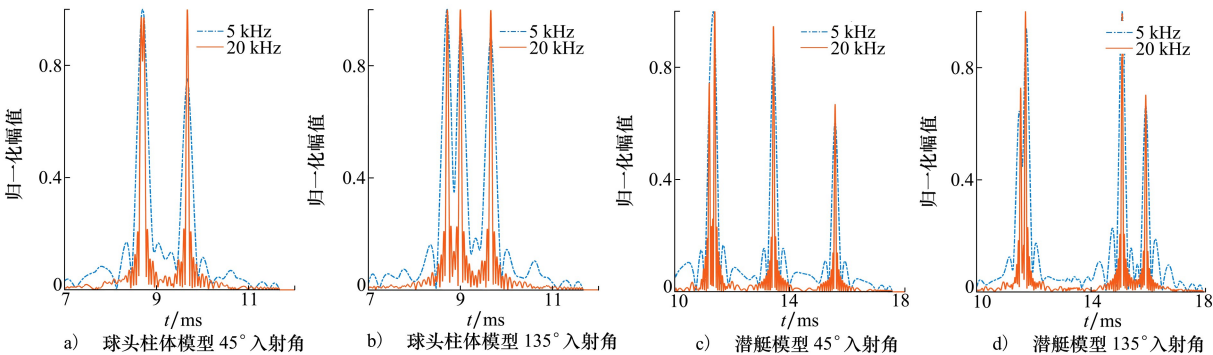


图 4 不同信号带宽下亮点回波互相关时序结构图

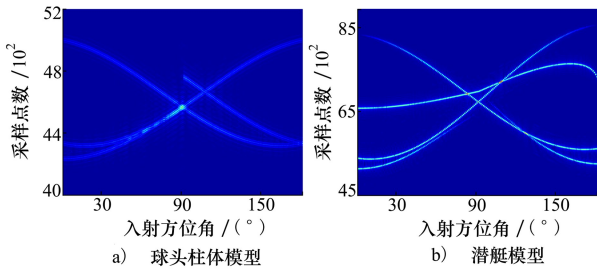


图 2 目标模型在不同入射方位角下各亮点分布

用双曲调频(HFM)信号^[8],并将常用的线性调频(LFM)信号作为对比。图 3 为 2 种信号的模糊函数,从图中可以看出,随着相对速度的增大,LFM 信号的模糊函数的脊线较 HFM 信号下降更为迅速,可知 HFM 信号的多普勒宽容性优于 LFM 信号,能够在更大速度范围内对目标进行估计。

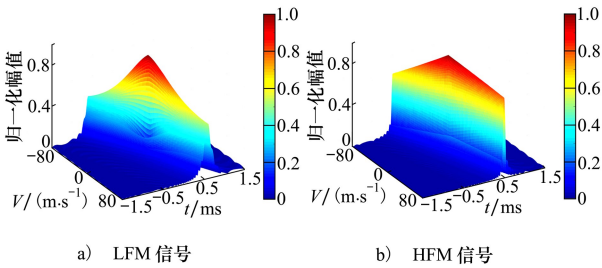


图 3 信号模糊函数示意图

水下主动探测中,声呐系统发射的信号记为 $x(t)$,接收的信号记为 $y(t)$, $x(t)$ 和 $y(t)$ 的互相关函数,如(2)式所示。

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T x(t)y(t+\tau)dt$$

(2)

对于这 2 类调频信号,其自相关函数主瓣宽度与信号的带宽呈负相关。图 4 为在入射方位角为 45° 和 135° 时 2 类目标在不同带宽发射信号下回波互相关结果。

当 2 个亮点之间的时延差小于信号自相关函数主瓣宽度,其相关峰出现合并的现象,即无法分辨的情况。在图 4c)~4d)中,信号带宽为 5 kHz 时,部分相关峰出现合并的现象。

1.2 互相关字典

设字典 Ψ 一个是 $M \times N$ 维的矩阵,其列向量 d_i 称为字典的原子,且原子 d_i 满足 $d_i \in \mathbf{R}, \|d_i\| = 1, i = 1, 2, \dots, N$ 。存在一个信号 $x = [x_1, x_2, \dots, x_N]$,其在字典 Ψ 下可表示为

$$x = \Psi\alpha \tag{3}$$

式中, α 是信号 x 在字典 Ψ 下的稀疏向量。根据稀疏向量的定义, α 中仅有 k 个元素为非零项,且 $k \ll$

$$\Psi = \begin{bmatrix} s_1^0(1) & s_1^0(2) & \cdots & s_1^0(L) & s_2^0(1) & s_2^0(2) & \cdots & s_2^0(L) & \cdots & s_p^0(1) & s_p^0(2) & \cdots & s_p^0(L) \\ s_1^1(1) & s_1^1(2) & \cdots & s_1^1(L) & s_2^1(1) & s_2^1(2) & \cdots & s_2^1(L) & \cdots & s_p^1(1) & s_p^1(2) & \cdots & s_p^1(L) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_1^{180}(1) & s_1^{180}(2) & \cdots & s_1^{180}(L) & s_2^{180}(1) & s_2^{180}(2) & \cdots & s_2^{180}(L) & \cdots & s_p^{180}(1) & s_p^{180}(2) & \cdots & s_p^{180}(L) \end{bmatrix}^T \tag{5}$$

式中, L 代表互相关运算后信号总点数。

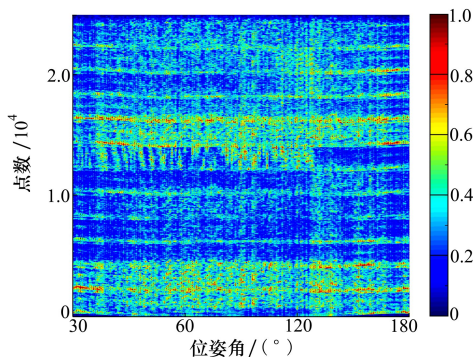


图 5 潜艇模型互相关字典

2 字典的相干特性分析

字典对于输入信号能否求解出稀疏解,不仅取决于输入信号本身的稀疏性质,还取决于字典中各原子间的相干特性^[9],良好的相干性会有更好的稀疏表达效果和更高的精度^[10]。字典的相干特性可用格拉姆矩阵 G 表示,即

M 。此时称信号 x 是可稀疏信号或者在字典 Ψ 下是 k -稀疏的。

当发射信号为 $x(m)$,声波入射方位角为 θ 时,第 p 个阵元接收到的目标回波信号记为 $y_p^\theta(m)$,则目标回波与发射信号互相关记为

$$s_p^\theta(n) = \sum_{m=0}^M [x(m)y_p^\theta(m+n)] \tag{4}$$

入射方位角在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围内取步长为 1° ,亮点回波信号按(4)式互相关运算并归一化处理,可构造出如(5)式所示的不同方位角回波的互相关字典 Ψ 。图 5 为潜艇模型的互相关字典。

$$G = |\Psi^H \times \Psi| = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \cdots & \mu_{1i} & \cdots & \mu_{1n} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \cdots & \mu_{2i} & \cdots & \mu_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \mu_{i1} & \mu_{i2} & \cdots & \mu_{ii} & \cdots & \mu_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & \cdots & \mu_{ni} & \cdots & \mu_{nn} \end{bmatrix} \tag{6}$$

式中

$$\mu_{ij} = |\langle d_i, d_j \rangle| \tag{7}$$

μ_{ij} 表示字典不同原子间内积的绝对值。在理想情况下,字典中任意 2 个不相同的原子都正交,即当 $i \neq j$ 时, $\mu_{ij} = 0$,当 $i = j$ 时, $\mu_{ij} = 1$,此时格拉姆矩阵 G 为单位矩阵(归一化字典),即字典格拉姆矩阵越接近单位矩阵时,字典的相干特性越好。

使用稀疏随机阵(单阵 6 阵元),球头柱体和潜艇 2 个模型不同方位角回波的互相关字典相干特性如图 6~7 所示。可以看出,互相关字典的相干特性主瓣窄且高于旁瓣,对角线元素的值都为 1,其他元素都小于 1。对比图 6a)~6b)、图 7a)~7b),可看出带宽 20 kHz 互相关字典相干特性较带宽为 5 kHz 的更接近单位矩阵,这是因为带宽 20 kHz 互相关字典中,各回波亮点的相关峰更窄,能够更精确地描述不同姿态下亮点的差异;对比图 6a)和图 7a)、图

6b) 和图 7b), 可看出在相同信号带宽下, 因为潜艇模型的回波亮点信息更为丰富, 使得不同姿态之间

的回波差异更为明显, 其互相关字典比球头柱体模型的相干性更好。

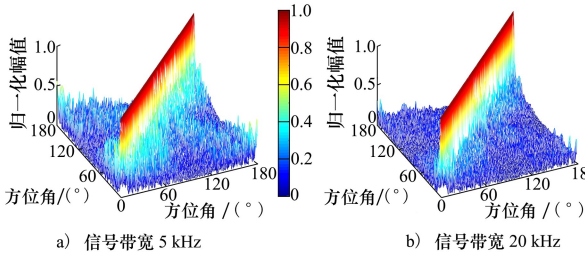


图 6 球头柱体模型互相关字典的相干特性

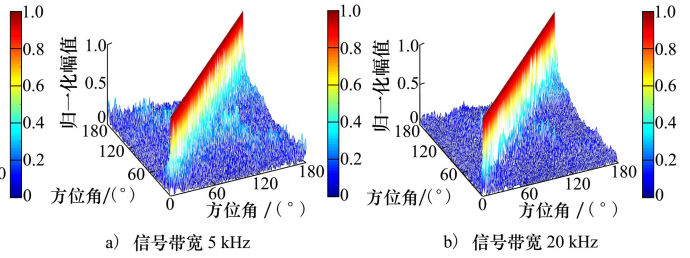


图 7 潜艇模型互相关字典的相干特性

改变阵元个数, 考察阵元个数对字典相干性产生的影响。球头柱体、潜艇模型在 4 阵元、8 阵元、12 阵元下不同方位角回波的互相关字典相干特性的侧视图如图 8 所示。

可以看出, 随着阵元数的减少, 字典中所包含目标信息会减少, 各位姿不同方位角之间的差异会变小, 使得字典的相干特性会逐渐降低 (4 阵元与 8 阵元间曲线的差异较 8 阵元与 12 阵元间明显)。

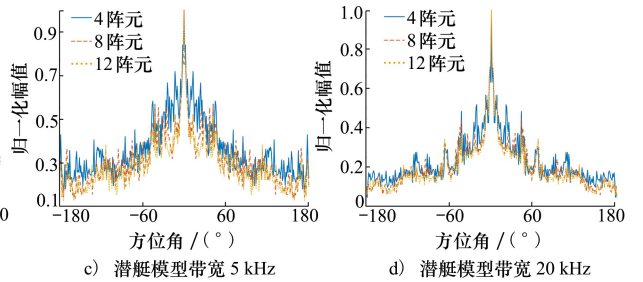
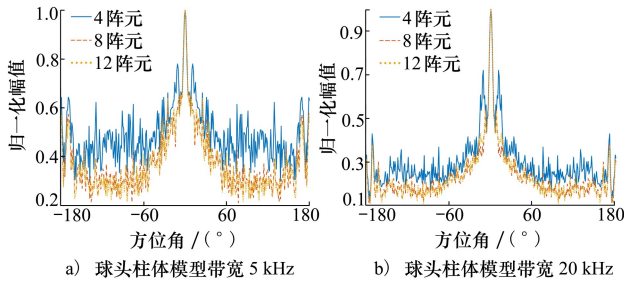


图 8 不同阵元数字典的相干特性

3 目标位姿估计方法

对于目标的位姿估计, 即对 (3) 式中稀疏向量 α 的求解, 利用字典 Ψ 对输入的信号进行稀疏重构。重构过程就是对于以下 0-范数最小化问题的求解。

$$\min \|\alpha\|_0 \text{ subject to } x = \Psi\alpha, \alpha \geq 0 \quad (8)$$

式中, $\|\alpha\|_0$ 表示 α 中非零元素的个数。

0-范数最小化问题的求解, 目前常用贪婪算法等方法来解决, 其中 OMP 算法基于 MP 算法, 通过递归对已选原子集合进行正交化, 以确保每次迭代选择的原子最优, 将收敛速度提高了约 20 倍, 其算法流程如下所示。

输入: 观测矩阵 (字典) Ψ , 测量向量 (回波信号) y , 稀疏度 k_0

输出: 稀疏向量 α

1) 初始化: 残差 $r_0 = y$, 支撑集 $\Gamma = \emptyset$, 迭代次数 $k = 1$;

2) 找出残差 r_{k-1} 与观测矩阵中的原子 θ_j 内积最大值所对应的索引 λ_k :

$$\lambda_k = \underset{j \notin \Gamma_{k-1}}{\operatorname{argmax}} |\langle \theta_j, r_{k-1} \rangle|$$

3) 更新支撑集 Γ_k , 将 λ_k 计入支撑集:

$$\Gamma_k = \Gamma_{k-1} \cup \{\lambda_k\}$$

4) 运用最小二乘法计算稀疏向量 α_k :

$$\alpha_k(i \in \Gamma_k) = \underset{\alpha}{\operatorname{argmin}} \|\Psi_{\Gamma_k} x - y\|_2, \alpha_k(i \notin \Gamma_k) = 0$$

5) 更新残差 r_k :

$$r_k = y - \Psi\alpha_k$$

6) 判断是否满足迭代停止条件:

$$k > k_0$$

若不满足停止条件, $k = k + 1$, 返回第 2) 步; 否则停止迭代, 输出稀疏向量 α_k 。

选用合适的 k_0 ($k_0 = 1, 2, \dots, 180$) 作为 OMP 算法中稀疏度的输入; 所求解出的稀疏向量 α , 即为输入信号的稀疏表达。对于单个位姿信号的输入, 认为其最大值所对应元素的索引即为估计出的目标位姿角。

基于互相关字典的目标位姿识别方法结合了互相关处理与波形字典的优点。通过对目标各位姿下的信号与发射信号进行互相关处理,提取目标的时序特征并据此构造互相关字典。同时,针对含噪回波信号,互相关处理能够有效增强目标信号的表达,有助于更准确地估计目标信息。相比波形字典,互相关字典在抗噪性和位姿估计正确率方面表现更优。方法整体流程图如图 9 所示。

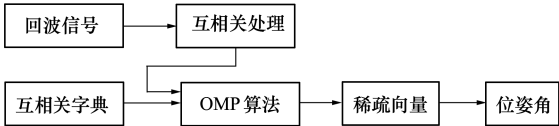


图 9 目标位姿估计算法框图

结合亮点模型,在信噪比为 -7 dB 下对位姿角为 45° 的潜艇目标进行位姿估计,所得输出稀疏向量如图 10 所示。

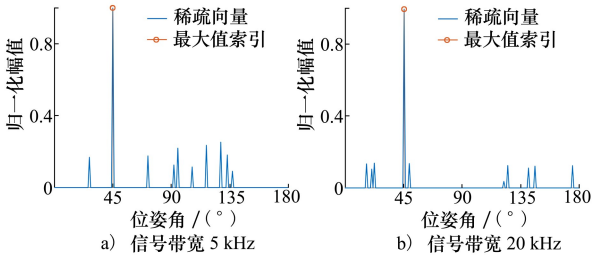


图 10 潜艇模型稀疏表达结果

图 10 为基于潜艇目标亮点模型构造的回波信号所生成的互相关字典对目标进行位姿估计的结果。针对不同带宽信号和 2 类目标,输入相对应姿态角为 45° 的含噪信号后,所求得稀疏向量均在 45° 处达到最大值。这表明,基于互相关字典的方法在上述条件下能够有效实现目标位姿估计。

4 实验分析

通过设计水池实验,验证基于互相关字典的目标位姿识别,实验示意图如图 11 所示。实验环境为消声水池(消声频率范围为 $(2\sim 80)\text{ kHz}$)。声呐系统距目标中心距离选择限制为:当距离过近时,不满足远场条件,当距离较远时,目标回波能量较弱,信噪比较差。因此,选择声呐系统距目标中心距离为 5 m 。

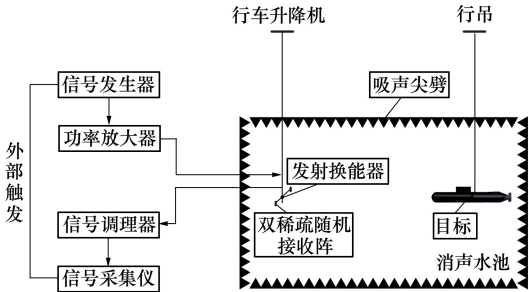


图 11 水池实验示意图

所使用的 2 种目标模型如图 12 所示。目标舰艏正对双稀疏随机阵为起始 0° ,以 1° 为步长绕目标纵轴顺时针旋转目标模型,采集不同旋转角下双稀疏随机阵接收的目标回波信号,构建互相关字典。

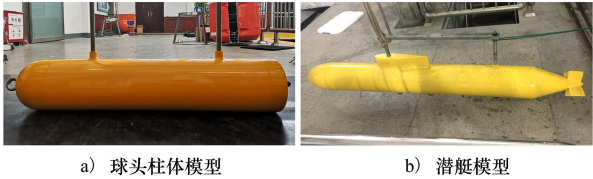


图 12 目标模型示意图

4.1 位姿估计实验

为验证互相关字典能否实现对目标位姿的估计,取信噪比 -7 dB ,入射方位角范围 $0^\circ\sim 180^\circ$ (步长为 1°),开展 20 次蒙特卡洛实验,进行位姿估计遍历,估计均值与方差如图 13 所示。

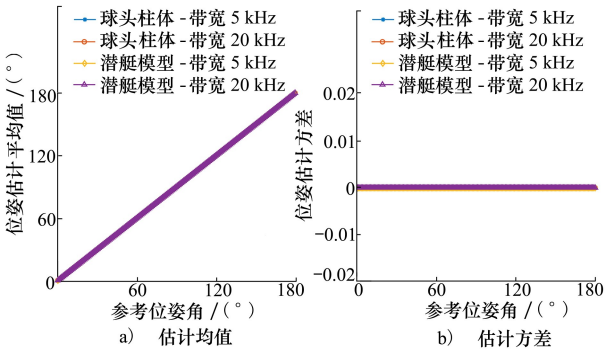


图 13 估计位姿均值与方差

从图 13 可以看出,在每个方位角下 4 种字典目标估计均值与真值相同。因此,对目标位姿的遍历实验估计验证了基于互相关字典能够实现对目标以变化步长为 1° 的位姿估计,同时验证了字典相干特性逼近单位矩阵的优越性。

4.2 抗噪性实验

为验证本位姿估计方法的抗噪性,在 $[0^\circ, 180^\circ]$ 位姿角范围内随机生成一个角度的位姿角回波信号,并记录该字典角作为姿态角真值。取信噪比为 $-24 \sim -8$ dB(步长 1 dB),分别利用互相关字典与波形字典对上述回波信号进行估计,每个信噪比蒙特卡洛实验次数为 200。若估计结果等于姿态角真值,则累计 1 次正确估计,总正确识别次数与总实验次数比值记为估计正确率,结果如图 14 所示。

从图 14 可以看出,对于 2 类目标,与波形字典相比,在 -12 dB 下的信噪比,互相关字典对于目标位姿估计具有更好的抗噪性。对于不同目标,带宽 20 kHz 的发射信号互相关字典的估计正确率优于带宽为 5 kHz 的发射信号。这是因为带宽为 5 kHz 的发射信号在互相关中,部分相关峰主瓣会出现合并导致回波时序特征缺失的现象;对于相同带宽的发射信号,潜艇目标的互相关字典的估计正确率优于球头柱体目标,这是因为潜艇目标较球头柱体目标有更多亮点信息,互相关字典和回波中含有更丰富的时序特征。同时,上述实验结论均与字典相干特性中得出的结论相符。

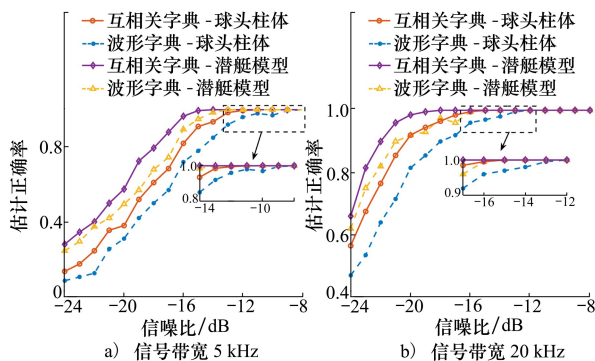


图 14 位姿估计正确率

4.3 阵元数量影响实验

为验证阵元数量对互相关字典的影响,改变阵元个数,信噪比为 $-24 \sim -8$ dB 的条件下(步长 1 dB),重复 4.2 节实验流程,估计随机位姿角,结果如图 15~16 所示。

图 15~16 说明,随着阵元数减少,估计正确率均会下降,这是因为阵元数的减少,导致目标空间采样信息减少。同时,在相同阵元数目下,互相关字典的估计准确率均优于波形字典,说明算法在不同阵元下的适用性。在少量阵元(4 阵元,两侧各 2 阵元)条件下,通过增加信号带宽,仍可获得低信噪比下的准确估计。

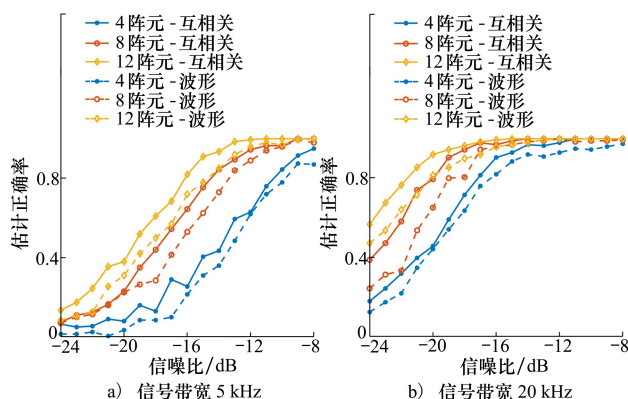


图 15 球头柱体模型在不同阵元数目下的估计正确率

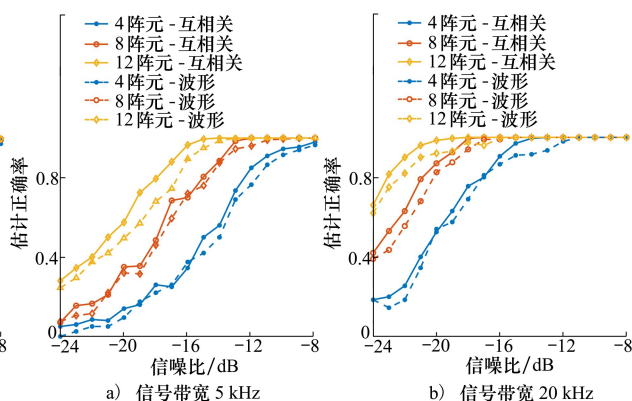


图 16 潜艇模型在不同阵元数目下的估计正确率

4.4 多普勒宽容性实验

为验证所选用 HFM 信号多普勒宽容性,信噪比为 -6 dB 的条件下,重复 4.2 节实验流程,随机位姿估计正确率如图 17 所示。

图 17 中, HFM 信号优于常规所用的 LFM 信号,在相对速度为 $-6 \sim 6$ m/s 范围内,以 HFM 信号为发射信号的互相关字典均能达到 95% 以上的位姿估计正确率。

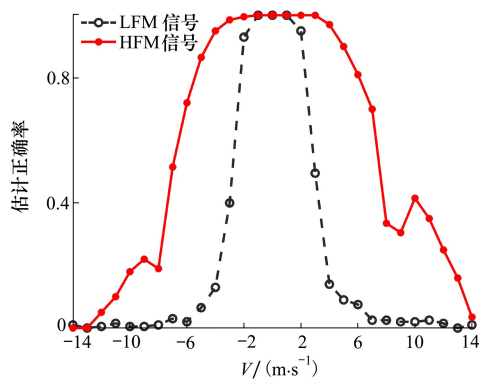


图 17 不同相对速度下的位姿估计正确率

5 结 论

本文结合字典和互相关的特点,提出了基于互相关字典的水下目标位姿估计方法。结合目标回波亮点模型,利用互相关分析出回波信号的时序结构,构造互相关字典并预判其相关性能。随后利用水池实验数据,验证了本文方法在低信噪比下对目标具有优异的位姿角估计能力,分析了阵元数量对互相关字典性能的影响,并验证了 HFM 信号的多普勒宽容性。结果表明,结合使用 HFM 信号,基于互相关字典的水下目标位姿估计方法可用于运动弱目标的位姿估计。

参考文献:

- [1] 李秀坤, 徐天杨, 嵇守聪. 基于深度学习的水下目标姿态识别[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(10): 1503-1509
LI Xiukun, XU Tianyang, JI Shoucong. Pose recognition of underwater target based on deep learning[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2021, 42(10): 1503-1509 (in Chinese)
- [2] 杨长生, 李杭波, 胡丽萍, 等. 一种基于距离-方位字典的仿生目标定位方法[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(3): 471-476
YANG Changsheng, LI Hangbo, HU Liping, et al. Bionic target localization method based on rangeazimuth joint dictionary[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(3): 471-476 (in Chinese)
- [3] 张勇强, 伍岳, 张启. 基于回波互相关的拖引干扰抑制方法[J]. 兵工自动化, 2014, 33(3): 40-42
ZHANG Yongqiang, WU Yue, ZHANG Qi. Approach of gate pull-off jamming suppression based on ECC[J]. Ordnance Industry Automation, 2014, 33(3): 40-42 (in Chinese)
- [4] 王俊刚, 杨号. 基于互相关的正弦信号特征提取方法[J]. 海军航空工程学院学报, 2009, 24(3): 277-279
WANG Jungang, YANG Hao. Feature extraction method base on cross correlation signal[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2009, 24(3): 277-279 (in Chinese)
- [5] PATI Y C, REZAIIHAR R, KRISHNAPRASAD P S. Orthogonal matching pursuit: recursive function approximation with applications to wavelet decomposition[C] // Proceedings of 27th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 1993: 40-44
- [6] 汤渭霖, 范军, 马忠成. 水中目标声散射[M]. 北京: 科学出版社, 2018
TANG Weilin, FAN Jun, MA Zhongcheng. Acoustic scattering of underwater targets[M]. Beijing: Science Press, 2018 (in Chinese)
- [7] 汤渭霖. 声呐目标回波的亮点模型[J]. 声学学报, 1994, 19(2): 92-100
TANG Weilin. Highlight model of echoes from sonar targets[J]. Acta Acustica, 1994, 19(2): 92-100 (in Chinese)
- [8] 张雅琦. 基于 HFM 信号的水声扩频通信研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020
ZHANG Yaqi. Study on underwater acoustic spread spectrum communication based on HFM signal[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020 (in Chinese)
- [9] 练秋生, 石保顺, 陈书贞. 字典学习模型、算法及其应用研究进展[J]. 自动化学报, 2015, 41(2): 240-260
LIAN Qiusheng, SHI Baoshun, CHEN Shuzhen. Research advances on dictionary learning models, algorithms and applications [J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(2): 240-260 (in Chinese)
- [10] TROPP J A. Greed is good: algorithmic results for sparse approximation[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2004, 50(10): 2231-2242

An underwater target position estimation method based on the cross-correlation dictionary

YANG Changsheng, GAO Feiyu, WEI Yan, LOU Ziyang

(School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: For underwater active detection, the relative position relationship between a target and a sonar system is very important for identifying and tracking the target. It is difficult for the existing underwater target position estimation method based on the waveform dictionary to accurately estimate the target position under at low signal-to-noise ratios. Because the cross-correlation processing has noise immunity in target echo detection, this paper proposes a target position estimation method based on the cross-correlation dictionary. It constructs a cross-correlation dictionary and combines it with the orthogonal matching pursuit (OMP) algorithm. To construct the cross-correlation dictionary, the echo highlight model is used to generate echo signals with different horizontal position angles. The effects of different system parameters on the correlation performance of the dictionary are analysed. Pool experimental results show that the target position estimation method based on the cross-correlation dictionary outperforms the waveform dictionary at low signal-to-noise ratios (less than -12 dB) and can still carry out the accurate estimation at low signal-to-noise ratios with a small number of array elements by increasing the bandwidth. Jointly used with HFM signals, the underwater target position estimation method based on the cross-correlation dictionary can be used to estimate the position of a slow target.

Keywords: target position recognition; cross-correlation dictionary; echo highlight model; sparse representation

引用格式: 杨长生, 高斐宇, 卫艳, 等. 一种基于互相关字典的水下目标位姿估计方法[J]. 西北工业大学学报, 2025, 43(4): 677-684

YANG Changsheng, GAO Feiyu, WEI Yan, et al. An underwater target position estimation method based on the cross-correlation dictionary[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2025, 43(4): 677-684 (in Chinese)