

# 主动声纳动目标空一时三维联合估计

龚美生

(第七一五研究所,浙江 杭州 310023)

**摘要:**文章发展空一时三维联合估计,将空-时接收数据形成为方位-时延-多普勒三维数据搜索空间,搜寻峰值点来获得目标方位-时延-多普勒估计。此外,将发射信号从窄带发展为宽带,相应的多普勒频移发展为多普勒伸缩,来提高时延和多普勒分辨率。仿真数据验证了三维联合估计的有效性,可以分辨出多个目标,也验证了宽带信号提高了分辨率。

**关键词:**方位-时延-多普勒;三维搜索空间;宽带分辨率;模糊度函数

**中图分类号:** TN927.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-9759(2022)04-0012-03

## 0 引言

主动声纳是水下目标探测的重要工具,其感兴趣的目标参量是(水平)方位、距离和径向速度等。目标参数估计的常规方法是利用波束形成来估计方位;利用时延-多普勒滤波来估计距离-径向速度<sup>[1]</sup>。

实际海洋十分复杂,目标探测面临着两个“一千倍”问题:可能存在的疑似目标是真实目标的一千倍,干扰的强度也是目标强度的一千倍,主动声纳需要在强干扰、多虚假目标的环境中分辨出真实目标。本文基于“增维”的思想<sup>[2-3]</sup>,发展空一时三维联合估计,形成方位-时延-多普勒三维数据搜索空间,将目标与干扰划分到多维的分辨单元中<sup>[4]</sup>,搜索三维数据的峰值位置,来实现多目标的分辨,并获得方位-时延-多普勒估计。

模糊度函数是时延-多普勒滤波的基本工具,它的时延维主瓣宽度衡量了时延分辨率,多普勒维主瓣宽度衡量了多普勒分辨率。窄带信号的多普勒效应应用多普勒频移表示,而宽带信号的多普勒效应需要利用多普勒伸缩表示<sup>[5-6]</sup>。

## 1 回波信号建模

假设自由场中存在声源和点目标,声源与目标距离为  $R$ ,两者的径向相对速度为  $v$ ,声源无指向性地发射脉冲信号  $s(t)$ ,目标反射形成回波,则声源处接收的信号可以表示为:

$$y(t) = e(t) + n(t) = \rho \cdot \sqrt{\beta} s(\beta(t - \tau)) + n(t) \quad (1)$$

$e(t) = \rho \cdot \sqrt{\beta} s(\beta(t - \tau))$  表示目标的回波信号,  $n(t)$  表示噪声。

幅值变化  $\rho$  反映了目标的反射系数与传播损失。时延  $\tau$  反映了声信号的传播路程,与目标距离  $R$ ,声速  $c$  的关系为:

$$\tau = \frac{2R}{c} \quad (2)$$

$\beta$  称之为多普勒伸缩,用来表示多普勒效应引起的回波波形的伸缩,与径向速度  $v$ 、声速  $c$  的关系为:

$$\beta = 1 + \frac{2v}{c} \quad (3)$$

当  $s(t)$  为窄带信号时,多普勒伸缩可以近似为多普勒频移,此时回波信号近似表示为:

$$e(t) = \rho s(t - \tau) e^{j2\pi\beta t} \quad (4)$$

$\beta$  在此处表示多普勒频移,

$$\beta = \frac{2v}{c} f_0 \quad (5)$$

因此,根据发射信号是否为窄带信号,将接收信号建模为两种形式:

$$y(t) = \rho \cdot s(t - \tau) e^{j2\pi\beta t} + n(t) \quad \text{窄带模型,}$$

$$y(t) = \rho \cdot \sqrt{\beta} s(\beta(t - \tau)) + n(t) \quad \text{宽带模型。}$$

## 2 模糊度函数

模糊度函数是发射波形设计与时延-多普勒滤波的基本工具,它将一个能量有限的脉冲或波形映射到一个两变量复值能量有限的函数集合,窄带模糊度函数定义为:

$$\chi_{ss}(\tau, \beta) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) s^*(t - \tau) e^{-j2\pi\beta t} dt \quad (6)$$

PCW 模糊度函数的时延维的-3dB 主瓣宽度为,多普勒维为。由于 PCW 的时-带宽积等于 1,若增加信号时长,则多普勒分辨率提高,而时延分辨率降低;若降低信号时长,则时延分辨率提高,而多普勒分辨率降低。这体现了不确定性原理——二维分辨率,一维高,则另一维低。

理想的发射信号能在时延维和多普勒维同时获得较高的分辨率,一个途径是采用宽带信号。宽带信号能够独立的调节信号时长和带宽,进而可以独立地改变时延分辨率和多普勒分辨率。而发射信号为宽带信号时,应当利用多普勒伸缩来表示多普勒效应,相应的宽带模糊度函数定义为:

$$\chi_{ss}(\tau, \beta) = \sqrt{\beta} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) s^*(\beta(t - \tau)) dt \quad (7)$$

时延-多普勒滤波对接收信号  $y(t)$  与发射信号  $s(t)$  求互

收稿日期:2022-02-15

作者简介:龚美生(1996-),男,浙江金华人,硕士研究生,研究方向:水声信号处理。

遗传算法的寻优性能,从而有效提高其全局搜索能力和收敛速度。本文基于多式海陆联运方式与路径规划问题,基于免疫遗传算法设计了智能化规划平台,并依靠平台寻优得到了较为理想的多式海陆联运方式与路径规划方案。由仿真结果可知,本文所提算法有着较佳的寻优性能。

## 参考文献:

[1] 康凯,牛海蛟,朱越杰,张维存.多式联运中运输方式与运输路径集成优化模型研究[J]. 计算机应用研究,2010,27(05): 1672-1675.

- [2] 万杰,龙云飞,陈星瀚.基于改进烟花算法的中俄商品多式联运路径优化 [J]. 天津大学学报 (自然科学与工程技术版), 2022,55(03):291-298.
- [3] Bo Yang. Dynamic risk identification safety model based on fuzzy support vector machine and immune optimization algorithm [J]. Safety Science,2019,118:205-211.
- [4] 陈勇,郑瀚,沈奇翔,刘焕淋.基于改进免疫粒子群优化算法的室内可见光通信三维定位方法 [J]. 电子与信息学报,2021,43(01):101-107.

模糊度函数,将时间信号变换为时延-多普勒数据  $\chi(\tau, \beta)$ 。

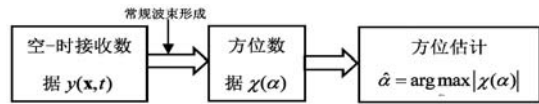
$$\chi(\tau, \beta) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t) s^*(t - \tau) e^{-j/2 \pi \beta t} dt$$

$$\chi(\tau, \beta) = \sqrt{\beta} \int_{-\infty}^{\infty} y(t) s^*(\beta(t - \tau)) dt \quad (8)$$

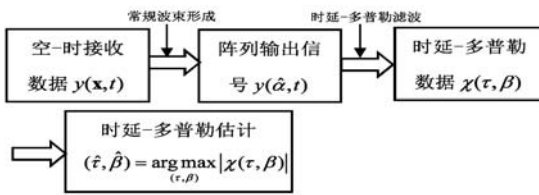
### 3 接收信号处理流程

常规接收数据处理流程是,先进行常规波束形成,估计出目标的方位角,然后驾驶到目标角度上,获得阵列输出信号,利用阵列输出信号进行时延-多普勒滤波,估计目标的时延-多普勒。

常规处理流程如图 1 所示。



(a) 目标方位估计



(b) 目标时延-多普勒估计

图 1 接收数据常规处理流程图

空-时三维联合处理的方法是进行波束扫描,获得不同驾驶角度的阵列输出信号,再进一步获得对应角度的时延-多普勒数据,形成一个三维数据搜索空间。对比不同角度的时延-多普勒数据峰值,当驾驶角度对准目标方位时,时延-多普勒数据截面的峰值最大,相应的峰值位置便是目标的方位-时延-多普勒估计。三维解卷滤波流程图如图 2 所示。

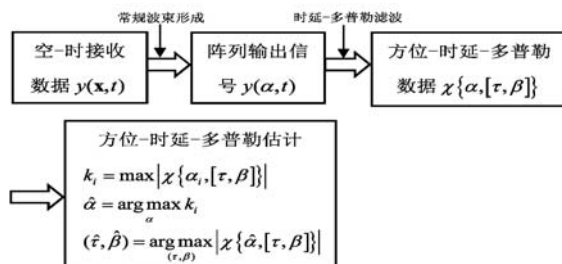


图 2 接收数据三维联合处理流程图

### 4 仿真数据分析

#### 4.1 PCW 接收数据常规处理结果

方位分辨力约为  $1.8^\circ$ , 时延分辨力为  $0.6\text{s}$ , 多普勒频移分辨力为  $0.86\text{Hz}$ , 相应的距离分辨力为  $450\text{m}$ , 径向速度分辨力为  $0.43\text{m/s}$ 。

先对接收数据进行常规波束形成,结果如图 3 所示:

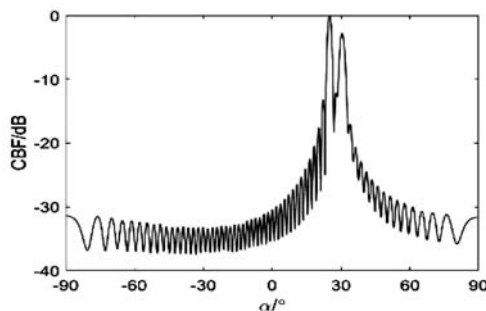
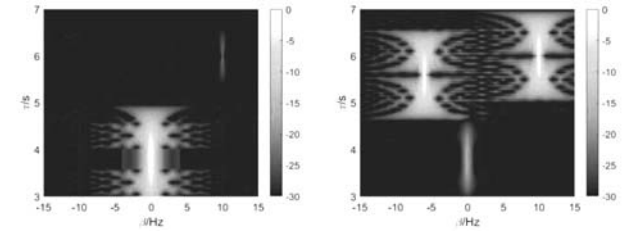


图 3 PCW 常规波束形成结果

可以发现在  $25^\circ$  和  $30.5^\circ$  方向上存在目标,然后将观测角驾驶到这两个角度上,进行时延-多普勒滤波,结果如图 4 所示:



$\alpha=25^\circ$

$\alpha=30.5^\circ$

图 4 PCW 时延-多普勒滤波结果

$25^\circ$  方向上发现出一个目标,  $30.5^\circ$  方向上发现两个目标,利用时延和距离的关系,多普勒与径向速度的关系,获得三个目标的方位-距离-径向速度估计结果,如表 1 所示:

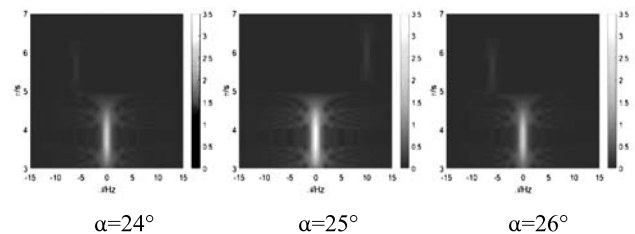
表 1 方位-距离-径向速度估计结果表

目标	方位估计 ( $\hat{\alpha} / ^\circ$ )	距离估计 ( $\hat{R} / \text{m}$ )	径向速度估计 ( $\hat{v} / \text{m/s}$ )
1	30.5	4.5	5
2	30.5	4.2	-3
3	25	2.8	0

对 PCW 接收数据进行常规处理,定位出了三个目标。由于目标 1 与目标 2 的方位差小于方位分辨力,因此不能通过常规波束形成将两个目标的方位角区分出来,方位估计的结果均为  $30.5^\circ$ ,而时延-多普勒的估计结果与实际相符;  $25^\circ$  方向存在两个目标,由于目标 3 和目标 4 的时延差小于 PCW 的时延维分辨力,所以无法通过时延-多普勒滤波分辨出目标 3 和 4。接下来对 PCW 接收数据进行空-时三维联合处理。

#### 4.2 PCW 接收数据三维解卷滤波

依照三维联合处理的流程,进行波束扫描,获得不同驾驶角度下的时延-多普勒数据,观察时延-多普勒数据峰值的变化,当扫描到  $25^\circ$  方向时,出现了一次峰值最大的情况,下面是驾驶角度分别为  $24^\circ$ 、 $25^\circ$ 、 $26^\circ$  的时延-多普勒数据截面,



$\alpha=24^\circ$

$\alpha=25^\circ$

$\alpha=26^\circ$

图 5 PCW 时延-多普勒数据截面图

可以判断在  $25^\circ$  方向上存在目标。

接下来继续进行波束扫描,当扫描到  $30^\circ$  方向和  $31^\circ$  方向时,都出现了峰值最大的情况,根据波束扫描结果,可以搜索出三个目标,目标参数估计结果如表 2 所示:

表 2 扫描结果目标参数表

目标	方位估计 ( $\hat{\alpha} / ^\circ$ )	距离估计 ( $\hat{R} / \text{m}$ )	径向速度估计 ( $\hat{v} / \text{m/s}$ )
1	31	4.5	5
2	30	4.2	-3
3	25	2.8	0

PCW 三维联合处理成功地将目标 1 和目标 2 定位出来,但是目标 3 和目标 4 依旧无法分辨出。接下来利用 LFM 接收数据进行三维联合处理。

(下转第 19 页)

图 9(b)中可以看到, 玻尔兹曼探索策略在前 400 次试验中, 折扣累计奖励值趋近于-49, 收敛速度较慢; 而探索率递减变化的策略收敛速度比另外三种策略快, 且收敛后更加稳定, 收敛时间比固定探索率的贪心策略缩短了 38.4%, 平均路径长度比玻尔兹曼动作选择策略缩短了 7%。

#### 4 结语

本文针对兵棋推演中存在危险区域的路径规划问题, 提出了一种特殊的奖励函数设置方法, 该方法可以有效引导强化学习算法在兵棋推演中进行路径规划。在此基础上, 设计了一种控制探索率递减变化的动作选择策略, 该策略控制探索率从 0.7 到 0.05 线性变化, 在保证快速收敛的前提下, 可以充分探索环境, 得到最优路径。在 Q-learning 算法的框架下分别测试了探索率固定的 $\epsilon$ -greedy动作选择策略、探索率递减变化的 $\epsilon$ -greedy动作选择策略、玻尔兹曼探索策略、轮盘赌动作选择策略在不同实验环境下的路径规划能力。实验表明, 在保证收敛速度较快的情况下, 探索率递减变化的 $\epsilon$ -greedy动作选择策略收敛后更稳定, 规划出的路径受到打击的概率更小, 较好的解决了本文所提出的兵棋推演路径规划问题。但本文所提方法在面对较大的环境时, 存在 Q-table 维度过大的情况。而且在需要维持较长路径链路的问题上表现不佳。在后续的改善中, 可以进一步地考虑缩减算法规划出最优路径的时间, 以满足动态路径规划下的实时性要求。

#### 参考文献:

- [1] 闫皎洁, 张锬石, 胡希平. 基于强化学习的路径规划技术综述[J]. 计算机工程, 2021, 47(10): 16-25.

- [2] 曹占广, 陶帅, 胡晓峰, 等. 国外兵棋推演及系统研究进展[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(09): 2059-2065.
- [3] 张韬, 项祺, 郑婉文, 等. 基于改进 A-Star 算法的路径规划在海战兵棋推演中的应用[J/OL]. 兵工学报, 2021, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.TJ.20211008.1542.002.html>.
- [4] 周彬, 郭艳, 李宁, 等. 基于导向强化 Q 学习的无人机路径规划[J]. 航空学报, 2021, 42(09): 506-513.
- [5] 张真诚. 机器人路径规划的改进粒子群-蚁群算法[J]. 电子测量技术, 2021, 44(08): 65-69.
- [6] 王娟, 吴宪祥, 郭宝龙. 基于改进粒子群优化算法的机器人路径规划[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(15): 240-244.
- [7] 蚁群优化算法及其应用研究\_张频捷[D]. 中南大学, 2010.
- [8] 刘奇, 宋凯, 张世平, 等. 基于目标向量的非全向测距机器人路径规划[J]. 电子测量技术, 2012, 35(05): 73-77.
- [9] 徐佳乐, 张海东, 赵东海, 等. 基于卷积神经网络的陆战兵棋战术机动策略学习[J]. 系统仿真学报, 2021: 1-12.
- [10] Cho H, Park H, Kim C, et al. Investigation of the Effect of "Fog of War" in the Prediction of StarCraft Strategy Using Machine Learning [J]. Computers in Entertainment (CIE). 2016, 14(1).
- [11] 臧兆祥, 李昭, 王俊英, 等. 基于平均奖赏强化学习算法的零阶分类元系统[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(21): 14-20.
- [12] Sutton R S. Learning to Predict by the Methods of Temporal Differences[J]. Machine Learning. 1988, 3(1).

(上接第 13 页)

#### 4.3 LFM 接收数据三维解卷滤波

时延分辨力为 0.002s, 多普勒伸缩分辨力为 0.0016, 相应的距离分辨力为 1.5m, 速度分辨力为 1.2m/s。与 PCW 相比, LFM 的时延(距离)分辨力明显地提高了。进行波束扫描, 当扫描到 25°时, 通过时延-多普勒数据可以发现两个目标, 如图 6 所示。

当扫描到 31°方向时, 出现了峰值最大的情况, 下面是驾驶角度分别为 30°、31°、32°的时延-多普勒数据截面局部图。

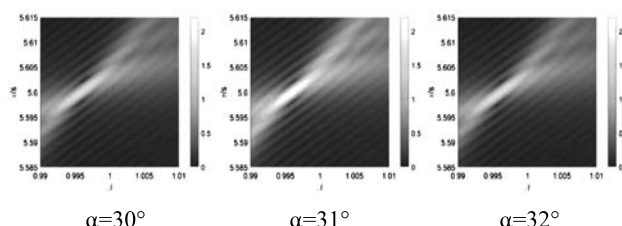


图 6 LFM 时延-多普勒数据截面图

根据波束扫描结果, 可以搜寻出四个目标, 目标参数估计结果如下所示:

表 3 搜寻目标参数结果表

目标	方位(°)	距离(km)	径向速度(m/s)
1	30	4.5	5
2	31	4.2	-3
3	25	3	0
4	25	2.7	0

利用 LFM 接收数据进行三维联合处理, 成功地找出四个目标的位置, 方位-距离-径向速度估计结果与实际参数一致。

#### 5 结语

水下运动目标的三个重要参数是方位、距离和径向速度。本文利用仿真数据的常规处理方法与空-时三维联合处理方法进行了对比, 三维联合处理将空-时数据变换为三维数据, 利用三维数据来搜索目标, 可以分辨出多个目标的位置。考虑到窄带模糊度函数的不现实性原理, 将发射信号从窄带发展为宽带, 相应的多普勒频移发展为多普勒伸缩。仿真数据说明了宽带信号可以同时获得高的时延分辨力和多普勒分辨力。

#### 参考文献:

- [1] Harry L Van Trees. Optimum Array Processing Part I of Detection, Estimation, and Modulation Theory [M]. John Wiley, 2002.
- [2] 曾小辉, MVDR 多波束方位-时延-多普勒三维解卷滤波及算法 [D]. 浙江大学, 2015.
- [3] Jingning Jiang, T. C. Yang, Xiang Pan. Beam-timedelay domain deconvolved scheme for high-resolution active localization of underwater targets [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2020, 148(6): 3762-3771. 2020, 148(6): 3762-3771.
- [4] 王贵越. 三维傅里叶变换波束形成 [D]. 中国舰船研究院, 2017.
- [5] Xue Jiang, Wen-Jun Zeng, Xi-Lin Li. Timedelay and Doppler estimation for wideband acoustic signals in multipath environments [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2011, 130(2): 850-857.
- [6] 肖专, 宫先仪, 潘翔, et al. 宽带与窄带模型下的时延-多普勒