

深弹自导过程的波束相关处理仿真

邱涛, 陈韶华

(中国船舶重工集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003)

摘要 深弹精确自导受测向测距精度影响, 为探究自导全过程算法, 采用波束域相关处理方法, 开展深弹自导过程中自导算法的测向测距性能研究。首先, 对方法的可行性进行分析, 确定噪声背景下有效混响抑制方法。进而, 假设深弹运动态势和弹目的初始位置, 根据几何态势推算出运动过程中的弹目位置和目标俯仰角, 并加入随机误差模拟弹体旋转。最后, 仿真计算自导全过程目标方位和距离。目标方位结果与几何值基本吻合, 验证了波束域相关处理方法正确。

关键词 自导; 测向测距; 波束域相关

中图分类号 TJ630 文献标识码 A 文章编号 2096-5753(2021)02-0128-05

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2021.02.009

Simulation on Beam Correlation Processing in Homing Process of Depth Charge

QIU Tao, CHEN Shaohua

(No. 710 R & D Institute, CSIC, Yichang 443003, China)

Abstract With the fact that the precision homing of depth charge is influenced by the accuracy of angle and range estimation, and in order to study the whole-process algorithm of homing, we adopted beam domain correlation to conduct the angle and range estimation performance study of homing algorithm in the homing process of depth charge. First, we analyzed the feasibility of the method, and confirmed the effective reverberation suppression ways under the background of noise. Then assuming the moving trace of depth charge and its initial location relative to the target, the azimuth between charge and target and pitch angle of the target during the motion process are calculated according to geometric situation, and the charge rotation is simulated by adding some random errors. Finally, the azimuth and distance of target in the whole homing process are simulated and calculated. The results are basically consistent with the originally setting parameters, which verifies the correctness of beam domain correlation method.

Key words homing process; direction finding and ranging; beam domain correlation

0 引言

深弹自导性能是决定精确打击目标的关键, 通过理论分析与仿真研究自导算法的测向测距性能是算法性能评估的重要方向^[1-4]。结合工程实际, 设计合理的深弹自导过程, 利用过程仿真来验证算法的适用性,

可以降低试验成本, 提高效率, 为算法提供理论基础。

本文首先通过深弹自导运动态势假设, 建立了深弹自导的初始条件。据此仿真信号的参数和体制^[5-6], 基于波束域相关开展自导过程仿真^[7], 利用时延估计方法^[8]得出自导过程目标方位仿真结果, 对比验证算法的有效性。

1 波束域相关处理

图 1 是平面阵等效波束分布图,波束间距为 d 。根据平面阵阵形和阵元几何位置来生成阵元仿真信号,并综合考虑声盲区对仿真信号脉宽的要求、相对运动多普勒频移等对测向的影响、信混比对信号幅值大小的影响,设计出对应不同距离要求的信号脉宽、不同相对运动速度下的频率、不同信混比下的信号幅值,以此得到随自导环境(位置、相对运动速度)变化的仿真信号。通过波束域相关处理、过门限检测后估计时延来测向测距。

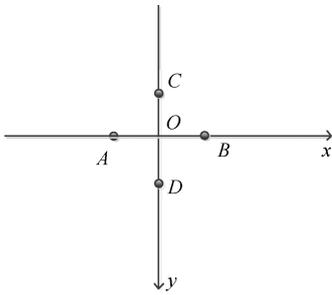


图 1 平面阵等效波束示意图

Fig. 1 Schematic diagram of equivalent beam of planar array

设水平 A 和 B 波束求得的时延为 τ_1 , 垂直 A 和 C 波束求得的时延为 τ_2 , 远场声源入射方位角与俯仰角分别为 φ 与 θ , 与 x 轴与 y 轴的夹角分别为 α 与 β , 如图 2 所示。

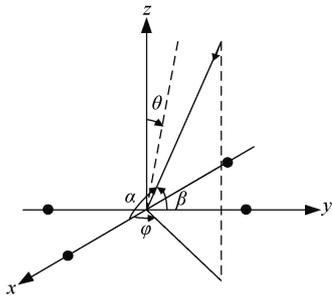


图 2 目标方位示意图

Fig. 2 Schematic diagram of target location

根据几何投影关系, 有:

$$\tau_1 = \frac{d \cos \alpha}{c} \quad (1)$$

$$\tau_2 = \frac{d \cos \beta}{c} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \sin \theta \cos \varphi &= \cos \alpha \\ \sin \theta \sin \varphi &= \cos \beta \end{aligned} \quad (3)$$

根据式 (1) 和式 (2) 可以求得 $\cos \alpha$ 和 $\cos \beta$, 又由公式 (3) 可得到 $\varphi = \tan^{-1}(\cos \beta / \cos \alpha)$, $\theta = \sin^{-1}(\sqrt{\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta})$, 代入 $\cos \alpha$ 和 $\cos \beta$ 可以求得方位角 φ 和俯仰角 θ 。

根据声呐方程, 可以计算出等效波束对体积混响和海底混响的信混比。

体积混响可表示为

$$RL_V = SL - 2TL + S_V + 10 \lg V \quad (4)$$

海底混响表示为

$$RL_S = SL - 2TL + S_b + 10 \lg A \quad (5)$$

式 (4) 和 (5) 中: 混响体积 $V = c\tau\pi r^2\theta_h\theta_v/8$, 混响面积 $A = c\tau r\theta_h/2$; τ 为信号脉宽; r 为自导作用距离; c 为声速取 1 500 m/s; 阵元间距取半波长; S_V 为体积散射强度; S_b 为海底散射强度。

体积混响条件下的信混比:

$$EL - RL_V = TS - S_V - 10 \lg V$$

海底混响条件下的信混比:

$$EL - RL_S = TS - S_b - 10 \lg A$$

检测阈根据信号参数计算, 一般在 6 dB 以上。可见海底混响的信混比较低, 在混响背景下检测回波信号很困难, 因此考虑采用长 CW 脉冲, 通过多普勒归零补偿技术抑制混响, 避免混响背景, 从而在噪声背景中检测信号。

2 态势假设与仿真分析

2.1 态势假设

深弹入水下沉舷侧阵搜索目标, 确定目标大致方位后, 自导系统启动, 头部阵工作, 开始跟踪目标。如图 3 所示, 设定基阵与目标的初始水平距离与初始垂直距离, 以及弹垂直下沉速度与导向目标速度、目标运动速度, 目标作匀速直线运动。将运动过程分割短时处理, 弹在短时间内的运动可看作是朝着锁定目标方向直线运动。根据实际弹自导能力, 将弹自导偏转角度限定在 20° 内。弹入水后,

下沉舷侧阵搜索目标,连续多次搜索到目标后,确定目标的大致方位,然后开始导向目标。

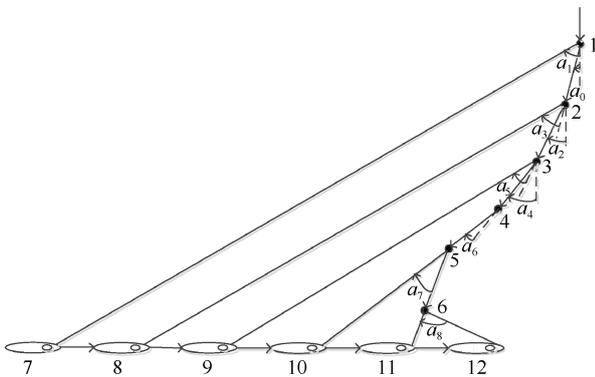


图 3 导引运动轨迹示意图

Fig. 3 Schematic diagram of moving trace

图 3 中,在位置 1 舷侧阵连续多次搜索到目标,此时位置 7 的目标的俯仰角 $\alpha_1=63.43^\circ$ 。弹进入头部阵搜索阶段,偏转角度 $\alpha_0=20^\circ$,运动 2 s 后到位置 2。目标运动到位置 8,测得目标的俯仰角 $\alpha_3=44.47^\circ$,弹偏转 20° 运动, $\alpha_2=40^\circ$, 2s 后运动到位置 3。目标运动到位置 9,测得目标的俯仰角 $\alpha_5=24.96^\circ$,弹偏转 20° 运动, $\alpha_4=60^\circ$, 2s 后运动到位置 4。目标运动到位置 10,测得目标的俯仰角 $\alpha_6=4.63^\circ$,俯仰角小于 20° 。此后弹运动轨迹沿着测得的目标方向变化,一段时间间隔计算一次目标俯仰角。设仿真时间间隔为 2 s,短时间内弹运动可近似为直线运动,将目标的初始位置设为 (0, 200),弹入水位置为 (400, 0),得到自导全过程中目标与弹运动轨迹图,见图 4。在图 4 中,

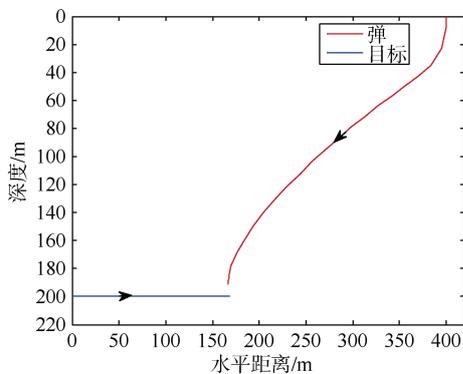


图 4 目标与弹运动过程

Fig. 4 Moving process of target and charge

弹和目标最终交会(距离小于 10 m,认定为交会),弹和目标的运动态势假设合理。

2.2 仿真分析

根据 2.1 节中态势假设可以计算出自导过程中俯仰角的几何值,假定仿真目标初始方位角为 $\pi/2$,为模拟弹下沉和自导过程中弹体旋转,仿真时俯仰角在几何值的基础上加上随机误差 $\pi\text{randn}(1)/60$,方位角在 $\pi/2$ 基础上加上随机误差 $\pi\text{randn}(1)/36$,并从自导起始位置开始迭代。

此次仿真采用 CW 脉冲信号,接收到的信号为 $x = A\sin 2\pi f(t + \tau) + n(t)$ 。式中: A 为正弦信号幅值,通过运动过程中信混比计算; f 为加入多普勒后的频率; τ 为不同位置时延; $n(t)$ 为噪声信号。仿真时采用高斯白噪声,用 randn 产生。利用 MATLAB 软件进行仿真,取弹在某位置信号进行波束处理,得到弹在某位置处 4 波束信号如图 5 所示。此位置信号在多普勒频移范围内最大线谱幅值过门限情况见图 6,图 6 中有 3 帧最大线谱幅值过门限,过门限的时刻与实际仿真信号中 CW 脉冲出现的时刻相吻合,最大线谱过门限确定目标信号的方法合理。但由于按数据帧处理,取过门限最大线谱信息估计目标方位和距离,最大线谱幅值位置并非最先检测到信号的位置,距离估计存在一定误差。在工程应用中为保证信息有效,最大线谱带来的距离误差可以忽略。

根据最大线谱多普勒频移内过门限的方法,可以得到自导全过程中目标方位和距离,将结果与几何值比对,见图 7-11。

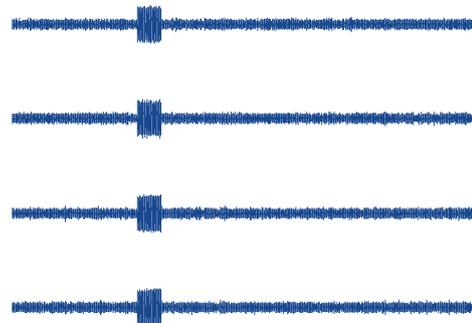


图 5 等效 4 波束信号

Fig. 5 Signals of 4-beam equivalent

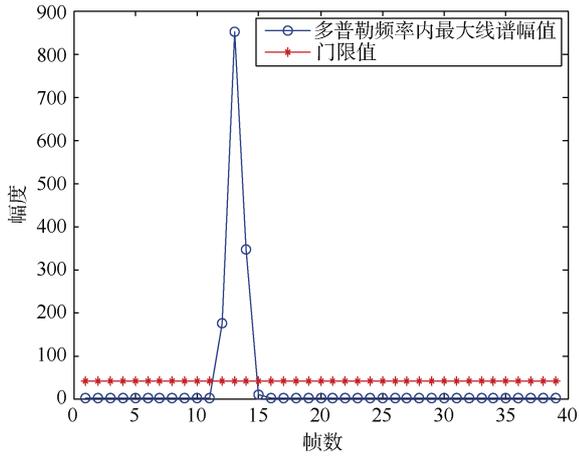


图 6 多普勒频移内过门限检测

Fig. 6 Over threshold detection within Doppler shifts

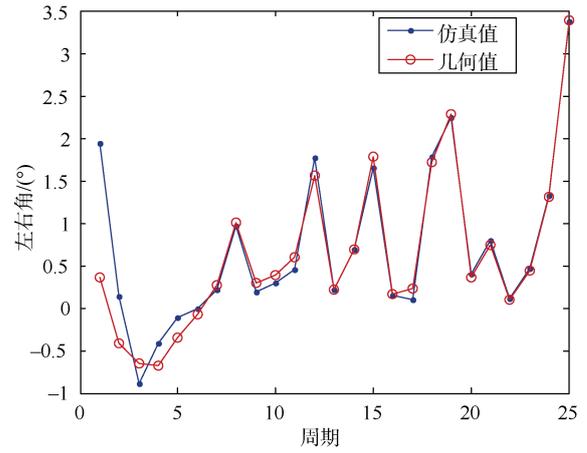


图 9 目标左右角仿真结果与几何值对比

Fig. 9 Comparison results of target left and right angle simulation with geometry

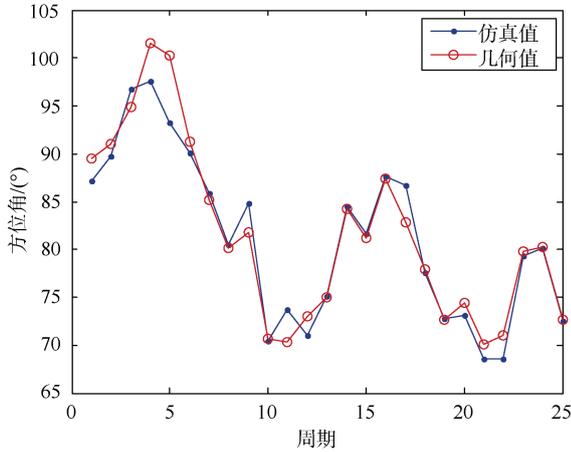


图 7 目标方位角仿真结果与几何值对比

Fig. 7 Comparison results of target azimuth angle simulation with geometry

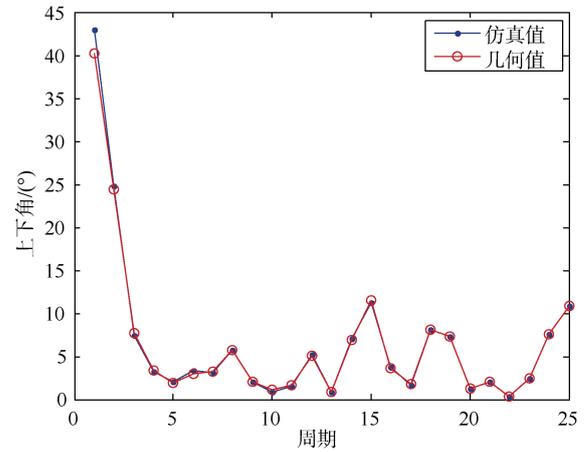


图 10 目标上下角仿真结果与几何值对比

Fig. 10 Comparison results of target top and bottom angle simulation with geometry

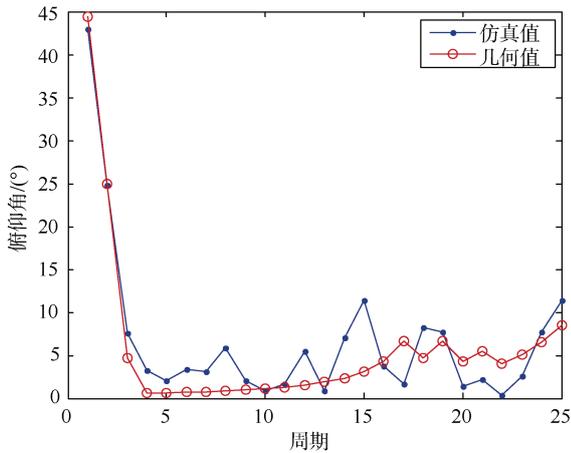


图 8 目标俯仰角仿真结果与几何值对比

Fig. 8 Comparison results of target pitch angle simulation with geometry

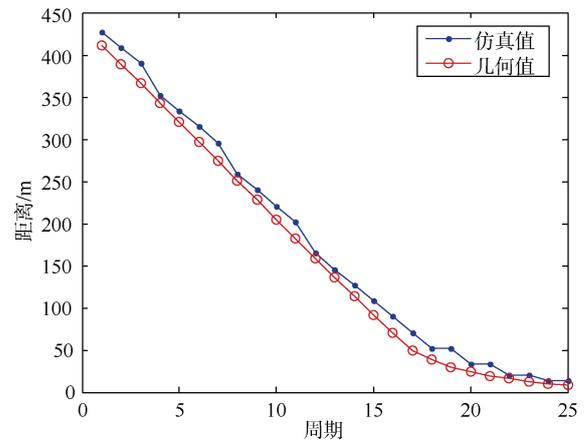


图 11 目标与弹的距离仿真结果与几何值对比

Fig. 11 Comparison results of target distance simulation from charge with geometry

从图 7 可知，加入随机误差模拟弹体旋转，会使整个自导过程中目标方位角一直改变。除了位置 5 外，其余目标方位角仿真结果与几何值的差值小于 5° ，仿真方位角的变化规律与几何值基本相同。在图 8 中，弹自导前期，由于航速和控制能力限制，几何态势设定时将偏转角度限制在 20° 以内，贴合实际运动情况，仿真得到的目标俯仰角较大。当俯仰角小于 20° 后，进入导引跟踪阶段后仿真得到的目标俯仰角小于 15° 。除了位置 15 以外，目标俯仰角仿真结果与几何值差值小于 5° ，在误差允许范围内。图 9 和图 10 是根据方位角和俯仰角计算得到的目标上下角和左右角对比结果，可以看出仿真结果与几何设定值差值在 3° 以内。图 11 是取过门限最大线谱求得的弹目距离，不同位置的距离仿真值均大于几何设定值，差值小于 $1/4$ 脉宽距离。

从几何态势几何值与仿真结果对比可知，除个别点外，测向的仿真结果与几何值差值小于 5° ，测距误差小于 $cT/4$ (T 为信号脉宽， c 为声速)，表明波束域相关测向测距方法可行。从俯仰角来看，进入导引跟踪阶段后，目标的俯仰角小于 15° ，在等效波束范围内。

3 湖上试验数据验证

2019 年进行了湖上试验，试验采用自导声基阵平台，利用目标特性回波模拟装置在不同距离发射 CW 脉冲，采用波束域相关方法对回波信号进行检测和分析。

图 12 为实测等效 4 波束信号，对检测到回波信号进行分周期分析，将距离与 GPS 记录值对比，结果见图 13。

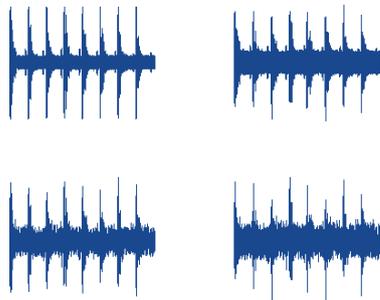


图 12 实测等效 4 波束信号

Fig. 12 Experimental signals of 4-beam equivalent

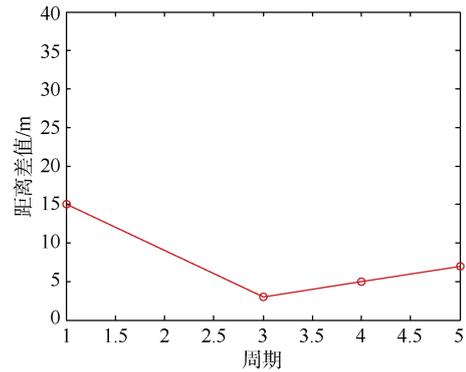


图 13 距离实测值与 GPS 记录值对比

Fig. 13 Differences of distance between measured value with GPS value

从图 13 可知，在检测到回波周期中，距离实测值与 GPS 记录值差值小于 15 m，试验时由于水流影响，会导致试验搭载平台位置时刻发生改变，但测距误差在允许范围内。利用波束域相关方法可以较为准确地测量回波距离。

4 结束语

本文采用 CW 脉冲信号仿真研究了深弹自导过程中目标方位和距离的估计方法。仿真结果表明：测向误差小于 5° ，距离估计与几何值基本吻合，等效波束域相关测向测距方法有效，实测数据处理也侧面验证了此方法在工程应用上可行。下一步将对更多实测数据进行分析，进一步验证与优化信号处理方法。

参考文献

- [1] 李志舜. 鱼雷自导信号与信息处理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2004.
- [2] 罗会彬. 深水炸弹技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
- [3] 黄鹏, 罗会彬. 基于攻潜深弹自导系统的目标特性分析方法[J]. 水雷战与舰船防护, 2013, 21(1): 71-74.
- [4] 陈韶华, 汶宏刚, 张恒, 等. 一种自导深弹舷侧阵回波检测与测向方法: 中国, 108318882A[P]. 2018-07-24.
- [5] 田坦. 声呐技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010.
- [6] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 2 版. 南京: 南京大学出版社, 2001.
- [7] 陈韶华, 田荣艳, 郑伟. 线阵分裂波束相关测向测距技术研究[J]. 水雷战与舰船防护, 2008, 16(1): 1-4.
- [8] 崔玮玮, 曹志刚, 魏建强. 声源定位中的时延估计技术[J]. 数据采集与处理, 2007, 22(1): 90-99.

(责任编辑: 曹晓霖)