

单水听器被动测距的信赖域最优化方法

刘俊星, 章新华, 綦敦浩, 张本辉

(海军大连舰艇学院 水声信息研究中心, 辽宁 大连 116018)

摘要: 为了解决单水听器被动测距的问题,提出了一种基于信赖域最优化方法的多普勒被动测距法。与必须检测到航路捷径点时间和频率的多普勒最接近法相比,该方法可以在航路捷径点之前对目标实现实时探测,不仅能实时给出目标运动参数,而且还能直接获得目标当前距离及预测目标距离,不再是仅仅得到航路捷径距离,充分利用目标多普勒信息,实现了单水听器对运动目标的实时测距。该方法还适用于目标匀加速模型,因而具有更好的实用价值。仿真结果表明了新方法的正确性。

关键词: 信息处理技术;单水听器;多普勒频率;信赖域最优化方法;被动测距

中图分类号: TJ61 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2012)09-1118-06

Trust Region Optimization Method for Single Hydrophone Passive Ranging

LIU Jun-xing, ZHANG Xin-hua, QI Dun-hao, ZHANG Ben-hui

(Research Center of Signal and Information, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, Liaoning, China)

Abstract: In order to solve the problem of single hydrophone passive ranging, a method of Doppler passive ranging based on trust region optimization method was proposed. Compared with the existing method that has to detect the time and frequency when the target arrives to the course shortcut, the new method can detect the target in real-time detecting before it arrives to the course shortcut. This approach can obtain not only the kinetic parameters but also the current and predicted distances of the target. It makes full use of the target's Doppler information, and realizes real-time ranging for moving target by single hydrophone. It can also be suitable for the uniformly accelerated target model and has better practice value. Simulation results show its correctness.

Key words: information processing; single hydrophone; Doppler frequency; trust region optimization method; passive ranging

0 引言

水雷是海军海上防御与对敌封锁作战的有战略作用的水中常规兵器,具有隐蔽性好、打击突然、威胁时间长、敌清除困难、效费比高的特点。在水雷引信中,声引信有着广泛的应用。水雷对目标进行攻击时需要估计目标距离,一旦目标进入到水雷的作用区域,声引信工作,引爆水雷摧毁目标。单个水雷

利用单个水听器接收目标信号,提取有用信息,实现对目标运动状态的跟踪及预测,计算引爆水雷的最佳时间,所以单水听器被动测距是水雷发挥其作战性能的关键技术。

文献[1-2]研究了多普勒最接近法,并将其运用于被动定向浮标目标定位,实现了单枚被动定向浮标对目标的发现、定位、追踪,但只能对匀速直线运动的目标有效,同时,必须准确测出目标过航路捷

收稿日期: 2012-03-07

作者简介: 刘俊星(1987—),男,硕士研究生。E-mail: 315538537@qq.com;

章新华(1962—),男,教授,博士生导师。E-mail: xinghua_zhang@126.com

径点的时间及特征频率。文献[3]改进了多普勒最接近法,增强了测距实时性,但测距存在理论误差。

本文在多普勒最接近法的基础上,研究了基于最优化信赖域算法的单水听器被动测距方法。目的是解决单水听器对运动目标的实时测距,并预测目标距离等问题,以便更好应用于水雷声引信。

1 多普勒最接近方法

目前单个水听器实现对运动目标的测距主要是利用运动目标的多普勒频移信息,具体实现流程图如图1所示。

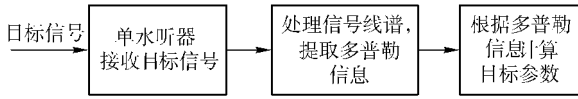


图1 测距流程图
Fig. 1 Ranging flow chart

多普勒最接近法是比较常用且研究较多的方法,如图2所示,当目标以速度 v 从左向右运动。

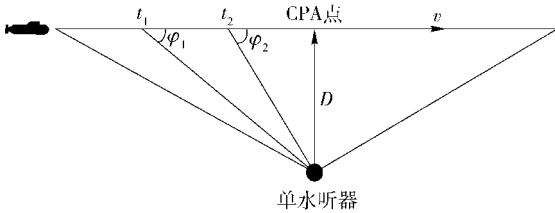


图2 水听器目标位置图
Fig. 2 The location of hydrophone and target

根据多普勒频移理论,水听器检测到的目标特征线谱有从高到低的变化过程。其中 D 为目标航路捷径点的距离(即 CPA 点的距离)^[1]。

根据多普勒频移公式,水听器检测到目标的线谱频率为

$$f = f_0 + f_0 \frac{v}{c} \cos \varphi, \quad (1)$$

式中: f 为测量的目标频率; f_0 为目标的特征频率; v 为目标的运动速度; φ 为目标航向到水听器连线的夹角; c 为声音传播速度。在 t_1 、 t_2 时刻分别测量线谱频率 F_1 、 F_2 。当目标由接近水听器到离开水听器,通过记录线谱的变化,如图3所示,根据线谱变化过程,求得线谱曲线的拐点(CPA点)位置,从而可以得到目标到达 CPA 点的时间 T_{CPA} 及频率 f_{CPA} ^[2]。记:

$$\begin{aligned} \Delta t_1 &= T_{CPA} - t_1, \\ \Delta t_2 &= T_{CPA} - t_2. \end{aligned} \quad (2)$$

由(1)式可知:

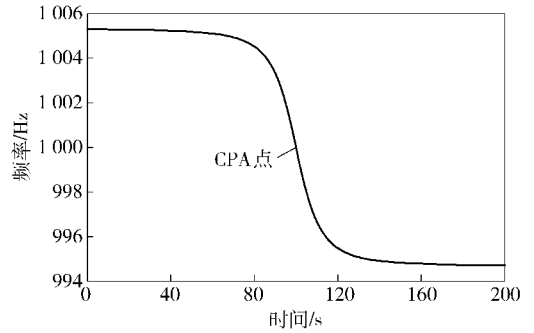


图3 理想的观测频率时间曲线

Fig. 3 The ideal frequency curve graph

$$f_{CPA} = f_0, \quad (3)$$

$$F_1 = f_{CPA} + f_{CPA} \frac{v}{c} \frac{\Delta t_1 v}{\sqrt{(\Delta t_1 v)^2 + D^2}}, \quad (4)$$

$$F_2 = f_{CPA} + f_{CPA} \frac{v}{c} \frac{\Delta t_2 v}{\sqrt{(\Delta t_2 v)^2 + D^2}}, \quad (5)$$

对(4)式、(5)式两边平方、化简,并记:

$$y_1 = \frac{(F_1 - f_{CPA})c}{f_{CPA}}, \quad (6)$$

$$y_2 = \frac{(F_2 - f_{CPA})c}{f_{CPA}}, \quad (7)$$

$$y_1^2 \Delta t_1^2 = v^2 \Delta t_1^2 - y_1^2 \left(\frac{D}{v}\right)^2, \quad (8)$$

$$y_2^2 \Delta t_2^2 = v^2 \Delta t_2^2 - y_2^2 \left(\frac{D}{v}\right)^2. \quad (9)$$

t_1, t_2, y_1, y_2 均已知,求解此方程组,即可求得 v, D ^[4]。

多普勒最接近方法利用任意两个时刻的目标多普勒信息,加上目标过 CPA 点的时刻及频率,可以估计出目标的绝对速度和最接近距离,但不能实时给出目标的距离^[3]。

2 改进多普勒测距法^[5]

如图4所示,以水听器为坐标原点建立直角坐标系,设目标的初始位置为 (x_0, y_0) ,从目标初始位置开始计时,如果目标匀速直线运动,则有

$$\cos \varphi = -\frac{x_0 + vt}{\sqrt{(x_0 + vt)^2 + y_0^2}}, \quad (10)$$

代入(1)式得

$$f(t) = f_0 - f_0 \frac{v(x_0 + vt)}{c \sqrt{(x_0 + vt)^2 + y_0^2}}, \quad (11)$$

如果目标是匀加速直线运动,设加速度为 a ,初速度为 v_0 ,则有

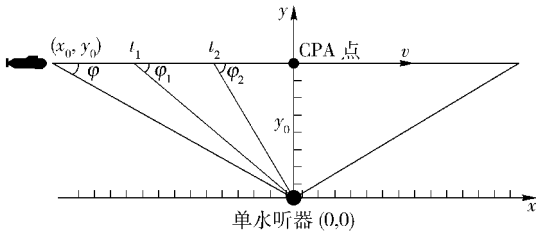


图 4 水听器目标直角坐标位置图

Fig. 4 The location of hydrophone and target in rectangular coordinate

$$\cos \varphi = -\frac{x_0 + \frac{1}{2}at^2 + v_0t}{\sqrt{\left(x_0 + \frac{1}{2}at^2 + v_0t\right)^2 + y_0^2}}, \quad (12)$$

代入(1)式得

$$f(t) = f_0 - f_0 \frac{(v + at) \left(x_0 + \frac{1}{2}at^2 + v_0t\right)}{c \sqrt{\left(x_0 + \frac{1}{2}at^2 + v_0t\right)^2 + y_0^2}}, \quad (13)$$

(11)式、(13)式为目标时间与频率的关系表达式,理论上来说,只要观测几个时间点的频率值,就能通过解方程组的方法求得运动参数,但这种方法要求观测频率值必须是无误差的,不符合实际情况。本文只要观测一段时间内的目标频率 $f_d(t)$,采用曲线拟合的优化方法估计出目标未知参数 \hat{f}_0 、 \hat{v} 、 \hat{a} 、 \hat{x}_0 、 \hat{y}_0 、 \hat{v}_0 ,进而计算水听器与目标的距离:

$$\hat{R}(t) = \sqrt{(\hat{v}t + \hat{x}_0)^2 + \hat{y}_0^2} \quad (14)$$

或

$$\hat{R}(t) = \sqrt{\left(\hat{x}_0 + \frac{1}{2}\hat{a}t^2 + \hat{v}_0t\right)^2 + \hat{y}_0^2}. \quad (15)$$

(14)式、(15)式中当 t 等于观测时间就是对当前目标距离的估计, t 大于观测时间就是对目标距离的预测。所以任何时刻都能根据记录的频率估计目标距离,体现了实时性。但由于每次测距都需要优化,计算量较大,所以本文的实时性是建立在具有高速计算性能的硬件基础上的。

2.1 信赖域最优化方法

最优化问题就是求一个多元函数在某个给定集合上的极值,对于非线性优化参数估计的算法主要有 Gauss-Newton 法、Levenberg-Marquardt 法及 trust-region(信赖域)法^[7]。本文选用信赖域算法,信赖域算法是求解无约束优化问题的一类有效算法^[5]:

$$\min_{x \in R^n} f(x). \quad (16)$$

其基本思想是设 x_k 是第 k 次迭代点。记 $f_k = f(x_k)$, $g_k = \nabla f(x_k)$, $d = x - x_k$, B_k 是 Hesse 阵

$\nabla^2 f(x_k)$ 的第 k 次近似,则 $f(x)$ 在 x_k 的泰勒二阶展开为

$$f(x) = f_k + g_k^T d + \frac{1}{2} d^T B_k d. \quad (17)$$

令 $q_k(d) = g_k^T d + \frac{1}{2} d^T B_k d$, k 次迭代步的信赖域子问题具有如下形式:

$$\begin{aligned} \min q_k(d), \\ \text{s. t. } \|d\| \leq \Delta_k, \end{aligned} \quad (18)$$

式中: Δ_k 是信赖域半径; $\|\cdot\|$ 是任何一种向量范数,通常取 2 范数或 ∞ 范数,设子问题的最优解为 d_k ,定义 Δf_k 为 f 在第 k 步的实际下降量,

$$\Delta f_k = f_k - f(x_k + d_k). \quad (19)$$

Δq_k 为对应预测下降量,

$$\Delta q_k = q_k(0) - q_k(d_k). \quad (20)$$

再定义它们的比值为

$$r_k = \frac{\Delta f_k}{\Delta q_k}. \quad (21)$$

一般地,有 $\Delta q_k > 0$,因此,若 $r_k < 0$ 则 $\Delta f_k < 0$, $x_k + d_k$ 不能作为下一个迭代点,需要缩小信赖域半径重新求解子问题。若 r_k 比较接近 1,说明二次模型与目标函数在信赖域范围内有很好的近似,此时 $x_k + d_k$ 可以作为新的迭代点,同时下一次迭代时可以增大信赖域半径。对于其他情况,信赖域半径可以保持不变^[6]。将该方法应用于本文的被动测距,令(16)式中:

$$\min_{x \in R^n} f(x) = \sum_i (f(t_i, x) - f_d(t_i))^2, \quad (22)$$

式中 $x = (f_0, v, x_0, y_0)^T$,选取合适的搜索初值及信赖域半径,找到使目标函数 $f(x)$ 最小的点 $\hat{x} = (\hat{f}_0, \hat{v}, \hat{x}_0, \hat{y}_0)$ 便是所求的估计值^[5]。

2.2 信赖域算法^[8]

信赖域算法实现步骤如下:

步骤 0 选取控制迭代的参数值,初始点 $x_1 \in R^n$, $0 \leq \eta_1 < \eta_2 < 1$, $0 < \gamma_1 < 1 < \gamma_2$, $0 \leq \varepsilon \ll 1$ 。取定 $\tilde{\Delta} > 0$ 为信赖域半径的上限,初始信赖域半径 $\Delta_1 \in (0, \tilde{\Delta}]$,令 $k := 1$ 。

步骤 1 计算 $g_k = \nabla f(x_k)$,若 $\|g_k\| \leq \varepsilon$,停止迭代。

步骤 2 求解子问题(18)式的解 d_k 。

步骤 3 按(21)式计算 r_k 值。

步骤 4 校正信赖域半径:

$$\Delta_{k+1} := \begin{cases} \gamma_1 \Delta_k, & r_k \leq \eta_1; \\ \Delta_k, & \eta_1 < r_k < \eta_2; \\ \min \{ \gamma_2 \Delta_k, \tilde{\Delta} \}, & r_k \geq \eta_2. \end{cases} \quad (23)$$

步骤5 若 $r_k > \eta_1$, 则令 $x_{k+1} := x_k + d_k$, 更新矩阵 B_k 到 B_{k+1} , 令 $k := k + 1$, 转步骤1; 否则 $x_{k+1} := x_k$, 令 $k := k + 1$, 转步骤2.

3 仿真及结论

3.1 仿真

针对新方法进行计算机仿真, 使用 Matlab 作为仿真计算软件. 利用 Matlab 软件提供的 lsqcurvefit 优化工具实现^[9], 该工具的调用格式为 $[x, residual] = lsqcurvefit(myfun, x1, xdata, ydata, lb, ub)$, 式中 x 为求取的估计参数向量 $\hat{x} = (\hat{f}_0, \hat{v}, \hat{x}_0, \hat{y}_0)$, residual 为对 $f_d(t_i)$ 拟合后的残差序列数据 $\Delta f(t_i) = f(t_i, x) - f_d(t_i)$, xdata、ydata 为观测数据 $t_i, f_d(t_i) (i = 1, 2, \dots, n)$, myfun 为由(11)式或(13)式所描述的非线性函数表达式, x1、lb、ub 分别为搜索初值和上下限. 系统默认算法为信赖域法. 迭代参数取值如下: $\Delta_1 = 1, \tilde{\Delta} = 10^6, \eta_1 = 0.05, \eta_2 = 0.9, \gamma_1 = 0.25, \gamma_2 = 2.5$.

仿真条件如下: 目标中心频率 $f_0 = 1\,000$ Hz, 目标匀速运动速度为 $v = 8$ m/s, 目标初始位置坐标 $(x_0, y_0) = (-800, 100)$ m, 即航路捷径点距离为 100 m. 水文环境为典型的浅海环境, 弱负梯度, 水中声音传播速度 $c = 1\,500$ m/s, 声波按直线传播, 不考虑传播能量衰减, 水声信道等的影响, 水听器静止, 频率测量周期为 1 s. 测量目标由起始位置到 CPA 点之前的频率, 即观测时间为 100 s, 设测量频率附加 0.2 Hz 的高斯白噪声. 图 5 为信号整个过程的 LOFAR 历程图. 根据实际情况, 设搜索初始值 $x1 = [f_d(t_n), 5, -500, 200]$, 最大值 $ub = [f_d(t_n) + 10, 50, -10, 10\,000]$, 最小值 $lb = [f_d(t_n) - 10, 0, -4\,000, 1]$.

仿真计算结果为: 经过 17 次迭代后得估计目标中心频率 $\hat{f}_0 = 999.896\,9$ Hz, 估计目标速度 $\hat{v} = 8.163\,3$ m/s, 估计目标初始位置坐标 $(-819.862\,9, 104.471\,3)$ m. 然后通过(14)式对目标距离估计及预测, 图 6 为仿真图.

假设目标为匀加速直线运动模型, 则设目标加速度 $a = 0.2$ m/s², 初速度 $v_0 = 3$ m/s, 测量目标由起始位置到 CPA 点之前的频率, 其余仿真条件不变. 仿真结果如下: 目标中心频率 $\hat{f}_0 = 998.8$ Hz, 加速度

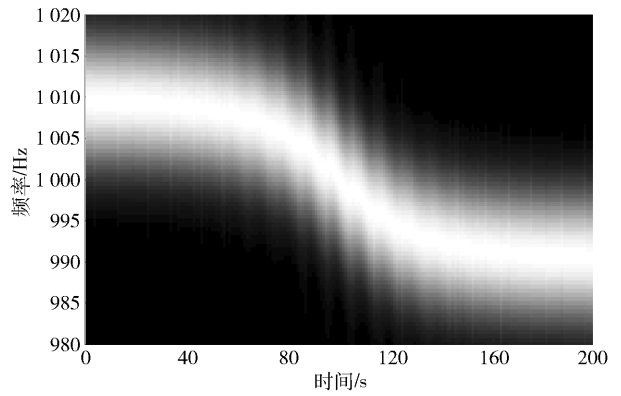
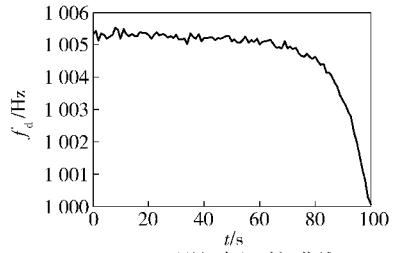
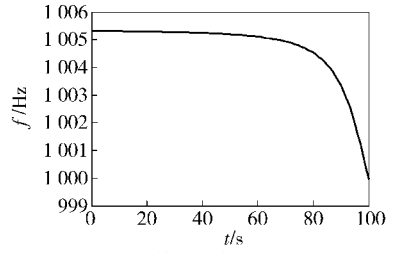


图5 信号 LOFAR 历程图

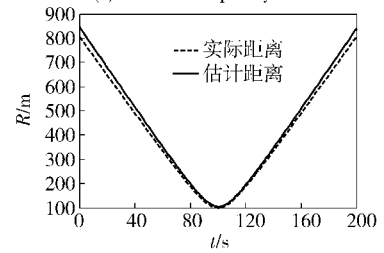
Fig.5 The history plot of signal LOFAR



(a) 观测频率与时间曲线
(a) Observing frequency-t curve

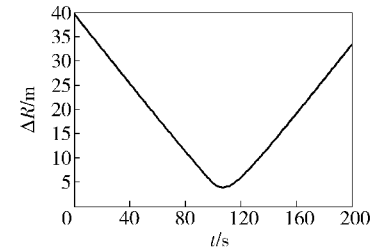


(b) 估计频率与时间曲线
(b) Estimate frequency-t curve



(c) 实际距离与估计距离

(c) Actual distance and estimated distance



(d) 估计距离误差
(d) Estimate distance error

图6 匀速运动目标实时测距及预测距离仿真图

Fig.6 The simulation diagram of real-time ranging and forecasting distance of uniform motion target

$\hat{a} = 0.2005 \text{ m/s}^2$, 初速度 $\hat{v}_0 = 2.391 \text{ m/s}$, 目标初始位置坐标 $(-753.2 \text{ m}, 97.31 \text{ m})$, 仿真图如下:

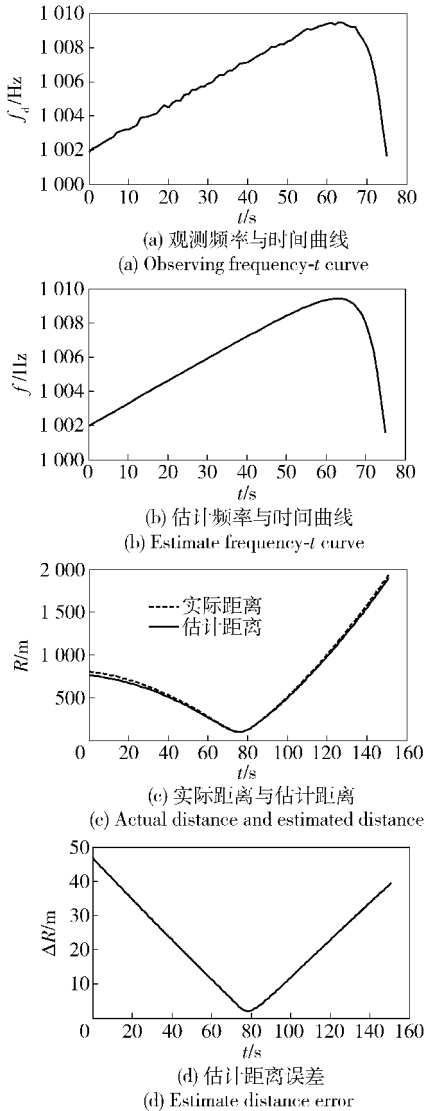


图 7 匀加速运动目标实时测距及预测距离仿真图

Fig. 7 The simulation diagram of real-time ranging and forecasting distance of uniformly accelerated motion target

由以上计算结果可知该算法的正确性,下面着重研究观测时间、频率测量周期、目标初始位置及目标运动速度对测距结果的影响。在仿真分析目标运动参数对测距性能的影响时,采用作 50 次 Monte Carlo 的方法,给出了距离真值、估计距离均值及均方差,距离真值和估计距离均值可以表征距离估计的无偏性,估计距离的均方差可以表征距离估计的有效性。

改变观测时间,其余仿真条件不变,以估计目标当前时刻距离的真实值、估计距离平均值、均方差及估计航路捷径点的距离(实际距离是 100 m)作为比

较测距性能优劣的标准。结果见表 1。

表 1 不同观测时间测距仿真分析

Tab. 1 The simulation analysis of different observation time

观测时间/s	距离真值/m	估计距离均值/m	估计距离均方差/m	估计 CPA 点距离均值/m
85	156.205 0	174.209 7	128.337 9	118.504 5
90	128.062 5	168.570 8	95.705 9	117.389 3
95	107.703 3	116.661 1	35.886 1	106.104 9
100	100.000 0	98.910 7	6.798 6	98.910 7
105	107.703 3	107.940 1	2.578 4	100.309 3
110	128.062 5	128.060 2	1.040 5	100.299 9
115	156.205 0	156.194 4	0.754 4	100.100 4

有时被动目标测距会给出测距过程的累积误差,累积误差是指在每个时刻的估计误差将影响下个时刻参数估计的精度,并具有传播性形成累积误差,且累积误差会随着时间增加^[10]。本文采用的是曲线拟合的参数估计方法,每个时刻的参数估计都是利用之前所有观测的数据进行拟合估计,与前一时刻的估计值不存在递推关系,且由上表可知随着时间增加,误差越小,所以该算法完全消除了累积误差。

再比较目标不同的运动速度对测距结果的影响,改变目标运动速度,观测时间为目标从起始位置开始运动到 CPA 点为止,仿真重复 50 次,其余仿真条件不变,以估计目标在 CPA 点的距离真实值、估计距离平均值及均方差作为比较测距性能优劣的标准。结果如表 2 所示。

表 2 不同目标速度测距仿真分析

Tab. 2 The simulation analysis of different target speed

目标速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	距离真值/m	估计距离平均值/m	估计距离均方差/m
2	100	102.138 1	14.584 5
6	100	100.596 5	6.749 9
10	100	100.675 8	4.307 9
14	100	99.801 4	4.019 6
18	100	100.200 9	3.106 6
22	100	99.981 6	3.038 7
50	100	100.124 7	1.722 2

改变频率测量周期,观测时间为目标从起始位置开始运动到 CPA 点为止,其余仿真条件不变,仿真重复 50 次,以估计目标在 CPA 点的距离真实值、

估计距离平均值及均方差作为比较测距性能优劣的标准。结果如表3所示。

表3 不同频率测量周期测距仿真分析

Tab.3 The simulation analysis of different frequency measurement period

测频 周期/s	距离真 实值/m	估计距离 平均值/m	估计距离 均方差/m
0.1	100	100.224 3	1.962 4
0.5	100	100.091 0	4.152 7
1	100	100.631 9	5.858 1
2	100	100.901 3	7.238 1
5	100	100.128 2	9.333 6
10	100	104.964 5	24.355 8

3.2 仿真结论

由以上仿真结果可以得出以下结论:1)由图6、图7可知,目标运动至CPA点附近,测距误差变小,离CPA点越远,测距误差越大,因为CPA点附近的多普勒变化率最大;2)由表1可以看出,目标运动到CPA点之前就可以估计目标运动参数,同时观测时间对测距误差影响明显,观测时间越长,误差越小,因为观测时间越长,数据点就越多,观测到得多普勒频移量就越大;3)由表2可见,目标运动速度越快,测距误差越小,因为速度越快,多普勒频移就越大;4)理论上,频率测量周期越短,相同的观测时间,数据点就越多,频率附加0.2 Hz的高斯白噪声对测距结果影响也就越小,这符合表3给出的结果,但实际工程应用上,测频周期越短,频率分辨率就越低,带来的误差也越大。

4 结束语

基于最优化方法的单元被动测距法,充分利用单个水听器接收的多普勒信息,运用最优化方法的信赖域算法估计目标运动参数。该方法可以在航路捷径点之前对目标实现实时探测,不仅能直接获得目标当前运动状态及预测目标状态,还适用于目标匀加速运动模型。将其运用于水雷声引信上,将更好地发挥水雷作战性能。

但该方法对频率测量精度依赖性很大,如何解决频率测量周期与频率分辨率的矛盾是下一步需要研究的内容。而且,本文研究的测距方法都是已知了目标是匀速直线运动或匀加速直线运动,在实际作战中,不可能事先完全知道目标运动规律,目标也不可能完全遵循匀速直线运动或匀加速直线运动,

所以能否根据观测量来判断目标的运动规律也是需要进一步研究的。

参考文献 (References)

- [1] 陶林伟,王英民,王成,等. 声纳浮标多普勒最接近法的一种新算法[J]. 系统仿真学报, 2008,20(23): 6353-6355. TAO Lin-wei, WANG Ying-min, WANG Cheng, et al. New algorithm for sonobuoy Doppler-CPA[J]. Journal of System Simulation, 2008,20(23):6353-6355. (in Chinese)
- [2] 陶林伟,王英民. 一种新的单枚被动定向浮标目标定位方法[J]. 兵工学报, 2011,32(3): 365-369. TAO Lin-wei, WANG Ying-min. A target location algorithm based on single direction finding and ranging sonobuoy[J]. Acta Armamentarii, 2011,32(3):365-369. (in Chinese)
- [3] 郁涛. 对水下目标的多普勒直接定位[J]. 中国电子科学研究院学报, 2011, 6(3): 328-330. YU Tao. Doppler direct location for underwater target [J]. Journal of CAEIT, 2011,6(3):328-330. (in Chinese)
- [4] TAO Lin-wei, WANG Ying-min. A new single DIFAR sonobuoy target location algorithm[J]. Journal of China Ordnance, 2011,7(3):153-157.
- [5] 王永杰. 利用引信多普勒频率估计导弹脱靶量方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2005,27(11):1914-1931. WANG Yong-jie. Research on estimating missile miss distance using fuze Doppler spectrum [J]. Systems Engineering and Electronics, 2005,27(11): 1914-1931. (in Chinese)
- [6] 孙文瑜,徐成贤,朱德通. 最优化方法[M]. 第二版. 北京:高等教育出版社,2010. SUN Wen-yu, XU Cheng-xian, ZHU De-tong. Optimization method[M]. 2nd. Beijing: Higher Education Press, 2010. (in Chinese)
- [7] 王德人. 非线性方程组解法与最优化方法[M]. 北京:人民教育出版社,1979. WANG De-ren. Solving nonlinear equations and optimization method[M]. Beijing: People's Education Press, 1979. (in Chinese)
- [8] 马昌凤. 最优化方法及其 Matlab 程序设计[M]. 北京:科学出版社, 2010. MA Chang-feng. Optimization method and Matlab program design [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [9] 魏巍. Matlab 应用数学工具箱手册[M]. 北京:国防工业出版社, 2004. WEI Wei. Matlab toolbox of applied mathematics handbook[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [10] 嵇玮玮,刘中. 递增式传感器节点定位方法的累积误差分析及其改进[J]. 南京理工大学学报:自然科学版, 2008, 32(4):496-501. JI Wei-wei, LIU Zhong. Accumulative error analysis of incremental node localization approach and its improvement in wireless sensor network[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science, 2008,32(4):496-501. (in Chinese)