

基于无人水下航行器的潜艇隐蔽协同跟踪

周红波¹, 蔡祥¹, 尹亚兰¹, 舒安平²

(1. 海军指挥学院信息战研究系, 南京 211800; 2. 中国人民解放军91601部队, 福建 福鼎 355200)

摘要: 针对单潜艇必须进行高速机动才能对目标进行被动纯方位跟踪的问题, 提出了基于无人水下航行器(UUV)的潜艇隐蔽协同跟踪方法, 该方法将无人水下航行器布置在离潜艇一定的距离, 并通过光纤与潜艇进行通信。潜艇指控系统利用潜艇和无人水下航行器获得观测的信息进行协同被动跟踪, 使得潜艇不需要进行高速机动就可以对目标进行有效跟踪。计算机仿真结果表明, 该方法相对于单艇机动具有更好的跟踪性能。

关键词: 潜艇; 被动跟踪; 隐蔽攻击; 无人水下航行器; 纯方位

中图分类号: TN953 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)11-0040-03

Tracking a Target Stealthily by Submarine Cooperated with Unmanned Underwater Vehicles

ZHOU Hong-bo¹, CAI Xiang¹, YIN Ya-lan¹, SHU An-ping²

(1. Department of Information Warfare Researching, Navy College of Commanding, Nanjing 211800, China;
2. No. 91601 Unit of PLA, Fuding 355200, China)

Abstract: A single submarine must maneuver at high speed to carry out bearing-only target tracking passively. To solve the problem, a new method is proposed for a submarine to track a target stealthily by cooperation with Unmanned Underwater Vehicle (UUV). The UUVs are arranged at some distance away from a submarine, which communicate with the submarine by optical fiber. The command and control system of the submarine tracks the target by using observations of the submarine and UUVs, by which submarines can track target stealthily without making high-speed maneuvering. Results of simulations prove that the method has better tracking performance.

Key words: submarine; passive tracking; stealthy attack; unmanned underwater vehicle; bearing-only

0 引言

未来高技术条件下的海上局部战争中, 潜艇是海战中常用的杀手锏之一, 其中, 潜艇的生命力和战斗力主要取决于其隐蔽性^[1]。潜艇在作战过程中, 为了达到不被敌方发现而进行隐蔽攻击的目的, 一般采用被动声纳对目标进行纯方位跟踪, 即仅仅利用声纳测得的目标方位实现对目标的跟踪。在传统的单艇作战模式中, 由于受到被动跟踪可观测条件的限制, 本艇必须采取合适的机动形式才能获得目标跟踪的收敛解^[1]。潜艇在机动时往往会发出噪声导致失去隐蔽性。为了提高目标的可观测性和目标跟踪的收敛速度, 多

艇协同跟踪是一个有效的方法^[2]。但是在实际作战中, 多潜艇联合作战的场合比较少, 且相互之间在水下通信也比较困难。因此, 如何解决潜艇的隐蔽跟踪是一个亟待解决的问题。针对这个问题, 文献[3]利用水下传感器网络研究了潜艇隐蔽跟踪的问题, 虽然跟踪效果较好, 但是仍是以良好的水声通信为基础的。随着无人水下航行器(Unmanned Underwater Vehicle, UUV)的快速发展, UUV被大量用于目标探测。针对单潜艇必须进行高速机动才能对目标进行被动纯方位跟踪的问题, 本文提出了基于UUV的潜艇隐蔽协同跟踪方法, 以解决潜艇隐蔽跟踪的问题。计算机仿真结果表明, 基于UUV的潜艇隐蔽协同跟踪方法在本艇不机动的情况下也可以对目标进行有效跟踪, 且效果比单艇机动跟踪更好, 因此可以有效解决潜艇隐蔽跟踪的问题。

1 潜艇隐蔽跟踪问题描述

潜艇在进行水下隐蔽作战过程中, 对目标的检测、

收稿日期: 2015-09-16

修回日期: 2015-10-22

基金项目: 全军军事类研究生资助课题(2014JY437)

作者简介: 周红波(1984—), 男, 山西夏县人, 博士, 讲师, 研究方向为无线传感器网络目标定位与跟踪。

跟踪和攻击是潜艇作战的 3 个重要环节。其中,对目标进行有效隐蔽跟踪是潜艇能够对目标实施攻击完成作战任务的首要条件^[1]。潜艇为了不被敌方发现而达成作战任务,一般采用被动声纳对目标进行纯方位跟踪。潜艇在作战时往往采用单艇单独作战,因此只能利用单艇进行目标被动跟踪,但是受被动跟踪可观测条件的限制,潜艇必须进行高速机动才能有效跟踪目标。典型的潜艇被动跟踪态势如图 1 所示。

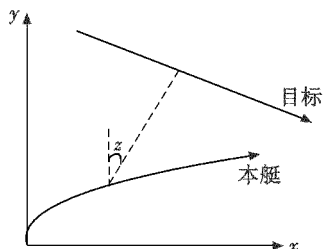


图 1 典型潜艇被动目标跟踪态势图

Fig.1 The situation of typical submarine passive target tracking

将目标 t 的状态变量记为 $\mathbf{X}_k^t = (x_k^t \ y_k^t \ \dot{x}_k^t \ \dot{y}_k^t)^T$, 系统噪声记为 \mathbf{w}_k , 则目标的运动状态方程可以描述为

$$\mathbf{X}_{k+1}^t = f(\mathbf{X}_k^t, \mathbf{w}_k) \quad (1)$$

将本艇的状态记为 $\mathbf{X}_k^w = (x_k^w \ y_k^w \ \dot{x}_k^w \ \dot{y}_k^w)^T$, 本艇只能被动地测得目标的方位角, 观测噪声为 \mathbf{v}_k , 则观测方程为

$$z_k = \arctan\left(\frac{x_k^t - x_k^w}{y_k^t - y_k^w}\right) + \mathbf{v}_k \quad (2)$$

潜艇的被动目标跟踪问题就可以描述为由式(1)和式(2)组成的非线性状态估计问题。

2 基于水下航行器的潜艇协同跟踪

由文献[4-5]可知,为了保证目标的可观测性,潜艇在对目标进行被动纯方位跟踪时,本艇必须进行高速机动,但是潜艇高速机动时又会发出大量的噪声,容易被敌方发现。因此,如何解决潜艇的隐蔽跟踪是一个亟待解决的问题。本节提出一种基于水下航行器的潜艇隐蔽协同跟踪方法,以解决潜艇的隐蔽跟踪问题。

2.1 无人水下航行器

无人水下航行器(UUV)是一种无乘员、可移动的水下无人系统^[6],由于其不需要人工操作,因此设计很灵活,在体积等方面可以不受约束。通过搭载不同的探测设备,UUV可以完成不同的任务,因此在民用和军用领域都显示出广泛的应用前景。目前,在军用领域,UUV可用于目标侦察、中继通信等^[7]。

2.2 基于 UUV 的潜艇协同跟踪原理

随着 UUV 技术的不断发展,UUV 可以更好地用于军事领域,由于其具有体积小、成本低、机动性好和噪

声小等特点,搭载声纳后就可以对目标进行被动探测。文献[8]研究表明,在多站协同跟踪的情况下,即使潜艇静止也可以等效为单艇高速机动,有效克服纯方位被动跟踪的不可观测性问题。因此,可以利用 UUV 协同潜艇对目标进行隐蔽跟踪,从而有效解决单艇目标被动跟踪的不可观测性问题,实现潜艇对目标的隐蔽攻击。基于 UUV 的潜艇隐蔽协同跟踪思路如下。

将装载有声纳的 UUV 布置在离潜艇一定的距离范围,并通过光纤与潜艇进行通信。潜艇和 UUV 同时对目标进行被动探测,UUV 将获得的纯方位信息通过光纤实时地传送给潜艇指控系统,潜艇指控系统利用潜艇和 UUV 测得的纯方位信息对目标进行跟踪。由于潜艇和 UUV 在不同的位置,且 UUV 能够通过光纤实时地将自身位置信息和目标方位信息传送给潜艇指控系统,因此,基于 UUV 的潜艇隐蔽协同跟踪相当于一个观测站在不同的位置之间进行高速机动,从而使得潜艇即使静止时也可以在较短的时间内获得较大的方位变化率,因而其协同被动跟踪性能可以得到很大的提高。

UUV 的潜艇隐蔽协同目标跟踪问题描述如下。将潜艇的状态记为 $\mathbf{X}_k^q = (x_k^q \ y_k^q \ \dot{x}_k^q \ \dot{y}_k^q)^T$, UUV 状态记为 $\mathbf{X}_k^u = (x_k^u \ y_k^u \ \dot{x}_k^u \ \dot{y}_k^u)^T$, 潜艇和 UUV 都只能被动地测得目标的方位角,观测噪声分别为 \mathbf{v}_k^q 和 \mathbf{v}_k^u , 则潜艇和 UUV 的观测方程分别为

$$z_k^q = \arctan\left(\frac{x_k^t - x_k^q}{y_k^t - y_k^q}\right) + \mathbf{v}_k^q \quad (3)$$

$$z_k^u = \arctan\left(\frac{x_k^t - x_k^u}{y_k^t - y_k^u}\right) + \mathbf{v}_k^u \quad (4)$$

则基于 UUV 的潜艇隐蔽协同目标跟踪就可以描述为在得到潜艇和 UUV 的观测序列的情况下对目标状态 \mathbf{X}_k^t 的估计问题。

假设潜艇的采样时刻为 $0, 2, 2n, \dots$, UUV 的采样时刻为 $1, 3, 2n+1, \dots$, 则基于 UUV 的潜艇隐蔽协同跟踪情况见图 2。潜艇指控系统获得的观测序列为 $Z = \{z_0^q, z_1^u, z_2^q, z_3^u, \dots\}$, 指控系统在获得观测序列后,利用粒子滤波^[9]即可实现对目标的隐蔽跟踪,如图 2 所示。

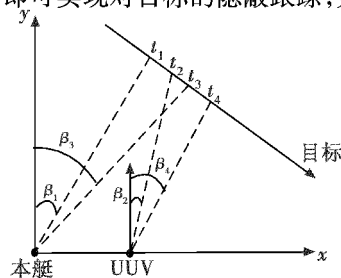


图 2 基于无人水下航行器的潜艇隐蔽协同跟踪

Fig.2 Target tracking by submarine cooperating with UUV

3 计算机仿真

为了验证基于UUV的潜艇隐蔽协同跟踪方法的有效性,进行了蒙特卡罗仿真。仿真环境设置如下。

1) 潜艇位于坐标原点,UUV位于(1000 m,0 m)。目标以18 kn的速度匀速航行,目标初始距离为(0 m,10000 m),目标航向为130°,如图3所示。

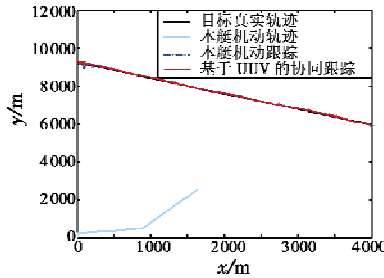


图3 单次目标跟踪结果

Fig.3 The result of single target tracking

2) 仿真时长为200 s,潜艇和UUV的采样周期都为2 s,假设潜艇和UUV的观测顺序不变,对于 $n = 0, 1, 2, \dots, 100$,在 $2n$ 时刻,潜艇获得探测方位,在 $2n + 1$ 时刻,UUV获得探测方位。

3) 目标状态噪声、潜艇和UUV的观测噪声均为相互独立的高斯白噪声。其中目标状态噪声为 $\begin{pmatrix} 10^{-4} & 0 \\ 0 & 10^{-4} \end{pmatrix}$,潜艇观测噪声均方差为 0.5° ,UUV观测噪声均方差为 1° 。

4) 另外,将其与单艇采取机动方式跟踪进行比较。单艇机动跟踪设置为:潜艇采用典型的方位航路-接敌航路-攻击航路的接敌跟踪航路^[10],各航路的参数设置如表1所示。跟踪态势如图3所示,系统噪声均方差为 $\begin{pmatrix} 10^{-4} & 0 \\ 0 & 10^{-4} \end{pmatrix}$,观测噪声均方差为 0.5° 。

表1 本艇接敌航路参数

Table 1 Waterway parameters of the submarine approaching enemy

| 阶段 | 航速/kn | 航向/(°) | 时间/min |
|------|-------|--------|--------|
| 方位航路 | 5 | 0 | 3 |
| 接敌航路 | 10 | 75 | 5 |
| 攻击航路 | 8 | 20 | 12 |

在仿真中,取粒子数 $M = 1000$,进行了50次蒙特卡罗仿真。单次的航迹跟踪结果如图3所示,50次仿真的目标位置和速度的估计误差均方根(RMSE)分别如图4和图5所示。

从图3~图5可以看出,潜艇在不需要机动的情况下利用基于UUV的潜艇隐蔽协同跟踪方法可以对目标进行有效跟踪,且与本艇机动跟踪方法相比具有

更好的跟踪精度。

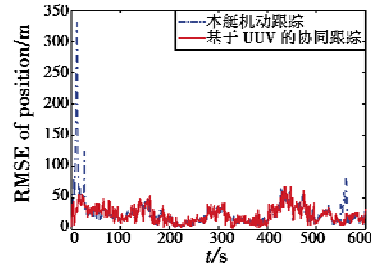


图4 目标位置估计误差均方根

Fig.4 The RMSE of target position estimating

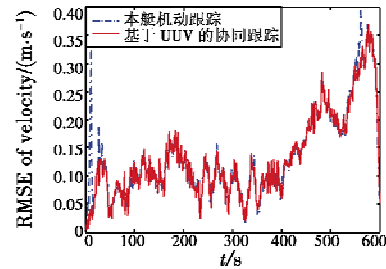


图5 目标速度估计误差均方根

Fig.5 The RMSE of target velocity estimating

4 结论

为使得潜艇实现有效的隐蔽攻击,本文利用UUV,提出了基于UUV的潜艇隐蔽协同跟踪方法。由于潜艇和UUV在不同的位置,其获得的探测方位具有较高的变化率,从而可以使得潜艇不需要进行高速机动就可以有效地对目标进行跟踪。计算机仿真结果表明,基于UUV的潜艇隐蔽协同跟踪方法相对于单艇机动具有更好的跟踪性能。下一步,将针对UUV的部署位置和数量对该方法跟踪性能的影响进行研究。

参考文献

[1] 赵正业. 潜艇火控原理[M]. 北京:国防工业出版社,2003. (ZHAO Z Y. Principles of submarine fire control [M]. Beijing:National Defense Industry Press,2003.)

[2] 刘忠,周丰,石章松,等. 纯方位目标运动分析[M]. 北京:国防工业出版社,2009. (LIU Z,ZHOU F,SHI Z S, et al. Bearings-only target motion analysis[M]. Beijing: National Defense Industry Press,2009.)

[3] 薛锋. 潜艇协同隐蔽攻击中的目标跟踪算法与仿真研究[D]. 武汉:海军工程大学,2007. (XUE F. Study on algorithms and simulations of target tracking in cooperative stealthy attack of submarines[D]. Wuhan:Naval University of Engineering,2007.)

[4] NORDONE S C, MARCUS I G. A closed-form solution to bearings-only target motion analysis[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering,1997,22(1):168-178.

方差的原理,能快速有效地获得多个物体的轮廓。

参考文献

- [1] 谢立,胡玲玲,吕一品,等. 面向智能视频监控系统运动目标检测的轮廓提取方法[J]. 东南大学学报:自然科学版,2012,42(s1):31-35. (XIE L, HU L L, LYU Y P, et al. A novel contour extraction method for motion object detection in surveillance video systems[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2012, 42(s1):31-35.)
- [2] 张燕芳. 基于遥感图像的大规模城市建模中的建筑物轮廓提取[D]. 西安:西安电子科技大学,2014. (ZHANG Y F. Building contour extraction of large-scale city modeling based on remote sensing image[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.)
- [3] KASS M, WITKIN A, TERZOPOULOS D. Snakes: active contour models[J]. International Journal of Computer Vision, 1988, 1(4):321-331.
- [4] 王艳. 结合小波变换的边缘活动轮廓模型[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(10):27-30. (WANG Y. Edge-based active contour models combined with wavelet transform[J]. Computer Engineering and Applications, 2014, 50(10):27-30.)
- [5] 冯玉玲,何传江,李梦. 不用高斯平滑的边缘活动轮廓模型[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(36):192-194. (FENG Y L, HE C J, LI M. Edge-based active contour model without Gaussian smoothing[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(36):192-194.)
- [6] XU C, PRINCE J L. Snakes, shapes, and gradient vector flow[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1998, 7(3):359-369.
- [7] LI B, ACTON S T. Active contour external force using vector field convolution for image segmentation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(8):2096-2106.
- [8] CHAKRABORTY A, STAIB L H, DUNCAN J S. Deformable boundary finding influenced by region homogeneity[C]//Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE, 1994:624-627.
- [9] FIGUEIREDO M A T, LEITÃO J M N, JAIN A K. Adaptive parametrically deformable contours[C]//Energy Minimization Methods in Computer Vision and Pattern Recognition. Springer Berlin Heidelberg, 1997:35-50.
- [10] ATLT A V, BAYRAM I. Image segmentation with global active contours[C]//The 20th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), IEEE, 2012:1-4.
- [11] MUMFORD D, SHAH J. Optimal approximations by piecewise smooth functions and associated variational problems[J]. Communications on Pure and Applied Mathematics, 1989, 42(5):577-685.
- [12] CHAN T F, VESE L. Active contours without edges[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(2):266-277.
- [13] LI C, XU C, GUI C, et al. Level set evolution without re-initialization: a new variational formulation[C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE, 2005:430-436.
- [14] LI C, KAO C Y, GORE J C, et al. Minimization of region-scalable fitting energy for image segmentation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2008, 17(10):1940-1949.
- [15] ZHU S C, YUILLE A. Region competition: unifying snakes, region growing, and Bayes/MDL for multiband image segmentation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996, 18(9):884-900.
- (上接第 42 页)
- [5] TAFE T G. Target localization from bearings-only observations[J]. IEEE Transactions on AES, 1997, 33(1):2-10.
- [6] 陈强. 无人水下航行器[M]. 北京:国防工业出版社, 2014. (CHEN Q. Unmanned underwater vehicle[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.)
- [7] 李德远,吴汪洋,李晓晨. 军用 UUV 的发展与应用前景展望[J]. 舰船电子工程, 2012, 32(4):22-25. (LI D Y, WU W Y, LI X C. Current status and future directions of navy unmanned underwater vehicles[J]. Ship Electronic Engineering, 2012, 32(4):22-25.)
- [8] 刘忠,邓聚龙. 多传感器系统纯方位定位与可观测性分析[J]. 火力与指挥控制, 2004, 29(5):79-83, 87. (LIU Z, DENG J L. Passive localization method and observability analysis for multiple observers bearings-only system[J]. Fire Control & Command Control, 2004, 29(5):79-83, 87.)
- [9] ARULAMPALAM M S, MASKELL S, GORDON N. A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(2):174-188.
- [10] 罗浩,赵厚奎,尹迪. 一种单站纯方位目标跟踪中的最小二乘递推方法[J]. 舰船科学技术, 2008, 30(4):130-133. (LUO H, ZHAO H K, YIN D. A recursive least square algorithm for BOT[J]. Ship Science and Technology, 2008, 30(4):130-133.)