

基于编队协同的 UUV 时敏打击效能研究*

吴泽伟 陈 玮 陈悦龙

(海军兵种指挥学院 广州 510431)

摘 要 UUV(Unmanned Undersea Vehicle)作为一支独具特色的水下作战力量,正在成为一种新型作战平台,受到美国等世界各国海军的关注。针对 UUV 的具体使命任务,以“时敏打击”为目标,研究了 UUV 时敏打击的概念、方式、特点以及衡量 UUV 时敏打击效果的主要效能指标。重点围绕基于 UUV 编队协同这一核心内容,分析了编队协同对提高 UUV 时敏打击效能的重要作用。

关键词 UUV;时敏打击;编队协同

中图分类号 E910

Research on Efficiency of UUV Time Critical Striking
Based on Formational Cooperating

Wu Zewei Chen Wei Chen Yuelong

(Naval Arms Command Acadamy, Guangzhou 510431)

Abstract As a force of executing special missions, the UUV (unmanned undersea vehicle) is going to be a new platform for naval development and be noticed by some countries such as US. Aim at the mission of UUV, it chooses time critical striking as the object and do some research on its concept, mode, characteristic and the main parameter of striking effect. The main aim is to research how formational cooperating takes effect on time critical striking of UUV.

Key words unmanned undersea vehicle, time critical striking, formational cooperating

Class Number E910

1 引言

时敏打击也被形象地称为“发现即摧毁”式打击,作战对象为那些被发现、定位和识别后受攻击时间极为有限的时间敏感目标。时敏打击的概念源于 1991 年的海湾战争,当时伊拉克部队用移动式的“飞毛腿”导弹对美军进行攻击,这种移动式导弹通常用军用汽车等平台搭载,其机动性能好,能实现打击后迅速转移,往往导致美军的飞机来不及进行攻击。UUV 时敏打击,即基于 UUV 作战平台的,在有限的“攻击窗口”或“交战机会”内对敌“时

间敏感”目标发现、定位、识别、瞄准和攻击的一种新型作战方式。

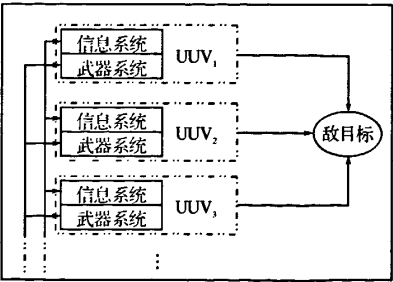


图 1 编队协同示意图

* 收稿日期:2008 年 6 月 29 日,修回日期:2008 年 7 月 22 日
作者简介:吴泽伟,男,硕士研究生,研究方向:海军指挥自动化。陈玮,男,硕士研究生,研究方向:海军指挥自动化。陈悦龙,男,硕士研究生,研究方向:海军指挥自动化。

编队协同是指编队两个以上的平台为完成同一战术任务,根据一定的计划实施的协调一致的行动。编队协同一般以协同网的形式来表示。在协同网中每个平台作为网络的一个节点(node),平台间的信息连接构成网络的边(edge)。通过编队协同可以实现各节点间的信息共享以及武器协同。其示意图如图1所示。

2 UUV 时敏打击的对象

根据时敏打击的概念,UUV 主要用于对敌海上航速较高、机动性能较强的目标进行打击,主要包括:

1) 敌水面舰艇。敌水面舰艇是 UUV 时敏打击的主要目标,主要有敌航母、驱护舰、导弹艇、扫雷艇、猎潜艇、水面运输舰艇等。现代海战中,水面战斗舰艇的航速都比较高,在与我海军兵力的对抗中,能够实现对快速打击后快速转移,以使我水面战斗舰艇部队很难及时做出战术反应。

2) 敌核潜艇。一般来讲,现代常规潜艇的水下航速比较低,其最高航速一般小于 20 节,水下经济航速小于 10 节,因此通常不作为 UUV 时敏打击的对象。而现代核潜艇的水下航速高(可达 30 节)、活动时间长,具有常规潜艇不可比拟的战术性能,属于典型的水下时间敏感目标。

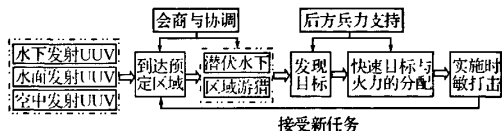


图2 UUV 一般打击流程

3 UUV 时敏打击的方式

UUV 时敏打击主要有以下三种方式^[1]:

1) 预先布设。UUV 由搭载平台发射出去后,在敌目标以较高概率出现的水下区域预先布设武器,并在敌目标出现时控制武器实施打击。此类打击方式较依赖于前期的情报支持,打击的可靠性相对不大。

2) 水下游猎。UUV 在指定水下区域潜伏或巡游,在发现敌目标时水下实时发射武器进行打击。这种打击方式反应时间最短,作战实时性强,是针对敌航速高、机动性强的目标最理想的打击方式,但是同时也增加了 UUV 自身系统的复杂性,比如注水发射管、UUV 平衡控制、压载系统以及 UUV 水下打击时的通信系统等。

3) 水面发射。UUV 在水下发现目标做出打

击决策或得到后方攻击命令后,迅速上浮水面、实时跟踪目标并水面发射武器进行打击。此类打击避免了水下发射武器所带来的一系列复杂问题,并且在浮出水面后能够更好地得到友方兵力的引导支持,增强打击协同效果。但是在这种方式下,UUV 的上浮延迟了打击的时间,而且 UUV 在上浮的过程中会产生位置偏差。

4 UUV 时敏打击效能指标

1) 目标延时

目标延时是 UUV 衡量时敏打击效能最主要的战术指标,其被定义为发现目标到第一枚武器到达目标的时间间隔。目标延时计算公式为:

$$T = \sum_{i=1}^n t_i \quad (1)$$

其中, n 为目标延时中耗时环节的数量; t_i 为每一个环节消耗的时间。

一般来说,UUV 时敏打击目标延时主要包括^[2]:目标信息传递时间、信息处理时间、形成决策时间、武器发射时间、武器飞行时间等。

2) 时间窗口

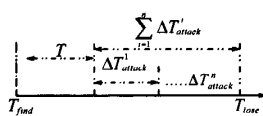


图3 时间窗口示意图

时间窗口,即 UUV 编队对敌目标的可攻击时间窗口,一般指发现敌目标到目标消失的时间间隔。时间窗口是我 UUV 对敌目标攻击行动的时间约束值,是影响我对敌时敏目标打击效果的重要因素。

时间窗口大小: $T_{lose} - T_{find}$ (2)

第一枚武器到达目标的时刻: $T_{find} + T$ (3)

设 UUV 武器攻击时间间隔为: ΔT_{attack} (4)

则: $\Delta T_{attack} = f(t_1, t_2, t_3, t_4)$ (5)

其中: t_1 为观察攻击效果时间; t_2 为再次攻击的决策时间; t_3 为发射系统的响应时间; t_4 为武器飞行时间。

由上可得,在时间窗口内 UUV 可发射武器的数量 n 的约束条件为:

$$S. T - T + (n-1)\Delta T_{attack} \leq (T_{lose} - T_{find}) \quad (6)$$

$$\text{即: } n = \text{Mod} \left[\frac{T_{lose} - T_{find} - T}{\Delta T_{attack}} \right] + 1 \quad (7)$$

Mod 为取整运算。

3) 目标毁伤概率

UUV 对敌“时间敏感”目标可攻击的时间窗口小,且可再次发射武器的数量 n 一般较小,所以在

对敌时敏目标进行打击时,通常需要较高的毁伤概率。下面以我UUV编队对敌目标发射自导鱼雷进行毁伤概率计算^[3]。

由于UUV体积小,隐蔽性好,可航行并潜伏在敌港口附近或敌目标频繁活动区域,在敌目标出现后对其进行近距离攻击,使敌目标来不及反应或抗击。因此,可以把鱼雷发现目标的概率近似等效为命中目标的概率,即:

$$P_m = P_f \quad (8)$$

则目标毁伤概率为:

$$P_h = 1 - \left(1 - \frac{P_m}{\omega}\right)^n = 1 - \left(1 - \frac{P_f}{\omega}\right)^n \quad (9)$$

ω 为毁伤目标必须命中的鱼雷数目。

下面研究自导鱼雷发现目标概率。

• 鱼雷搜索空间:鱼雷从UUV上发射出去之后,在水平方向和垂直方向上都形成一定的搜索扇面,根据自导鱼雷自身特点和水文条件,通常水平方向上的搜索扇面大于垂直方向上的搜索扇面,并在空间上表现为一个立体的搜索空间。

• 目标可能散布空间:目标可能散布空间也是影响鱼雷发现目标的概率的一个主要因素。其定义为UUV发现敌目标到鱼雷发射出去这段时间内敌目标可能的散布空间的大小(这里不考虑鱼雷发射后搜索期间敌目标的机动,即该段时间内视为静止目标)。

因此,鱼雷发现目标概率可以定义为鱼雷搜索的空间与目标可能散布空间重叠部分的体积与目标可能散布空间体积之比,即:

$$P_f = \frac{V_{\text{鱼雷}} \cap V_{\text{目标}}}{V_{\text{目标}}} \quad (10)$$

式中鱼雷搜索空间的大小由鱼雷本身性能和搜索自然条件决定,这里暂时忽略自然环境的影响,认为鱼雷搜索空间大小为一固定值,则影响鱼雷发现目标概率的主要因素为目标在鱼雷发射出去后可能散步的空间大小 $V_{\text{目标}}$ 。

影响目标可能散布空间的因素有:目标延时(在 T 内目标保持机动)、目标运动要素误差、传感器节点测量误差、信息处理过程产生的误差。其中,目标运动要素误差主要来自于水下潮、流等自然因素的影响;传感器节点测量误差主要受硬件精度影响;信息处理误差则来自于系统或人为因素的影响。

以上几种误差,在计算鱼雷发现目标概率时,通过时间的累积后表现为目标的可能散布空间

$V_{\text{目标}}$,我们将各误差进行等效处理,视为目标的航向和航速,并用三维坐标来表示,即:

$$V_{\text{目标}} = V_{\text{目标}}(\Delta v \cdot t, \Delta \varphi, \Delta \theta) \quad (11)$$

式中: Δt 为敌目标到鱼雷发射出去的时间间隔; v 为发现敌目标在 t 内的航速; $(\Delta \varphi, \Delta \theta)$ 为敌目标在 t 内空间坐标下航向变化量。

则有,

$$V_{\text{目标}} = \iiint_{\Omega} F(u, \varphi, \theta) v^2 t^2 \sin \theta d(u) d\varphi d\theta \quad (12)$$

5 UUV编队协同打击研究

由于现代战争任务需求复杂,单体UUV的性能指标很难达到最优化要求,而UUV又具有体积小、灵活机动等特点,因此UUV的作战使用一般采取编队协同的形式,且编队的规模一般都比较。UUV编队协同可以实现UUV节点间的信息共享、武器协同,拓展了UUV作战的空间分布、时间分布及功能分布^[4]。

1) UUV编队协同网

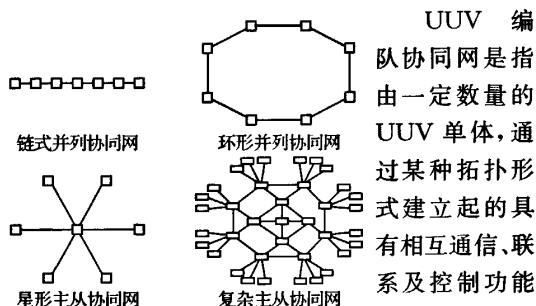


图4 几种编队协同网络结构

UUV编队协同网是指由一定数量的UUV单体,通过某种拓扑形式建立起的具有相互通信、联系及控制功能的特殊水下作战网络。根据

网络中每个UUV节点的性质功能一般有同构协同网、异构协同网、并列协同网、主从协同网等不同类型。

2) 编队协同对目标延时的影响

UUV打击时的目标延时主要包括:目标信息传递时间、信息处理时间、形成决策时间、武器发射时间、武器飞行时间。UUV编队协同可以通过编队信息共享来实现对目标信息的协同处理,并将处理结果传送到主UUV形成指挥决策,然后通过武器平台的协同控制来打击目标,有效地减少目标延时中的信息处理时间。UUV编队协同对目标延时的其他环节的影响不明显,在这里不予考虑。

设单UUV目标信息处理的时间为 t_c ;编队协同打击时、目标信息处理时间为 $t_{c\text{编}}$ 则有,

$$t_{c\text{编}} = \max(t_a + t'_i) \quad (13)$$

式中, $i=1, 2, \dots, m$, m 为编队规模,

$$t_a = t_a(k_i, v_i) \quad (14)$$

式中, t_a 为第 i 艘 UUV 信息处理时间; t'_i 为第 i 艘 UUV 所处理信息的传递时间; k_i 为第 i 艘 UUV 所处理信息占总信息的权重系数; v_i 为第 i 艘 UUV 的信息处理速度。

由上可得, 编队协同时目标延时的缩减值为:

$$\Delta T = t_c - \max(t_a + t'_i) \quad (15)$$

3) 编队协同对可攻击时间窗口的影响

以在时间窗口内 UUV 可发射武器的数量为衡量可攻击时间窗口的指标, 分析式(7)可以看出, 在 UUV 编队协同打击方式下, 对单 UUV 时间窗口因子的影响如表 1 所示。

表 1 单 UUV 时间窗口因子的影响效果

窗口因子	t_1	t_2	t_3	t_4	T	$T_{lose} - T_{find}$
影响效果	↓	↓	→	→	↓	↑

因此通过编队协同, 单 UUV 可发射武器数量可以得到提高, 明显增强打击的时敏效果。

同时, 可以计算出多 UUV 对敌目标同时攻击时的发射鱼雷数量:

$$N = \sum_{i=1}^m k_i n_i = \sum_{i=1}^m \left(\text{Mod} \left[\frac{T_{lose} - T_{find} - T_i}{\Delta T_{attack}} \right] + 1 \right) \quad (16)$$

4) 编队协同对敌目标的毁伤概率的影响

由公式(9)可得, 编队协同时影响对敌目标毁伤概率的主要因素为鱼雷发射后发现敌目标的概率 p_f 以及可发射鱼雷总数 n 。设:

$$P_f = P_f(T, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3) \quad (17)$$

式中 $T, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 分别代表目标延时、目标运动要素误差、传感器节点测量误差以及信息处理过程产生的误差。由于 UUV 编队协同影响 p_f 的主要因素为时间延时 T , 因此有,

$$P_{f\text{编}} = P_{f\text{编}}(T - \Delta T, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3) \quad (18)$$

综上可得, 编队协同时对敌目标的毁伤概率模型为:

$$\begin{cases} P_{h\text{编}} = 1 - \left(1 - \frac{P_{f\text{编}}}{\omega} \right)^N \\ = 1 - \left[1 - \frac{P_{f\text{编}}(T - \Delta T, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3)}{\omega} \right]^N \\ N = \sum_{i=1}^m k_i n_i \\ = \sum_{i=1}^m \left(\text{Mod} \left[\frac{T_{lose} - T_{find} - T_i}{\Delta T_{attack}} \right] + 1 \right) \end{cases} \quad (19)$$

5) 编队协同打击效果的双目标规划

UUV 时敏打击的效果主要由两个方面来表示: 可攻击的时间窗口, 可以等效处理为可发射武器数量 N ; 打击的精度(设为 P), 具体表现为武器发现目标的概率以及各处理环节的精确度。

对于可攻击时间窗口来讲, 为提高可发射武器的数量, 需要尽可能的缩减攻击的每个环节的耗时量; 另一方面, 为了提高打击总的精度, 则需要提高每个环节的精确度, 而在一定的硬件条件下, 各环节精确度的提高在一定程度上是以耗时的增加来获取。因此, UUV 实施时敏打击时, 需要同时考虑以上两个目标因素^[5]。可用公式表示为:

$$\begin{cases} V - \max[f_1(t), f_2(t)]^T \\ s. t. \sum_{i=1}^n t_i \leq (T_{lose} - T_{find}) \\ t_1, t_2, \dots, t_n, \geq 0 \end{cases} \quad (20)$$

其中, $f_1(t) = N$ 为可发射武器数量; $f_2(t) = P$ 为打击精度; $t = (t_1, t_2, \dots, t_n)^T$, t_i 为每一个环节消耗的时间; $V - \max$ 表示求向量最大值。

6 提高 UUV 时敏打击效果的途径

1) 提高编队协同打击能力。UUV 编队协同可以实现编队内部信息的协同处理, 协同决策, 以及武器平台的协同使用。UUV 编队协同时, 可采取异构网的形式, 为不同功能类型的 UUV 指派相应的任务, 充分发挥不同 UUV 的功能优势, 以提高编队的整体作战效能。

2) 增强后方兵力的支持。随着军事领域各项技术的发展, 单一兵种作战的形式已无法满足现代化战争的需求。UUV 在对目标实施打击时, 也应充分发挥我海军后方兵力的作用, 为 UUV 提供各种数据支持, 减少 UUV 的负担, 从而提高时敏打击的效果。

3) 减少打击中间环节以及提高各环节处理速度和精度。通过本文可以看出, UUV 打击各个环节的处理对整体作战效能起着重要作用。通过技术处理以及环节的衔接处理, 可以提高各个环节的效率以及简化或去除一些不必要的环节。

7 结语

目前, 我海军对军用 UUV 的作战使用研究正处于起步阶段, 对相关作战领域的理论研究还是当前的一个主要任务。UUV 时敏打击是未来我水下作战力量的重要组成部分, 本文所做的工作对我军

(下转第 99 页)

图像经两种算法压缩重构后的峰值信噪比。仿真结果如下:1)从图 3 可以看出,SPIHT 算法在小波分解层数是 3 时,压缩性能降低很多,但是,本文算法降低了原始算法性能损失的一半,压缩性能明显好于 SPIHT 算法。2)从图 4 可以很清楚看出,当采用 $T/2$ 阈值时,峰值信噪比曲线有点波动,当换为 T 阈值时,波动曲线就消失了。而且本文算法不需要复杂的计算,因为它们用不同的阈值进行分类初始子带系数和新的像素,但是与 SPIHT 算法相比,本文算法编码和解码时间要稍长一些,这主要是因为编码和解码时要存储更多的信息。

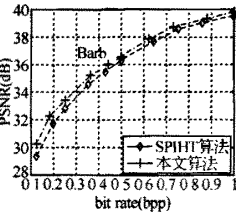


图 3 Barb 图像经 2 种算法
重建图像的 PSNR 值曲线

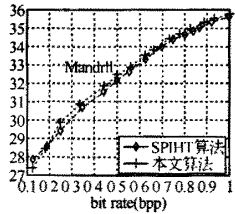


图 4 Mandrill 图像经 2 种算
法重建图像的 PSNR 值曲线

6 结 语

本文分析了图像压缩的小波基和小波分解层数的选取,在研究经典 SPIHT 算法的基础上,提出了一种改进的 SPIHT 编码算法。该算法利用可变阈值重新分类初始子带系数和 LIP 中的像素,通过 Matlab 对 Barb 图像和 Mandrill 图像进行仿真验证,结果表明该算法在压缩性能上要优于 SPIHT 算法,而且该算法程序运行速度较快、计算复杂度较低。

表 6 2 种图像在两种方法压缩后图像的峰值信噪比

图像	比特率 /bpp	PSNR/dB		
		SPIHT	本文算法	信噪比的变化
Barb	1.0	39.6	39.8	0.2
	0.5	36.3	36.5	0.2
	0.25	32.8	33.3	0.5
	0.125	29.3	30.2	0.9
Mandrill	1.0	35.6	35.7	0.1
	0.5	32.2	32.4	0.2
	0.25	29.4	29.8	0.4
	0.125	27.8	27.4	-0.4

参 考 文 献

[1] Hong, E. S., Ladner, R. E. Group testing for image compression[J]. IEEE Trans Image process, 2002, 11 (3):901~902

[2] Usevitch, B. E. A tutorial on modern lossy wavelet image compression[J]. IEEE Signal process, 2001, 18 (5):22~25

[3] Kim, K. L, Ra, S. W. Performance improvement of the SPIHT coder[J]. IEEE Image Communication , 2004,19(4):29~36

[4] Shapiro, J. M. Embedded image coding using zero-trees of wavelet coefficients[J]. IEEE Trans Signal Process, 1993,40:3445~3462

[5] Said, A, Pearlman, W. A. A new fast and efficient image coded based on set partitioning in hierarchical trees[J]. IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology ,1996,6(6):243~250

[6] 陈淑珍,刘治华. IWT 在图像压缩中几个主要问题的研究[J]. 武汉大学学报,2002,48(5):617~620

(上接第 56 页)

以后 UUV 的实际作战使用具有一定的理论参考意义。文中通过对 UUV 时敏打击效能指标的分析,得出了 UUV 编队协同打击的一般作战优势以及提高编队协同时敏打击效果的一般途径。编队协同作战是未来 UUV 时敏打击的主要形式,是我海军下一步的主要研究方向之一。

参 考 文 献

[1] DoD, The Navy Master Plan[R]. 2004,11,9

[2] 李敏勇,孙胜春. 猎击时敏目标的作战机理分析[J]. 情报指挥控制系统与仿真技术,2004,(4)

[3] 陈建华. 舰艇载武器装备及其战斗使用[M]. 海潮出版社,2006,10

[4] 许真珍,封锡盛. 多 UUV 协作系统的研究现状与发展[J]. 机器人,2007,(3)

[5] 张最良,李长生,赵文志. 军事运筹学[M]. 军事科学出版社,1992,10