

## 基于独立成分分析的舰船气泡尾流后向散射光信号处理

万俊<sup>1</sup>, 张晓晖<sup>1</sup>, 饶炯辉<sup>1</sup>, 梁瑞涛<sup>2</sup>

(1. 海军工程大学 兵器工程系, 湖北 武汉 430033; 2. 92060 部队, 辽宁 旅顺 116000)

**摘要:** 光尾流自导鱼雷激光探测系统所获取的信号是水体和舰船气泡尾流共同产生的后向散射光信号, 从该信号中提取出舰船气泡尾流的信息是光尾流自导鱼雷的关键技术。由于水体所产生的后向散射光信号强度大于舰船气泡尾流所产生的后向散射光信号, 两个信号在时域和频域里的特征又十分接近, 因此难以用传统滤波方法将其分离以提取有用的尾流信息。提出了采用盲源分离和独立成分分析的方法来处理激光探测系统所获取的信号, 研究了盲源分离的算法, 编制程序对课题组在激光探测舰船尾流海上试验所获取的数据进行了计算, 结果表明: 该方法可在不同探测条件下有效地将舰船气泡尾流场所产生的后向散射光信号从原始信号中提取出来, 有利于系统正确判别舰船尾流及其特征。

**关键词:** 海洋光学; 舰船尾流; 独立成分分析; 后向散射; 信号处理

**中图分类号:** TN911.72 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)01-0244-07

## Processing of backscattering signal of warship wake flow based on independent component analysis

Wan Jun<sup>1</sup>, Zhang Xiaohui<sup>1</sup>, Rao Jionghui<sup>1</sup>, Liang Ruitao<sup>2</sup>

(1. Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. No. 92060 Unit of PLA, Lvshun 116000, China)

**Abstract:** The signal obtained by self-guided torpedo by laser is the backscattering signal of warship wake flow and sea water, from which extracting the backscattering signal of warship wake flow is the key point of realizing the self-guided torpedo by laser. While the backscattering signal of water constantly influences the detection of backscattering optical signal of warship wake flow, and it is stronger than the needed signal, the characteristics of the two signals in time domain and frequency domain are very similar. So the separation of these two signals can not be realized with the traditional method effectively. The blind source separation and independent component analysis theory were used to process the signal obtained by laser detection system, and the experiment data was calculated by the software complied in the independent component analysis ideology. The results show that this method can extract the backscattering signal of wake flow from the original signal effectively in different condition, which can help the system judge the warship wake flow and its characteristics.

**Key words:** ocean optics; warship wake flow; independent component analysis; backscattering; signal processing

收稿日期: 2012-05-12; 修订日期: 2012-06-15

基金项目: 总装备部十一五仿真预研项目(513040203)

作者简介: 万俊(1985-), 男, 博士生, 主要从事水下激光探测方面的研究。Email: wanjun198524@163.com

导师简介: 张晓晖(1965-), 女, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事军用光电工程等方面的研究。Email: zhangxiaohui505@vip.sina.com

## 0 引言

舰船在航行过程中,由于螺旋桨空化、舰船壳体侧壁与水体摩擦、水中所溶空气或舰船运动时卷入水中的空气因搅动而破碎等因素的影响,不可避免地在其尾部产生一个包含大量不同尺寸气泡的区域,这就是舰船气泡尾流<sup>[1]</sup>。如果能对舰船航行时产生的气泡尾流进行探测和跟踪,则可以为鱼雷提供一种新的自导手段。目前已有许多国家装备了基于气泡尾流声学效应的声尾流自导鱼雷。与声波相比,光波的波长短,探测精度高,在目前已出现大量针对声尾流自导鱼雷的对抗和防御技术措施的情况下,研究基于气泡尾流光散射特性的光尾流自导鱼雷及其相关技术非常重要。

使用激光探测舰船气泡尾流并从获取的后向散射光信号中提取尾流信息是目前光尾流自导鱼雷研究领域的热点问题,有不少研究机构和人员在这一方面进行了研究。张晓晖等<sup>[2]</sup>在分析舰船气泡尾流空间分布的基础上研究了激光探测舰船气泡尾流的机理,并讨论了实现鱼雷激光尾流制导的几种技术途径。饶炯辉等<sup>[3]</sup>依据参考文献[2]中讨论的技术途径,设计研制了基于后向散射的气泡尾流探测系统,使用该实验系统分别获得了有尾流和无尾流时的后向散射信号波形,验证了基于后向散射的光尾流探测方法的可行性。张建新等<sup>[4]</sup>利用小波变换工具通过对散射光信号进行一维平稳小波去噪、小波变换密度估计、小波系数选取等方面的分析,对比了不同散射光信号的性质。苏丽萍等<sup>[5]</sup>在分析散射信号中各种噪声的基础上介绍了傅里叶变换和功率谱估计两种频域方法在处理散射光信号中的应用。

目前该领域研究大都局限于对气泡的散射光信号进行滤波去噪处理或是与水体的后向散射信号进行比较,以提供判别尾流存在的定性依据,难以判别尾流并获取气泡浓度及尾流深度等相关信息。因此文中重点研究如何从激光探测系统所获得的同时包含水体和舰船气泡尾流的后向散射光信号中提取出只包含舰船气泡尾流信息的后向散射光信号,为鱼雷自导控制系统提供舰船尾流信息。

## 1 舰船气泡尾流后向散射光探测原理

光尾流自导鱼雷探测舰船气泡尾流的原理如图1

所示。在海水中航行的鱼雷垂直向海面发射脉冲激光,同时接收该脉冲激光的后向散射光信号。如果激光脉冲向海面的行进路径上没有舰船气泡尾流,则探测系统所接收的信号是水体的后向散射光信号;如果激光传输路径上存在气泡尾流,则除了水体的后向散射信号外,所接收的信号中还包含了气泡尾流的后向散射信号。因此通过处理该接收信号能够判别尾流的存在并提取尾流相关信息。

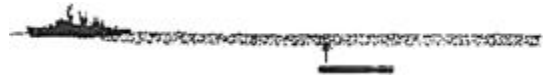


图1 光尾流自导鱼雷工作原理示意图

Fig.1 Principle of self-guided torpedo by laser

作者所在的课题组设计了探测舰船气泡尾流后向散射光信号的试验样机。其结构如图2所示,激光光源采用了高峰值功率、窄脉冲宽度、波长为532nm的YAG倍频固体激光器;接收光学系统采用了大口径、小视场的望远系统;高速光电探测器采用了大光敏面的光电倍增管;为了减小脉冲信号的失真,电信号的放大使用了高速宽带放大器,并使用了采样频率为5GHz的示波器来采集信号;采集的数据传输给上位机进行处理;控制通信模块用于远程控制探测系统的工作时序和工作参数,并实时监测系统的工作状态。

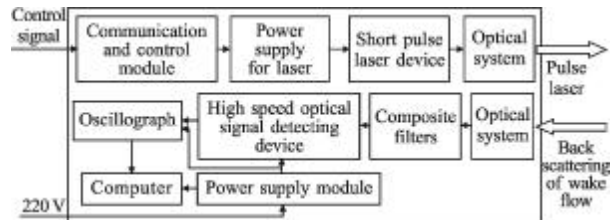


图2 后向散射光探测试验样机

Fig.2 Construction of backscattering optical signal detection system

## 2 舰船气泡尾流后向散射光信号特征分析

课题组在某海域进行了舰船气泡尾流探测试验,对大型船只驶过该试验样机上方产生的气泡尾流进行探测所获取的几种具有代表性的信号如图3~图6所示。图中信号是样机中光电探测器所探测到的后向散射光信号强度随时间的变化波形。由于样机使用的光电倍增管是负电平有效,所以获取的后向散射光信号的波形都呈现“负峰”的形状。示波器的采样频率为5GHz,每次采样时间为500ns,可获取2500个数据。

图 3~图 5 分别为舰船气泡尾流后向散射光信号较强、较弱及适中等时刻探测试验样机所获取的信号;图 6 是样机上方没有气泡尾流时探测得到的以水体后向散射光信号为主的背景信号。图 3~图 5 中除了海水的后向散射光信号,还存在尾流的后向散射光信号,它叠加在水体后向散射信号之上,波峰位置在海水后向散射光信号波峰位置之后。该信号在图 3 和图 5 中可以明显辨认,而图 4 中的尾流信号十分微弱,易被噪声掩盖。此外,连续多次探测得到的尾流信号的幅度是无序变化的,这符合舰船尾流气泡分布随机变化的特征。

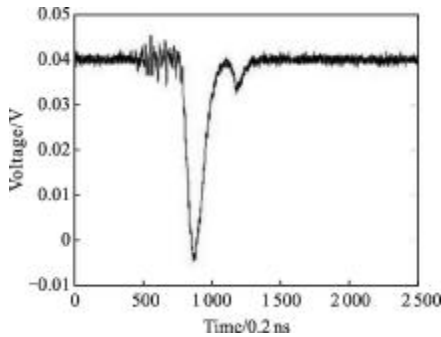


图 3 尾流信号较强时刻的接收信号

Fig.3 Received signal when the wake flow signal is strong

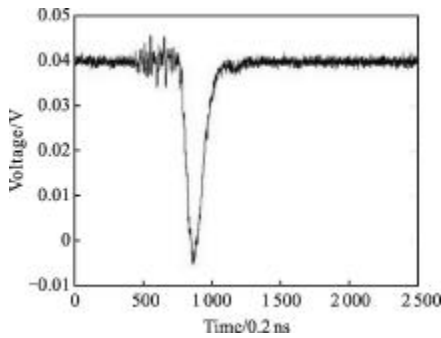


图 4 尾流信号较弱时刻的接收信号

Fig.4 Received signal when the wake flow signal is weak

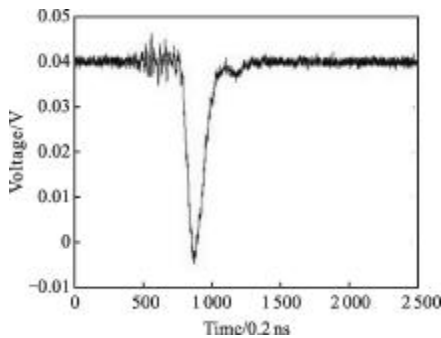


图 5 尾流信号适中时的接收信号

Fig.5 Received signal when the wake flow signal is moderate

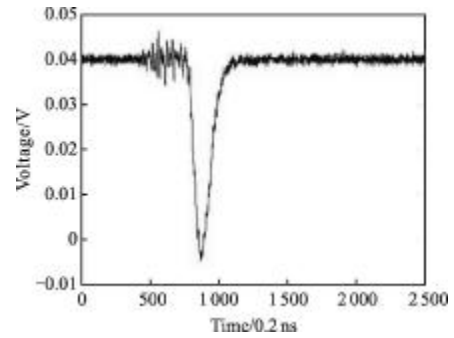


图 6 无尾流时的背景信号

Fig.6 Background signal without wake flow signal

根据分析,光电探测器接收的信号可以写成公式(1)或公式(2)的表示形式:

$$x_m(t) = x_m^w(t) + x_m^n(t) \quad (1)$$

$$x_m(t) = x_m^w(t) + x_m^s(t) + x_m^n(t) \quad (2)$$

式(1)中: $x_m(t)$ 为水中没有气泡尾流时的接收信号,式(2)中 $x_m(t)$ 为水中有气泡尾流时探测到的后向散射光信号。式中信号的下标 $m$ 表示是第 $m$ 次探测获取的数据,而 $t$ 表示一次探测过程中的时间变量。 $x_m^w(t)$ 表示第 $m$ 次探测获取的信号中的水体后向散射光信号, $x_m^s(t)$ 表示第 $m$ 次探测获取的信号中的气泡尾流后向散射光信号, $x_m^n(t)$ 是噪声信号。所获取信号中的噪声主要是呈高斯分布的电路噪声和 YAG 激光器泵浦和调 Q 时的强烈干扰。该干扰信号发生在水体后向散射信号之前,在波形上可以明显看到。

要定量获取关于舰船气泡尾流的气泡浓度和尾流深度等信息就必须要从包含水体和舰船气泡尾流的后向散射光信号中提取出尾流后向散射光信号。传统的信号处理方法主要是将信号从时域变换到频域等变换域,然后在变换域上依据各信号的特征进行信号分离,但水体与气泡尾流的后向散射光信号都是水中粒子对入射激光散射的结果,频域和时域特征接近,通过传统滤波方法难以实现水体与尾流的后向散射光信号的分离。参考文献[6]中提出直接使用有无尾流时的信号数据相减来得到尾流信号。但当气泡尾流的后向散射光信号微弱时,就会混和在噪声中很难提取。在噪声较大的情况下该方法易产“漏警”误判。并且该方法不太适合于高速航行的鱼雷穿过气泡尾流或在气泡尾流区内做蛇形机动等实际战术应用。因此目前尚没有一种能有效提取气

泡尾流信号的方法。

### 3 舰船气泡尾流后向散射光信号处理

#### 3.1 独立成分分析算法

独立成分分析(Independent Component Analysis)是 20 世纪 90 年代发展起来的一种基于盲源分离(Blind Source Separation)思想的统计信号处理方法,它是在源信号和传输通道参数未知的情况下,利用各种成分统计特征的差异,将由相互独立的源信号混合而成的信号分离为各自独立的信号分量<sup>[7]</sup>。它不需要知道信号源和各种干扰源的特征,只假设它们是统计独立的,就可以对来自不同信号源的混合信号进行分离,是一种典型的盲源分离方法。

独立成分分析的一般模型为:

$$X(t)=AS(t) \quad (3)$$

式中: $X(t)=[x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t)]^T$  为  $M$  维观测信号向量; $S(t)=[s_1(t), s_2(t), \dots, s_N(t)]^T$  为  $N$  维源信号向量,即存在  $N$  个独立信号源; $A$  是  $M \times N$  阶满秩混合矩阵,且  $M \geq N$ 。独立成分分析的目的就是在信号源  $S$  和混合矩阵  $A$  均未知的条件下,通过  $X$  寻找变换矩阵  $W$ ,使得  $X$  通过  $W$  后得到的输出  $Y$  是信号源  $S$  的估计,即:

$$Y(t)=WX(t)=WAS(t) \approx S(t) \quad (4)$$

式中: $Y(t)=[y_1(t), y_2(t), \dots, y_N(t)]^T$  为信号源的估计。理想情况下,当  $M=N$  时, $W=A^{-1}$ , $Y(t)=S(t)$ 。而一般情况下,由于公式(3)中的原始信号  $S(t)$  和混合矩阵  $A$  都是未知的,因此难以求得分析解,都是通过一些假设和约束条件,求得一个变换矩阵  $W$ ,使得经过公式(4)得到的输出向量  $Y(t)$  是源信号向量  $S(t)$  的最优逼近。

ICA 的一个重要步骤就是构造或选取度量信号独立性的函数。由公式(4)可知最终计算得到的  $Y$  的每一个分量实际是向量  $S$  中各源信号的线性组合,而假设各个源信号之间是相互独立的,根据中心极限定理,多个独立随机变量的混合信号更趋近于高斯分布,即  $Y$  的每一个分量的高斯性比任一源信号都强,除非它刚好就是源信号中的一个,只有在该情况下  $Y$  的高斯性才最弱。因此,可以使用输出信号  $Y$  的非高斯性作为信号之间独立性的度量,ICA 问题的求解就转化为使得最终结果  $Y$  非高斯性最

大化的问题。

目前主要使用的非高斯性度量函数包括峭度(kurtosis)和负熵(negative entropy)。Aapo Hyvarine<sup>[7]</sup>提出了负熵的几种近似计算,并在此基础上提出了基于负熵的快速不动点算法,即 FastICA 算法<sup>[8]</sup>,FastICA 固定点迭代法虽然收敛速度很快,但分离精度稍差,每次得到的结果还存在一定的随机性。作者于另一篇文章中<sup>[9]</sup>在介绍独立成分分析原理和相关算法的基础上,引入了待估计信号的信噪比参数,将其与负熵相结合,作为信号分离独立性的度量函数,提高了分离精度,并推导了该度量函数的向量梯度,提出了一种改进的 ICA 算法,算法的流程如图 7 所示。

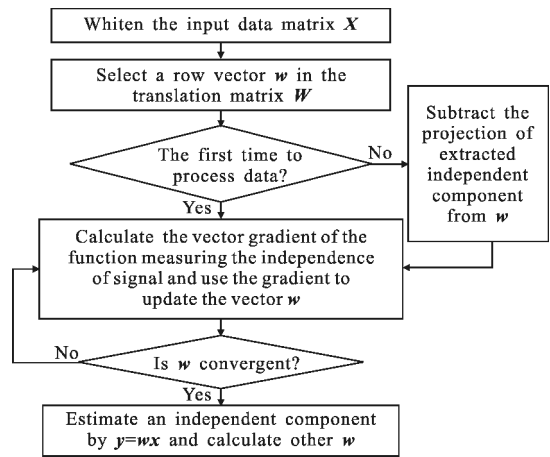


图 7 独立成分分析计算流程

Fig.7 Calculation process of ICA

#### 3.2 基于独立成分分析的后向散射光信号处理

根据前面的分析,水体的后向散射光信号与舰船气泡尾流的后向散射光信号的频域和时域特征十分接近,难以用传统滤波方法分离,但是这两个信号作为水中不同粒子对入射激光散射的结果,本身是相互独立的,是不同信号源所产生的信号,满足了利用各信号统计特征的差异进行处理的独立成分分析的使用要求。所以文中采用基于盲源分离思想的独立成分分析算法来处理所接收到的后向散射光信号数据,以实现水体信号与舰船气泡尾流信号的分离。

文中的基本思想是:将探测器多次探测接收到的信号数据模拟多个独立探测器对目标探测所接收到的信号数据,以构成原始数据矩阵,使用上述 ICA 算法进行分离。

但是,发现接收到的信号随机出现了信号时间起点相对漂移现象,这一现象使得分离的效果大大降低。此外,ICA 算法对于信号中的高斯噪声也无法有效滤除,必须增加滤波处理以改善信号质量。因此,对所获取到的后向散射光信号处理主要包括信号时间起点调整、独立成分分析运算和滤波去噪三部分。

### 3.2.1 原始数据的时间起点调整

根据分析,造成信号数据时间起点随机漂移现象的原因主要是使用电光调 Q 信号触发激光器产生脉冲激光时,晶体光电效应和激光脉冲的形成会产生 1~2 ns 的随机波动<sup>[10]</sup>。另外,调 Q 信号自身上升沿的斜率是有一定差别的,使得达到触发阈值条件的时间有一定的随机波动,从而产生时间起点的相对漂移。这是系统存在的固有偏差,硬件上很难消除。这一现象极大地影响了 ICA 算法对信号数据提取处理的结果,因此必须首先调整各次测量数据的时间起点。文中使用最小二乘相减法来调整散射光信号的时间起点。

设某一时刻接收到的后向散射光信号数据序列为  $x(i)$ ,之前一次探测所接收到的信号数据序列为  $x'(i)$ ,将  $x'(i)$  在时域上左、右平移,分别得到表达式为:

$$x'(i, n) = \begin{cases} x'(i), & 1 \leq i < n \\ x'(i-n), & n \leq i \leq N \end{cases} \quad (5)$$

$$x'(i, n) = \begin{cases} x'(i+n), & 1 \leq i < N-n \\ x'(i), & N-n \leq i \leq N \end{cases} \quad (6)$$

式中: $n$  为信号数据平移的长度; $N$  为采集的信号数据总长度。以  $x(i)$  为基准信号,计算平移后的信号  $x'(i, n)$  与基准信号  $x(i)$  的平方差  $e(n)$ :

$$e(n) = \sum_{i=1}^N [x(i) - x'(i, n)]^2 \quad (7)$$

寻找  $n_0$  使得  $e(n_0)$  达到最小,以此来调整接收到的后向散射光信号的时间起点,消除信号时间起点相对漂移对算法处理结果的影响。

### 3.2.2 独立成分分析与滤波去噪

在实际战术应用中,由于鱼雷航速很快,几次连续探测所获取的信号也并不能看作是几个探测器同时对同一目标水域探测所得到的信号。在这种特定情况下,就不太适合使用连续接收到的信号数据构成原始数据矩阵并使用 ICA 算法进行分离。但是在同一海域内,由于水体的后向散射性质是稳定的,可

使用没有出现气泡尾流时的背景信号数据来共同构成原始数据矩阵。这种情况在 ICA 数学模型中可理解为部分探测器未探测到某一目标信号的特殊情况,仍然满足 ICA 算法的使用条件。

因此,将未出现舰船气泡尾流时光电探测器接收到的两组水体的后向散射光信号数据和即刻接收到的包含水体与舰船气泡尾流的后向散射光信号数据作为算法的输入数据,使用时间起点调整算法处理,得到 ICA 算法的输入数据矩阵  $X(t)=[x_1(t), x_2(t), x_3(t)]^T$ ,经过独立成分分析运算之后,便可以得到源信号的估计值  $Y(t)=[y_1(t), y_2(t), y_3(t)]^T$ 。

由于 ICA 算法无法滤除高斯噪声,所以还要继续对源信号的估计值  $Y(t)$  使用进行滤波处理,文中考虑到算法执行的时间不能太长,因此使用较简单的滑动平均滤波器滤除噪声。

## 4 舰船气泡尾流海上试验数据验算与分析

文中使用图 3~图 5 的海上试验数据来对算法可行性进行验证。将存在尾流时的探测信号与无气泡尾流时两次探测的背景信号来模拟 3 个传感器探测目标所获取的信号,背景信号使用图 6 中的数据和另一组背景信号数据,如图 8 所示。

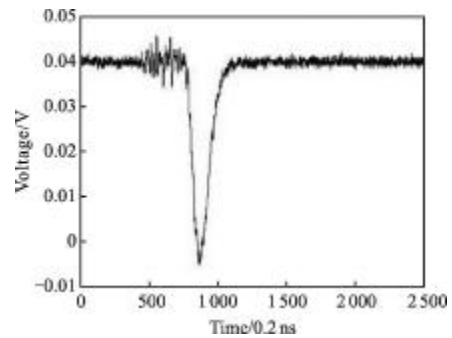


图 8 无尾流时的背景信号

Fig.8 Background signal without wake flow signal

对比这两个背景信号的波形可发现它们中的水体后向散射光信号基本一致,只是随机噪声部分不相同。另外从探测到的信号还发现水体的后向散射信号与气泡尾流的后向散射信号都集中在第 300 点至第 1500 点这段时间内,其他时间段的信号都是电路中的随机干扰噪声。因此,文中从探测获取的信号数据中截取第 300 点至第 1500 点这段时间内的数据进行处理,以减少算法的运算量,节省处理时间。

使用信号数据的时间起点调整算法和 ICA 算法,对探测获取的信号数据进行处理。经过迭代运算,分离矩阵  $W$  中的各个分离向量  $w$  收敛,得到水体和气泡尾流后向散射光信号以及部分噪声信号。图 9~图 11 分别是图 3~图 5 的信号数据经过处理得

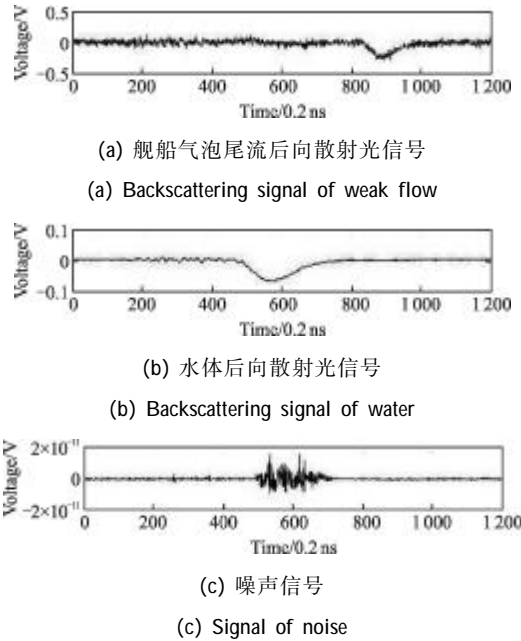


图 9 图 3 中的信号数据运算结果

Fig.9 Calculation result of the data in Fig.3

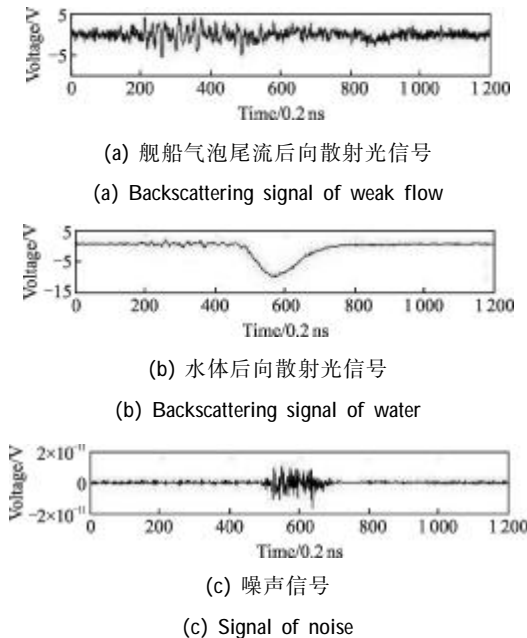


图 10 图 4 中的信号数据运算结果

Fig.10 Calculation result of the data in Fig.4

到的结果,算法不仅将水体的后向散射信号与尾流信号分离,并且把信号中的一个较强的干扰噪声也

作为一个独立成分分离出来。各图中,图(a)为舰船气泡尾流的后向散射光信号;图(b)为水体的后向散射光信号;图(c)为噪声信号。图中的水体后向散射信号与舰船气泡尾流的后向散射信号幅值发生了变化,这是由于 ICA 算法是依据信号间独立性的标准来完成处理的,因而信号乘以某个量值而改变幅度或极性并不会影响到信号间的独立性。

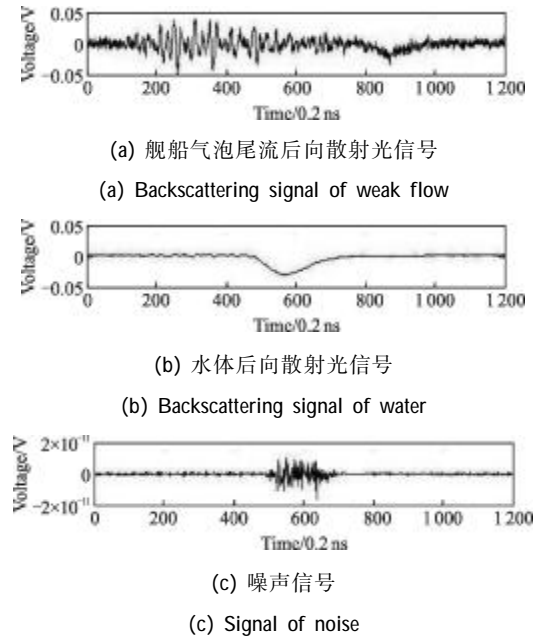
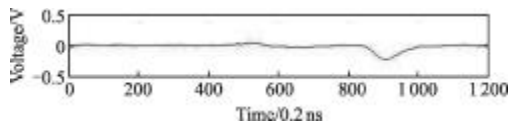


图 11 图 5 中的信号数据运算结果

Fig.11 Calculation result of the data in Fig.5

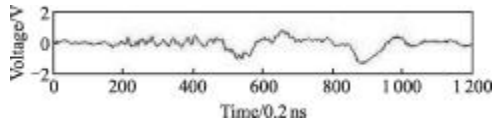
图 9(a)中的尾流信号十分明显,容易辨认,图 11(a)中的尾流信号也可辨认,但其中仍混有大量噪声,而图 10(a)中尾流信号较微弱,易被噪声湮没而影响鱼雷自导系统对气泡尾流的判决与信息提取。

继续使用一个宽度为 40 的滑动平均滤波器对图 9~图 11 中的尾流后向散射光信号数据进行处理,得到的结果如图 12 所示。从中可以看出原先信号中的噪声被有效抑制,气泡尾流的后向散射光信号的波形较处理前清晰。图 12(b)的波形是图 10 中尾流信号经滤波得到的结果,即试验中尾流较弱时的接收信号最终处理结果。可以看到波形中存在两个峰值,其中第一个峰值是由噪声累加产生的,第二个峰值就是气泡尾流信号。从该结果也可看出,当原始输入信号含有大量噪声并且源信号微弱时,ICA 算法的效果会受到影响,这就需要使用滑动平均滤波器或是其他效果更佳的滤波器对输入信号进行滤波去噪,以提高 ICA 算法的分离效果。



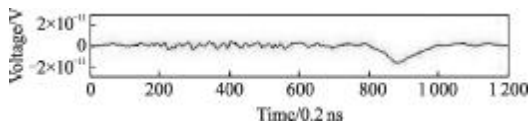
(a) 图 9 的数据处理结果

(a) Processing result of data in Fig.9



(b) 图 10 的数据处理结果

(b) Processing result of data in Fig.10



(c) 图 11 的数据处理结果

(c) Processing result of data in Fig.11

图 12 滑动平均处理结果

Fig.12 Calculation result of sliding averaging

## 5 结 论

从探测获取的包含有舰船气泡尾流后向散射光信号与水体后向散射光信号中实现二者分离,以提取气泡尾流信息一直是实现激光尾流自导鱼雷的难点,主要原因是这两个信号的频域和时域特征接近,且水体后向散射光信号远强于气泡尾流的后向散射光信号,各种背景噪声较复杂。而目前的研究大都集中于信号的滤波处理或是不同情况下信号的对比判断分析上,尚没有能够分离出仅包含尾流信号数据的研究成果。文中在分析后向散射光信号特征并简要介绍独立成分分析基本原理的基础上,使用最小二乘相减法并结合信噪比参数的独立成分分析算法对水体后向散射光信号和气泡尾流的后向散射光信号进行分离。通过编写程序计算海上试验所获取的信号数据,验证了文中方法的有效性,为判别尾流的存在并提取尾流的相关信息提供依据。由于得到的信号中仍混有噪声,会对判决结果产生影响,因此如何保护微弱信号以及设计高速硬件电路实现文中方法都有待进一步研究。

## 参考文献:

[1] Ji Bangjie, Zhou Deshan, Zhang Jiansheng. Control and guide torpedo based on optical effect of ship wakes[J]. *Torpedo Technology*, 2000, 8(3): 40-43. (in Chinese)  
冀邦杰,周德善,张建新.基于舰船尾流光效应的制导鱼

雷[J]. *鱼雷技术*, 2000, 8(3): 40-43.

- [2] Zhang Xiaohui, Lei Xuanhua, Rao Jionghui, et al. Study of homing means for laser-wake-homing torpedoes [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(5): 494-496. (in Chinese)  
张晓晖,雷选华,饶炯辉,等.舰船尾流激光制导方法的研究[J]. *激光技术*, 2005, 29(5): 494-496.
- [3] Rao Jionghui, Ge Weilong, Zhu Donghua, et al. Ship wake detecting system based on backscattering light of bubbles[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2008, 20(4): 62-65. (in Chinese)  
饶炯辉,葛卫龙,朱东华,等.基于后向散射的光尾流探测系统[J]. *海军工程大学学报*, 2008, 20(4): 62-65.
- [4] Zhang Jiansheng, Lin Shuyu, Miao Runcai, et al. Wavelet analysis on managing of scattered optical semaphore from bubble films[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(3): 557-564. (in Chinese)  
张建生,林书玉,苗润才,等.小波分析在气泡幕散射光信号处理中的应用[J]. *光子学报*, 2007, 36(3): 557-564.
- [5] Su Liping, Zhao Weijiang, Ren Deming, et al. Processing methods for bubble laser scattering signals in frequency domain [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S): 222-225. (in Chinese)  
苏丽萍,赵卫疆,任德明,等.气泡激光散射信号的频域处理方法[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(增刊): 222-225.
- [6] Liang Ruitao. Study on judgment and identification method of the ship bubbles wake backscattering light signal [D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2009. (in Chinese)  
梁瑞涛.舰船气泡尾流后向散射光信号判识方法的研究[D].武汉:海军工程大学,2009.
- [7] Aapo Hyvarinen, Juha Karhunen, Erkki Oja. Independent Component Analysis [M]. Translated by Zhou Zongtan. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007. (in Chinese)  
Aapo Hyvarinen, Juha Karhunen, Erkki Oja.独立成分分析[M].周宗潭等译.北京:电子工业出版社,2007.
- [8] Aapo Hyvarinen. Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis [J]. *IEEE Transactions on Neural Network*, 1999, 10(3): 626-634.
- [9] Wan Jun, Zhang Xiaohui, Rao Jionghui, et al. A novel ICA algorithm using signal noise ratio [J]. *Control and Decision*, 2012, 27(9): 1376-1380. (in Chinese)  
万俊,张晓晖,饶炯辉,等.一种结合信噪比的独立成分分析算法[J]. *控制与决策*, 2012, 27(9): 1376-1380.
- [10] Zhang Xiaohui, Li Shushan. *Laser and Its Application*[M]. Wuhan: Naval University of Engineering Press, 1999. (in Chinese)  
张晓晖,李树山. *激光及其应用*[M].武汉:海军工程大学出版社,1999.