

引用格式:梅风华,侯旺.非声探潜技术在航空尾迹探潜上的应用.[J].电光与控制,2017,24(7):62-65. MEI F H, HOU W. Application of non-acoustic submarine detection technology in aviation antisubmarine of trailing detection[J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(7):62-65.

## 非声探潜技术在航空尾迹探潜上的应用

梅风华, 侯旺

(海军装备研究院,上海 200436)

**摘要:** 主要介绍了非声探潜技术在航空尾迹探潜上的应用。通过对航迹尾流、气泡尾流、热尾流、生物尾流和磁尾流等潜艇尾迹的特征的阐述,针对不同的特征,分别给出了 SAR、激光雷达、红外辐射测温、光谱成像和低频磁异常探测等相应的非声探测技术。分析了各探潜方法的优缺点,以及与航空平台的结合点,展望了非声探测技术在航空尾迹探潜方面的应用前景。

**关键词:** 航空探潜; 非声探潜; 尾迹

**中图分类号:** TP79 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2017.07.013

## Application of Non-acoustic Submarine Detection Technology in Aviation Antisubmarine of Trailing Detection

MEI Feng-hua, HOU Wang

(Naval Academy of Armament, Shanghai 200436, China)

**Abstract:** This paper mainly introduces the application of non-acoustic antisubmarine detection technology in trailing detection of submarine by aerial platform. The characteristics of submarine trailing are presented, including track trailing, bubble trailing, thermal trailing, biology trailing, and magnetic trailing. According to their different characteristics, such non-acoustic detection technologies as SAR, laser radar, infrared radiation temperature measurement technology, hyper-spectral imaging and low-frequency magnetic anomaly detection technology are introduced. Analysis is made to the advantages and disadvantages of these non-acoustic technologies for submarine detection, and their potential application on aerial platform. Finally, expectation is made to the future application of the non-acoustic technologies in aviation antisubmarine of trailing detection.

**Key words:** aerial anti-submarine; non-acoustic anti-submarine technology; trailing

### 0 引言

随着潜艇降噪技术的发展,特别是具有水下高航速、高水平安静性以及强续航能力核潜艇的出现,传统声学探潜方式面临新的挑战。非声探潜手段应运而生,这种方法使用灵活,拥有与航空载机平台性能相关的动态探测能力,具有广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>。目前,非声探测技术已逐渐成为国际探潜领域研究的热点。主要包括雷达、多/高光谱、激光雷达、红外热成像和磁探仪等探潜技术,其中,多/高光谱探潜、激光雷达是近年来涌现的新型探潜技术。

对于海面状态和通气管、潜望镜状态的潜艇,反潜飞机/直升机一般采用传统的雷达、红外成像等常规手段进行探测;对水下航行的潜艇,反潜飞机/直升机可采用多/高光谱、激光雷达、红外热成像和磁探仪等非声探测手段实施探测<sup>[4]</sup>。

由于多/高光谱、激光、红外等主动或被动光源辐射的光线在水中传播时衰减严重,直接探测水下潜艇作用距离很有限(一般为几十米)<sup>[5-7]</sup>。为探测潜航较深的潜艇,近些年,国内外相关单位开始应用非声探测手段对潜艇水下航行时扩展到海面的尾流进行探测,从而探测到潜航较深的潜艇。

### 1 潜艇尾流特征简析

#### 1.1 航迹尾流

潜艇在水下航行时产生的内波、湍流和 Kelvin 尾

收稿日期:2016-11-29

修回日期:2017-04-14

作者简介:梅风华(1973—),男,江苏江阴人,高工,研究方向为航空电子、反潜技术。

迹与海底地形、海表面波相互作用,产生海表面波分布的局部异常,并扩展在海面上,形成较大面积的尾迹特殊波纹,称之为航迹尾流。有资料报道,在3~4级海况下,潜艇水动力尾迹在海面可以持续存在1~1.5 h,延伸区域可达15~25 km<sup>[8]</sup>。合成孔径雷达能够探测到这种特殊波纹,并在图像上显现出来。

### 1.2 气泡尾流

潜艇在航行时,由于螺旋桨推进器或者泵喷推进器在运转时使海水空化、粗糙艇体表面与水介质的相互作用、核潜艇内高温冷却水的排放等因素的影响,使得在潜艇尾部的海水中形成一条含有大量气泡的气泡幕带,通常称为气泡尾流,其中推进器空化是潜艇气泡尾流的主要来源。已有的研究表明,尾流中的气泡特别是小气泡在产生后并不马上上浮到海面,而是在湍流的影响下先渗透到尾流的下边界,再缓慢上浮<sup>[9-11]</sup>。相应地,当增加尾流的存在深度时,尾流中气泡的存在时间也将相应拉长。由于尾流中气泡的大小不同,它受到海水的压力、浮力、摩擦力等各不相同,较大的气泡迅速浮上海面破裂消失,很小的气泡很快地在海水中溶解,只有满足一定条件的一些微小气泡由于尾流中的湍流、搅动、有机薄膜的保护等因素的影响生存时间比较长。因此,潜艇气泡尾流中的微小气泡具有空间分布广、持续时间长的特点,其光学散射效应可维持更长时间,大约为数小时,技术上可利用探测尾流中微小气泡的光学散射特性实现探测潜艇尾流。

### 1.3 热尾流

潜艇自身是一个很大的红外热源,温度可比周围海水的温度高0.05℃以上;核潜艇航行时为了冷却核动力装置,要放出大量的温热尾流,它排出的热能使其身后的水温升高。国外学者估测,一台动力为190 kW反应堆的核潜艇每秒钟释放到海洋的热能多达4500万卡,平均为了产生190 MW的有用能量,需向海水中排出188 MW的热量,这些温热的海水将会以大约5 kn(1 kn=1.852 km/h)的速度向外排出,从而会使潜艇周围海水的温度升高大约0.2℃<sup>[6]</sup>;另一方面潜艇航行时,螺旋桨与海水的摩擦,艇体与海水的摩擦,机械摩擦所产生的热量以及潜艇其他的热辐射都会加热海水,使海水温度进一步升高。

潜艇热尾流排出后因其密度比周围水密度小受浮力作用上升,随着对流到达海面,并维持一段时间。热尾流在逐渐浮升过程中,其宽度也在不停地扩展,热尾迹与周围海水的温差大约为0.005~0.02℃之间<sup>[12]</sup>。

### 1.4 生物尾流

水下潜艇在航行时会干扰海水各层的生物场,从而形成生物光尾迹,此尾迹可达数百米甚至上千米;同

时,核动力装置所产生的热废水会使海水不同层内的浮游生物死亡,形成海洋色调特有迹象。据文献报道,生物尾流光学效应可维持数小时。

### 1.5 磁尾流

潜艇本身磁性或磁化导致的磁异常是恒定磁场(静磁场),而在海洋中运动的潜艇,由于其防腐蚀处理及海水扰动等原因,潜艇水下运动会产生轴频磁场、涡流磁场、尾流磁场等与潜艇特性有关的极低频磁场。

潜艇在航行过程中,由于螺旋桨转动引起轴系接触电阻发生周期性变化<sup>[13]</sup>,使得海水中腐蚀防腐电流也随之发生周期性脉动,即流过转轴的电流被周期性调制,产生周期性的轴频电场,从而在海水中耦合出极低频磁场,有良好的远场特性,在海水中可以传播很远的距离。

庞大的潜艇会对海水产生巨大的扰动,尤其是它所产生的海水尾流能延伸很长的距离,由于海水是一种导电的流体介质,这种海水流动也会在地磁场的作用下产生感应磁场。MADURASINGHE推导了下潜物体航迹引起的海水运动感应电磁场的理论表达式<sup>[3]</sup>,并进行了仿真分析,指出沿航迹10 km距离上可产生大于 $10^{-3}$  nT的磁场,频率为水下运动体的固有频率。

## 2 尾流探潜技术

尾流探潜技术是对潜艇在浅近海面航行时所产生的尾迹进行探测,对潜艇的航行轨迹进行定位,进而追踪到潜艇位置的探潜技术。根据被探测介质的不同又可细分为航迹尾流探潜、热尾流探潜、气泡尾流探潜、生物尾流探潜和“磁尾流”探潜等技术。针对不同的尾流,一般可采用SAR雷达成像、激光雷达、红外辐射测温、多/高光谱成像和低频磁异常探测等技术手段开展探测。尽管目前尚没有尾流探潜技术进入工程实用阶段的报道,但据理论研究估计,应用上述方法对潜艇探测距离可达1000 m以上<sup>[13-14]</sup>,有望大幅度提升航空反潜装备对水下目标的探测距离。

### 2.1 基于SAR的潜艇尾迹探测技术

潜艇水下航行会在海面产生明显航迹尾流,改变了海面粗糙度。不同的海面粗糙度对电磁波的后向散射特性不同,SAR雷达是一个灵敏度极高的小尺度波检波器,能够测量微尺度海表面粗糙度的微弱变化,可以实现对潜艇的水动力尾迹,尤其是内波、湍流尾迹的检测,进而完成潜艇的发现、跟踪和定位。SAR雷达探测潜艇尾迹是捕捉潜艇水下浅潜的内波、湍流引起的海面变化,不是探测潜艇本身。

多年来,美国、英国、法国等一直致力于研究SAR雷达探测海面尾迹技术,据有关资料报道,美国“长曲

棍球”SAR 侦察卫星能对最深至水下 45 m 航行的潜艇实施侦察,美国已经能够在近海小风速海况下找出潜航中的潜艇尾迹,正在研究任何海况下的星载 SAR 探潜新方法。

与红外遥感和蓝绿激光等探测手段会受到云层雨雾的制约不同,利用 SAR 雷达探测浅潜潜艇尾迹,不受气候天时影响,探测距离远、反潜方式灵活,是具有可行性的航空非声反潜新途径之一。

## 2.2 激光雷达探潜技术

海军机载激光雷达早期主要应用是探测水雷。目前国际上逐渐开始研究激光雷达在潜艇探测方面的应用。

激光雷达基于海水中存在的蓝绿光透光窗口,通过对海面下方发射高功率、窄脉冲的蓝绿激光,测量海水中目标反射光时差,实现浅水潜艇目标的探测。目前,美国的机载激光探雷系统(ALMDS)、俄罗斯的“紫石英”,以及瑞典和加拿大联合研制的“鹰眼”,是较有代表性的军用机载蓝绿激光探测技术应用系统,其水下探测深度为 30 ~ 70 m<sup>[15]</sup>,主要用于对水雷的探测,其探测能力受海水透明度和激光束水下散射影响大,且搜索宽度较窄,对水下运动的潜艇目标搜索效率较低。

对于下潜较深潜艇,由于潜艇尾流中微小气泡的线度与蓝绿激光波长可以比拟,其 Mie 散射效应十分明显<sup>[16]</sup>。激光雷达潜艇气泡尾流处的回波成像与其他区域的回波成像有明显差异,可实现对潜艇气泡尾流的探测确定潜艇活动的迹象,进而推断潜艇的运动方向和轨迹。

激光雷达为主动式成像,与传统光学成像相比,受气候影响较小。将其用于气泡尾流的探测,可大大提高探测潜艇范围和效率,同时可基本不受海水透明度影响,但受激光器功率和体积限制,适合中低空搜索探测使用。

## 2.3 红外辐射测温尾迹探测技术

红外热成像具有速度快、精度高、昼夜全天候工作、被动工作、隐蔽性好、实时成像、分辨率高、不受电磁干扰、不受战场上强光及眩光干扰等特点,结合航空搜潜速度快、机动性强、搜索效率高、不易被潜艇攻击的优势,实现夜间和能见度恶劣的情况下快速搜索、监视等功能。

由于水介质对红外辐射的吸收,对于水下活动的潜艇,其本身所发出的红外辐射很难被红外热成像系统探测到。随着红外探测技术的发展,当前国际先进的红外热成像仪的探测能力可达 0.001 K 数量级,例如英国 NPL 研制的红外滤光辐射计进行海水温度测量,温度分辨力小于 0.001 K,准确度达到 0.01 K。德

国 OPTKOS 公司成功研制 DAD-900 中波红外及长波红外滤光辐射计,其温度测量范围为 5 ~ 50 °C,分辨率达到 0.001 K<sup>[15]</sup>,使得采用红外热成像探测潜艇航行时产生的热尾流特征成为可能。通过采用高精度红外辐射测温仪测量海面海水温度分布,根据测量温场变化情况初步判断潜艇经过的时间,从而推断潜艇的航行方向,经过一定时间跟踪,可估计出潜艇所在位置。

## 2.4 光谱成像探潜技术

光谱成像技术始于 20 世纪 80 年代,集光学、光谱学、精密机械、电子技术、计算机等技术于一体,能提供目标的二维空间信息和一维光谱信息,在航空航天遥感、宇宙与天文探测、大气探测、水雷探测等领域得到了十分广泛的应用。另外,据文献资料介绍<sup>[4]</sup>,美国海军曾使用 P-3C 反潜巡逻机和 SH-60 直升机搭载光谱传感器系统进行过探潜试验。

在实际应用中,航空光谱成像技术根据光谱分辨率的不同,又可以分为多光谱型、高光谱型两种。

多光谱探测设备往往根据特定的工作环境和感兴趣目标对波段和带宽进行精心设计,在经济性、使用便捷性、图像信噪比、数据处理上优势明显。多光谱相机的谱段数一般为几个到十几个,光谱分辨率为几十纳米到几百纳米,可以根据不同的任务规划和目标设置不同的谱段。高光谱探测设备具有更高的光谱分辨率,对不同环境和目标的适应性更强。

采用光谱成像探测技术探测潜艇主要依靠潜艇在水下反映的两个方面的光学特征:1) 隐藏在水下的潜艇艇身;2) 潜艇产生的生物尾迹。在潜艇处于水深较浅处(一般小于 30 m)时,依据蓝绿谱段水体的反射和散射特性,采用光谱成像探测特征轮廓可追踪潜艇踪迹;在潜艇于水中巡航时(50 ~ 100 m),依据潜艇航行产生的尾迹使海水固有光学特征产生的细微变化,通过具有数百谱段的高光谱成像仪,以 10 nm 左右的精细分辨力获取相关谱段的光谱特征图像,检测海水内部物体及变化,获取尾迹特征,从而探测到潜艇踪迹。

飞机搭载光谱成像探测设备搜索潜艇时,可利用其高空侦察的特点,进行大面积搜索,实现对浅近海面潜艇艇身和一定深度航行潜艇尾迹的探测,进一步丰富航空探潜手段。光谱成像探潜一般需在昼间使用,有一定使用局限性。

## 2.5 低频磁异常探测技术

传统磁异常探测技术作为一种较成熟的技术,具有探测隐蔽性好和不受水文气象条件影响等优点,主要通过检测潜艇的铁磁特征(静磁场)来发现水下潜艇,其作用距离较为有限,一般为 400 m 左右,用于进行目标确认和攻击前的精确定位,或在狭窄海域及敌潜艇机动受

限时小面积海域进行搜索。

与传统磁异常探测技术不同,低频磁异常探测技术检测的是潜艇的极低频电磁场特征,重点是其轴频磁场和尾流磁场等低频交变磁场特征。美国、瑞典、俄罗斯、英国、法国等国均已开展研究。由于严格保密原因,仅在少量文献中有“探测距离数公里”等的零星描述。

通过研究突破潜艇水下极低频电磁场建模与定位、潜艇水下极低频电磁场传播及衰减规律、高灵敏度、低噪声磁传感器研制等关键技术,利用低频磁异常探测技术,理论上可以将探测潜艇的作用距离提高到2000 m以上<sup>[1,13]</sup>,适于飞机搭载使用。但目前该技术还处在理论探索阶段,尚未见到探潜工程应用的报道。

### 3 结束语

随着潜艇降噪技术的不断发展,潜艇自噪声与海洋背景噪声越来越接近,极大地增加了声纳探潜的难度,单一的声纳探潜技术已难以满足反潜作战的需求。SAR 雷达、红外测温、激光雷达、光谱探测和低频磁异常探测等非声探潜技术作为声纳探潜的辅助能够有效弥补声纳探潜的不足;同时,非声探潜装备可以充分发挥固定翼飞机/直升机快速、大范围搜索的优势;在航空平台上,通过合理配置,可发挥声纳探潜与非声探潜各自的优势,使之相互补充,为反潜作战提供更加准确的探测手段。

### 参考文献

- [1] 赵景波. 舰船腐蚀电磁场的测量及防护方法的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2006.
- [2] 江传富,杨坤涛,王江安,等. 机载红外热像探潜技术[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2006,20(7):90-92.
- [3] MADURASINGHE D, TUCK E O. The induced electromagnetic field associated with submerged moving bodies in an unstratified conducting fluid[J]. IEEE Journal on Oceanic Engineering, 1994, 19(2):193-199.
- [4] MINNETT P J, BARTON I J, RICE J P. The MIAMI-2001 radiometer intercomparison [C]//Proceedings of Envisat Validation Workshop, Frascati, 2002:34-36.
- [5] MINNETT P J, EDWARDS M C. AATSR SST validation using the M-AERI [C]//Proceedings of Envisat Validation Workshop, Frascati, 2003:531-535.
- [6] 李哲,邓甲昊,周卫平. 水下激光探测技术及其进展[J]. 舰船电子工程,2008,48(12):8-11.
- [7] SQUADRON L G, WREN R. Detection of submerged vessels using remote sensing techniques [J]. Australian Defence Force Journal, 1997(2):9-15.
- [8] GONG W, DAI R, SUN Z. Detecting submerged objects by Brillouin scattering[J]. Applied Physics B, 2004, 79(5):635-639.
- [9] 崔国恒,于德新. 非声探潜技术现状及其对抗措施[J]. 火力与指挥控制,2007,32(12):10-13.
- [10] 国妍,王江安. 光电探测在探潜方面的发展分析[J]. 舰船科学技术,2002,24(4):42-45.
- [11] 师于杰,任海刚. 国外非声探潜与隐身技术发展趋势[J]. 舰船电子工程,2015,35(1):5-9.
- [12] 尹晓东,刘清宇,徐江. 国外航空声学探潜装备研究进展[J]. 舰船科学技术,2008,30(6):172-175.
- [13] 韩晶,赵朝方. 海洋遥感技术在探测潜艇中的应用[J]. 装备环境工程,2008,5(3):67-70.
- [14] 江传富,杨坤涛,王江安,等. 机载红外热像探潜技术[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2006,20(7):90-92.
- [15] 王建华,赵浩瀚. 机载红外探潜系统综述 [J]. 激光与红外,2013,43(6):599-603.
- [16] 冯包根. 蓝绿激光水下军事应用研究[J]. 舰船电子工程,1999(3):55-59.



请扫描二维码关注我刊