

多普勒计程仪作用距离估计

黄雄飞[†] 周徐昌 苑秉成

(海军工程大学 兵器工程系 武汉 430033)

摘要 多普勒计程仪已成功应用于多种载体的导航,而其最大作用距离对于设计和使用都具有重要的意义。根据声纳方程各项的定义并根据多普勒计程仪工作时的特点,推导出不同条件下声纳方程中各项的计算公式,从而对多普勒计程仪的最大作用距离进行估计,最后将某型多普勒计程仪的相关参数代入推导的公式中,并进行计算得到理论计算值。同时还计算了多普勒计程仪在不同条件下的作用距离。

关键词 声学, 多普勒, 作用距离, 声纳方程

Working range estimation of doppler velocity log

HUANG Xiong-Fei ZHOU Xu-Chang YUAN Bing-Cheng

(Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033)

Abstract Doppler velocity log (DVL) has been adopted in the navigation of various carriers. Working Range Estimation is significant. According to Sonar equation and working condition of DVL, the formula of working range is deduced such that working range can be estimated. Using the parameters of one type of DVL, working range is estimated. At the same time, working range under different conditions is computed.

Key words Acoustic, Doppler, Working range, Sonar equation

1 引言

随着声学测速技术的发展,利用多普勒效应进行测速,精度不断提高,多普勒计程仪已成功应用于多种载体的导航^[1,2],而多普勒计程仪的最大作用距离对于设计和使用都具有极其重要的意义,本文首先介绍了多普勒计程仪的工作原理,然后从声纳方程出发,分析了影响多普勒计程仪作用距离的多种因素,推导相应的计算公式,从而实现了对于多

普勒计程仪的最大作用距离估计,最后将某型多普勒计程仪的相关参数代入推导的公式中,并进行计算,将得到的计算值与实际的多普勒计程仪的试验数据比较,最后计算了不同条件下的作用距离。

2 多普勒计程仪工作原理^[3]

当频率为 f_0 的声波在海水中传播时,有一部分能量被海底散射回来,这些回波信号

2008-07-22 收稿; 2008-12-22 定稿

作者简介:黄雄飞(1979-),男,博士生,主要研究方向为水声信号处理和武器制导技术。

周徐昌(1954-),男,教授,博士生导师。

苑秉成(1950-),男,教授,博士生导师。

[†]通讯作者:黄雄飞, E-mail: xiongfeifang@sohu.com

经换能器接收, 处理后可以测得其频率为 f_r 。根据多普勒频移原理, 只要声源 (或接收器) 与散射体之间有相对运动, 则 $f_r \neq f_0$, 其差值为

$$f_d = f_r - f_0 = 2fV \cos \alpha / c \quad (1)$$

式(1)中: α 为波束的俯角; V 为声源 (或接收器) 相对海底的水平速度; c 为声速。四波束正交配置的多普勒计程仪如图 1 所示。通常每个波束和水平面夹角为 60° , 相邻两波束水平投影的夹角 90° , 在多普勒计程仪作用深度范围内, 每个波束都能测得载体相对海底的速度分量, 四波束可测四个相对海底的分速度。通过矢量合成便可求得速度矢量。同时从不同深度海底返回的回波时间是不一样的, 它与海底的深度相对应, 其关系式为:

$$z = \frac{T}{2} \times c \times \sin(\alpha) \quad (2)$$

式中 z 为多普勒计程仪相对海底的深度, T 为脉冲信号发射后的延迟时间, c 为水中声速。

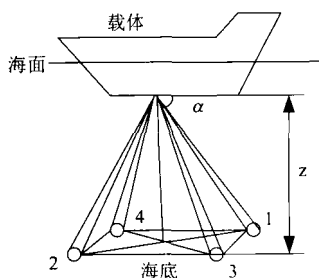


图 1 多普勒计程仪的四波束正交配置

3 作用距离估计模型

多普勒计程仪最大作用距离, 指能够有效测量速度矢量的最大海底深度。由于实际工作过程中, 影响多普勒计程仪作用距离的因素较多, 根据声纳方程, 主要有声源级、回波强度, 载体和多普勒计程仪的自噪声、传播损失以及指向性等, 而这些因素不但与

声纳本身的参数有关, 同时还与多普勒计程仪的载体运动速度、姿态的变化等因素相关, 另外还有一些不可忽视的因素如温度、盐度以及海况等, 而这部分因素很难准确地数学建模, 因此本文不讨论温度、盐度以及海况等因素对作用距离的影响, 主要讨论载体的运动速度、姿态的变化以及自噪声等因素对作用距离的影响。

由于多普勒计程仪以海底反射为目标的主动工作方式, 所以声纳方程^[4]为

$$SL - 2TL + TS - (NL - DI) = DT \quad (3)$$

声源级^[4]为:

$$SL = 170.8 + DI + 10 * \log W \quad (4)$$

W 为发射声功率。 DI 为发射波束的指向性指数, 对于收发共用换能器, 接收指向性和发射指向性相同。

对于多普勒计程仪的四个圆盘换能器^[5], 其指向性指数 DI 和波束开角 θ_b 可表示为:

$$DI = 20 \times \log(\pi D / \lambda) \quad (5)$$

$$\theta_b \approx \frac{60\lambda}{D} \quad (6)$$

其中 θ_b 为波束开角, D 为圆盘换能器的直径, λ 为波长。

传播损失^[6] TL 可由以下公式计算得到

$$TL = 20 \lg r + \beta \times r \times 10^{-3} \quad (7)$$

衰减系数计算采用文献[6]简化的经验公式, 即不考虑压力、温度等因素

$$\beta = \frac{0.1f^2}{1+f^2} + \frac{40f^2}{4.1+f^2} + 2.75 \times 10^{-4} f^2 + 0.03 \quad (8)$$

(dB/km)

式中 f 为信号频率, 单位为 kHz。

海底反射强度^[6] TS 可表示为

$$TS = V_B + 10 \log S \quad (9)$$

S 为对回波有贡献的海底散射面积。海底散射强度 V_B 与海底的性质 (岩石底、泥、沙等), 声波频率、声入射角有关, 且数值相差较大。对于多普勒计程仪来说, 声入射角为 30° 左

右, 取典型值 $V_B = -25\text{dB}$ 。

由于载体具有一定的速度, 所以发射波束和接收波束照射的区域并不完全重合, 虽然形状大小不变, 但是在运动方向上存在一定的位移, 如图 2 所示, 阴影区域为发射波束和接收波束照射海底的重合部分, 假设载体在发射与接收过程中运动的距离为 L , 设载体的运动速度为 v , 则 $L = vt_0$, $t_0 = \frac{2Z}{c \cos \alpha}$

为波束从发射到接收到海底回波所需要的时间。C 为水中声速。开角为 ψ 的波束照射海底所覆盖的区域, 为一椭圆形, 其中长轴 $a \approx \frac{Z\psi}{\cos^2 \alpha} = 0.0933z$, 短轴为 $b \approx \frac{Z\psi}{\cos \alpha} = 0.0808z$, 则二者的重合部分可由积分计算得到为

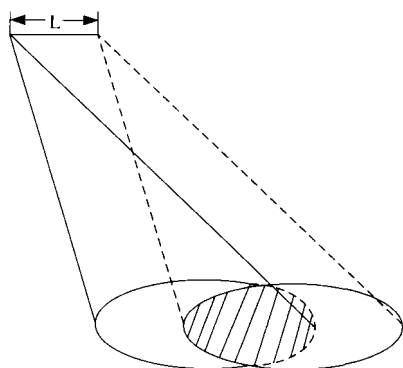


图 2 波束照射示意图

因此

$$S = \frac{\psi - \dot{\phi} \times t_0}{\psi} \times \frac{\psi - \dot{\phi} \times t_0}{\psi} \times \left[\frac{1}{4} ab\pi - \frac{1}{2} bL \sqrt{1 - \frac{L^2}{a^2}} - \frac{1}{2} ab \arcsin\left(\frac{L}{a}\right) \right] \quad (11)$$

噪声场一般由海洋环境噪声和自噪声组成, 许多文献按照发声的机理将海洋环境噪声的声源分成四类: 水动力噪声、海洋生物噪声、海洋中的人为噪声和海洋热噪声, 水动力噪声、海洋生物噪声、海洋中的人为噪声一般分布在低频^[6], 由于多普勒计程仪

$$S' = \frac{1}{4} ab\pi - \frac{1}{2} bL \sqrt{1 - \frac{L^2}{a^2}} - \frac{1}{2} ab \arcsin\left(\frac{L}{a}\right) \quad (10)$$

载体速度对于多普勒计程仪的作用距离的影响不但表现在对有效散射面积的影响, 更重要的是载体航行所引起的噪声包括机械噪声, 水动力噪声, 螺旋桨噪声等, 将在后面分析。

同时当载体有横滚和纵倾运动时即使载体没有移动, 发射波束和接收波束仍然不能重合, 因此同样对测量具有较大的影响, 横滚角和纵倾角定义如图 3 所示, 图中 1、2、3、4 对应多普勒计程仪的四个换能器, 同时定义载体在发射和接收信号期间发生的横滚角为 $\varphi = \dot{\phi} \times t_0$, 纵倾角为 $\phi = \dot{\phi} \times t_0$, 其中 $\dot{\phi}$ 和 $\dot{\phi}$ 分别为横滚角和纵倾角的变化率。因此考虑到载体的横滚和纵倾时可得到重合面积约为

$$S = \frac{\psi - \dot{\phi} \times t_0}{\psi} \times \frac{\psi - \dot{\phi} \times t_0}{\psi} \times S'$$

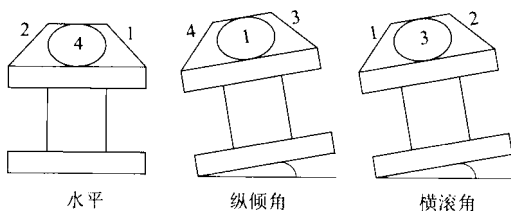


图 3 姿态角定义

工作频率较高, 属于高频段, 因此海洋环境噪声可忽略。自噪声主要包括多普勒计程仪的流噪声、电路噪声和载体辐射噪声等, 而以载体辐射噪声为主, 由于不同载体的不同航速对应的辐射噪声不同, 根据文献[6], 本文假定载体以 20kn 的速度航行时在 1kHz

处的辐射噪声谱级约为 110dB，并按每倍频程 6dB 衰减^[7]，则在中心频率 f_0 处载体辐射噪声谱源级为：

$$NL'=110-6\times\log_2f_0$$

同时载体自噪声级也随速度的增加而增加，当航速增加时，自噪声级上升率^[7]约为 1.5~2dB/kn。本文计算取上升率为 1.5dB/kn，则速度为 30kn 时对应 1kHz 处的辐射噪声谱源级为 125dB。

假定换能器与载体噪声源如螺旋桨的距离为 h ，多普勒计程仪的工作带宽为 Δf ，则换能器接收到的载体噪声级^[7]为

$$NL=NL'-20\log(h)+10\log(\Delta f) \tag{12}$$

由于多普勒计程仪实际测量过程中，不但要检测到海底回波，同时还要保证一定的信噪比才能使测量达到一定的精度。本文假定信噪比大于 10dB 时能够保证探测到海底和一定的测量精度。因此必须保证 $DT\geq10\text{dB}$ 。

因此由式（4）~（12）式相应的值代入式（3）可解算得到不同速度和姿态变化率时的对应的作用距离。

4 作用距离计算和分析

本文以某型 307.2kHz 多普勒计程仪的有关参数作为分析依据。圆盘换能器的直径 $D=73\text{mm}$ ，发射信号的中心频率为 $f=307.2\text{kHz}$ 则 $\lambda=\frac{c}{f}=4.88\text{mm}$ ，所以 $DI=33.44\text{dB}$ ， $\theta=4.01^\circ$ ，发射电功率为 25W，换能器效率为 65%，则发射声功率为 16.25W，所以 $SL=216.35\text{dB}$ ，同时计算得到 $\beta=64.8\text{dB/km}$ 。

假定换能器与载体噪声源如螺旋桨的距离为 $h=4\text{m}$ ，多普勒计程仪的工作带宽为 $\Delta f=75\text{kHz}$ ，则载体速度为 20kn 时的噪声级为 $NL=97\text{dB}$ ，本文计算了载体速度分别为 20kn、30kn， $\dot{\phi}=0,2,4,6,8^\circ/\text{s}$ ， $\dot{\phi}=0,2,4,6,8^\circ/\text{s}$ 时的最大作用距离,如表 1 和表 2 所示，单位为 m。从表中可以明显地看出载体姿态变化对多普勒计程仪作用距离有较大的影响，而载体速度的提高，增加了噪声级，减小了回波强度，从而减小了作用距离。

表 1 v=20 kn 时的最大作用距离

作用距离(m) ϕ	$\dot{\phi}$	0°/s	2°/s	4°/s	6°/s	8°/s
	0°/s	320	313	305	293	275
	2°/s	313	307	299	287	271
	4°/s	305	299	291	281	266
	6°/s	293	287	281	272	259
	8°/s	275	271	266	259	250

表 2 v=30 kn 时的最大作用距离

作用距离(m) ϕ	$\dot{\phi}$	0°/s	2°/s	4°/s	6°/s	8°/s
	0°/s	235	230	225	219	211
	2°/s	230	226	221	215	207
	4°/s	225	221	216	210	204
	6°/s	219	215	210	204	199
	8°/s	211	207	204	199	194

5 结束语

本文分析了影响多普勒计程仪作用距离的一些主要因素并推导了计算公式,从计算结果可以看出载体的运动和噪声对于多普勒计程仪的作用距离有较大的影响,需要加以控制,同时另外一些影响多普勒计程仪作用距离的因素如温度、盐度、及海况等还需进一步的理论研究,而自噪声中电路噪声和流噪声也需要进一步测量和研究。

参 考 文 献

- [1] 伍永学. 潜艇水下精确测速系统的研究. 哈尔滨工程大学: 水声工程学院, 2004: 8-12.
- [2] 李俊, 沈安文, 宋保维, 等. 基于多普勒速度声纳的水下航行器导航方法. 华中科技大学学报, 2004, 32(1): 73-75.
- [3] 王森, 林善明, 张秀萍, 等. 宽带声学多普勒流量剖面仪的系统仿真. 声学技术. 2004, 23(2): 113-116.
- [4] 蒋兴舟, 陈喜, 蒋涛. 鱼雷制导设计原理. 海军工程大学, 2001. 10 25-26.
- [5] 苑秉成, 陈喜. 水声自导原理基础. 海军工程学院, 1992, 69-72.
- [6] R.J.尤立克. 著, 洪申译. 水声原理. 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1985, 85, 166-167.
- [7] 王之程, 陈宗岐, 于飒, 等. 舰船噪声测量与分析. 国防工业出版社, 北京, 2004, 30-32.