

声纳原理

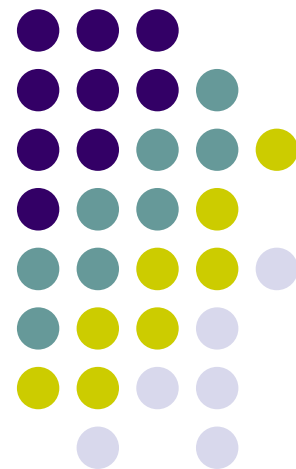
声纳系统测速方法

任课教师：杨益新

电子邮件：yxyang@nwpu.edu.cn

办公电话：88460373

办公地址：航海学院322室





第一节 概述

海军作战中，为了指挥武器的射击，特别是鱼雷和导弹的发射，更重要的是要知道目标的瞬时速度及加速度，以便给出武器射击的提前量。

由此引出声纳的另一重要任务：目标速度的测量。

另一方面，本艇航速测量可以为导弹发射提供初始参数，同时对潜艇的导航、船只的进港、靠岸等有重要意义。

基本原理：位变率、方位变化率、多普勒效应等。



第二节 目标速度的测量

1. 位变率法

基本假设：两次测量目标方位的过程中目标速度（包括航向及大小）不变。

情况一：本舰静止

正北方向为 N ，目标沿方位角 β 航行， β 角顺时针方向为正。要测量目标速度 α 和航向角 β 。

点1：测量 R_1, α_1

点2：测量 R_2, α_2

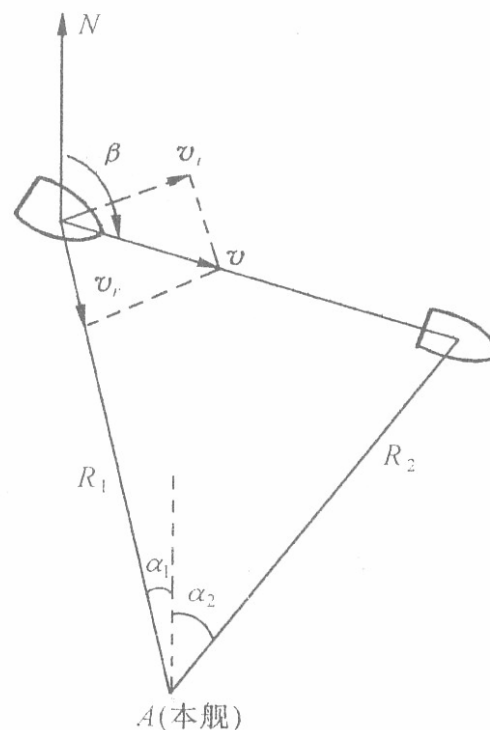


图 6-1 本舰静止时位变率测速原理



当方位角差别较小时，目标径向速度为 $v_r = \frac{R_2 - R_1}{T}$

切向速度为：
$$v_t = R_1 \frac{\alpha_2 + |\alpha_1|}{T} = R_1 \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{T} = R_1 \Omega$$

$$\Omega = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{T}$$

目标角速度

目标速度大小和方向为：

$$|v| = \sqrt{v_r^2 + v_t^2} = \frac{1}{T} \left[(R_2 - R_1)^2 + R_1^2 (\alpha_2 - \alpha_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\beta = 180^\circ - |\alpha_1| - \arctan \frac{v_t}{v_r} = 180^\circ + \alpha_1 - \arctan \frac{v_t}{v_r}$$

若无法测得目标距离，则只能得到目标角速度 $\Omega = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{T}$



情况二：本舰运动

$$P_1 = R_1 \sin(\varphi + |\alpha_1|) = R_1 \sin(\varphi - \alpha_1)$$

$$P_2 = R_2 \sin(\varphi - \alpha_2)$$

$$P_1' = R_1 \cos(180^\circ - \varphi + |\alpha_1|) \\ = -R_1 \cos(\varphi - \alpha_1)$$

$$P_2' = R_2 \cos(\varphi - \alpha_2)$$

$$\beta = \varphi + \arctan \frac{P_1 - P_2}{R_0 + P_1' + P_2'}$$

$$= \varphi + \arctan \frac{R_1 \sin(\varphi - \alpha_1) - R_2 \sin(\varphi - \alpha_2)}{R_0 - R_1 \cos(\varphi - \alpha_1) + R_2 \cos(\varphi - \alpha_2)}$$

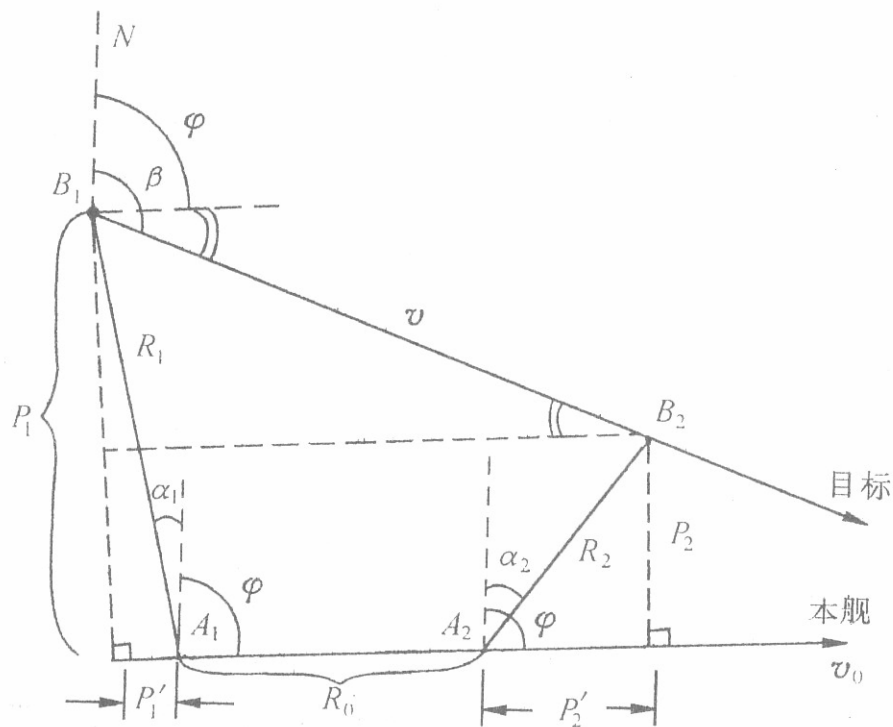
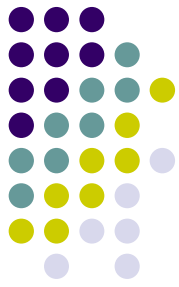


图 6-2 本舰运动时位变率测速法原理



$$B_1 B_2 = \left[(P_1 - P_2)^2 + (R_0 + P_1' + P_2')^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

目标速度 $v = B_1 B_2 / T$

$$v = \frac{1}{T} \left\{ R_1^2 + R_2^2 + R_0^2 - 2R_1 R_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \right. \\ \left. + 2R_0 \left[R_2 \cos(\varphi - \alpha_2) - R_1 \cos(\varphi - \alpha_1) \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

2. 回波脉冲比较法

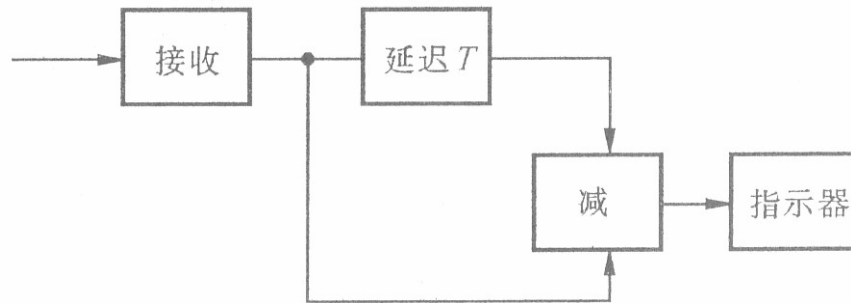


图 6-3 回波脉冲比较法测速原理

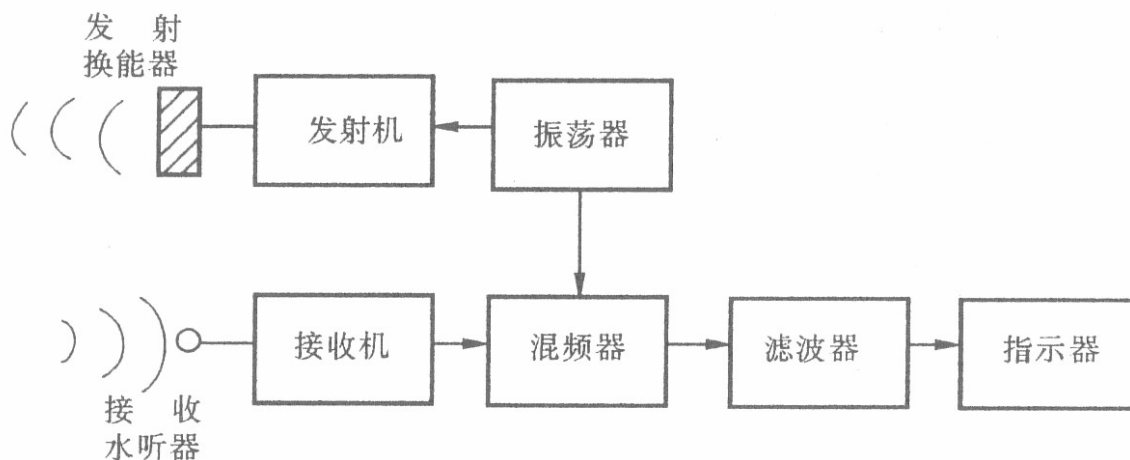
只能考虑径向运动，且 $T \cdot V_{r \max} \leq \frac{\tau_0 c}{2}$



3. 多普勒测速法

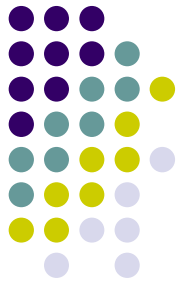
基本原理：利用回波的多普勒频移，测量目标的径向速度。

方法一：连续正弦波测速



$$f_d = f_0 \frac{2v_r}{c}$$

图 6-7 连续正弦波测速原理



方法二：脉冲测速

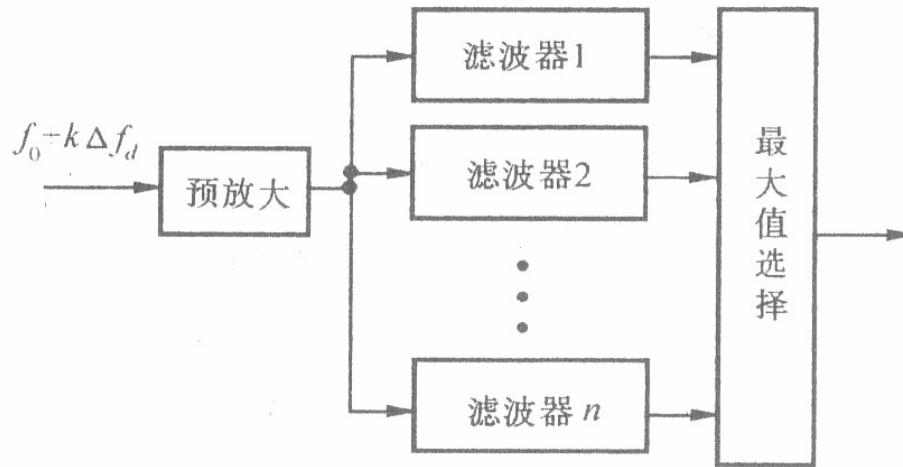


图 6-8 滤波器组测速原理

采用带通滤波器组或者匹配滤波器组，可以测得多普勒频移，从而计算得到径向速度。



第三节 本舰航速的测定

主要介绍多普勒测速法

1. 基本原理

$$f_{dx} = \frac{2v_x}{c} f_T \cos \alpha$$

发射信号频率越高，多普勒频移越大。

横向运动对应的频移：

$$f_{dx} = \frac{2v_y}{c} f_T \cos \varphi$$

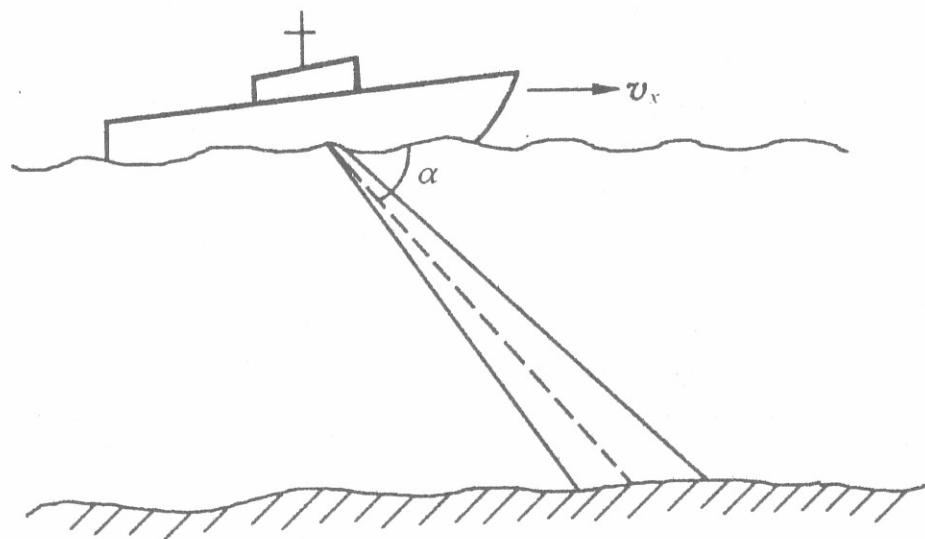
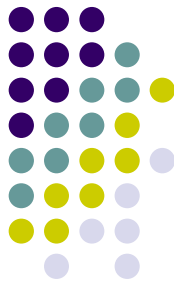


图 6-10 多卜勒测速示意图

2. 影响测速精度的主要因素及改进方法



(一) 公式简化误差

存在径向运动时，接收信号的精确频率为

$$f_r = f_T \frac{1+x}{1-x} \quad x = \frac{v_x}{c} = \frac{v_x \cos \alpha}{c}$$

多普勒频率为 $f_d = f_r - f_T = \frac{1+x}{1-x} f_T - f_T = \frac{2x}{1-x} f_T$

x 一般较小，故可以把上式近似为

$$f_{d1} = f_T \cdot 2x = \frac{2v_x \cos \alpha}{c} f_T$$



这种近似引入的相对误差为

$$\frac{\Delta f_d}{f_d} = \frac{f_d - f_{d1}}{f_d} = \left(\frac{2x}{1-x} - 2x \right) / \left(\frac{2x}{1-x} \right) = x = \frac{v_x \cos \alpha}{c}$$

举例： $\alpha = 60^\circ$ $v_x = 30 \text{节} \approx 15 \text{m/s}$ $\frac{\Delta f_d}{f_d} \approx 0.5\%$

减小公式简化误差的方法：采用前后两个波束发射。基本结构如下图所示。

若发射信号频率均为 f_T

$$f_{rI} = \frac{1+x}{1-x} f_T \quad f_{rII} = \frac{1-x}{1+x} f_T$$

两次接收信号的差频为

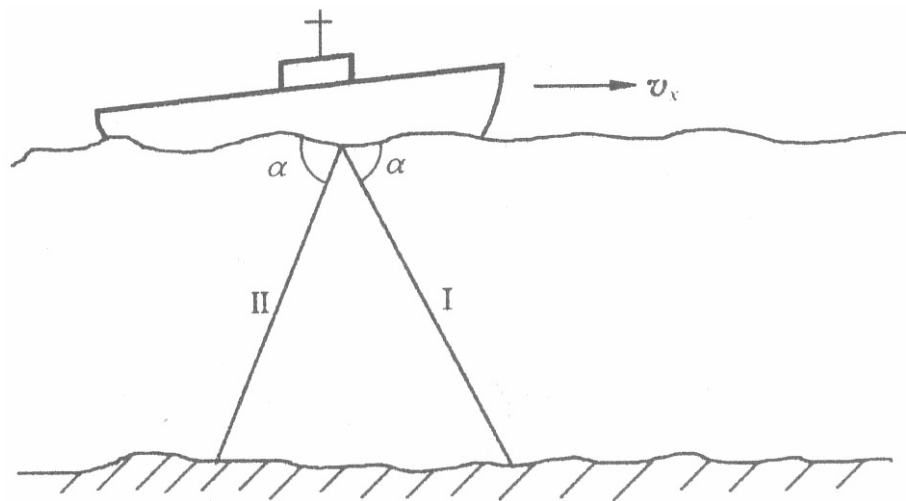


图 6-11 利用前后两波束进行多卜勒测速示意图



$$f_d = f_{rI} - f_{rII} = \frac{4x}{1-x^2} f_T$$

近似后为 $f_{d1} \approx 4xf_T = \frac{4v_x}{c} f_T \cos \alpha$

由近似引起的相对误差为

$$\frac{\Delta f_d}{f_d} = \frac{\frac{4x}{1-x^2} f_T - 4xf_T}{\frac{4x}{1-x^2} f_T} = \left(\frac{v_x \cos \alpha}{c} \right)^2$$

举例： $\alpha = 60^\circ$ $v_x = 30 \text{节} \approx 15 \text{m/s}$ $\frac{\Delta f_d}{f_d} \approx 0.0025\%$

所以，采用前后波束发射，可以大幅度降低测速误差。



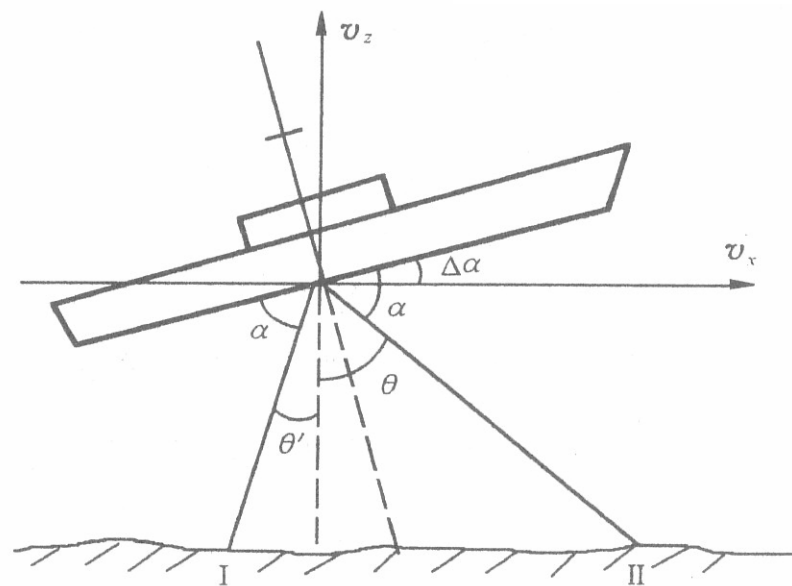
(二) 船有运动时的误差

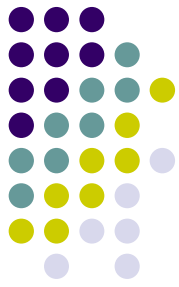
当测量换能器所在的船有摇摆时，利用前后两个波束亦可减小由船运动引起的俯角变化所造成的测速误差。

当船无摇摆与上下起伏时，各个波束测得的多普勒频率为

$$f_{dI} = \frac{2v_x}{c} f_T \cos \alpha \qquad f_{dII} = \frac{2v_x}{c} f_T \cos(180^\circ - \alpha)$$

当船以换能器安装位置为中心纵倾角度 $\Delta\alpha$ ，同时具有垂直运动速度 v_z （向上为正）时，前向波束测得的多普勒频移为





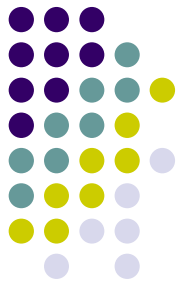
$$f_{dI} = \frac{2v_x}{c} f_T \cos(\alpha - \Delta\alpha) + \frac{2v_z}{c} f_T (-\cos\theta) =$$
$$\frac{2v_x}{c} f_T \cos(\alpha - \Delta\alpha) - \frac{2v_z}{c} f_T \sin(\alpha - \Delta\alpha)$$

后向波束测得的多普勒频移为

$$f_{dII} = \frac{2v_x}{c} f_T [-\cos(\alpha + \Delta\alpha)] + \frac{2v_z}{c} f_T (-\cos\theta') =$$
$$-\frac{2v_x}{c} f_T \cos(\alpha + \Delta\alpha) - \frac{2v_z}{c} f_T \sin(\alpha + \Delta\alpha)$$

因此差频为：

$$f_d = f_{dI} - f_{dII} = \frac{4v_x}{c} f_T \cos\alpha \left(\cos\Delta\alpha + \frac{v_z}{v_x} \sin\Delta\alpha \right)$$



当船无摇摆和上下起伏时，也就是 $\Delta\alpha = 0, v_z = 0$

$$f_{dr} = \frac{4v_x}{c} f_T \cos \alpha$$

存在摇摆和上下起伏时，多普勒频率误差为

$$\left| \frac{\Delta f_d}{f_{dr}} \right| = \left| \frac{f_d - f_{dr}}{f_{dr}} \right| = \left| \cos \Delta\alpha + \frac{v_z}{v_x} \sin \Delta\alpha - 1 \right|$$

情况一： $\Delta\alpha = 0, v_z \neq 0$ ，即船仅有上下起伏，无纵倾

$\Delta f_d / f_{dr} = 0$ 此时前后两个波束抵消了测量误差。

情况二： $\Delta\alpha \neq 0, v_z = 0$ ，即船无上下起伏，有纵倾

$$\left| \frac{\Delta f_d}{f_{dr}} \right| = |\cos \Delta\alpha - 1|$$



举例： $\Delta\alpha = 5^\circ$ $|\Delta f_d / f_{dr}| = |\cos 5^\circ - 1| \approx 0.3\%$

减小误差的措施： 1) 将换能器安装到稳定平台上，以稳定换能器的指向； 2) 测量摇摆角，然后修正测量值。

方法1代价昂贵，方法2较为行之有效。

(三) 传播声速的影响

计算多普勒频移时，假定声速已知且不变。但是实际上声速是温度、盐度等因素的函数。不同海区、不同季节的声速不同，会导致不同的测速误差。

一种消除声速误差的方法是测量换能器表面的声速，在测速误差中随时修正。



由斯涅尔定理知，分层介质中各层声线角与声速之比为常数，即

$$\frac{\cos \alpha_1}{c_1} = \frac{\cos \alpha_2}{c_2} = \dots = \text{常数}$$

因此只需保持换能器表面附近的 $\cos \alpha / c$ 为常数，变不会带来由其它水层声速变化而带来的测速误差。

保持换能器表面附近声速不变的方法是将换能器置于导流罩内，然后注入油，并用加热装置使油温恒定。

另一种实现 $\cos \alpha / c$ 恒定的方法是采用多元相控发射阵。

$$\varphi = 2\pi d \frac{\cos \alpha}{\lambda} = 2\pi f \cdot d \frac{\cos \alpha}{c} \quad \frac{\cos \alpha}{c} = \frac{\varphi}{2\pi f \cdot d}$$

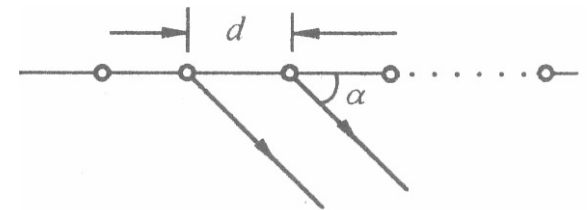
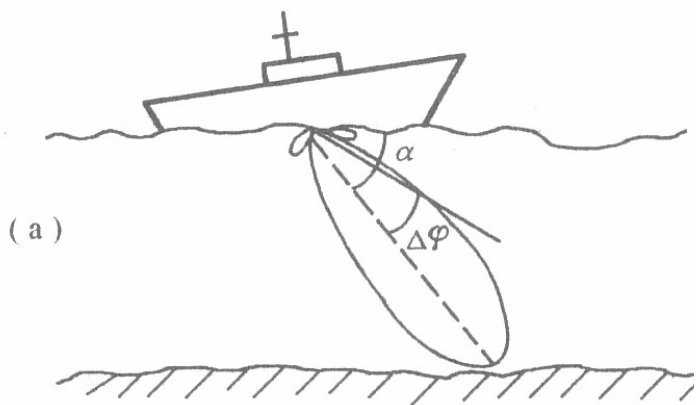


图 6-13 相控发射阵

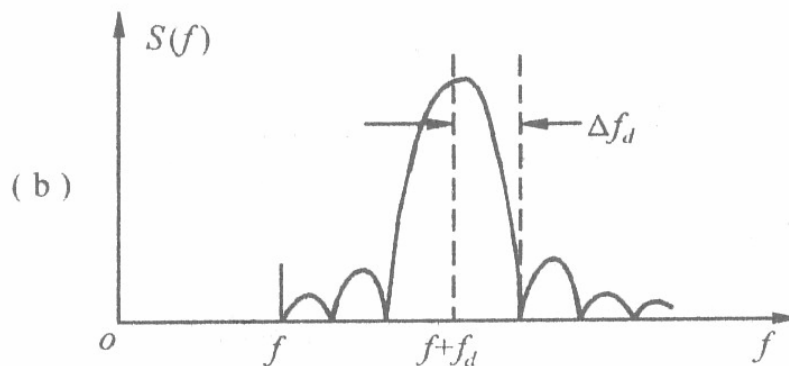


(四) 频率测量与有限束宽的影响

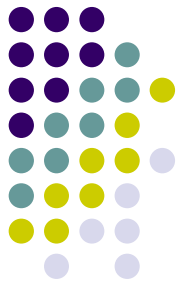
发射波束有一定宽度，导致回波多普勒频移展宽。展宽的原因是不同角度的声线返回后有不同的多普勒频移，使接收信号频谱比发射信号谱宽大。回波信号的功率谱与波束图大致相同，同时与海底散射强度随角度的变化规律有关。



波束示意图



接收回波功率谱



多普勒频移展宽与束宽的关系

$$\Delta f_d = \frac{2v_x}{c} f_T \sin \alpha \cdot \Delta \varphi$$

其中 $\Delta \varphi$ 为波束宽度的一半。相对展宽为 $\frac{\Delta f_d}{f_d} = \tan \alpha \cdot \Delta \varphi$

举例： $\alpha = 60^\circ$ $\Delta \varphi = 5^\circ$

$$\frac{\Delta f_d}{f_d} = \tan 60^\circ \cdot \left(5 \times \frac{\pi}{180} \right) = 15\%$$

减小该误差的方法：**多次测量，求平均**

$$\bar{f} = \frac{1}{M} \cdot \left(\sum_{i=1}^M f_i \right) \quad \sigma_f^2 = \frac{1}{M} \sigma^2$$



3. 多普勒测速仪的有关参数

中等海深下使用多普勒测速仪（几十米到几百米），工作频率在100kHz到1MHz之间。频率高，可以使多普勒频移大，容易测量，同时使基阵尺寸较小。

随着海洋开发与潜艇远海航行的需要，出现了大深度多普勒测速仪，海底跟踪深度达几千米。随之频率降低到几十千赫兹（为什么？）。此时基阵尺寸到米的量级，一般采用多元平面相控阵。



本章小结

- 概述
- 目标速度的测量方法
- 本舰航速的测量方法