

相控阵多普勒计程仪声基阵输出信号模型

张殿伦¹ 卢逢春¹ 田 坦¹ 刘光军²

(1 哈尔滨工程大学水声工程系 哈尔滨 150001)

(2 海军装备论证研究中心 北京 100073)

2002 年 8 月 16 日收到

摘要 相控阵多普勒计程仪具有基阵体积小, 无需进行声速补偿等优点。本文在讨论相控阵多普勒计程仪原理的基础上, 推导了速度解算公式, 验证出公式与声速无关, 进而推导出声基阵的输出信号模型, 利用此模型便可模拟相控阵的输出信号。

关键词 声呐, 相控阵, 信号模型

Output signal model of the acoustic array for phased-array doppler log

ZHANG Dianlun¹ LU Fengchun¹ Tian Tan¹ LIU Guangjun²

(1 Dept. of Underwater Acoustical Eng., Harbin Engineering University, Harbin 150001)

(2 Navy Research Center, Beijing 100073)

Abstract The phased-array Doppler log has several advantages, such as small the size of array and no need of compensation for sound velocity. From the array theory, the velocity formula is deduced. It is proved that the velocity formula does not involve the acoustic velocity in water. Then, the signal model of the acoustic array output is analyzed. The output signal of the phased-array can be simulated by this model.

Key words Sonar, Phased-array, Signal model

1 引言

多普勒计程仪是迄今为止应用最广, 也是最为成功的舰船自主导航设备之一。这种计程仪可测出船相对于地的绝对速度和相对于水层的速度。利用相控阵多普勒测速仪的最大优点是只需用一个平面阵进行相控发射和接收, 从工作机理上自动消除了水中声速变化这一影响速度测量的因素, 不再需要进行声速补偿。此外, 采用一个收发共用阵完成多个波束的形成, 使水下基阵的总尺寸大为减小。近年来, 国外已广泛开展利用相控阵发射和接收的多普

勒测速技术的研究^[1], 并已有产品投入市场, 国内这方面的研究刚刚起步。

相控阵多普勒计程仪主要包括声基阵、发射机、接收机和测频显示控制四部分, 如图 1 所示。图中, 模拟声基阵输出信号的信号源是必不可缺的, 它为检测和调试系统的性能提供了保证。利用该信号源可检查相控接收机是否

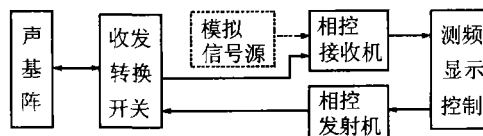


图 1 相控阵多普勒计程仪的构成

分开了两个不同频率的信号^[2]及测频模块测频的正确性。本文在简要介绍了相控发射和相控接收的基本原理后,推导了速度解算公式,并讨论了声基阵输出信号的模型,利用该模型即可模拟基阵接收的信号回波。

2 相控阵多普勒计程仪原理

以一维相控阵为例来加以分析。基阵本身呈圆形,可视为由长度不同的换能器条并排构成。因此这一平面阵可看作为一个灵敏度不同的等间距直线阵。

为了说明相控原理,先观察灵敏度相同的等间距线列阵的指向性和相控方法。假定该直线阵有32个阵元,间距为 d 。将32元阵分为三级复合子阵,第三级为四个同样的8元子阵,各子阵中阵元的间距为 $D_3 = 4d$,等效四元阵的间距为 d ;再将此等效的四元阵视为一个两级复合阵,亦即第二级阵由两个间距均为 $D_2 = 2d$ 的二元子阵构成;最后,第一级阵由两个二元子阵构成,其等效阵元间距为 $D_1 = d$ 。这样,一个32元的线阵就可视为三级复合阵,它们的阵元数分别为2,2,8,而对应的阵元间距为 $D_1 = d$, $D_2 = 2d$, $D_3 = 4d$,如图2所示。

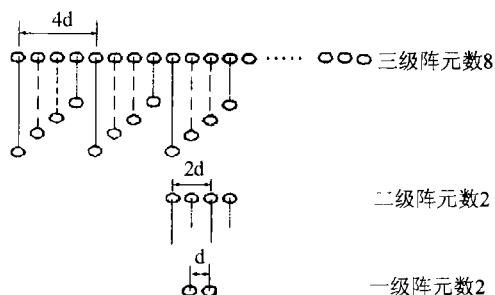


图2 三级复合阵的构成示意图

图3(a)示出了各级子阵的自然指向性图 $R_1(\theta)$ 、 $R_2(\theta)$ 、 $R_3(\theta)$ 和利用指向性乘积定理^[3]获得的总阵自然指向性图为 $R(\theta) = R_1(\theta)R_2(\theta)R_3(\theta)$ 。由图3(a)可知,只要对第二级二元阵进行适当的相控便可构成如图3(b)

的指向性。此时总指向性中同时存在两个方向的波束,这即是所需的发射指向性。由图3(b)可知,第二级阵的主波束指向应当被控制到

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{4d} \quad (1)$$

的位置。适当设计 d/λ 可得到所要求的波束指向角 θ (与基阵法线方向的夹角),由(1)式可知,对此二元阵应补偿的相位为

$$\psi_2 = \frac{2\pi D_2}{\lambda} \frac{\lambda}{4d} = \pi \quad (2)$$

只要根据(2)式对第二级的两个二元阵补偿相位 π ,即可实现相控发射。

对于相控接收,则要求能区分哪一个波束来的信号,以便对各通道进行独立的频率测量,从而据此解算载体的运动速度。这就意味着要将两个波束通道分开。由图3(a)可知,如果将第二级的两个二元阵进行相控,再将第一级二元阵的主极大值方向控制到 $\sin \theta = \lambda/(4d)$ 的位置,再次利用乘积定理,结果总指向中只留下右面的波束(如图4(b)),而这正好对应于右发射波束的指向。类似地,将第一级二元阵的主极大值方向控制到 $-\sin \theta = \lambda/(4d)$ 的位置,则最终形成左接收波束(如图4(a)),再由(1)式,可知第一级二元阵相邻阵元间需补偿的相移为

$$\psi_1 = \frac{2\pi D_1}{\lambda} \sin \theta = \frac{\pi}{2} \quad (3)$$

第二级的两个二元阵相邻阵元间需补偿的相移为

$$\psi_2 = \frac{2\pi D_2}{\lambda} \frac{\lambda}{4d} = \pi \quad (4)$$

依据上述分析,只要对第二级的两个二元阵补偿相位 π ,同时对第一级二元阵的两个子阵元分别补偿相位 $\pi/2$,即可实现相控接收,亦即将两个波束通道分开,形成前后两个独立的波束。

3 相控阵多普勒计程仪的速度解算公式

利用多普勒效应测量舰船速度时,普通双

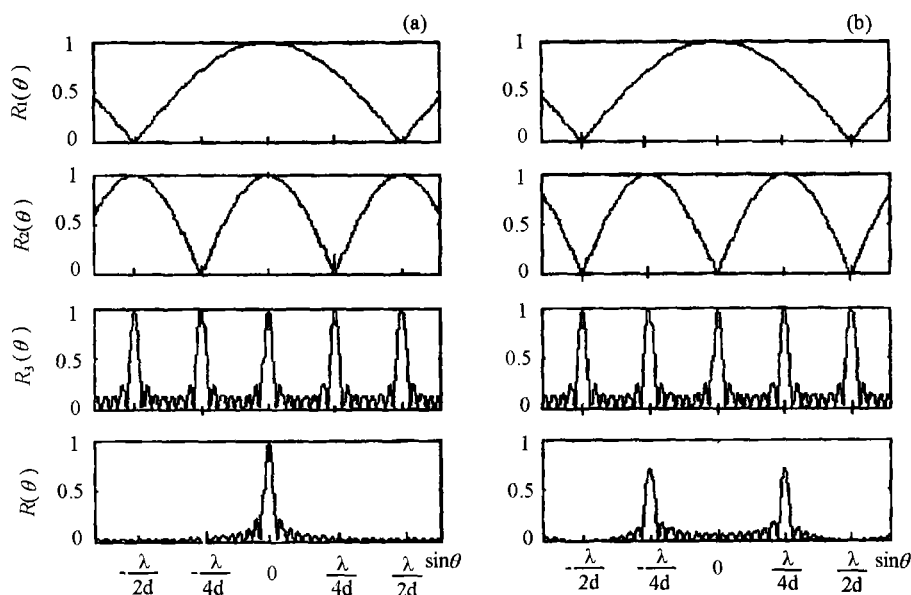


图3 (a) 基阵自然波束指向性图 (b) 基阵发射波束指向性图

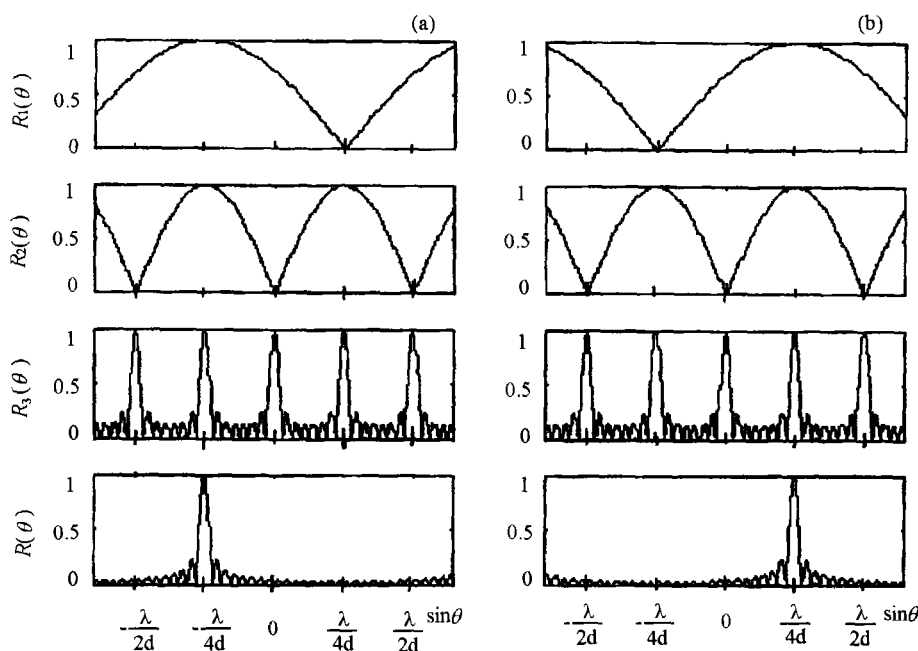


图4 (a) 左接收波束图 (b) 右接收波束图

波束系统的速度计算公式为^[3]

$$v = \frac{C(f_f - f_h)}{4f_0 \sin \theta} \quad (5)$$

其中, θ 为基阵波束指向与铅垂线的夹角, C 为水中声速, f_f 为前向多普勒频率, f_h 为后向

多普勒频率。当已知发射信号频率 f_0 、波束指向角 θ 和换能器表面附近水的声速 C 时, 在测得前向和后向多普勒频率后由 (5) 式便可求得船速。然而, 声速随环境而变, 采用固定值必然带来测速误差, 必须进行声速补偿。常规的方

法是设法使换能器表面附近的声速保持不变,例如将换能器充油,并使其恒温。另一方法是实时测量换能器表面附近材料的温度,根据温度取合适的声速(预先制表)进行速度计算。这些方法实际上都比较复杂,而且有时难以达到所要求的精度。若一元直线阵各阵元间距为 d ,要形成 θ 方向的波束,相邻阵元间需补偿的相位为

$$\phi = 2\pi f_0 \frac{d}{C} \sin \theta \quad (6)$$

因而有

$$\frac{C}{\sin \theta} = \frac{2\pi f_0 d}{\phi} \quad (7)$$

只要相邻阵元间补偿的相位保持不变,即可使因子 $C/\sin \theta$ 始终为一常数,从而从根本上免除了对声速进行的补偿,相控阵多普勒计程仪正好具备这一条件。

由(1)式得

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{4d} = \frac{C}{4f_0 d} \quad (8)$$

将(8)式代入(6)式得

$$\phi = \frac{\pi}{2} \quad (9)$$

将(9)式代入(7)式得

$$\frac{C}{\sin \theta} = 4f_0 d \quad (10)$$

将(10)式代入(5)式得

$$v = d(f_f - f_h) = d \cdot \Delta f \quad (11)$$

式(11)与(5)相比,大大简化,且速度与声速 C 无关,其速度测量的误差主要取决于基元的间距 d 和测量的频率差。

4 声基阵输出信号模型

由相控阵原理,对于一维速度的测量,声基阵等效为间距为 d 的四个基元,如图5所示。每个基元接收的信号来自前向和后向发射波束的回波。设载体以 v 的速度如图5所示的方向运动,则由(11)式得

$$f_f = f_0 + \frac{v}{2d} \quad f_h = f_0 - \frac{v}{2d}$$

如以0号基元为参考,对于前向波束的回波, i ($i = 0, 1, 2, 3$)号基元的回波滞后的相位为

$$\phi_{if} = \frac{i2\pi d \sin \theta}{\lambda}$$

由(8)式得 $\phi_{if} = i\frac{\pi}{2}$,同样可得对于后向波束的回波, i ($i = 0, 1, 2, 3$)号基元的回波滞后的相位为

$$\phi_{ib} = -i\frac{\pi}{2}$$

因此,等效四个基元回波的信号为

$$y_i(t) = \cos(2\pi f_f t + \phi_{if}) + \cos(2\pi f_h t + \phi_{ib}) \quad i = 0, 1, 2, 3 \quad (12)$$

由(12)式,每个等效基元的输出是两个频率分量的叠加。实际制作了一个4路输出的信号发生器,并利用该信号发生器实际调试了一套相控阵多普勒测速试验装置。

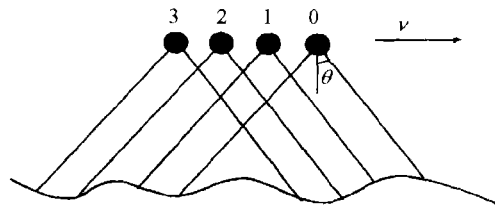


图5 基元接收回波信号

5 结论

本文通过分析相控阵多普勒计程仪的实现原理,推导了速度解算的公式,给出了声基阵输出信号的模型,利用此模型便可模拟相控阵的输出信号。已经制作了相控阵的多普勒测速的试验装置,进行了水池和湖上试验,验证了相控方案和基阵输出信号模型的正确性。

参 考 文 献

- 1 Yu X L. *Sea Technology*, January 1995, 56-60.
- 2 卢逢春, 张殿伦, 田坦. 应用声学, 2002, 21(4): 6-9.
- 3 田坦, 刘国枝, 孙大军编著. 声呐技术. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2000. 156-163.