

相控阵 ADCP 编码信号相移波束形成

李鹏飞¹, 彭东立²

(1. 海军装备研究院舰艇部, 北京 100841; 2. 中国科学院声学研究所东海研究站, 上海 200032)

摘要: 相对于活塞式声学多普勒流速剖面仪, 相控阵声学多普勒流速剖面仪的换能器体积大大缩小, 并且依托相控阵本身的物理特性, 无需进行声速补偿。利用窄带相控阵声学多普勒流速剖面仪系统进行编码信号的发射与接收, 从而提高相控阵声学多普勒流速剖面仪的设备性能。首先介绍了相控阵 ADCP 的波束形成方法, 然后分别介绍了相控阵的相移波束形成和时延波束形成原理, 对编码信号相移相控波束形成情况下, 相控阵发射和接收信号波束开角进行了对比, 并对作用距离、测量精度、系统复杂度等系统性能进行了分析。分析结果表明: 窄带相控阵声学多普勒流速剖面仪可以进行编码信号的发射和接收, 能够提高系统的空间分辨率和测量精度, 从而提高相控阵声学多普勒流速剖面仪的性能。

关键词: 声学多普勒流速剖面仪; 相控阵; 波束形成; 编码信号

中图分类号: U666.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2015)-06-0545-06

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2015.06.015

Coded signal phase shift beamforming of phased-array ADCP

LI Peng-fei¹, PENG Dong-li²

(1. Naval equipment academy, Department of warship and submarine, Beijing 100841, China;

2. Shanghai Acoustic Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200032, China)

Abstract: The volume of the transducer of phased-array ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) is much smaller than the volume of traditional piston ADCP, and compensation of sound velocity is not needed for physical characteristic of phased-array ADCP. The narrowband phased-array ADCP can transmit and receive coded signal to improve the equipment performance. This article starts with the beam forming method of phased-array ADCP, and then describes the theory of phase shift beamforming and time delay beamforming respectively. The beam angles of phased array ADCP are compared, and the working distance, measurement accuracy and system complexity are analyzed. The conclusion indicates that the narrowband Phased-array ADCP can transmit and receive coded signal to improve spatial resolution and measurement precision, and the performance of phased array ADCP is highly improved.

Key words: Acoustic Doppler Current Profiler(ADCP); phased-array; beam forming; coded signal

0 引言

声学多普勒流速剖面仪(Acoustic Doppler Current Profile, ADCP)是一种利用声学换能器发射的声脉冲在随水流运动的悬浮物质中产生的多普勒频移而进行流速测量的仪器。其突出特点是能够测量不同水层的三维流速和流向, 流速剖面范围能够达到上千米。声学多普勒流速剖面仪系统的信号可分为窄带和宽带两类。窄带声学多普勒流速剖面仪(Narrowband Acoustic Doppler Current Profile, NBADCP)发射单频脉冲信号, 优点是流速剖面范围较大; 缺点是流速测量标准方差较大, 时间和空

间分辨率较低。宽带声学多普勒流速剖面仪(Broadband Acoustic Doppler Current Profile, BBADCP)发射由重复二进制伪随机相位编码调制的正弦脉冲信号, 接收来自不同水层的散射回波信号, 计算多普勒频偏所在时间间隔内的相位变化, 进而获得沿波束方向的流速。BBADCP 采用脉冲编码技术解决了窄带 ADCP 空间分辨率和时间分辨率的矛盾, 提高了分层测流的精度。

随着要求流速测量范围的增加, 声学多普勒流速剖面仪的工作频率降低, 换能器基阵的面积也急剧增大。如果仍然采用传统的活塞式换能器基阵, 则换能器基阵尺寸会大到无法忍受的地步。以 38 kHz 的 ADCP 为例, 它的最大作用距离可以达到 1000 m^[1]。如果采用 4°的波束开角, 单个换能器的直径会达到 0.6 m。如果采用传统的 Janus 配置的四波束换能器基阵, 则整个换能器基阵的直径会达到

收稿日期: 2015-07-20; 修回日期: 2015-10-19

作者简介: 李鹏飞(1978—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 工程师, 研究方向为检测技术。

通讯作者: 彭东立, E-mail: bernou@163.com

1.5 m 的量级, 远远超过了一般舰船所能承受的
安装尺寸。考虑到换能器基阵的适装性, 必须要减小
换能器基阵的尺寸。

近年来, 相控阵技术获得了比较多的应用。相
控阵原理就是采用波束形成的方法, 对多元阵阵元
的发射或接收信号进行时延或相移补偿, 从而获取
预定方向波束的方法。相控阵 ADCP 采用的波束形
成的方法可获取 Janus 配置的四个收发合置的波
束。相对于传统的四波束活塞式换能器, 在相同波
束宽度和工作频率的情况下, 相控阵换能器能够大
大减小尺寸。由于相控阵换能器本身的物理特性,
它还具有如下优点: 相控阵 ADCP 不需要进行声速
的补偿和修正, 大大简化了传统 ADCP 换能器阵
利用声透镜等方法进行声速补偿的繁琐步骤; 相控
阵 ADCP 一般为圆形平面阵, 很容易与载体共形, 不
需导流罩来抑制气泡的产生; 相控阵由多阵元组合
而成, 通过波束形成技术获取 Janus 配置的四个波
束, 很容易保证波束指向、波束宽度、发射响应、
接收灵敏度等声学特性参数的一致性。相控阵的这
些优点, 使它在低频、大量程测速方面获得了广泛
的应用。

常规相控阵声学多普勒流速剖面仪采用窄带
信号体制, 利用相移波束形成的方法形成发射和接
收波束。由于信号相位的周期性, 相移波束形成可
在一定程度上大大简化控制结构, 所以窄带相控阵
波束形成易于实现。但是对宽带系统来说, 信号带
宽大大宽于窄带系统, 又由于相移是频率的函数,
宽带系统的相移随着频率的改变而改变, 所以宽带
系统一般情况下无法使用窄带系统所用的相移波
束形成方法。时延波束形成可做到与频率无关, 所
以宽带系统一般采用时延波束形成方法。时延波束
形成给宽带系统带来的问题就是波束控制结构太
复杂, 每路子阵列均需进行时延控制, 系统硬件复
杂度大大增加。

本文在分析相移波束形成和时延波束形成基
础上, 介绍了窄带相控阵 ADCP 相移波束形成和宽
带相控阵 ADCP 时延波束形成的原理。基于相移波
束形成, 计算随着频率的偏移, 波束形成的波束角
与频率变化的关系, 从而获取带宽的偏移对波束宽
度带来的影响。然后从作用距离、分层厚度和测量
精度以及系统复杂度三个方面分析利用相移波束
形成发射编码信号带来的影响。由分析可知, 窄带
相控阵声学多普勒流速剖面仪可进行编码信号的
发射和接收, 能够提高系统的空间分辨率和测量精
度, 从而提高相控阵声学多普勒流速剖面仪的性能。

1 相控阵的相移和时延波束形成

1.1 相控阵 ADCP 的波束形成

以 TRDI 公司的 75 kHz 平面相控阵 ADCP 为
例, 分析多元圆形平面阵的波束形成方法。相控阵
发射信号中心频率 $f=75$ kHz, 取水中声速 $c=1500$
m/s, 则波长 $\lambda=20$ mm, 阵元间距 $d=\lambda/2=10$ mm, 相
控阵总直径为 480 mm, 阵元数为 988^[2]。如图 1 所
示, 黑色阵元产生左右两个波束, 白色阵元产生前
后两个波束, 构成 Janus 配置的 ADCP 的四个波束,
如图 2 所示^[3]。由于白色阵元相当于黑色阵元旋转
90°而构成, 两种颜色的阵元具有相似的性质, 所以
这里只针对黑色阵元产生的左右两个波束进行分
析。黑色阵元共有 36 列, 组成一个 36 元子阵的线
阵, 每个子阵随包含阵元数目的不同而具有不同的
灵敏度。36 列各子阵列输出信号为:

$$\begin{aligned} F_0(t) &= M_0 \cdot \cos(\omega t) \\ &\vdots \\ F_i(t) &= M_i \cdot \cos(\omega t + i\varphi) \\ &\vdots \\ F_{35}(t) &= M_{35} \cdot \cos(\omega t + 35\varphi) = M_{35} \cdot \operatorname{Re} [e^{j\omega t} \cdot e^{35j\varphi}] \end{aligned} \quad (1)$$

式中: M_i 为子阵列的接收灵敏度, 随子阵包含阵元
数目的不同而不同; ω 为信号角频率; φ 为相邻阵
元接收信号间的相位差, 有

$$\varphi = 2\pi f \tau = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta = 2\pi f d \frac{\sin \theta}{c} \quad (2)$$

式中: τ 为相邻阵元间的信号时延; θ 为波束角。则
相控阵的总输出可以表示为

$$F_{\text{out}} = \sum_{i=0}^{35} M_i \cdot \cos(\omega t + i\varphi) \quad (3)$$

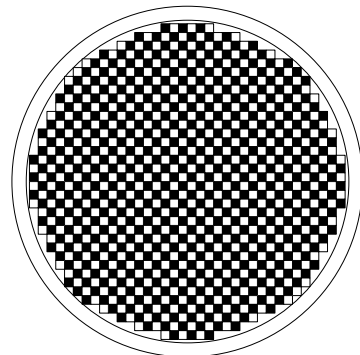


图 1 相控阵 ADCP 的阵元排列模型

Fig.1 The array arrangement model of phased-array ADCP

1.2 相控阵的相移波束形成

一个 N 元等间距线阵的归一化自然指向性函数
为^[4]

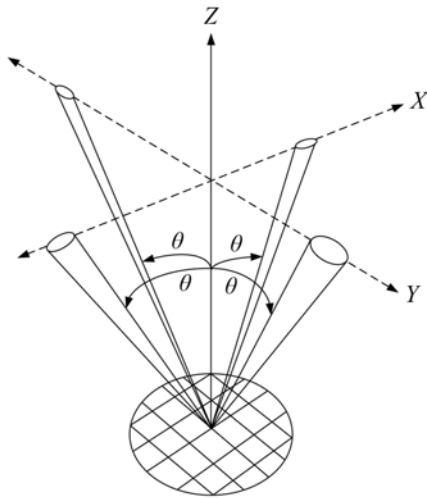


图 2 相控阵 ADCP 的波束形成示意图
Fig.2 Schematic of beam forming of phased array ADCP

$$R(\theta) = \frac{\left| \sin\left(\frac{N\varphi}{2}\right) \right|}{\left| N \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \right|} = \frac{\left| \sin\left(\frac{N\pi d}{\lambda} \sin\theta\right) \right|}{\left| N \sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin\theta\right) \right|} \quad (4)$$

在阵元之间插入相移使波束主极大方向控制到特定的方位的方法称为相移波束形成。在窄带应用(一般在主动声呐中)时,常用相移波束形成。在阵元之间插入相移 β 后的 N 元等间距线阵的归一化自然指向性函数为

$$R(\theta) = \frac{\left| \sin\left(\frac{N}{2}(\varphi - \beta)\right) \right|}{\left| N \sin\left(\frac{1}{2}(\varphi - \beta)\right) \right|} \quad (5)$$

即只要相邻阵元间均插入相移 β 后,即波束主极大方向满足

$$\beta = \varphi \quad (6)$$

将式(6)代入式(2)可知,波束主极大方向为

$$\theta_0 = \arcsin \frac{\beta \lambda}{2\pi d} = \arcsin \frac{\beta c}{2\pi f d} \quad (7)$$

由式(7)可知,相移波束形成下的波束主极大方向是频率的函数。只有在窄带情况下(相控阵信号系统带宽很窄,仅收发单频脉宽信号),才能假定波束主极大方向 θ_0 与插入相移 β 的关系不受频率的影响。如图 3 所示,当平面声波从偏离基阵法线 $\theta_0 = 30^\circ$ 方向入射,且阵元间距 $d = \lambda/2$ 时,相邻两列阵元的相位差 φ 为

$$\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta = \frac{\pi}{2} = 90^\circ \quad (8)$$

如图 1 所示的相控阵 ADCP 阵元排列模型中,每一列阵元作为一路子阵列。由于 0、4、8、12...列阵元,1、5、9...列阵元,2、6、10...列阵元,3、7、11...列阵元同相位,各阵列间可以分别并联起来,构成平面阵的四路输出线。改变四路输出线之

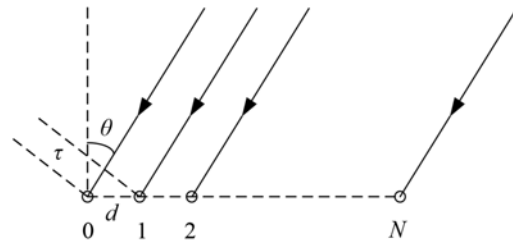


图 3 线阵波束形成
Fig.3 Beamformer of linear array

间的相移角,便可以构成窄带相移相控阵的发射和接收波束。这里只针对黑色阵元产生的左右两个波束进行分析,接收波束 1 的相移波束形成如图 4 所示,接收波束 2 的相移波束形成如图 5 所示,发射波束的相移波束形成如图 6 所示。相移波束形成使窄带相控阵 ADCP 的相控波束形成大大简化,只需要对四路波束进行相移控制,便能够同时形成两路发射波束和单独的两路接收波束。

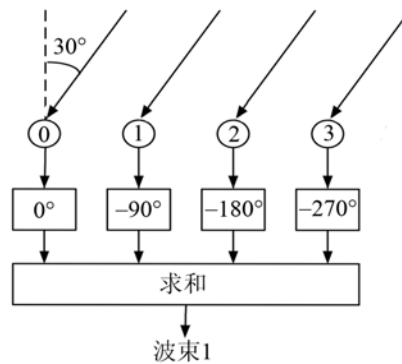


图 4 接收波束 1 的相移波束形成
Fig.4 Phase shift beamforming for receiving beam 1

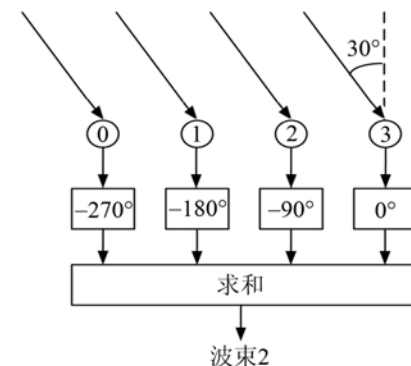


图 5 接收波束 2 的相移波束形成
Fig.5 Phase shift beamforming for receiving beam 2

由于信号相位的周期性,相移波束形成可在一定程度上大大简化硬件控制结构,所以窄带相控阵波束形成易于实现,并且被广泛应用于声学多普勒测速测流的产品中。

1.3 相控阵的时延波束形成

相邻阵元间的插入相移 β 与时延 τ 的关系为

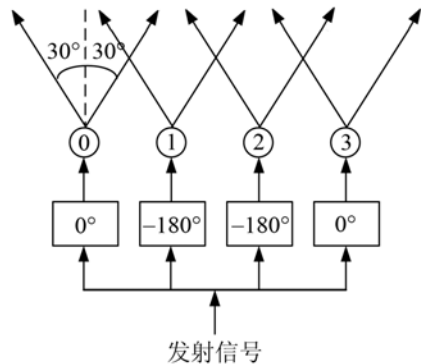


图6 发射波束的相移波束形成

Fig.6 Phase shift beamforming for the transmitting beams

$\beta=2\pi ft$, 代入式(7), 则波束主极大方向写成时间延迟形式为

$$\theta_0 = \arcsin \frac{c\tau}{d} \quad (9)$$

由式(9)可知, 时延波束形成下的波束主极大方向与频率无关。一般在宽带情况下(相控阵信号系统带宽很宽, 甚至占到中心频率的 25%带宽), 可以使用时延波束形成的方法进行波束形成。

如图 1 所示的相控阵 ADCP 阵元排列模型中, 每一列阵元作为一路子阵列。如图 3 所示, 当声波从 θ_0 方向入射时: 第 1 列阵元的输出较第 0 列阵元的时延为 $\tau=d\sin\theta_0/c$, 第 2 列阵元的输出较第 1 列阵元的时延为 $\tau=d\sin\theta_0/c$, …… , 即相邻阵列之间均需要插入相同的时延值。接收波束的时延波束形成如图 7 所示, 发射波束的时延波束形成如图 8 所示。时延波束形成的优点是波束主极大方向只与时延值有关, 通过改变时延值能够灵活地改变波束主极大方向; 缺点是增加了波束控制的复杂度, 由于

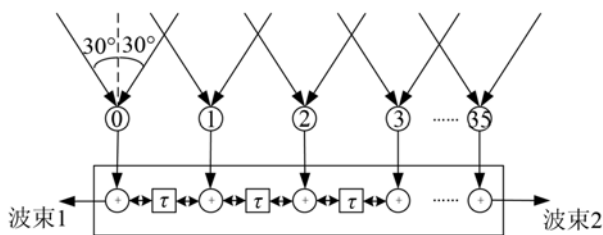


图7 接收波束的时延波束形成

Fig.7 Time delay beamforming for receiving beams

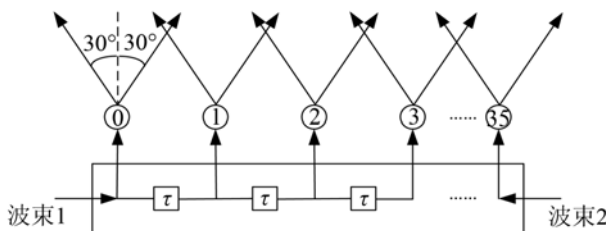


图8 发射波束的时延波束形成

Fig.8 Time delay beamforming for transmitting beams

时延没有周期性的特点, 每个相邻阵列间均需进行时延控制, 波束控制的路数要远大于相移波束形成方法的路数。

2 编码信号的相移波束形成

2.1 编码信号

宽带声学多普勒流速剖面仪采用重复二进制伪随机相位编码调制的正弦脉冲信号, 编码一般采用巴克码、m 序列等编码方式^[5]。编码信号在时域表现为信号相位的 $[0, \pi]$ 反转, 在频域表现为信号能量带宽的拓展, 编码信号的 -3 dB 宽度由每个编码码元填充正弦波周期数确定。如果码元填充数为 2, 则编码信号 -3 dB 带宽为中心频率的 50%。图 9 为正弦波由二进制伪随机编码相位调制的示意图。编码信号的带宽随着码元正弦波填充数的增加而减小, 当码元填充数为 10 时, 编码信号 -3 dB 带宽为中心频率的 10%。

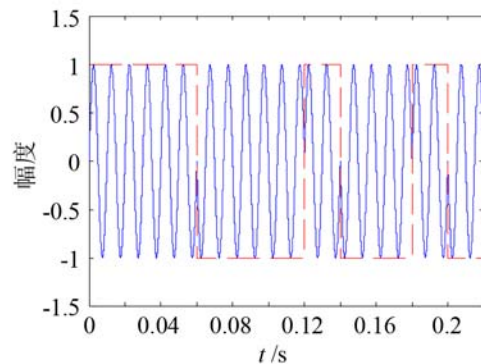


图9 二进制伪随机相位编码信号示意图

Fig.9 Schematic of binary pseudo random phase coding signal

2.2 编码信号对相移波束形成的影响

相移波束形成的方法无法应用在宽带情况下, 主要是由于随着信号带宽的增大, 相对中心频率产生偏移的频段, 形成波束的主极大方向也随之发生偏移, 使宽带信号的波束宽度增大, 能量分散, 从而影响系统性能。为了估算编码信号的波束宽度对系统性能的影响, 计算频率偏移与波束主极大方向的关系。

为了减小带宽对波束形成的影响, 假设编码信号系统的带宽中心频率比为 10%。对于 75 kHz 中心频率的相控阵 ADCP 系统来说, 则偏离中心频率的上下限分别为 ± 3.75 kHz。对相移波束形成系统来说, 插入相移的 N 元等间距线阵的归一化自然指向性函数如式(5)所示^[6]。利用相移波束形成, $+30^\circ$ 方向接收波束形成如图 10 所示。阵元间距与波长

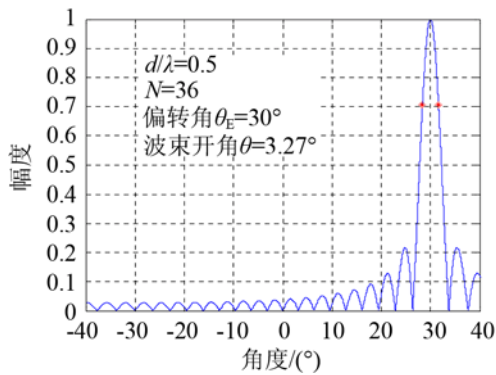


图 10 30°方向接收波束形成
Fig.10 Beamforming in the direction of 30°

之比为 0.5, 阵元数目 N 为 36, 波束角 θ_E 为 30°, 波束开角 $\theta=3.27^\circ$, -3 dB 角度分别为 28.38° 和 31.65° 。

为了进行编码信号发射, 对频率上下限 ± 3.75 kHz 的波束形成角度进行计算。当频率升高 5% 时, 波长减小, 阵元间距不变, 假设阵元间的相移仍然为 90° , 则波束形成如图 11 所示, 波束角 θ_E 为 28.445° , 波束开角 $\theta=3.07^\circ$, -3 dB 角度分别为 26.91° 和 29.98° 。当频率降低 5% 时, 波长增大, 则波束形成如图 12 所示, 波束角 θ_E 为 31.775° 。波束开角 $\theta=3.5^\circ$, -3 dB 角度分别为 30.02° 和 33.53° 。因此, 对带宽 10% 的编码信号来说, 相控阵换能器

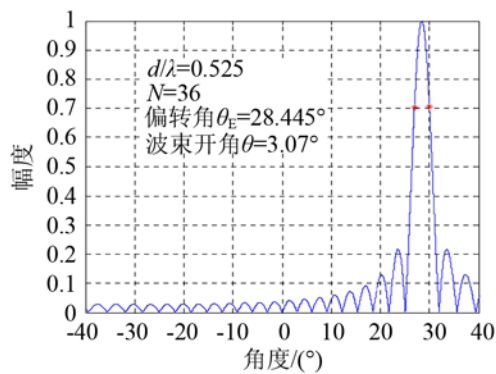


图 11 频率升高 5% 时的波束形成
Fig.11 Beamforming with 5% frequency increasing

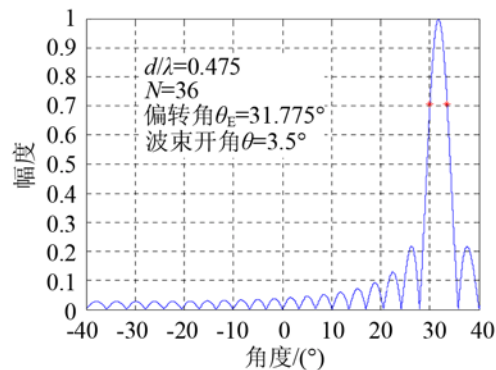


图 12 频率降低 5% 时的波束形成
Fig.12 Beamforming with 5% frequency decreasing

的波束开角变为 $33.53^\circ-26.91^\circ=6.62^\circ$, 波束开角大约增大到窄带信号波束开角的 2 倍。波束开角的增大引起换能器聚焦系数减小, 发射声源级减小, 系统作用距离减小, 但是由于发射信号变为伪随机编码的编码信号, 相控阵系统的测量精度得到提高。

考虑到换能器的面积和发射信号的能量聚集程度, 声学多普勒流速剖面仪的波束宽度一般取为 $3^\circ\sim 4^\circ$ 。采用相移波束形成的方法进行限定带宽的编码信号收发, 仅仅增加信号收发的波束宽度, 减小发射信号的能量聚集程度, 优点是能够大大简化波束控制复杂度, 减少信号控制流程。

3 编码信号相移波束形成的性能分析

3.1 作用距离

由第 2 节中计算可知, 利用相移波束形成的方法进行编码信号发射, 使信号波束宽度增大, 从而造成声呐系统声源级降低, 减小了系统的作用距离。相控阵 ADCP 为主动声呐的一种, 声呐方程可以表示为^[7]:

$$VSL = SL - 2TL + SV + 10\log(V) + SRX \quad (10)$$

其中: VSL 为体积散射强度, SL 为声源级, TL 为传播损失, SV 为体积散射强度, V 为散射体积, SRX 为接收灵敏度。

相控阵 ADCP 发射 10% 带宽的编码信号, 波束开角为发射窄带信号的 2 倍。换能器的聚集系数减小 6 dB, 则声源级和接收灵敏度均减小 6 dB; 照射体积增大一倍, 则散射体积对应分贝值增加 6 dB; 总回波强度减小 6 dB。对 75 kHz 相控阵 ADCP 来说, 如果均采用相移波束形成的方法, 10% 带宽的编码信号系统比窄带信号系统的作用距离大概减小 20%。

3.2 分层厚度和测量精度

窄带 ADCP 系统中, 由分层厚度决定发射信号脉宽, 每层得到一个速度测量值。而在编码 ADCP 系统中, 编码信号(如图 9 所示)采用复相关算法进行计算, 每一个重复的编码信号都可以计算得到一个速度值, 编码的个数对应计算得到的速度个数, 则每层测量得到的速度值个数可以由码元数所确定, 码元宽度对应编码信号分层厚度, 即编码信号 ADCP 的分层厚度可远小于窄带 ADCP 的分层厚度。

多普勒测频为随机过程, 窄带 ADCP 系统和编码信号 ADCP 系统分别采用单频脉宽信号和二进制伪随机编码信号作为发射信号, 由于信号体制的不同, 两种系统的测量精度也不相同。窄带 ADCP 系

统速度测量的标准方差 σ_{U_r} 为^[5]

$$\sigma_{U_r} = \frac{1.4c\lambda}{8\pi\Delta R} \quad (11)$$

其中: c 为水中声速; λ 为波长; ΔR 为分层厚度。

编码信号 ADCP 系统速度测量的标准方差 σ_{U_r} 为^[5]

$$\sigma_{U_r} = \frac{c\lambda}{8\pi\Delta R} \sqrt{\frac{C^2}{2M_a}(\rho^{-2}-1)} \quad (12)$$

其中: C 为编码和信号处理的非理想程度, 一般取为 1.5, M_a 为码元数, ρ 为相关系数幅值, 一般取 0.5。

利用相控阵 ADCP 的相移波束形成, 相控阵换能器的 -3 dB 带宽大于中心频率的 10%, 发射编码信号, 编码信号码元填充数为 10, 编码信号的 -3 dB 带宽为中心频率的 10%。当编码长度为 11 位时, 由式(11)和式(12)可知, 编码信号 ADCP 系统速度测量的标准方差是窄带系统标准方差的 40%, 即精度提高了 2.5 倍。相对于发射单频脉宽信号的窄带系统, 发射编码信号的 ADCP 系统能够提高系统的测量精度性能。

3.3 系统复杂度

由第 2.1 节的分析可知, 对于 988 个阵元的 75 kHz 相控阵 ADCP, 黑白阵元共构成 72 路子阵列。采用相移波束形成的相控阵 ADCP 中, 72 路子阵列可以根据相移规律并成 8 路子阵, 其中 4 路子阵形成左右两个波束, 另外 4 路子阵形成前后两个波束, 从而构成 Janus 配置的四个波束。对 8 路相移通道进行控制, 便可采用一套发射机和四路接收机实现相控阵 ADCP 的相移波束形成。

采用时延波束形成的相控阵 ADCP 中, 由于时延信号特征, 72 路子阵列无法简并。其中 36 路子阵列形成左右两个波束, 另外 36 路子阵列形成前后两个波束, 从而构成 Janus 配置的四个波束。需要对 72 路子阵列分别进行时延控制, 相对于相移波束形成系统, 增加了系统控制电路的复杂度, 加大了系统的硬件开销。

4 结 论

在不改变硬件电路结构的前提下, 相控阵 ADCP 系统利用窄带相移波束形成技术进行编码信号的发射与接收, 提高了系统的空间分辨率和测量精度(单测速标准方差降为窄带系统的 40%), 从而提高了设备的性能; 缺点是由于波束开角的增加, 系统的作用距离减小。对比相控阵系统发射窄带信号和编码信号的优缺点, 在损失作用距离的情况下提高了空间分辨率和测量精度, 满足了流速测量主要指标的提高。下一步可以考虑进行系统试验, 验证波束宽度的增大对系统的实际影响, 为系统的实用化奠定基础。

参 考 文 献

- [1] Ocean Surveyor Datasheet. Teledyne RD Instruments. 2009
- [2] 刘国勤, 彭东立. 相控阵多普勒计程仪的相控波束形成[J]. 声学技术, 2015, 34(4): 199-203.
LIU Guoqing, PENG Dongli. Beam former of Phased-Array Doppler Velocity Log[J]. Technical Acoustics, 2015, 34(4): 199-203.
- [3] YÜ Xiaolong, Steve E Bradley, Francis D Rowe. Two-dimensional array transducer and beamformer, US Patent No.5808967, Sep.15, 1998.
- [4] 田坦. 声呐技术(第二版)[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2009.
TIAN Tan. Technical of Sonar[M]. 2nd edition. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2009.
- [5] Blair H Brumley, Ramon G Cabrera, Kent L Deines, et al. Performance of a broad-band acoustic doppler current profile[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1991, 16(4): 402-407.
- [6] 田坦, 张殿伦. 相控阵多普勒测速技术研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2002.
TIAN Tan, ZHANG Dianlun. Study of phased_array doppler velocity measurement technique[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2002.
- [7] Urick R J 著. 洪申 译. 水声原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1990.
Urick R J. Principles of underwater sound[M]. 3rd edition, Harbin: Harbin Engineering University Press, 1990.