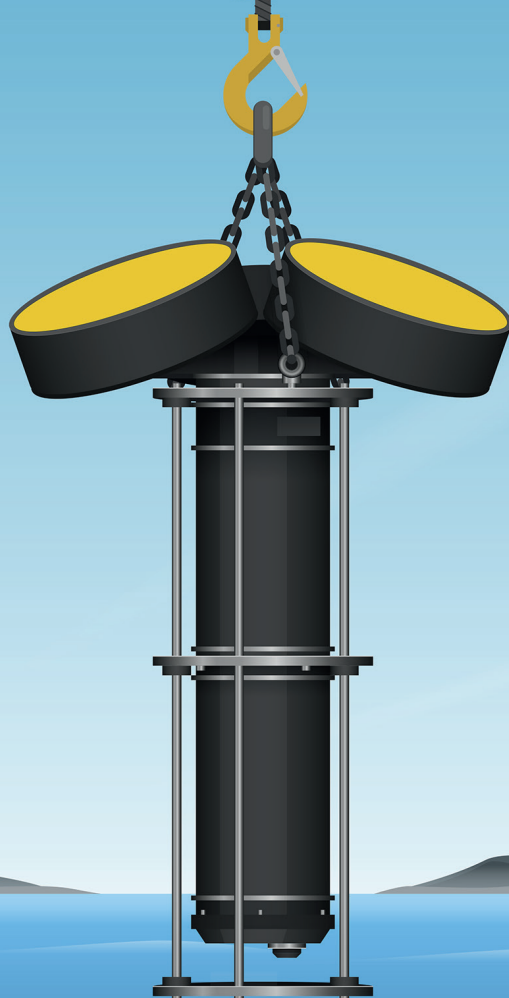




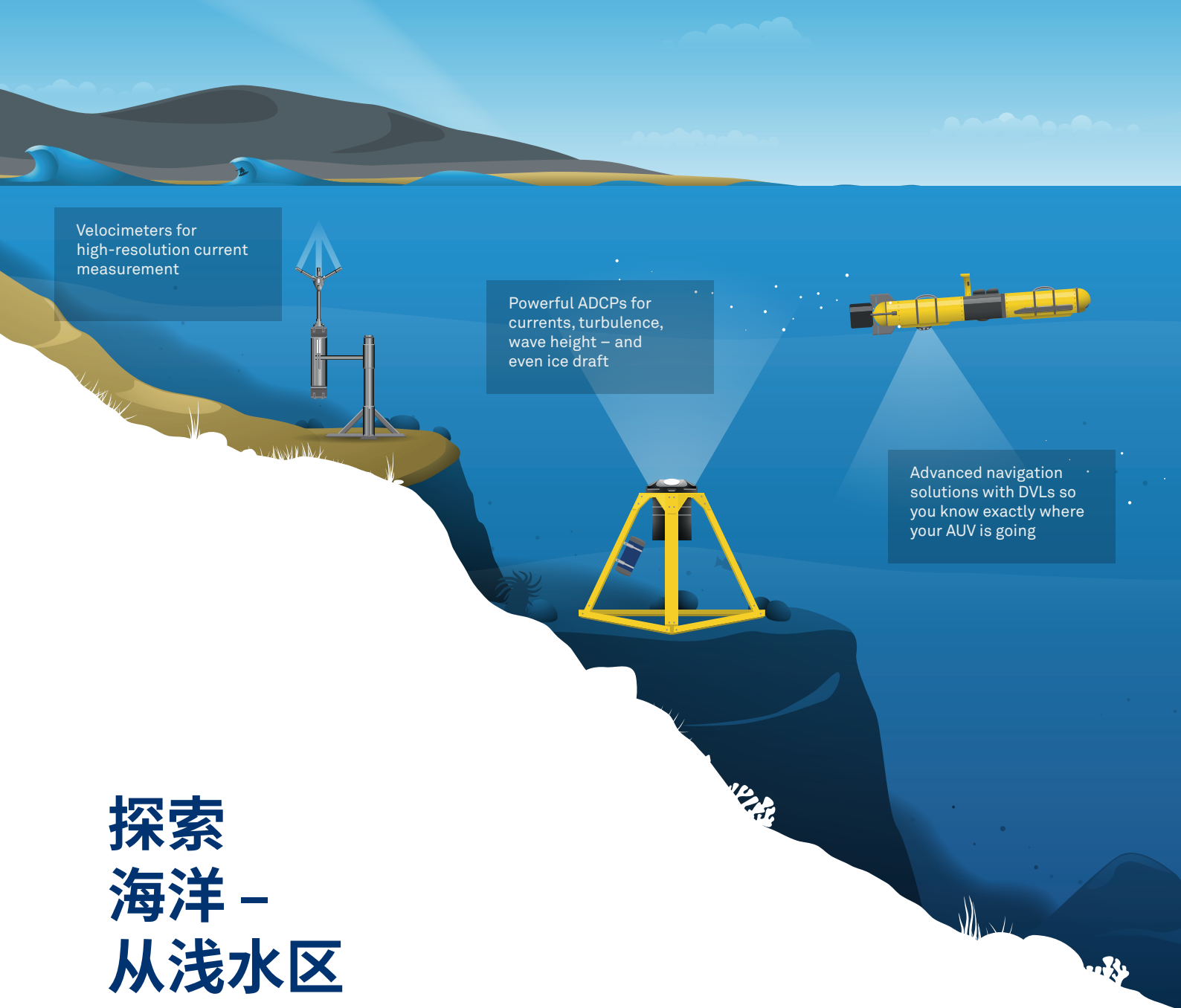
ADCP 使用指南

使用声学传感器测量洋流、
海浪和湍流的指南。



目录

目录	3
探索海洋 – 从浅水区到深水区	4-5
1. 多普勒技术和ADCP简介	6-9
2. 多普勒效应	10-13
3. ADCP如何利用多普勒效应	14-17
4. 不同的多普勒处理技术	18-23
5. ADCP频率和剖面范围	24-25
6. ADCP范围单元	26-27
7. 海面或海底如何影响ADCP数据	28-30
8. ADCP和振铃	31
9. ADCP如何利用声速数据	32-33
10. ADCP倾斜传感器	34-37
11. ADCP罗盘	38-39
12. 对数据求平均值来减小随机误差	40-43
13. 术语表	44-47

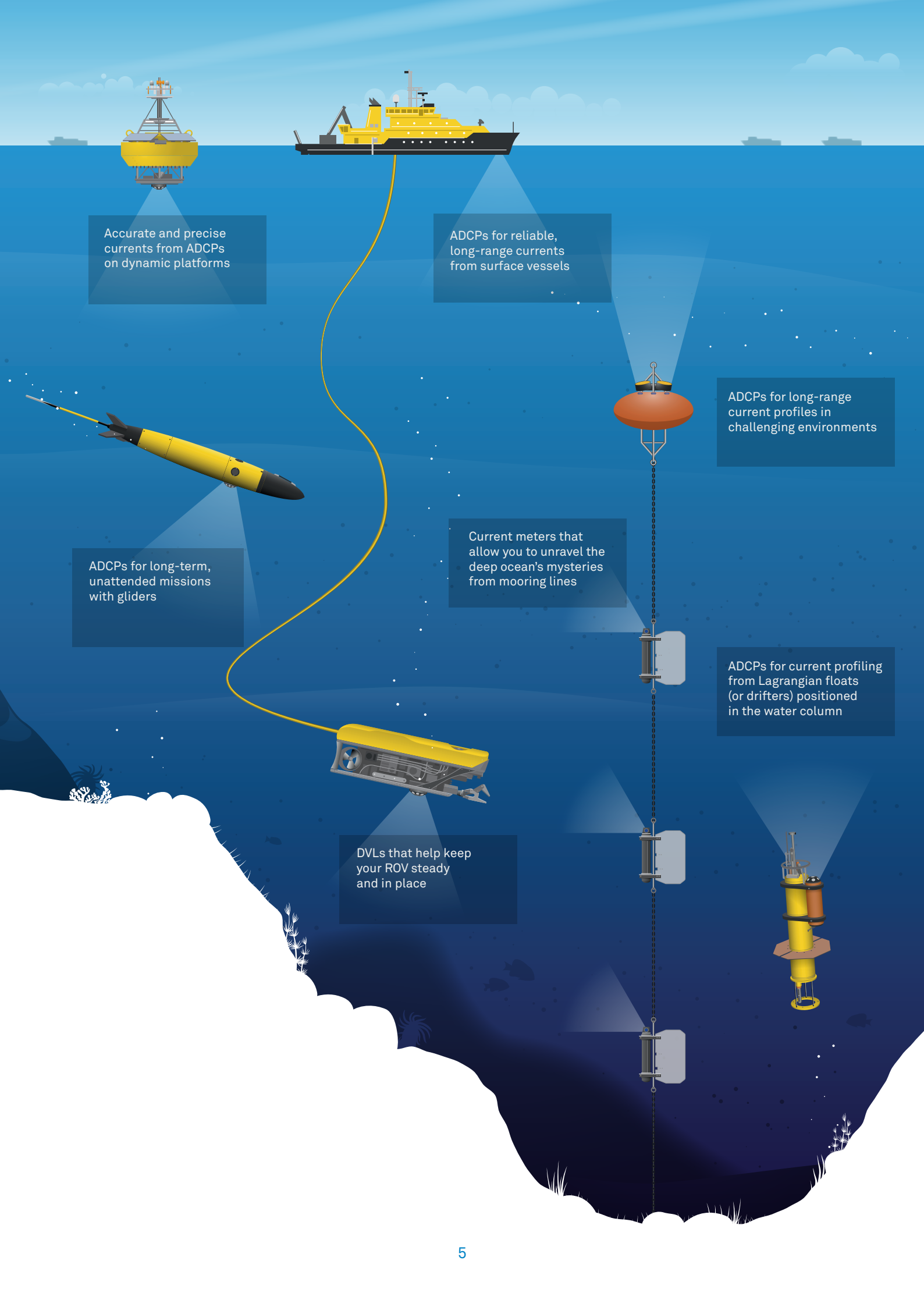


探索 海洋 – 从浅水区 到深水区

无论您是在浅水河口还是海洋深处工作，Nortek 都能为您提供满足测量需求的解决方案。

在我们的地球上，水的运动随处可见。从河口或海滩的浅水区到深邃幽暗的开阔海洋，水一直在上下和横向运动，输送着海洋食物网赖以生存的营养物质和调节全球气候的能量。因此，

无论是深海洋流、强大的海面波浪还是湍流的高能漩涡，能够准确测量这些运动都对生命至关重要。Nortek 的解决方案不仅可以直接进行这些测量，还可以帮助水下载体准确可靠地沿着海底导航，从而确保关键设备到达目的地并安全返回。



Accurate and precise currents from ADCPs on dynamic platforms

ADCPs for reliable, long-range currents from surface vessels

ADCPs for long-range current profiles in challenging environments

ADCPs for long-term, unattended missions with gliders

Current meters that allow you to unravel the deep ocean's mysteries from mooring lines

ADCPs for current profiling from Lagrangian floats (or drifters) positioned in the water column

DVLs that help keep your ROV steady and in place

1. 多普勒技术和ADCP简介

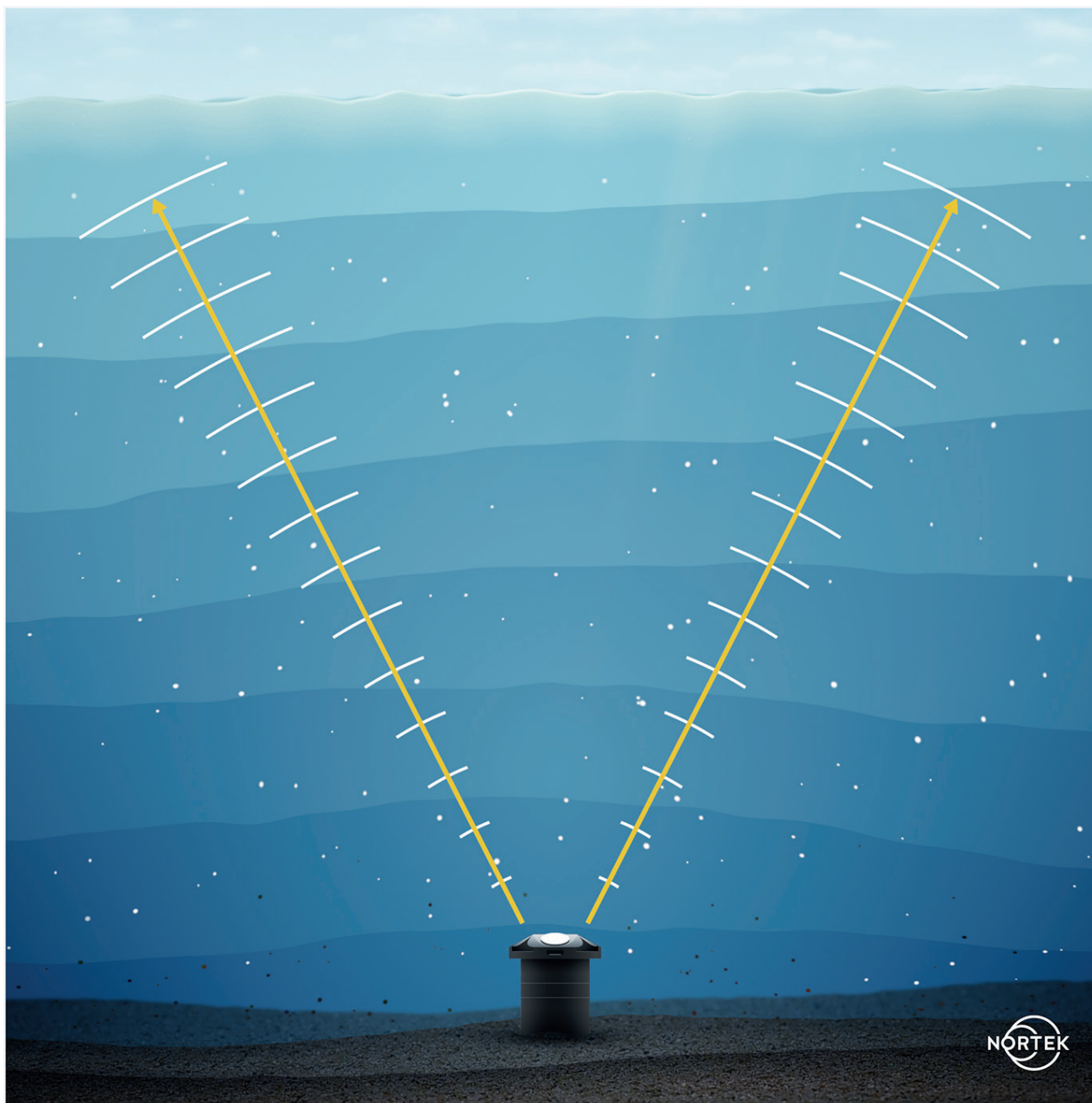


图1. ADCP功能的概念图。声信号（图中所示为从ADCP发出的锥形）穿过水体传播。然后ADCP测量图中所示的每层中的流速。[点击此处观看此插图的动画版本。](#)

本指南旨在为您提供有关多普勒技术的一些背景信息及其科学原理。本指南将帮助您更快地学会使用声学多普勒流速剖面仪(ADCP)，并在布放时充分利用它们。

ADCP是使用水下声学技术测量水流速度的仪器。它们的工作方式与声纳类似，发射的声信号离开仪器穿过水体传播。这些信号遇到水中的颗粒反射回来，产生可由ADCP检测到的回波。然后，ADCP可以利用这些回波构建流速剖面，方法是首先将水体分成多层，然后测量每层中的流速。概念图如图1所示。

到目前为止，ADCP已经问世40年了。它们最开始用于测量海洋的洋流剖面，后来适应了广泛的应用，包括海浪、湍流和海底导航。所有这些应

用均受本指南所概述原则的影响。虽然本指南主要针对ADCP，但这些原则也适用于其他多普勒仪器，包括单点流速仪、流速仪和多普勒计程仪(DVL)。

虽然最早的ADCP可以追溯到二十世纪七十年代初，但直到二十世纪八十年代初才开始投入商用，当时一家名为Rowe-Deines Instruments的公司最早成功推出了商用流速剖面仪。此后，ADCP有了长足的发展和转型。它们最初难以使用：在早期，ADCP用户必须花费大量时间学习技术，才能获得自己想要的的数据，并确保数据质量好到可以使用。

多年来，工程师们一直在努力完善ADCP的操作并使它们易于使用。从那以后，ADCP变得越来越好，随附的工具也非常有用，因此用户可以专注于自己的科学研究或工程设计，而无需过多考虑所用仪器的详细用法。

ADCP只是众多测量水流速度的传感器中的一种，但它们已成为海洋和内陆水域最常用的传感器，因为它们可使用户轻松获得高质量的数据。

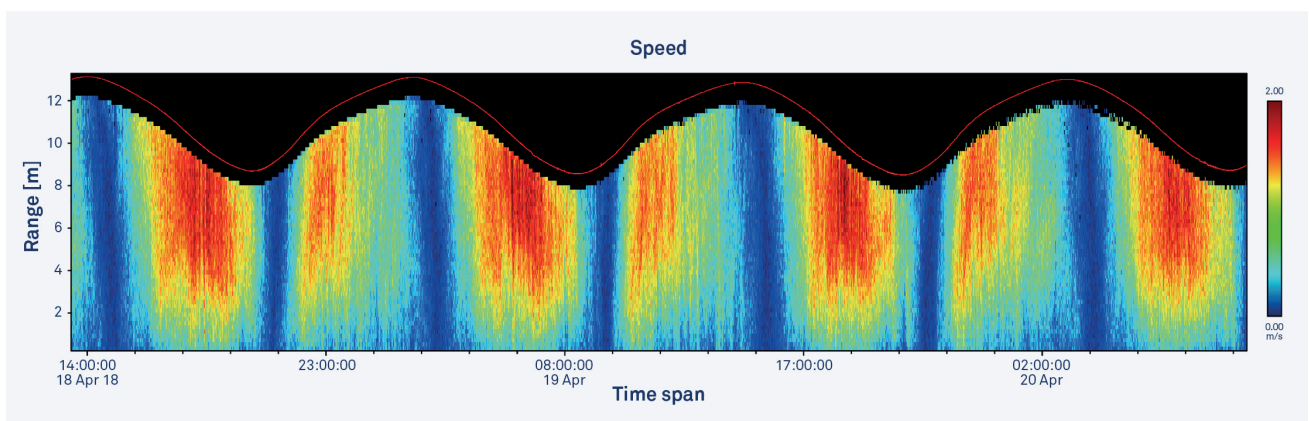


图2. 头朝上安装在潮汐河口底部的ADCP的洋流剖面数据。在潮汐周期之间经常观察到高达2米/秒的水流速度。

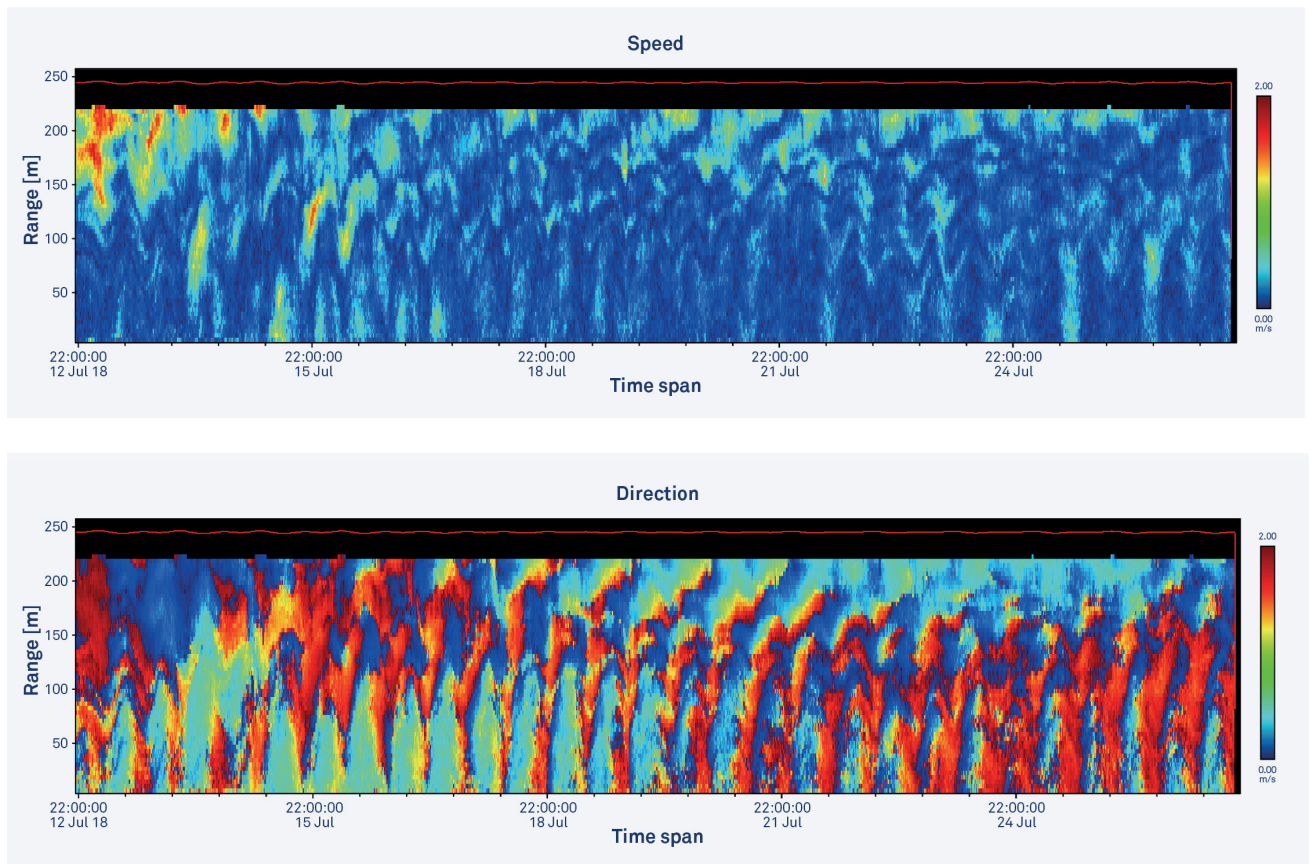


图3. 头朝上安装在水下大约300米处的ADCP的洋流剖面数据。上图所示为水流速度，下图所示为水流方向。在图中可以清楚观察到潮汐振荡，包括随深度发生的明显变化。

2. 多普勒效应

多普勒效应以十九世纪奥地利物理学家Christian Doppler的名字命名，他用多普勒效应来解释双星发出的光的颜色。为了演示多普勒效应的原理，他让小号手在火车的敞篷车厢中演奏，让音乐家站在火车轨道旁边，在火车来回经过他们时聆听小号的音调。该演示向我们介绍了声学中的两个关键概念：源和接收器。在本示例中，小号是声音源，而聆听小号音调的音乐家则是声音接收器。

我们可以用来说明多普勒效应的一个示例是赛车引擎声音的多普勒效应。由于多普勒效应，赛车引擎的声音以熟悉的方式改变音调。

赛车接近时音调变高，而离开时音调变低。

这段赛车经过时的引擎动画视频说明了频率和行驶时间之间的关系。如果您在一辆正在行驶的赛车前方，第二波到达您所在位置的时间会比第一波短，因为赛车速度使第二波离您更近。在赛车前方时，行驶时间越来越短，因此音调上升。在赛车后方时，行驶时间越来越长，因此音调下降。如果您知道频率和行驶时间中的一个，就可以计算另外一个。

在这种情况下，ADCP可以派上用场，因为它们几乎始终可以测量行驶时间变化来确定多普勒效应。

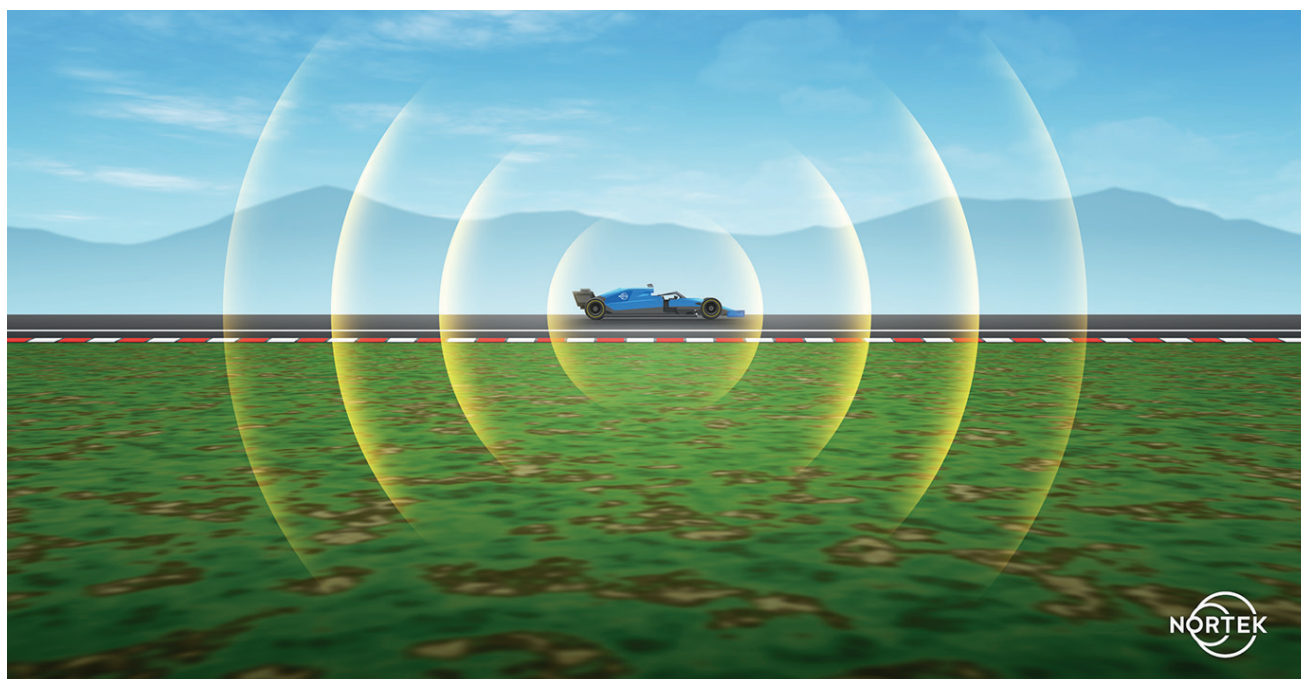


图4A. 当赛车静止不动时，在周围听到的引擎声音相同。

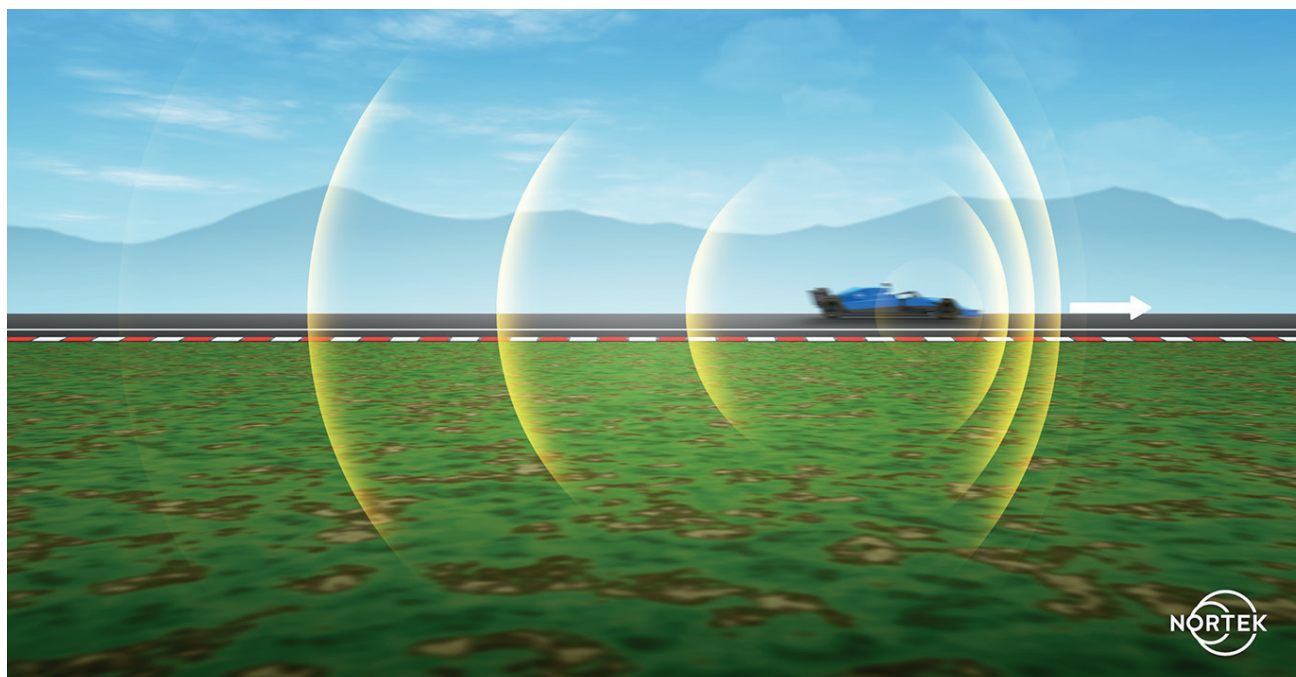


图4B. 在正在行驶的赛车前方和后方听到的引擎声音不同。在赛车前方，声波聚集在一起，产生更高的音调。在赛车后方，声波散开，音调下降。请观看这段赛车经过时的引擎[短片](#)。

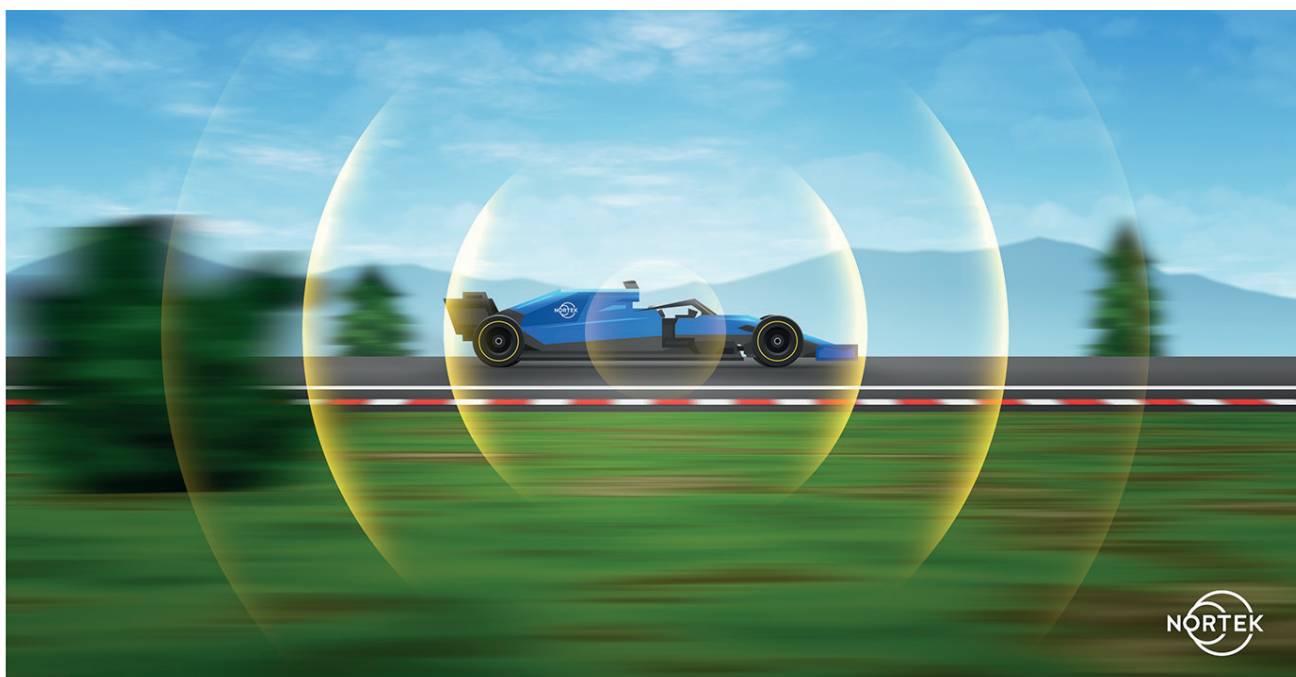


图5. 源和接收器之间如何相对运动才能产生多普勒效应的演示图。如果它们既没有相互靠近也没有相互远离，就不会产生多普勒效应。

图4A和4B显示了赛车速度会改变引擎音调的原因。如果您站在赛道旁边并且有一辆赛车经过，引擎音调将在赛车经过您时发生改变。发生这种情况的原因是您（接收器）和赛车（源）之间的距离正在变化。当赛车接近时，距离减小，因此音调增大，反之亦然。虽然我们以赛车引擎的声音为例，但也可以使用其他任何声音源，例如乘用车的喇叭，[如本视频所示](#)。

下文展示了如何使用乘用车喇叭的音调变化来计算乘用车的速度。当乘用车接近时，喇叭的频率约为530 Hz，当乘用车驶离时，喇叭的频率降至大约470 Hz。60 Hz的差值是多普勒频移 F_d 的两倍，因为您会听到频移来了又去（但方向相反）。

（乘用车喇叭）视频中的乘用车速度方程式如下：

$$\text{速度} = C \frac{F_d}{F} = 340 \text{ m/s} \frac{\left(\frac{530 \text{ Hz} - 470 \text{ Hz}}{2} \right)}{500 \text{ Hz}} = 20.4 \text{ m/s} = 46 \text{ mph (73 kph)}$$

其中C是声音在空气中的传播速度。

当乘用车静止不动时，喇叭的频率F是两个频率的平均值，即500 Hz。在前文提到的视频中可以清楚观察到明显的音调变化（频率变化；即多普勒效应）。但是，对于乘用车的驾驶员来说，音调并没有改变，因为他与乘用车一起运动，因此他和喇叭之间的距离没有改变，所以没有产生多普勒效应。类似的观点如图5所示，该图演示了源和接收器之间如何相对运动才能产生多普勒效应。

除了频率（即音调）变化外，还可以从传播时间变化的角度来理解多普勒效应。以乘用车上的驻

车传感器为例，这些小型声纳在发出声音脉冲后监听它们的回波。

声纳可以通过脉冲传播到障碍物并返回声纳所需的时间（“双向传播时间”）得知距障碍物的距离。当乘用车靠近障碍物时，警告声会发生变化，以提醒驾驶员乘用车正在接近障碍物。通过声音脉冲传播时间变化可以测算出乘用车速度，这是利用多普勒效应的另一种方式。

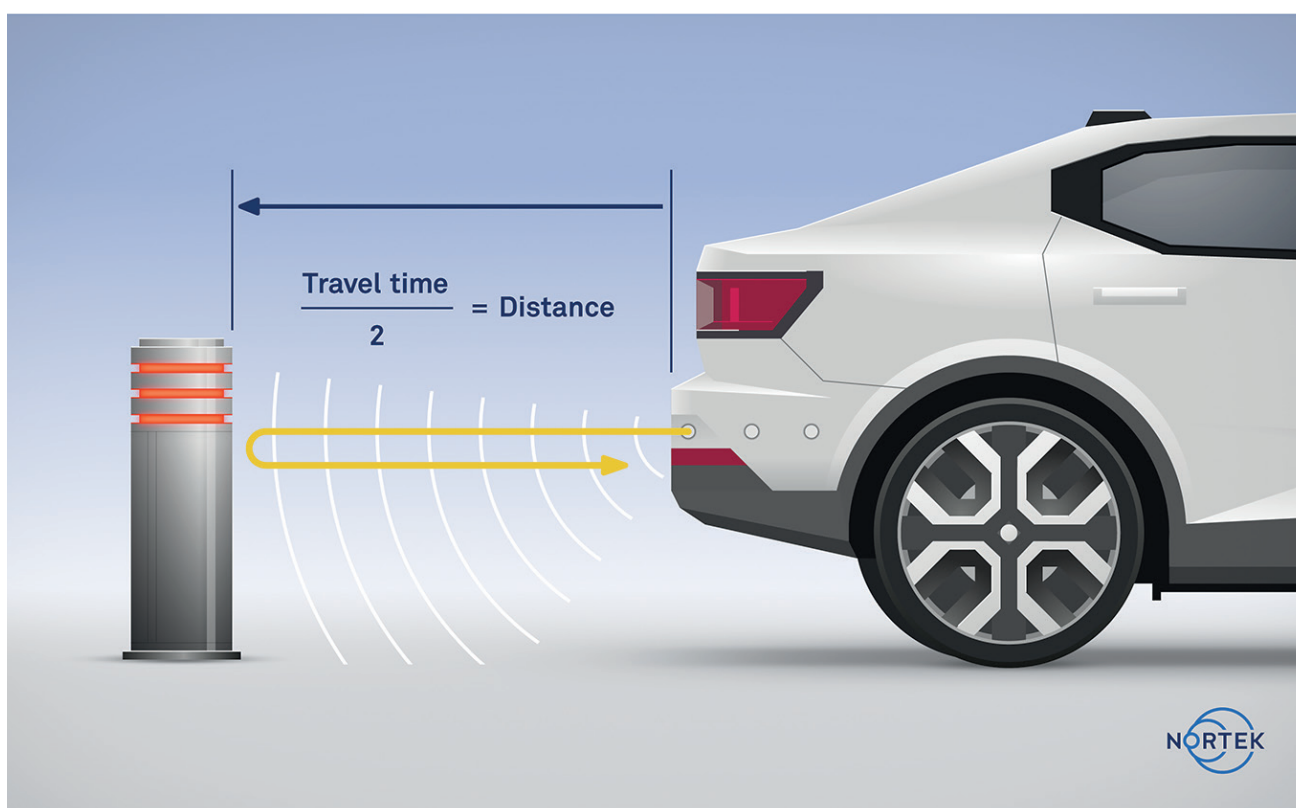


图6. 图中所示为乘用车驻车传感器的双向传播时间。传感器发出声音脉冲，遇到障碍物后反射回来，产生该传感器可检测到的回波。脉冲离开传感器并返回该传感器所需的时间称为双向传播时间。

3. ADCP如何利用多普勒效应

ADCP实际上是通过测量与水一起运动的颗粒速度来间接测量水流速度。这些颗粒通常是浮游动物，但也可能是悬浮沉积物或其他颗粒（图7）。ADCP假设颗粒的运动速度与水流速度相等。这几乎一直是合理的假设，正因如此整个ADCP行业目前才得以存在。这些颗粒被称为散射体，因为它们可以散射声波（或使声波发生偏转）。

ADCP使用窄声束测量颗粒的速度。它们发射（或发出）声音，等待一小段时间，然后监听颗粒反射的回波。ADCP通过多普勒处理得出颗粒的运动速度，也就是水流速度。在测量过程中，ADCP使用的声频非常高，以至于我们的耳朵根本听不到。

ADCP只能感知与ADCP的距离发生改变的颗粒的运动，这意味着ADCP声束只能检测到与该声束平行的运动。每个声束测量速度的单个分量，即一维(1D)速度。

头朝向水面或朝向海底的ADCP通过使用多个倾斜声束来获得三维速度剖面，每个声束指向不同的方向。这需要假设水流“在水平方向上是匀速的”，也就是说，在给定的深度，所有声束测量的速度都是相等的。鉴于ADCP声束之间的距离很短，这几乎一直是合理的假设。

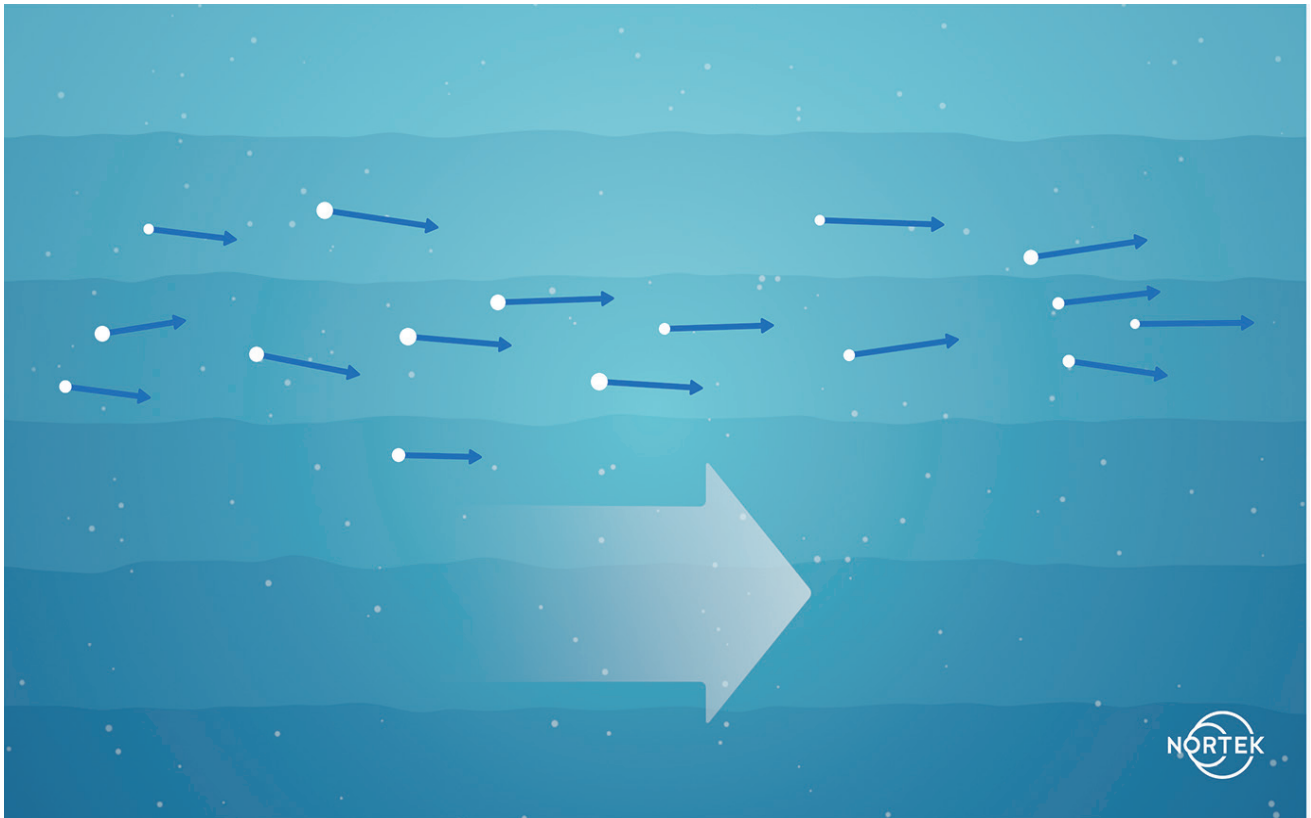


图7. 信不信由你，ADCP测量的并非水本身的运动！它们测量的是水中颗粒的运动。

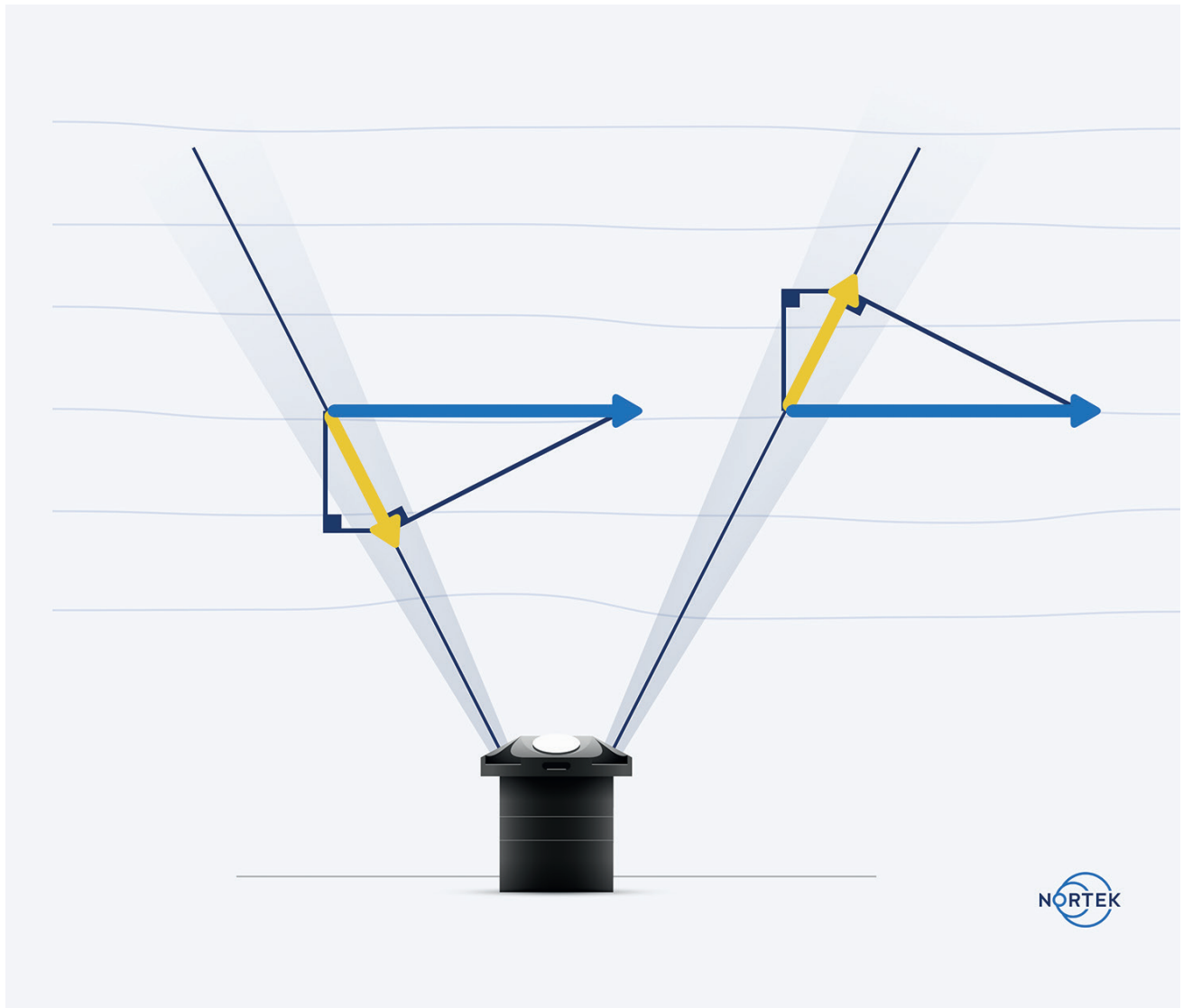


图8. 通过ADCP的左右一对声束测量速度。水流速度用蓝色箭头表示，每个声束测量的水流速度都相等。每个声束测量的速度（黄色箭头）是水流速度在声束上的投影。

图8所示为头朝上的ADCP发出的两个相对声束。每个声束实际测量的水流速度（蓝色箭头）都相等，但每个声束测量速度的方式不同。水流速度在右侧声束上的投影所产生的速度远离ADCP（黄色箭头）。而在左侧，投影朝向ADCP。图9所示为两个声束速度矢量的简单矢量相加得出的结果与水平水流速度成比例。具有左右一对声束的ADCP也将具有前后一对声束，通过组合两对声束可测量水平速度矢量。ADCP使用类似的数学方法来确定垂直速度，此时便获得了全面三维速度。在大部分时间内，垂直速度要远小于水平速度。事实上，海洋的总体垂直速度平均为零。

上述说明使用四个声束来说明ADCP如何计算三维速度，但使用三个声束也同样有效。只需稍微改变一下数学方法即可，但得出的结果是相等的。

用于将ADCP测量结果换算为实际水流速度的比例系数取决于ADCP的声束几何形状，该比例系数在制造时已加载到ADCP中。图8和图9给出的示例假设了三个条件：1) 垂直水流速度为零；2) ADCP完全处于水平状态；3) ADCP垂直于水流方向。但在不满足这些条件时，上述数学方法同样有效。当ADCP未处于水平状态和/或不垂直于水流方向时，ADCP纠正数据所用的过程将在本指南的下文中加以说明。

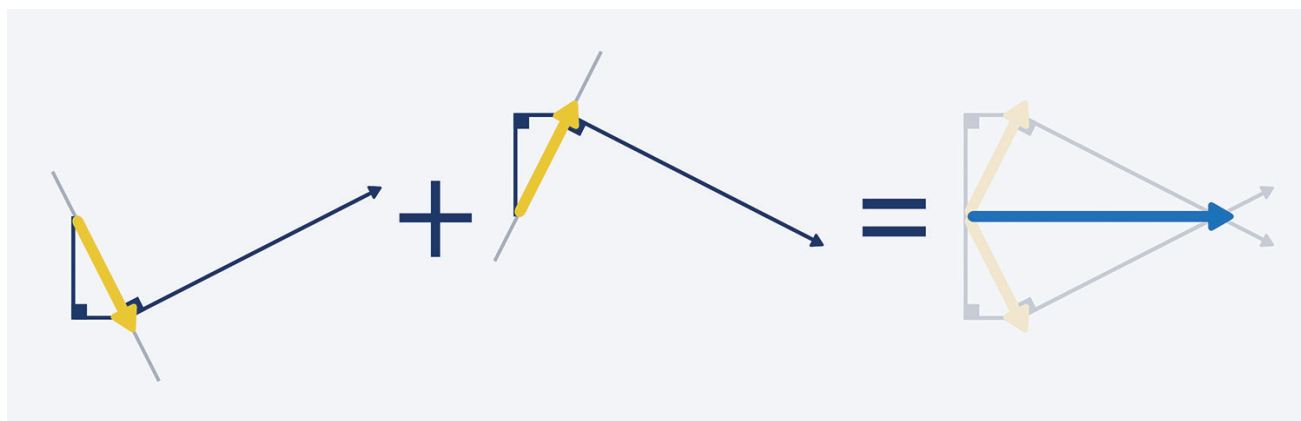


图9. 将图8中的两个黄色矢量相加即可得出水流速度。首先将黄色矢量分解为水平和垂直分量。垂直分量相互抵消，只剩下水平分量。该水平分量与水平水流速度成比例。

4. 不同的多普勒处理技术

ADCP可以通过多种方法测量水流速度，每种方法都有优缺点。商用ADCP最常用的两种方法通常称为宽带和窄带。宽带和窄带中的“频带”是指所用声脉冲的带宽。最后的第三种方法称为脉冲间相干（或简称为脉冲相干），该方法可实现非常高的时间和空间分辨率，但会减小范围。

本节将从基本宽带处理开始说明，因为窄带只是宽带的一个特例。在ADCP中实现宽带有不同的方法。最简单的宽带实现方法是使用两个短声音脉冲。这两个脉冲必须从相同的散射颗粒反射回来，才能得到颗粒的速度。这意味着ADCP在发射第一个脉冲和发射第二个脉冲之间不能等待太长时间。因此，ADCP通常将两个脉冲同时发射到水中。也就是说，在大多数宽带实现过程中，ADCP不会等到第一个脉冲返回到ADCP后再发射第二个脉冲。

我们通常将水中的散射体称为“云散射体”，因为散射体是随机分布的，就像云中的水滴一样。每当声音移动其脉冲长度时，都会从新颗粒返回回波，从而产生另一个独立的水流速度估算值。宽带中通常使用较短的脉冲，可提供更独立的估算值，从而产生更精细的细节或通过减少随机误差来改善结果。

带宽取决于脉冲长度：可实现最佳分辨率的短脉冲也具有最大带宽。图10所示为带宽与脉冲长度成反比。与此相反，无休止纯音的带宽为零，通常称为线谱。宽带ADCP使用的脉冲比窄带ADCP使用的脉冲短得多，并且它们测量水流速度的时间分辨率要好得多。

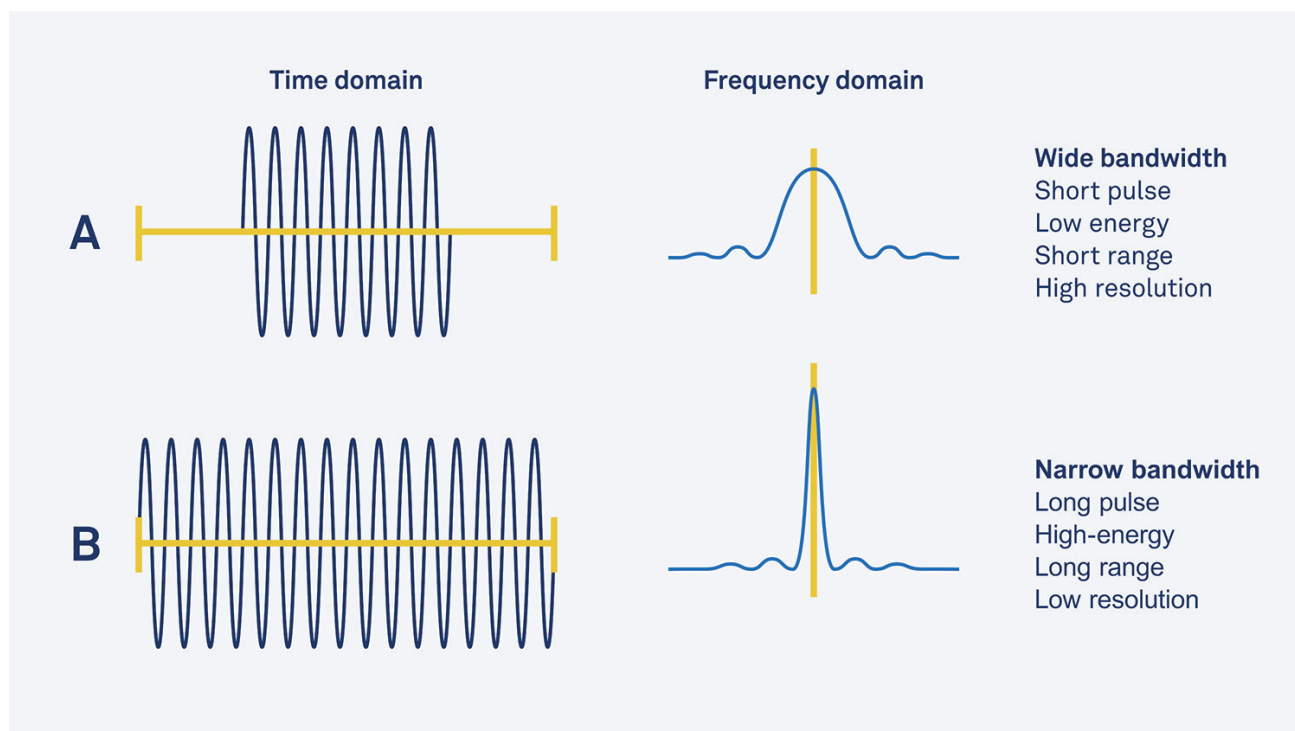


图10. 脉冲长度和带宽。左侧是在时域中显示的两个纯音信号，即它们随时间变化的图形。右侧的信号与左侧相同，但显示在频域中，即它们作为频率的函数的图形。顶部(A)脉冲频谱宽度大约是底部(B)脉冲频谱宽度的四倍，而底部(B)脉冲长度大约是蓝色脉冲的四倍。

宽带处理过程中通常使用的短脉冲存在的问题是，它们在进入水中时所携带的能量没有长脉冲所携带的能量多，因此它们形成的剖面范围没有那么广。解决方法是设计出具有短脉冲带宽的长脉冲。长脉冲在进入水中时会携带更多能量，形成的剖面范围更长。如果信号保持较短带宽，那么仍然可以通过处理回波来获得高分辨率的水流速度数据。一种方法是使用更多相同的短脉冲补充宽带中使用的两个原始短脉冲，只可惜这些

短脉冲中的一部分相位反转（就像将它们倒置一样）。这样做可使ADCP区分脉冲。另一种宽带实现方法使用线性调频，脉冲以一个频率开始，然后以另一个更高或更低的频率结束。

回顾上文中仅由两个短纯音脉冲组成的宽带传输原示例，想像两个短脉冲的长度逐渐增加，直到二者刚好相互接触。如图13所示。发生这种情况时，宽带传输就变成了窄带传输。

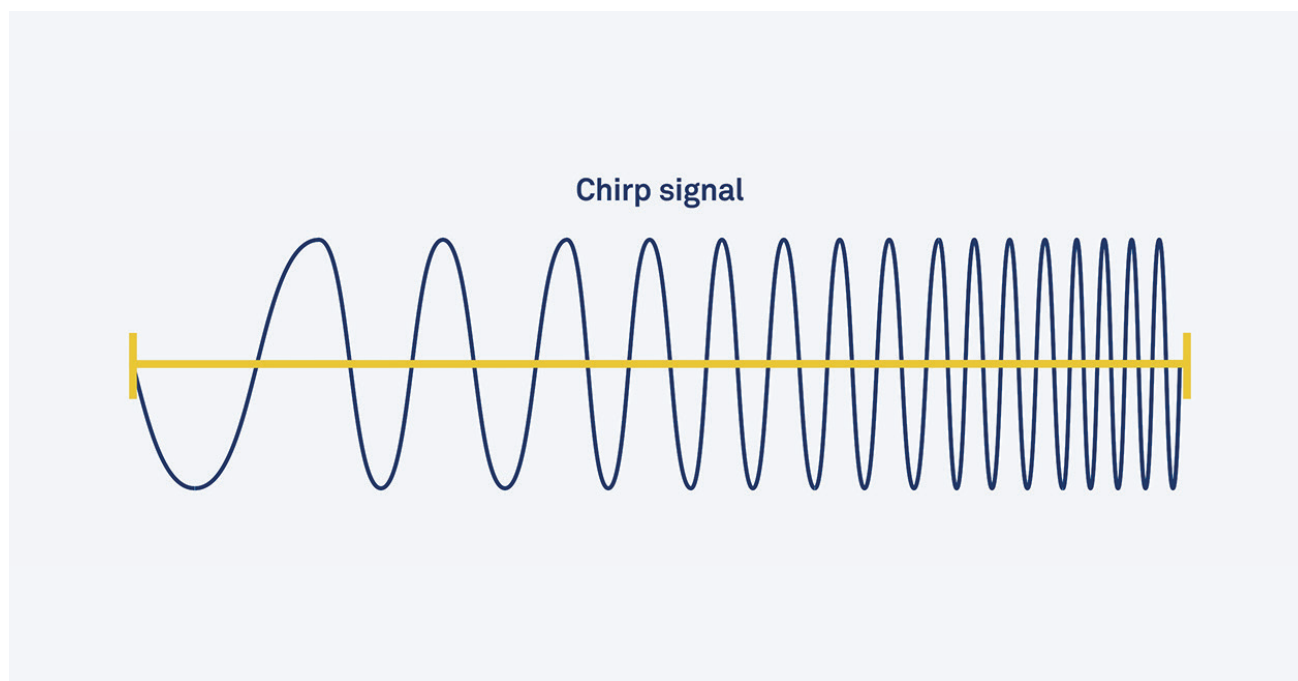


图11. 线性调频信号示例。请注意各峰间距是如何随着时间逐渐缩短的。这样可以区分脉冲的不同部分。

窄带脉冲可被视为宽带的一个特例，其信号处理基本相同。ADCP最开始使用的是窄带，部分原因是窄带在概念上看起来更简单，但也因为那个时代的微处理器处理能力有限。宽带处理的计算量更大，当然目前的微处理器处理速度已有所提升。

如前文所述，宽带ADCP可以捕捉更精细的细节，因为它们的较短脉冲会产生更独立的估算值。如图12所示，ADCP设置为同时使用窄带和宽带构建洋流剖面，每60秒在这两种方法之间进行一次切换。这两种方法都能很好地捕捉水流中的一般结构，并且得出的深度平均速度相等。

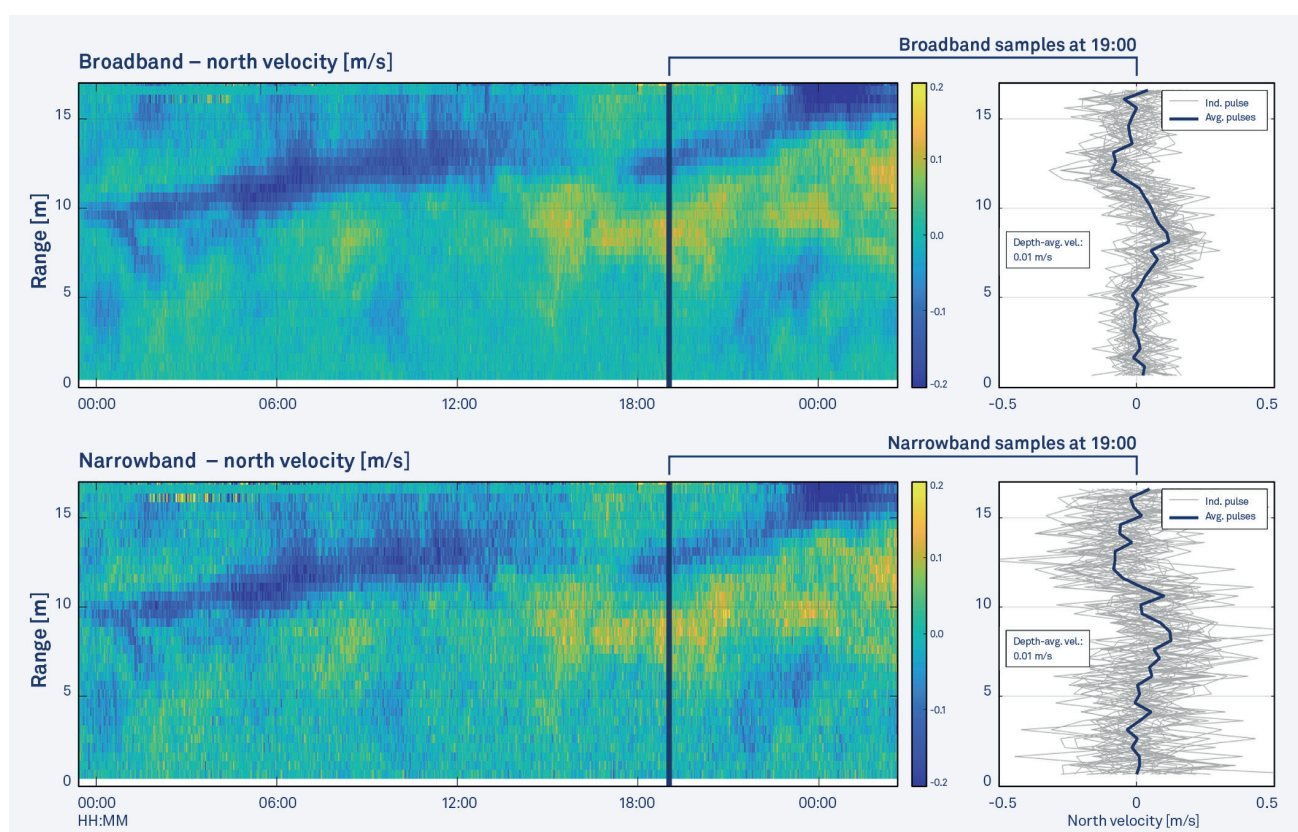


图12. 配置为使用窄带和宽带方法进行测量的单个ADCP提供的洋流速度。ADCP头朝上处于大约17米水深处。每种方法使用相同的配置，只改变带宽，并设置为每60秒切换一次。左侧面板显示了稍微超过24小时的数据，是速度北向分量的等值线图，上面是宽带，下面是窄带。右侧面板显示了在当地时间19:00左右依次采集的30个单独脉冲（灰色）的集合，以及所有这些脉冲的平均值（深蓝色）。与等值线图一样，上面是宽带，下面是窄带。请注意，两种方法得出的深度平均速度相等，但宽带呈现的水流结构细节更精细。

但是，如上图左侧的等值线图所示，宽带方法（左上）呈现的细节比窄带方法（左下）呈现的细节更精细。

宽带ADCP可获得更好细节的另一个原因是，它们可以更灵活地分离连续脉冲。更高的脉冲分离灵活性可降低测量不确定度，前提是它们仍然可以观测到相同的散射体。如图12所示，右侧是30个单独宽带脉冲（右上）和30个单独窄带脉冲（右下）的洋流剖面。在图中可以清楚看出，宽带的单独脉冲间可变性如何小于窄带的单独脉冲间可变性。因此，虽然两种方法得出的深度平均速度相等，但宽带呈现的细节更精细。

虽然更高的脉冲分离灵活性可使宽带为我们提供更详细的数据，但等待时间过长也会导致信号处理问题（例如，仪器可以测量的速度范围会受到影响），因此在设置ADCP进行测量时，宽带ADCP所需的保养要比窄带ADCP多。

除了宽带和窄带之外，我们还有第三种多普勒处理方法，称为脉冲相干。使用这种处理方法时，发射一对脉冲，与宽带方法非常相似；但是，脉冲的间距相对较长，导致两个脉冲无法同时在水中。脉冲相干法的目的是，只有在第一个脉冲完全返回后才发射脉冲对中的第二个脉冲。然后ADCP计算第一个脉冲的返回信号与第二个脉冲的返回信号的相似程度，该值与水流速度成正比。脉冲相干法是迄今为止的所有多普勒技术中精密度和时空分辨率最好的方法，因此它非常适合微湍流测量。但是，这种方法只能测量相对较短的距离（通常只有几米）和较低的速度（通常只有几厘米/秒）。

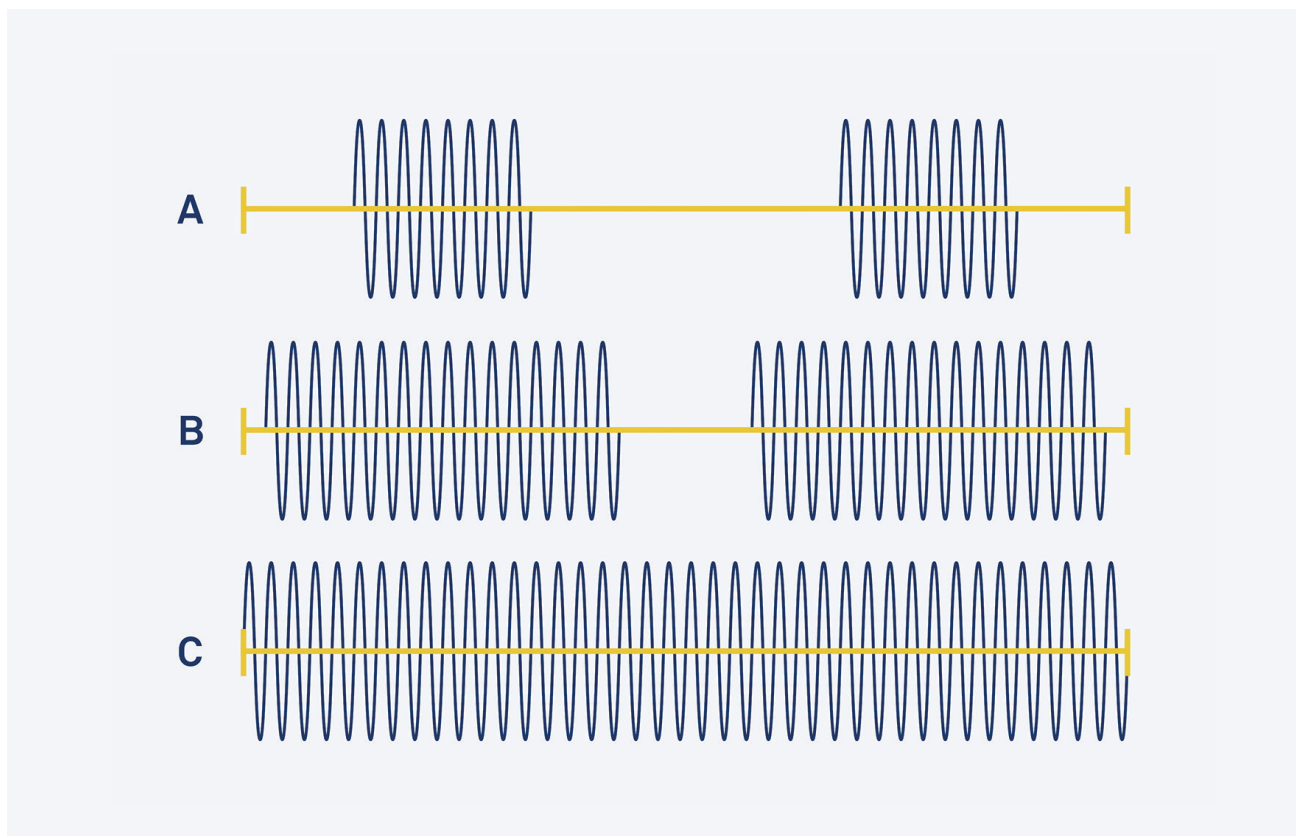


图13. 转变宽带脉冲对，但增加它们的脉冲长度，使它们变成一个窄带脉冲。A) 脉冲长度较短的宽带脉冲对；B) 增加脉冲长度，导致带宽变窄，从而产生C) 单个窄带脉冲。

5. ADCP频率和剖面范围

由于ADCP带宽与频率成比例，因此高频ADCP的带宽更大，可用于获取分辨率更高的数据。另一方面，低频ADCP的剖面范围更广。

如果剖面范围对您很重要，您可以采取一些措施来增大范围。使用一些仪器可以调整发射功率，提高功率即可增大范围。增大单元大小也可产生相同效果。例如，将发射脉冲持续时间加倍（通常通过将单元大小加倍来实现；请参阅第6节）可将发射的能量增加两倍或3 dB。但是，声音呈指数级衰减，因此功率加倍通常只会将范围增大几个百分点。

在某些地方，例如在远低于海面的深水中，散射体较少，因此回波较弱。水中的散射体较少会减小ADCP的范围。如果将ADCP头朝上停泊在

深海中，它将通过信噪比最强（因为信号更接近ADCP）的散射体区域构建剖面，然后将在信噪比通常最弱的范围末端有更多散射体。

这种方法可使ADCP构建最长的剖面范围，因此，在开阔的海洋中，头朝上的ADCP构建的剖面通常比覆盖同一区域的头朝下的ADCP构建的剖面更广。缺点是深水中的ADCP会丢失海面附近的数据（请参阅第7节）。如果海面附近的数据对您很重要，可以在海面附近使用额外的高频ADCP来获取这些数据。

Frequency	Typical range	Typical resolution
100 kHz	400 m	4 m
250 kHz	200 m	3 m
500 kHz	70 m	2 m
1000 kHz	30 m	1 m
2000 kHz	5 m	0.5 m

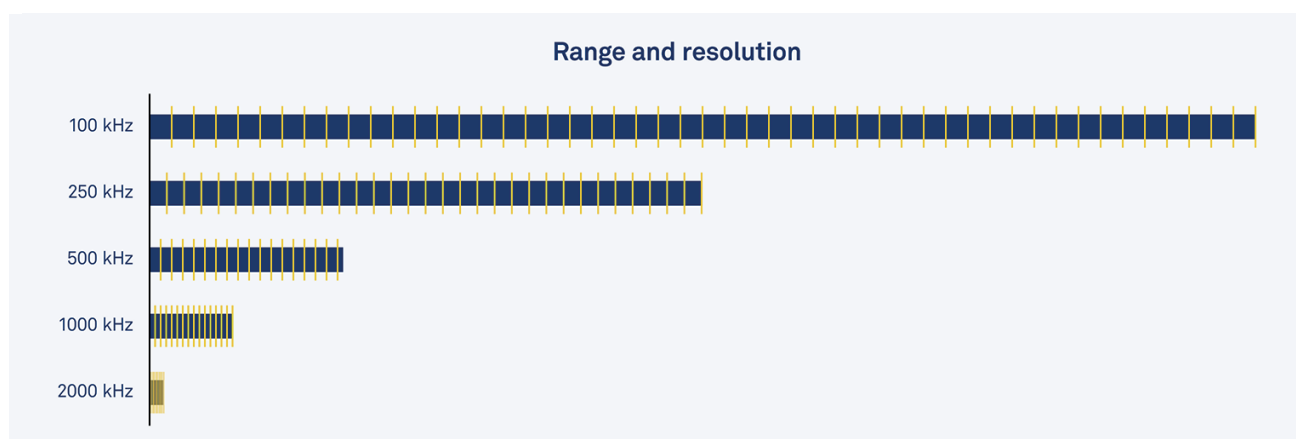


图14A和14B. 表格所示为ADCP中常用的各种频率的典型剖面范围和空间分辨率（单元大小）。

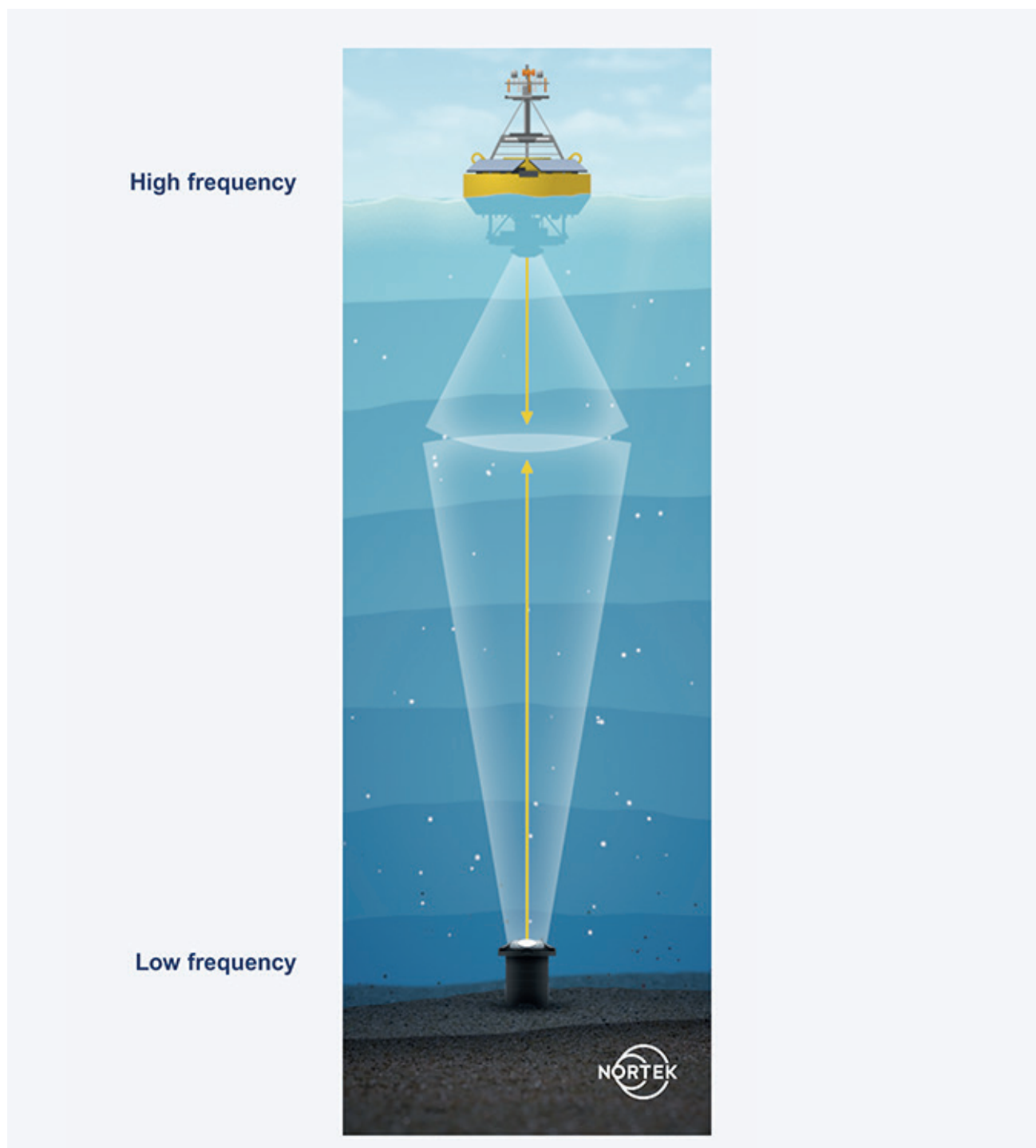


图15. 高频ADCP（安装在浮标上）与低频ADCP（安装在海底）结合使用以覆盖整个水体的示例。

6. ADCP 范围单元

ADCP将测量剖面划分为称为“范围单元”或“区间”的分段。返回到ADCP的第一批回波来自第一个范围单元。片刻之后，来自第二个范围单元的回波返回。一个接一个的单元返回数据，直到信号消失并且ADCP无法继续计算速度（见[图17](#)）。

如前文所述，ADCP深度单元大小会影响剖面范围以及速度方差。标准差是方差的平方根，是数据中随机误差的标称大小。

单次ADCP测量称为声脉冲，ADCP会对一组声脉冲求平均值来减小速度方差。

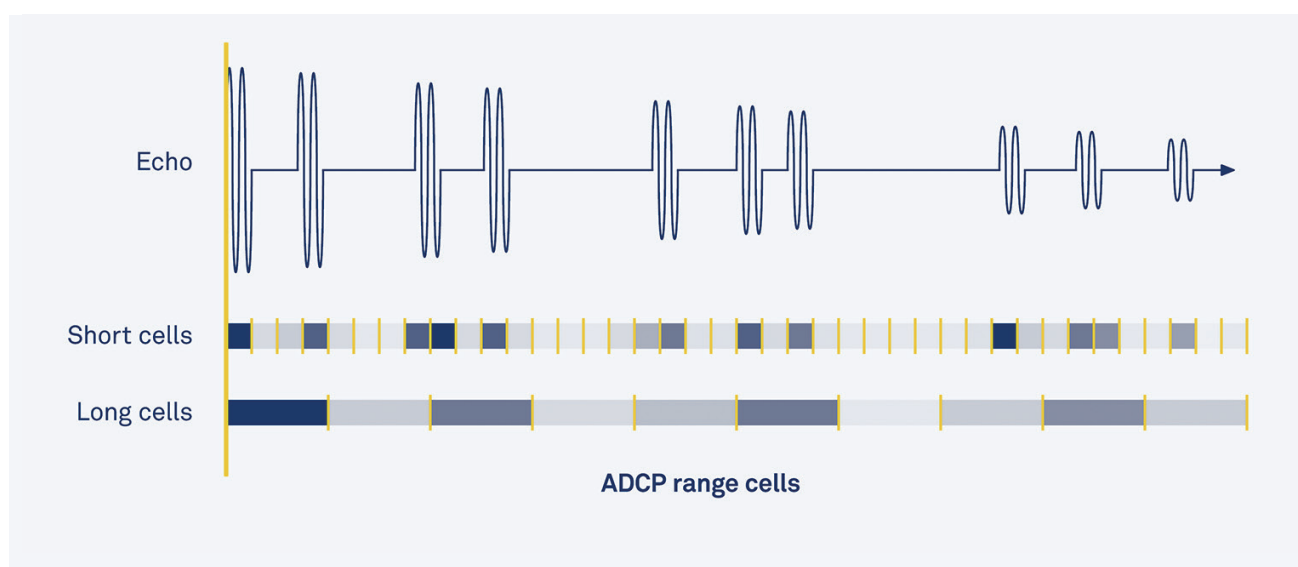


图16. 通过在间距较小的不同时间间隔监听回波，ADCP可以将水体分成许多深度层，称为单元或区间。这些单元或区间的大小可能不同。许多相邻单元的集合构成一个剖面。

用户可以调整ADCP范围单元的大小，但是一旦完成设置，整个剖面的单元大小都相同（只有少数例外情况）。较短的单元可以产生更精细的空间细节，但会增大速度方差。对一组声脉冲求平均值可以减小方差，但会降低时间分辨率（见图18）。因此，在选择单元大小时需要权衡空间分辨率、时间分辨率和速度方差。

[点击此处观看ADCP功能说明的动画版本。](#)

剖面ADCP测量整个剖面范围内许多单元的数据，但也测量其他声束几何形状。一些流速仪使用两个水平声束仅在单点深度测量水平速度。这些流速仪使用第三个倾斜声束测量三维洋流。

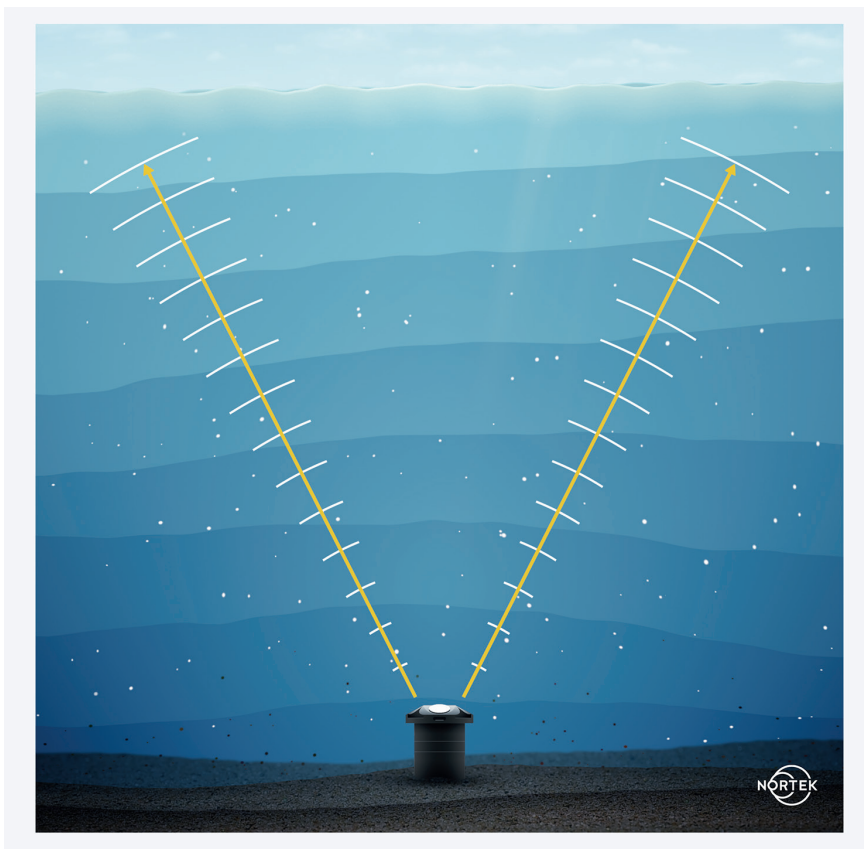


图17. ADCP功能的概念图。

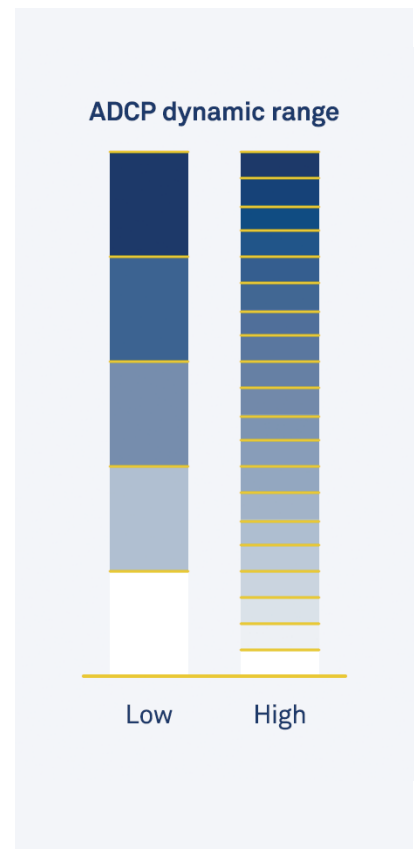


图18. 通过使用许多小单元，ADCP可以在水体中识别出更精细的速度细节，但单元越小，测量不确定度越大。换句话说，较短的ADCP单元（如图中右侧所示）可产生更精细的空间细节，但会增大速度方差。

7. 海面或海底如何影响ADCP数据

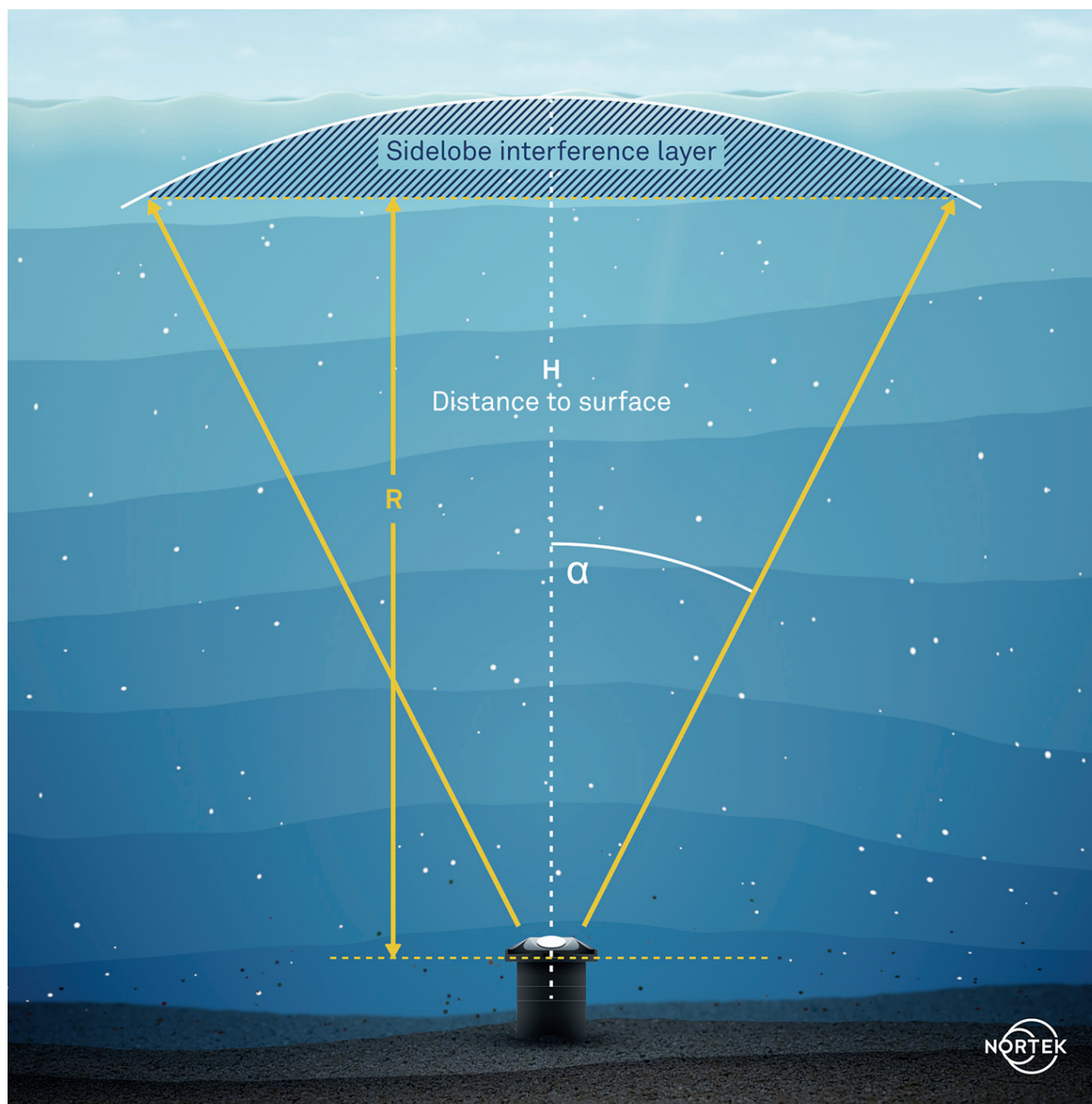


图19. ADCP测量到达海面的剖面中的速度。从海面反射回来的旁瓣在距海面的距离 H 内来回传播。沿声束测量的距离 H 位于海面下方，这里是旁瓣干扰测量速度的位置。干扰深度取决于声束的角度。如果将上述换能器更换为角度更小的换能器，干扰层将变薄。产生的范围 R 是ADCP的实际可用剖面范围。

ADCP声束有时被称为笔形声束，因为它们很窄。但是，声束实际上是锥形而非笔形，而且它们还会向侧面泄漏声音。ADCP声束像闪光灯或手电筒一样，朝向您时会令人眩目，但远离您时仍然可见。

声束的中心称为主瓣，这是ADCP中发挥作用的声束部分。旁瓣向侧面泄漏，在ADCP的大部分范围内，旁瓣对ADCP的测量几乎没有影响。这是因为主瓣携带大部分声功率。但是，与海底或海面等硬反射体相比，海洋中的声音散射体反射声音的效果较差。虽然旁瓣很弱，但是这些表面的旁瓣反射通常会强到足以在测量中引入误差。

由于海面和海底通常是静止的（即垂直速度平均为零），因此旁瓣干扰可通过使速度数据偏向零

来污染速度数据。旁瓣干扰会在旁瓣深度处的彩色等值线速度图上产生条纹。

当附近有反射物体时，旁瓣也会污染数据。例如，串联安装在电缆上的ADCP可能有其他传感器安装在声束前面的电缆上。这些传感器有时会污染速度数据，就像来自海面或海底的回波一样。

发生这种情况的原因是，虽然旁瓣很弱，但是海面和海面下的许多物体反射声音的效果比水中的颗粒（例如浮游动物）好。虽然径直朝上的旁瓣比沿倾斜主声束传播的声音弱得多，但海面是一个非常强大的反射体，以至于来自海面的回声可能会与主声束的回声一样强。

图19和图20所示为旁瓣干扰速度测量的位置。干扰深度取决于声束的倾斜角。倾斜角为 30° 时，可以在距海面距离的大约86%处获得良好数据。将倾斜角减小到 20° 时，可以在距海面距离的大

约94%处获得良好数据。倾斜角越小，距海面越近，但会增大速度标准差，因为与倾斜角为 30° 时相比，声束更垂直于水流方向。倾斜角为 20° 时所产生数据的方差大约是倾斜角为 30° 时的两倍。

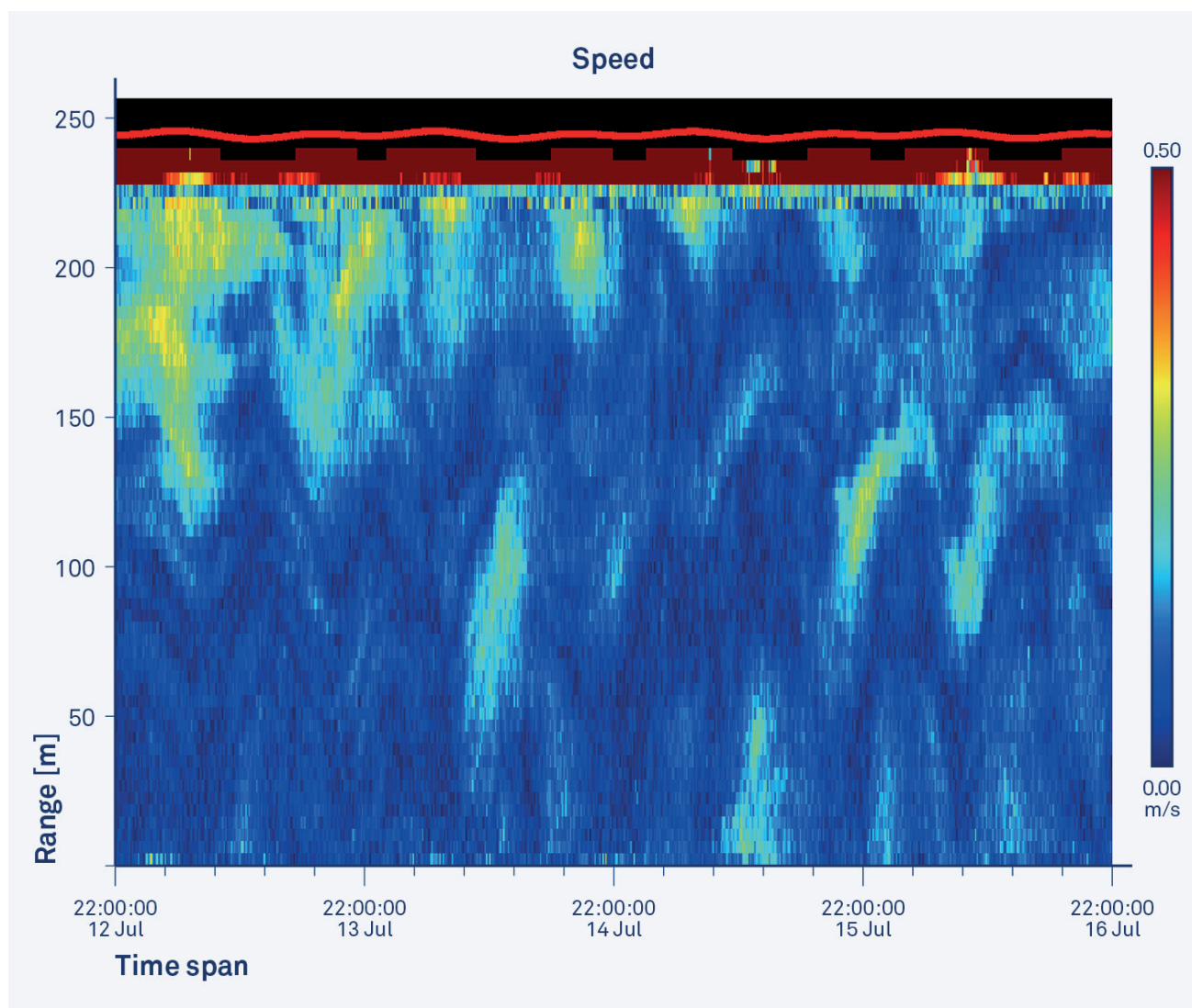


图20. 在水下大约250米处且头朝上的ADCP的速度数据。大约220米以上的区域受到旁瓣干扰的污染，因此水体顶部大约30米内的速度无效。

8. ADCP 和振铃

早期的ADCP必须让其换能器“振铃”才能获得良好的数据，因为即使在发射能量后，换能器仍会继续振动。这意味着需要忽略ADCP附近受到这种振铃影响的数据。振铃是由换能器和发射电路引起的。

目前的ADCP大有改善。（问题没有之前严重，但我们在操作时仍会使用测量盲区一词，这只是描述振铃的另一种方式。）但是，在ADCP换能器附近收集数据时，请注意ADCP本身导致的流动干扰。

9. ADCP如何利用声速数据

ADCP使用其换能器的温度来计算声速。深水中的ADCP，例如 >1000米，也可以使用深度来计算声速。ADCP需要声速来计算水流速度。准确的声速很重要，因为声速误差会在水流速度测量中产生比例误差。

声速通常会随水面以下深度而变化，但好消息是这种变化对水平ADCP的速度测量没有影响。原因可以用斯涅尔定律解释。从图21可以看出，当声速在海洋各层中变化时，连续性会使声音的水平速度分量保持不变。由于ADCP的水平速度测量仅取决于声音的水平速度，因此声速变化对ADCP的速度测量没有影响。

ADCP还使用声速将传播时间转换为距每个深度单元的距离。由于ADCP知道自己的声束几何形状及其倾斜度（请参阅第10节），因此它们可以将沿声束的距离转换为每个单元的深度。它们假设声速随深度变化保持恒定，但如果您知道温度和盐度如何随深度变化，就可以根据声速变化直接纠正单元深度。

声速取决于温度、盐度和压力，但温度的影响最大，因此ADCP始终有嵌入式温度传感器。声音在水中的速度会随水温升高、盐度增大和深度增加而加快。在典型的海洋环境中，声速在ADCP的整个剖面范围内最多变化几个百分点。

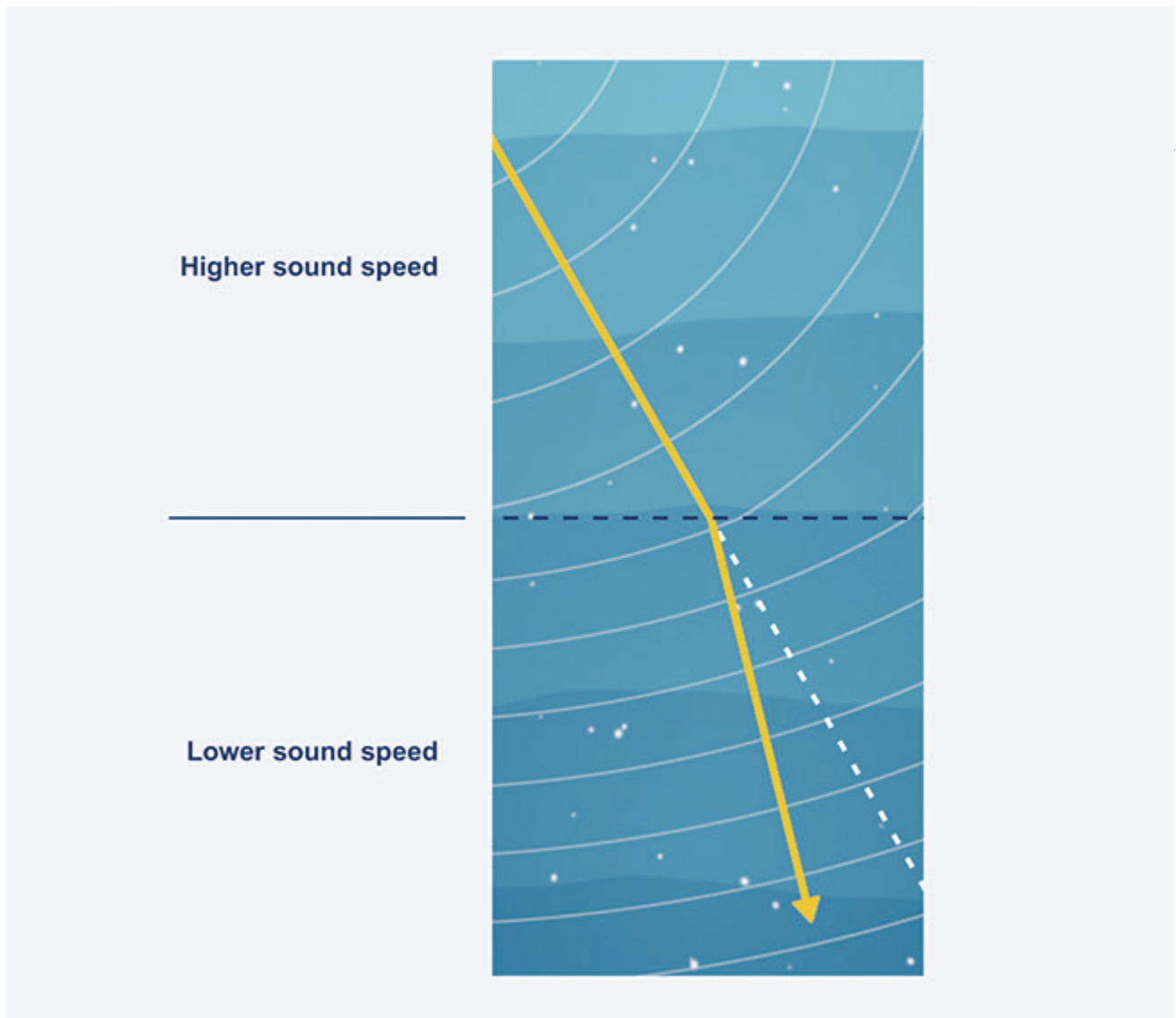


图21. 当以一定角度传播的声波通过声速发生变化的界面时，水平波长将保持不变。如果水平波长保持不变，水平速度也会保持不变。这就是斯涅尔定律的基本原理。

10. ADCP倾斜传感器

ADCP需要知道自己的倾斜度，才能确定自己的声束位置及其指向。ADCP需要知道确切的声束角度，才能计算出准确的速度。另外，当一个声束上的深度单元向下倾斜时，相对声束上的匹配单元将升高，它们会测量不同深度处的速度。一些ADCP使用映射过程来匹配最接近给定层的单元，以计算该层的速度。

在制造过程中可以对ADCP的声束角度实现高精度控制。标准ADCP有三个或四个声束，所有声束的倾斜角都相同，通常均匀分布在仪器周围。一些剖面仪的声束指向不同的角度。这些角度被硬编码到仪器中，ADCP在计算速度时会自动考虑这些角度。

但是，在布放后，ADCP可以四处运动，既可以倾斜也可以旋转（图22）。ADCP使用测量倾斜和航向的传感器来处理这种运动。

使用一杯酒即可说明倾斜传感器的工作原理。无论酒杯倾斜程度如何，重力都会使酒的表面保持水平状态。现代倾斜传感器以几乎相同的方式使用重力，与首次推出ADCP时相比，它们的性能更好、体积更小且价格更低。

就像图23中不稳定的酒杯会出现倾斜问题一样，水平加速会在ADCP的倾斜度测量中引入误差。

海面波浪可能是最常见的加速原因，但安装在强洋流中系泊缆绳上的ADCP也会出现加速情况。加速和倾斜误差都会在ADCP数据中产生速度误差。

在大多数情况下，加速对ADCP的总体测量精度几乎没有影响。与正常测量不确定度相比，加速产生的速度误差相对较小，而且这些误差最终会达到平衡。

加速产生的倾斜误差会导致ADCP错误计算其在水体内的倾斜度和范围单元位置，但是由于深度误差近似对称，一个单元为正，另一个单元为负，它们在很大程度上可以相互抵消。最终结果是垂直剖面在深度方向上有些模糊。

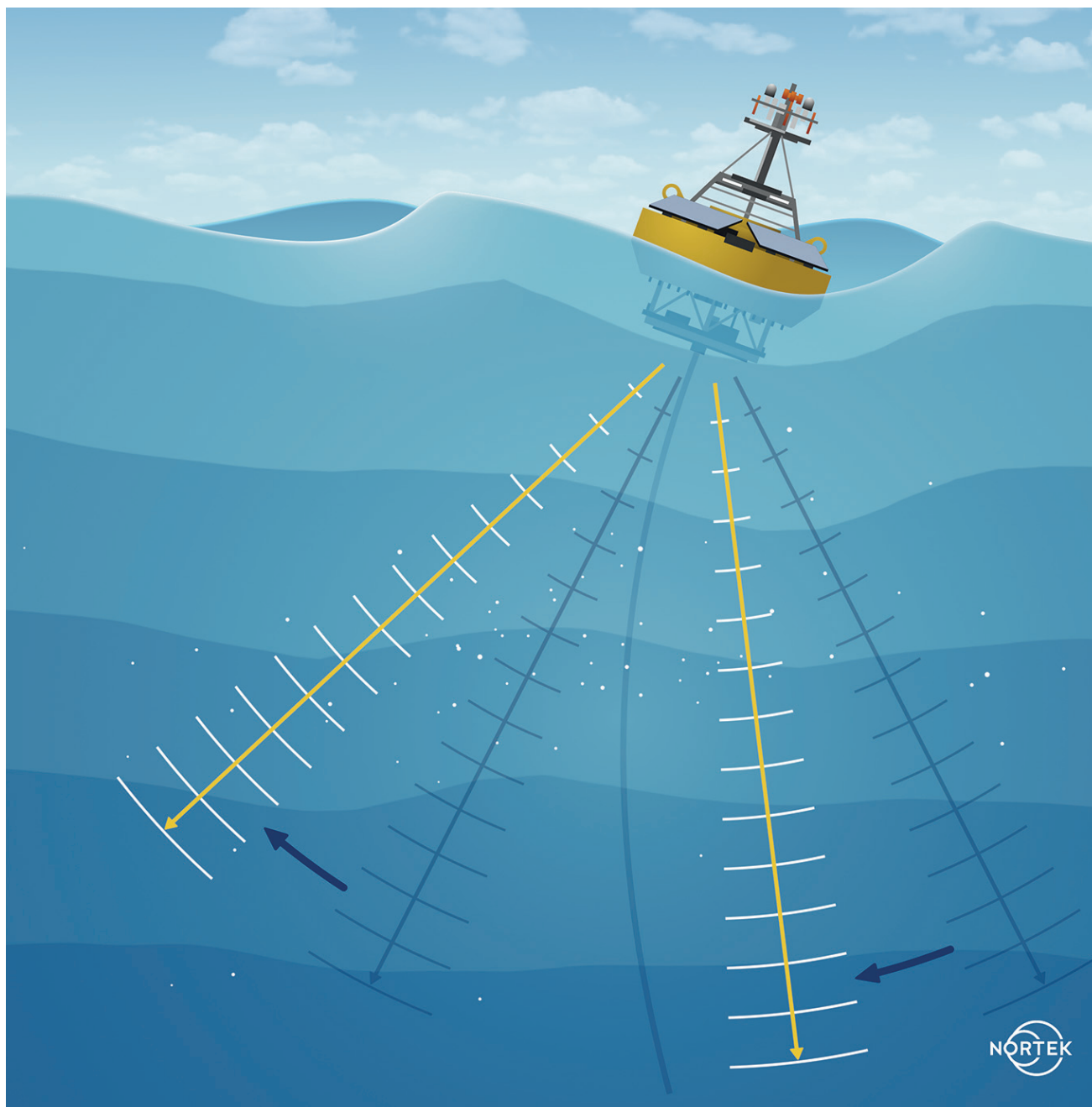


图22. 海面浮标上的ADCP倾斜、上下和前后加速以及旋转

某些环境（尤其是海面浮标）非常活跃，以至于它们会在ADCP数据中引入重大误差。相对较新的技术可通过测量运动的所有分量使ADCP准确纠正其数据，从而使ADCP消除这些误差。一些ADCP可以增加姿态和航向基准系统(AHRS)，用于测量线性（即前后、上下）和旋转加速度（图24）以及磁力计数据。AHRS中的陀螺仪可使传

感器区分ADCP的加速度和重力加速度。AHRS可大幅提高ADCP对自身倾斜度的了解，进而改善ADCP在活动环境中获得的数据。AHRS会产生大量数据，但现代处理器可以轻松处理这些数据。

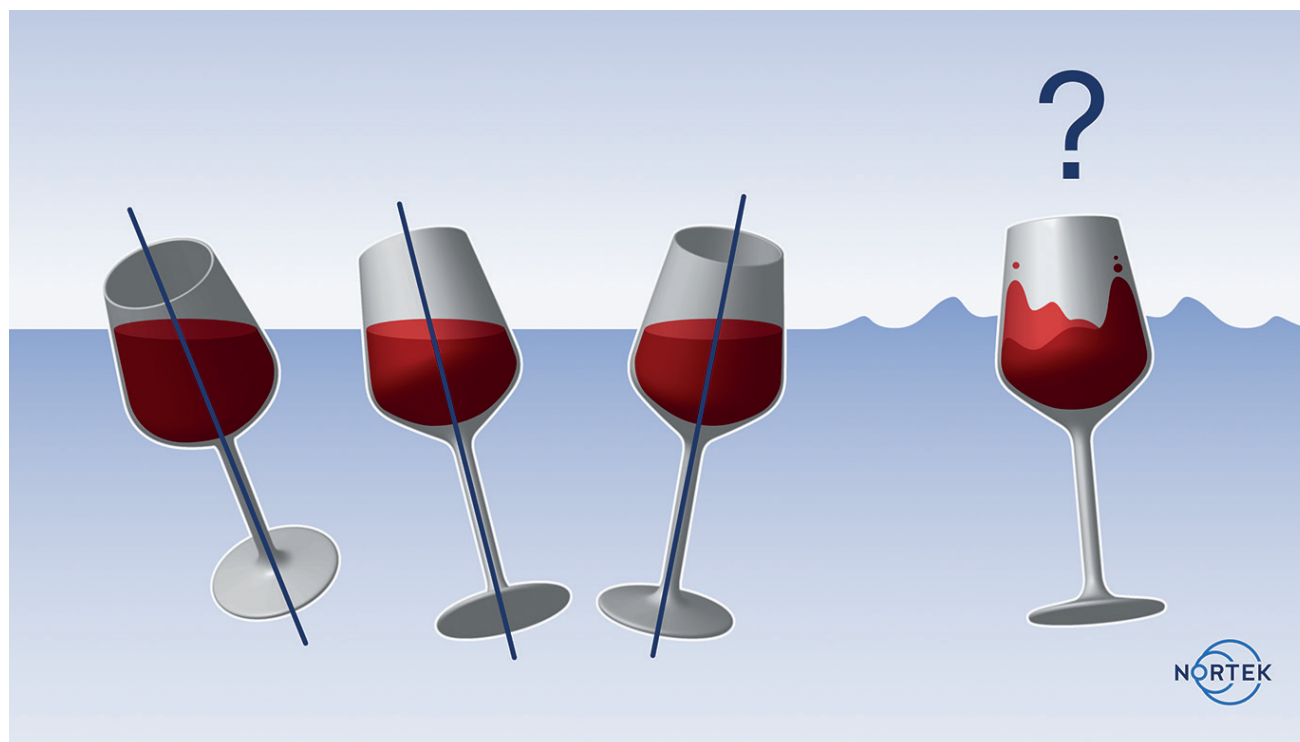


图23. 玻璃杯中的酒。如果能够感知酒在玻璃杯中的位置，就可以计算出玻璃杯的倾斜度（前三张玻璃杯图片）。最后一张图片是一只不稳定的手拿着的酒杯，说明了出现倾斜误差的常见原因（第四个玻璃杯）。

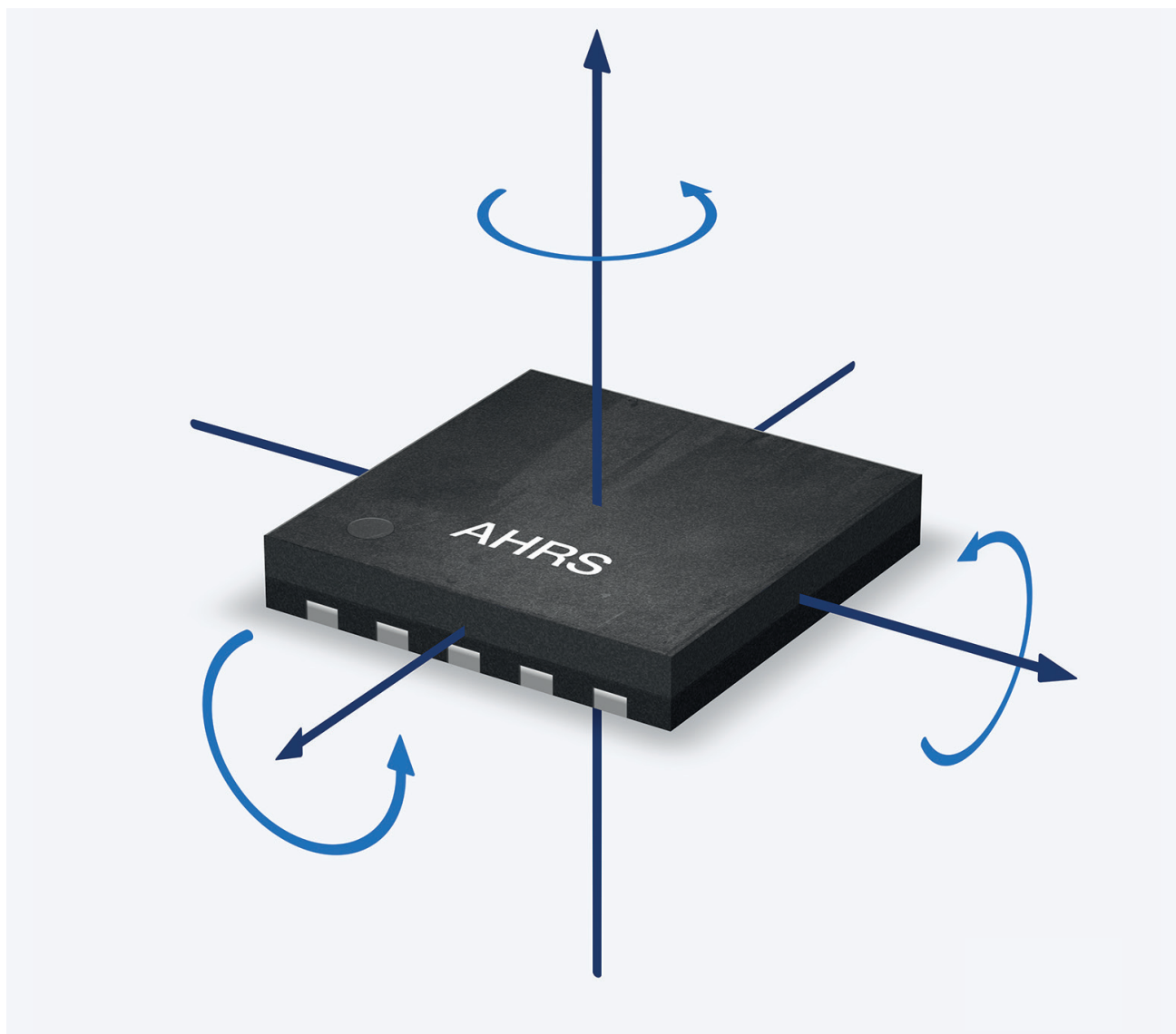


图24. AHRS测量三个轴的水平加速度以及三个轴的旋转加速度。通过右手定则可确定旋转方向：用右手握住z轴，拇指朝向箭头方向，此时手指方向即为正z轴旋转加速度方向。

11. ADCP

罗盘

ADCP还必须知道自己的航向，以确定自己的声束相对于北向的指向。在过去，ADCP使用过许多不同种类的罗盘，但现在，现代ADCP主要使用磁力计。磁力计测量三个轴的地球磁场。水平分量是朝向磁北的方向。

磁北通常接近真北，二者之间的差异称为磁偏角。偏角取决于ADCP在地球表面的位置。您可

以在地图上或在线查询磁偏角，并在后处理过程中纠正您的数据。

磁力计误差主要由ADCP的磁性材料、电池及其底座或框架引起。这些会导致地球磁场发生偏移和/或畸变，从而在航向测量中引入误差（见图25）。罗盘校准可以纠正大部分误差，但如果干扰太强，则无法纠正误差。

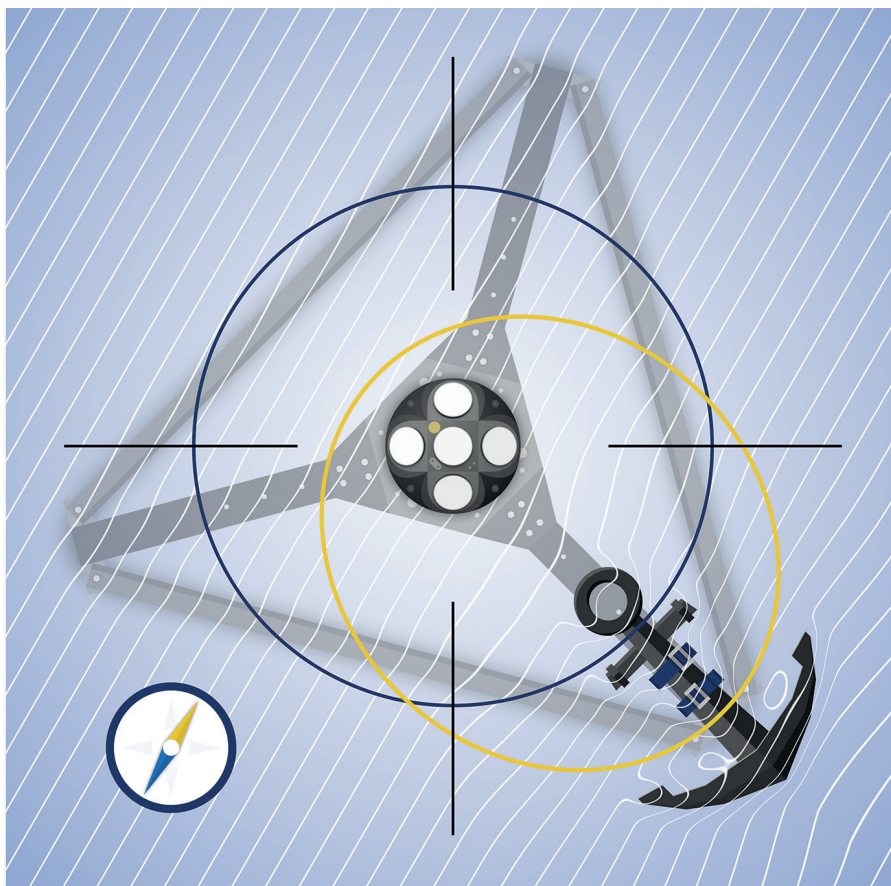


图25. ADCP的罗盘依靠测量地球磁场的传感器。因此，ADCP附近的磁性材料会导致该磁场发生畸变，从而在ADCP的数据中引入航向误差。在本例中，铁锚将局部磁场拉向自身。因此，ADCP的底座不得含有任何磁性材料。

如果具有完美磁力计的水平非磁性ADCP在测量地球磁场时旋转，ADCP的x轴和y轴磁力计数据将绘制成以原点为中心的完美圆形（见图26上的黑色圆形）。圆形的直径是该位置地球磁场的水平强度，而角度是ADCP的航向。

实际上，附近始终会有磁性材料，这种材料会引入两类误差：“硬铁”和“软铁”误差。图26中的校准说明了安装在巨大钢制浮标附近的ADCP

的这些误差。硬铁误差使圆形偏离原点，而软铁误差将圆形挤压成椭圆形。

大多数ADCP都有罗盘校准程序，可在布放准备期间使用。若可能，应在ADCP安装在底座上进行校准。一些ADCP可收集磁力计的原始数据，例如配备AHRS的ADCP。如果这些ADCP在水中可以自由旋转，这些数据可用于校准罗盘，作为后处理的一部分。

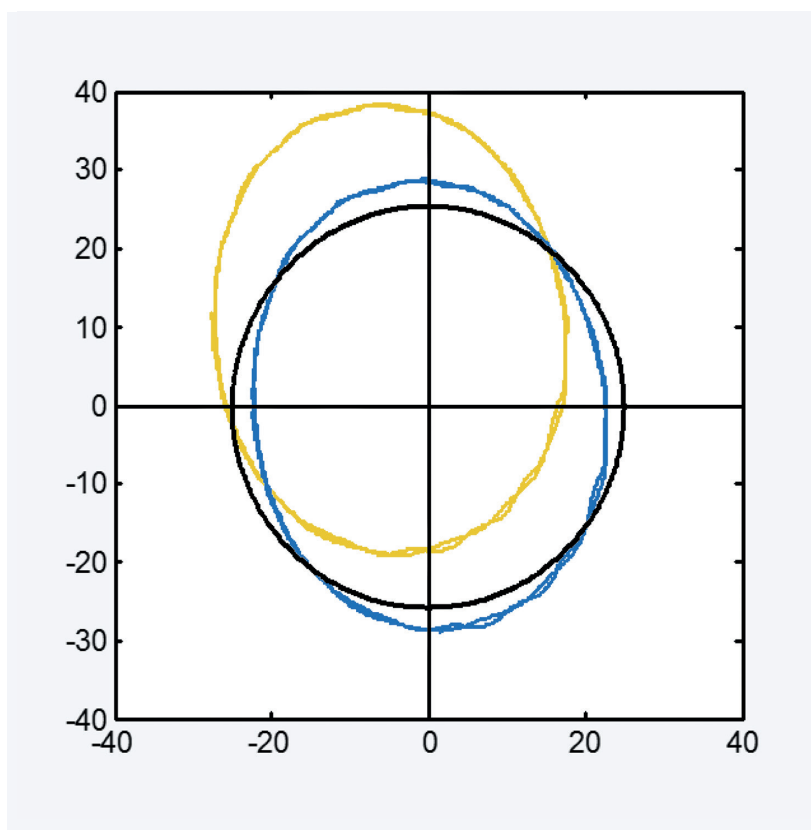


图26. 安装在距离10吨钢制钟形浮标50厘米处的Aquadopp剖面仪的实际罗盘校准。黄色椭圆形是未纠正的磁力计数据。校准后产生蓝色椭圆形，它与黄色椭圆形相同，只是它的中心是原点 (0, 0)。偏移到原点后，可消除会产生约为5°的航向误差的硬铁误差。Aquadopp校准不能纠正软铁误差，软铁误差会使本应完美的黑色圆形变形为蓝色椭圆形。

12. 对数据求平均值来减小随机误差

所有ADCP数据都有随机误差。图27所示为随机误差如何影响数据，以及求平均值如何改善某些应用的数据。该图显示了取自同一ADCP的四个单独时间序列，该ADCP设置为每秒连续发射两次声脉冲(2 Hz)。深蓝色线是原始的2 Hz数据。浅蓝色线是完全相同的数据，但对每十个样本进行了求平均值。分别对100个和1000个样本求平均值后形成了黑线和黄线。您可以看出蓝线的方差如何明显大于其他线的方差。图28用另一种方式显示了这些数据，该图将原始数据（深蓝色）以及对每十个样本求平均值得出的数据（浅蓝色）一起绘制成直方图。黑色垂直线是数据的平均值，这两种情况相同。这些直方图由正态（高斯）分布拟合而成，垂直虚线显示了平均值两侧的两个标准差的限值。请注意原始数据的标准差（即方差的平方根）如何宽于平均数据的标准差。

对数据求平均值可以减小随机误差。随机误差的方差随着求平均值的数据点数的倒数一起减小（并且标准差随着求平均值的数据点数的平方根一起减小）。

但是，求平均值并非总能改善您的数据。自从ADCP问世以来，ADCP数据的质量得到了大幅改善，当ADCP数据远高于相关洋流的最小可分辨极限时，除了删除（可能）有用的信息外，求平均值几乎没有任何作用。例如，在图29中，我们将相同的原始2 Hz数据图显示在频域中作为频谱；即数据中包含的每个频率处存在的能量。在这种情况下，对这些数据求平均值只会删除实际上可能有用的最高频率（例如用于湍流研究）。但不必担心，在大多数应用中，仪器的配置软件会指导您选择可满足布放要求的求平均值区间。另外，如果您是高级用户，也可以使用原始数据。

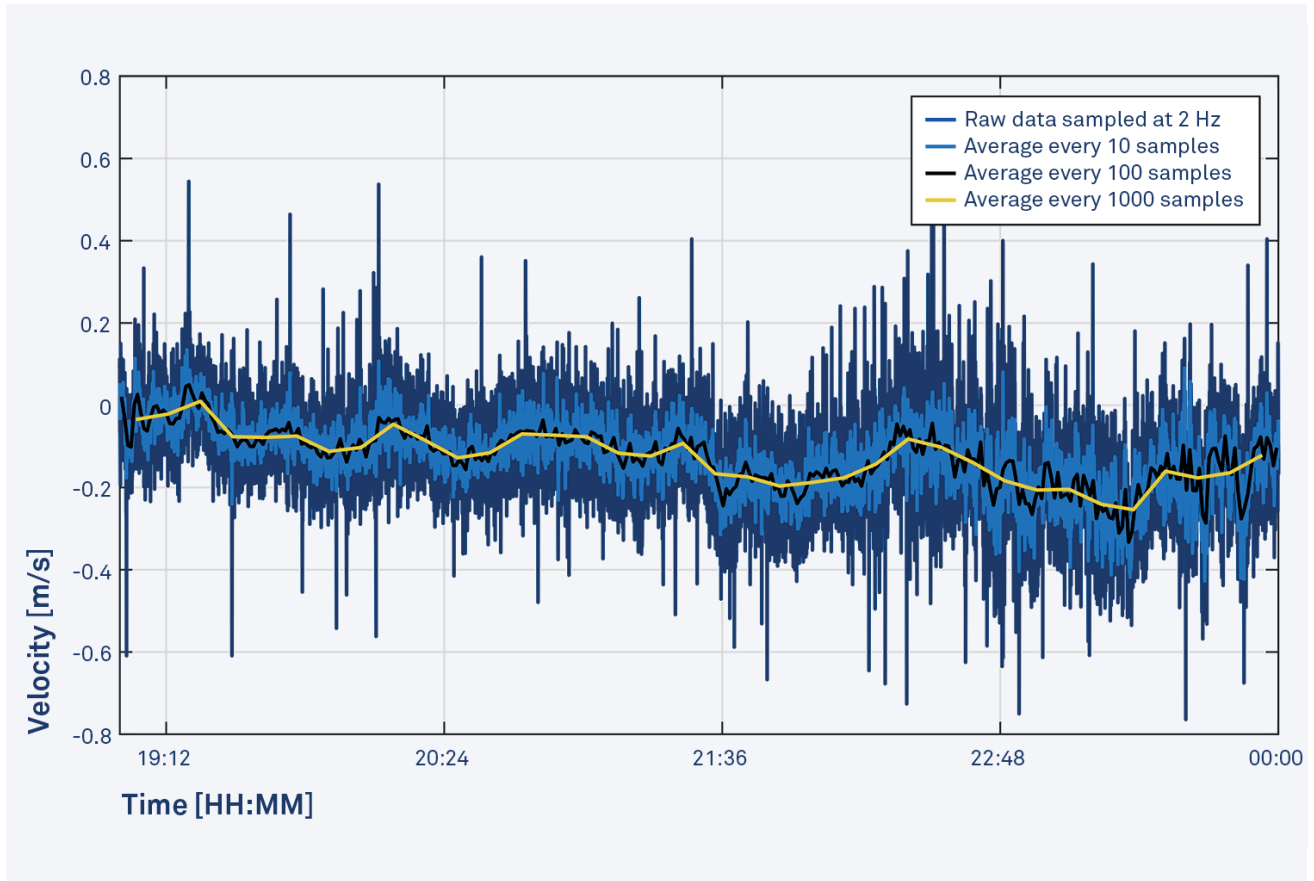


图27. 可采用不同求平均值区间的ADCP速度时间序列。深蓝色线所示为以2 Hz的频率收集的原始数据。浅蓝色线是完全相同的数据，但对每十个样本进行了求平均值。分别对每100个和每1000个样本求平均值后形成了黑线和黄线。虽然原始数据的方差随着求平均值步骤的增加而减小，但有关洋流行为的细节也可能会丢失。

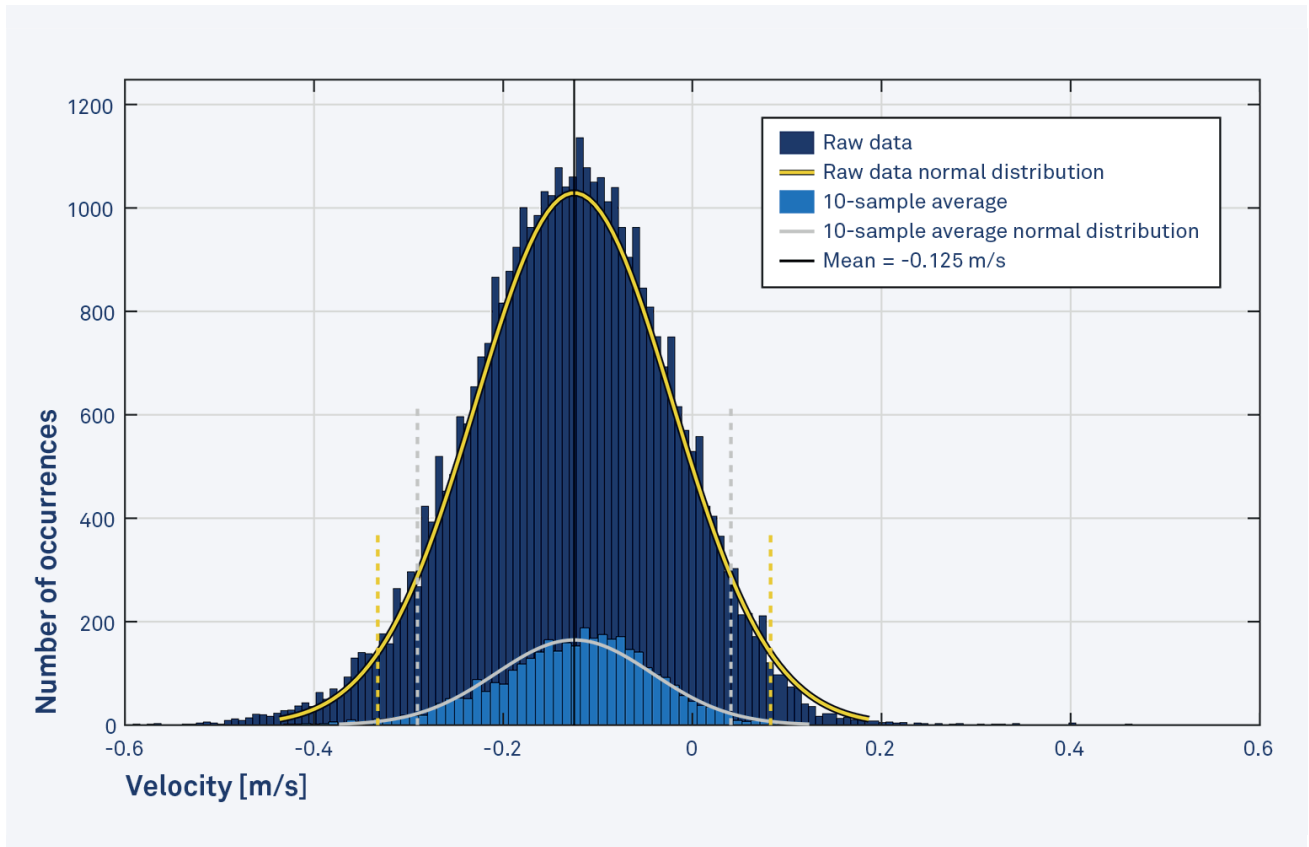


图28. 与图27所示的数据相同，但本图绘制的是原始数据（深蓝色）和十个样本平均值（浅蓝色）的直方图。对数据绘制正态分布（钟形曲线）以提高可读性。垂直虚线所示为两个标准差的限值，它们是数据的95%，约为数据的平均值。灰色虚线是十个样本的平均值，该范围小于两条黄色虚线之间的范围，表明平均数据的方差更小。

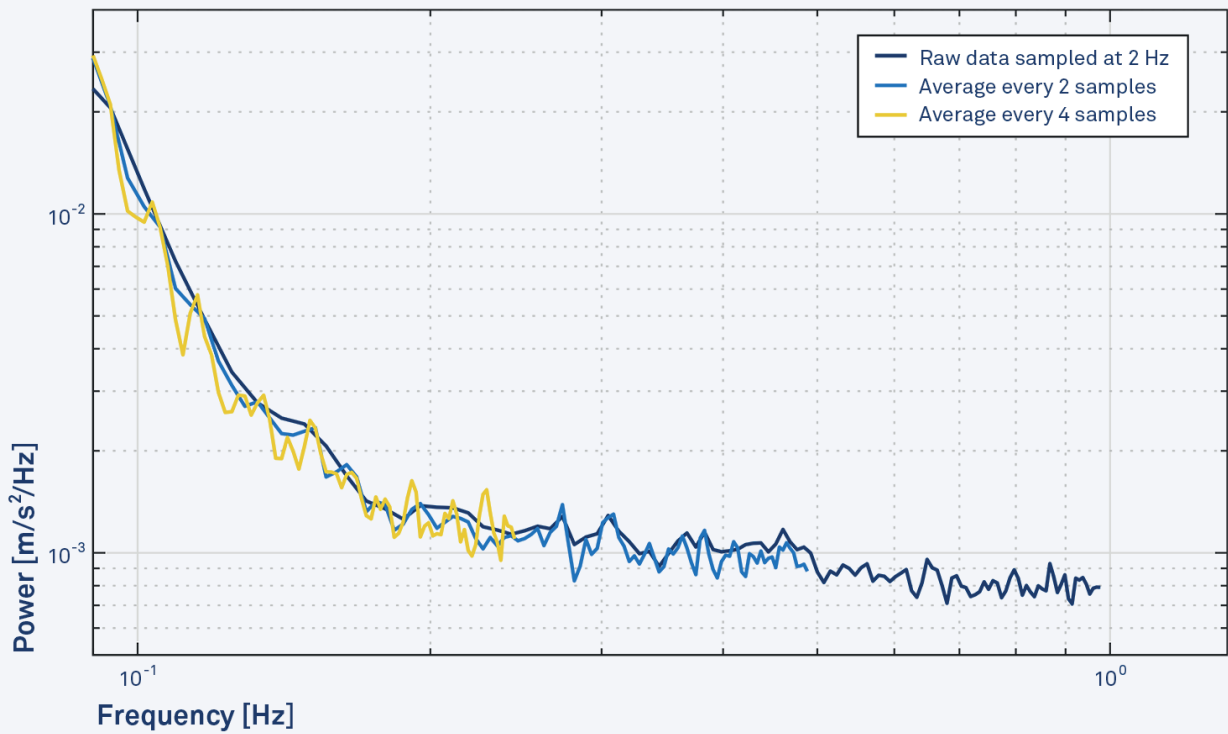


图29.: 图27中的原始数据（深蓝色），但在频域中绘制。另外还绘制了对相同数据中每两个样本（浅蓝色线）和每四个样本（黄线）求平均值得出的数据。虽然求平均值可以减小数据的方差，但也可能会删除有用的数据，例如用于湍流研究

13. 术语表

我们意识到本术语表中的某些术语可能有多个含义，具体取决于它们的应用领域或语境（例如带宽或脉冲），因此除非另有说明，本术语表的预期用途是适用于ADCP的水下声学。

ADCP（声学多普勒流速剖面仪）

一种仪器，通过发射给定频率的声音脉冲并检测从水中颗粒反射回来的脉冲的多普勒频移，测量水中的速度剖面。

标准差

值A的可变性的统计量度，定义方法如下：

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N |A_i - \mu|^2}$$

其中 μ 是A的平均值。请注意，S是方差的平方根。标准差也称为随机误差，可理解为任何给定测量的粗略误差值，但平均而言，误差为零。

波长

声信号的两个连续波前之间的物理距离。

传播时间

声脉冲离开换能器后移动给定距离所需的时间，例如声音到达特定单元或到达剖面末端所需的时间。ADCP使用“双向”传播时间，因为声音必须先出去，然后再回来。

纯音

频率完全固定的脉冲，通常持续时间较长。

磁力计

一种测量磁场的仪器。ADCP使用磁力计来确定航向。

磁偏角

磁北（罗盘针的指向）和地理北（即北极）之间的差异。

带宽

连续频谱中较低频率和较高频率之差，用平均频率的百分数表示。它是脉冲长度的倒数。

多普勒计程仪

通常缩写为DVL，这是一种特殊的ADCP，其主要功能是测量水下载体在海底的速度和方向。

多普勒效应

发射器相对于接收器运动时频率的明显变化。ADCP使多普勒效应加倍，因为多普勒效应在ADCP和水中的反射体之间起作用，然后在声音反射回ADCP后再次起作用。

发射功率

ADCP换能器发射的能量的测量值。可以用分贝(dB)或瓦特(W)表示。

反射体

反射声能的任何颗粒、表面或区域。

分贝

声信号功率的测量单位，以对数刻度表示，定义为测量量与参考量的比值。符号：dB。

分辨率

给定参数的检测极限。例如，ADCP的空间分辨率取决于其最小单元的大小（例如20厘米）。也可用于时间（时间分辨率）；例如，如果ADCP的最大采样频率为1 Hz，其最佳时间分辨率为1秒。

航向

ADCP指向或其速度参考的罗盘上的方位。

赫兹

频率测量单位，单位为每秒周期数。

横摇

围绕ADCP的x轴的旋转。

换能器

将能量从一种形式转变为另一种形式的任何设备。ADCP换能器的主要元件是压电陶瓷，可将电流转变为模拟声（压力）波，或将模拟声（压力）波转变为电流。ADCP换能器可以用作发射声信号的源，也可以用作将声音转变成电信号的接收器。

几何形状

ADCP换能器的特定固定布置方式，它与换向器和仪器垂直轴的倾角以及换能器之间的分离角度有关。

接收器

负责检测声源产生的反射声能的组件。可以指ADCP上的实际换能器，也可以指负责收集和初步调节能量的电子元件。ADCP使用同一个换能器发射和接收声信号，而流速仪有专用的发射（源）元件和接收元件。

精度

表示测量值与真实值接近程度的数值。精度可以用百分数（测量值与真实值的比值）表示，也可以用相同的单位表示。精度有两个组成部分，即偏差和标准差，二者的定义如下。

精密度

表示一组独立测量值彼此之间接近程度的数值，用与测量值本身相同的单位表示。与精度不同，精密度无需知道实际（真实）值。

宽带

换能器带宽大于约12%的任何ADCP的统称。

临界值

给定值或参数的最大或最小阈值的统称。

流速仪

一种仪器，测量单个水体中的水流速度而非剖面。

流速仪

一种水流速度测量设备，与ADCP不同，它使用一个发射器和多个单独的接收器，使其能够专注于单个小水体。流速仪能够以比ADCP高得多的频率进行采样（即高达200 Hz），并且它们的误差要小得多。

罗盘

一种仪器，能够检测地球磁场，从而向ADCP提供磁航向信息。

脉冲

声学换能器产生的声波。

脉冲长度

声脉冲的范围。脉冲长度通常采用毫秒(ms)作为单位，在从换能器最初被激发到激发期结束的时间内测得。但是，如果给定已知声速，也可以采用长度单位。

旁瓣

虽然声束中的大部分能量通过主瓣传播，但弱得多的能量也会从旁瓣的其他角度漏出。

偏差

一组测量中的系统误差。例如，磅秤的测量值总是比实际重量多1公斤。在ADCP测量中，偏差通常是指在对数据求平均值以消除随机误差（噪声）之后的测量误差。

频谱

信号在频域中的图形表示，其中信号的能量被绘制为频率的函数。信号的频率分布。频谱将信号的能量分成一系列频带。

剖面

物理上相邻的深度单元的测量值组合。

剖面范围

声信号可以到达的最大距离。

倾斜度

ADCP倾角的测量值；即与垂直方向的差异。倾斜度包括纵摇和横摇。

软铁

导致ADCP的罗盘提供错误航向数据的局部磁场畸变。软铁误差导致测量的局部磁场强度随着仪器航向变化。无论航向如何变化，完美磁力计测量的强度都会保持恒定。

散射体

类似于反射体，但更常用于颗粒。

深度单元

测量速度所在的声束上的单个剖面段。距ADCP相同距离的深度单元的集合形成一个厚度已知的层。深度单元通常简称为单元，有时也称为区间或范围单元。

声脉冲

换能器发出的声信号的完整包络；可能包含固定频率（单频）或可变频率（线性调频）的脉冲。通常（错误地）与“脉冲”互换使用。

声束

从ADCP的声学换能器发射的窄声能射线。

矢量

具有大小和方向的数学量。也是由Nortek制造的流速仪的名称。

衰减

给定信号强度的降低，通常是距信号源距离的函数。在水下声学中，衰减通常可以遵循对数衰减曲线。高频声学的衰减比低频声学的衰减更快，因此低频声学测量的距离更远。

头朝侧面

表示ADCP在其换能器指向水平方向时的物理方向。

头朝上

表示ADCP在其换能器指向上方时的物理方向。

头朝下

表示ADCP在其换能器指向下方时的物理方向。

线性

用直线表示的任何测量值、参数或功能。

线性调频

一种声信号，其频率随时间增大或减小。

相位

两个周期信号之间的角度差。

信噪比

声信号与仪器噪声水平相比的强度。测量值是两者之比的对数，用分贝(dB)作为单位表示。

硬铁

导致ADCP的罗盘提供错误航向数据的局部磁场畸变。硬铁误差会使局部磁场产生矢量偏移。

源

负责发射声能的组件。可以指ADCP上的实际换能器，也可以指产生信号的位置。ADCP使用同一个换能器发射和接收声信号，而流速仪有专用的发射器（源）和多个接收元件。

窄带

换能器带宽小于约12%的任何ADCP的统称。

主瓣

声束中心线周围的锥形区域，集中有声束的大部分声能。

纵摇

围绕ADCP的y轴的旋转。



Vangkroken 2,
NO-1351 Rud, Norway
+47 67 17 45 00
nortekgroup.com

使用声学传感器测量洋流、
海浪和湍流的指南。