

浅剖仪垂直探测分辨力分析*

王 琪 刘雁春 暴景阳

(海军大连舰艇学院海洋测绘系 大连 116018)

提要 根据浅剖仪所采用的 PCW 信号和 Chirp 信号的性质, 推导了两类浅剖仪垂直地层分辨力的公式, 对影响浅剖仪垂直地层分辨力的各个因素给出了详细分析。比较了两种典型浅剖仪垂直地层分辨力指标。

关键词 浅剖仪, 脉冲信号, 垂直分辨力

中图分类号 P716+.8 **文献标识码** A **文章编号** 1000-3096(2003)06-0077-04

浅地层剖面仪在近海工程测量中有着广泛而重要的应用。由于其原位未扰动及连续走航式测量方式, 比传统海底物理钻孔方式具有较大的优势。在探测海底底质分层及每层沉积物层厚时, 需要对剖面仪的垂直分辨力及影响垂直分辨力的各因素予以分析, 特别是近年来采用 Chirp 信号剖面仪获得较高的垂直分辨力需要加以理论分析。

1 PCW 信号浅剖仪垂直分辨力

PCW 信号浅地层剖面仪垂直分辨力取决于声波脉冲宽度、换能器波束角、接收机带宽、记录纸图象分辨率等因素^[1]。

1.1 脉冲宽度与分辨力的关系

设 PCW 的脉冲宽度为 τ , 从图 1 可以看出, 第

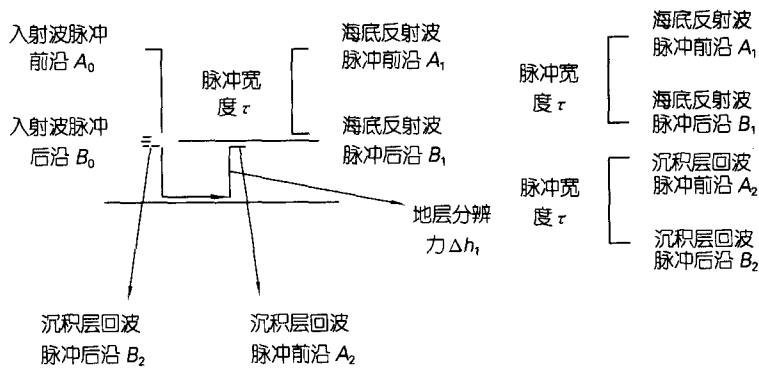


图 1 脉冲宽度对分辨力的影响

Fig.1 Effect of pulse width on vertical resolving power

一地层的回波应当在海底回波结束后到达, 因此脉冲宽度 τ 所决定的垂直分辨力为:

$$\Delta h_1 = C\tau/2$$

其中: Δh_1 为可分辨的第一地层沉积物的厚度; C 为第一地层沉积物的平均声速; τ 为 PCW 信号的脉冲宽度。

* 国家自然科学基金项目 40071070 号

第一作者: 王琪, 出生于 1962 年, 硕士, 从事海道测量定位与水声技术教学与科研。E-mail: Wang-Qi@sina.com

收稿日期: 2002-08-09; 修回日期: 2003-03-27

1.2 接收带宽与分辨力的关系

设接收机通道的频率带宽为 Δf , 则脉冲接收从零开始到稳态建立起来的过渡过程为 τ_1 , 当外来接收脉冲消失后, 具有同样的过渡过程 τ_1 。由图 2 可见, 过渡过程的存在, 使得接收脉冲延长拖尾 τ_1 时延, 如果下一地层回波与拖尾时延 τ_1 相重叠, 则剖

面无法分辨出下一地层回波, 由此所限定的垂直分辨力为:

$$\Delta h_2 = C\tau_1/2, \quad \tau_1 = 1/\Delta f$$

其中 Δh_2 为接收系统的过渡过程所形成的拖尾而引入的地层分辨率; τ_1 为接收系统过渡过程的时间常数; Δf 为接收系统频率带宽。

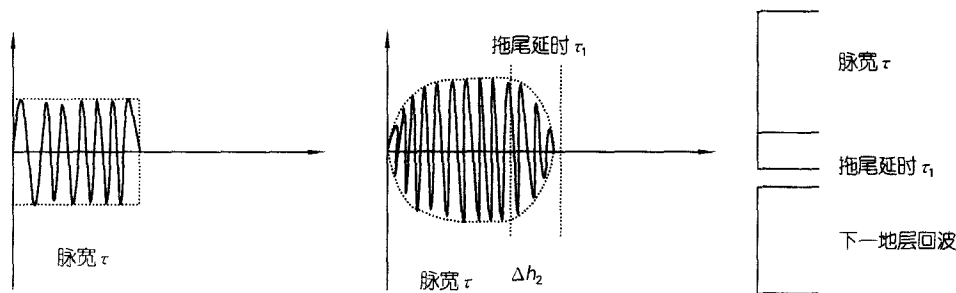


图 2 接收带宽对分辨力的影响

Fig. 2 Effect of receiving system frequency width on vertical resolving power

1.3 波束角与分辨力的关系

脉宽为 τ 的声波从换能器发射后, 按照一定的波束角 θ 以球面波的形式辐射到海底。其中换能器辐射面中垂线方向上的波前首先到达海底, 除了产生反射外, 余下的能量向下一地层穿透。由于浅剖仪较宽的波束角 θ , 当中垂线方向上的波前到达海底时, 波束边沿尚差 Δh_3 距离才能够到达海底。此

时, 中垂线方向上的波前已经穿透地层 Δh_3 的厚度, 根据几何关系的推导可得:

$$\Delta h_3 = h(\sec\theta/2 - 1)$$

其中 Δh_3 为由于浅剖仪波束角波前扩展所导致的地层厚度; θ 为浅剖仪换能器 -3dB 波束角。在时间波形上, 相当于回波延时拖尾 $\Delta h_3/C$ 。如图 3 所示。

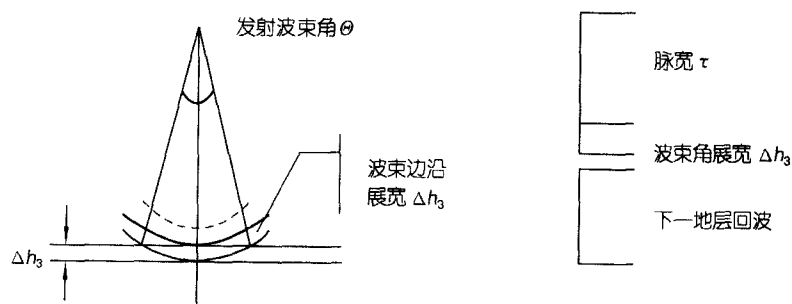


图 3 波束角对分辨力的影响

Fig. 3 Effect of beam angle on vertical resolving power

1.4 记录纸垂直比例与分辨力的关系

在记录纸上分辨最小目标的间距 $d = 0.5 \text{ mm}$, 设记录纸有效记录宽度为 Q , 对应的量程为 R_M , 则

记录纸垂直比例为: R_M/Q 。记录纸间距 d 所对应的垂直分辨力为:

$$\Delta h_4 = d R_M/Q$$

综合上面各因素,对于 PCW 信号的浅剖仪,其地层垂直分辨力为:

$$h = \max\{\Delta h_1, \Delta h_2, \Delta h_3, \Delta h_4\}$$

由分析表达式可见,主要是发射脉冲宽度 τ 限制了地层垂直分辨力,如果希望提高地层垂直分辨力,必须缩短发射脉冲宽度 τ ,但如此将极大地降低地层探测厚度,故脉宽 τ 的选择是地层垂直分辨力与地层探测厚度折衷的结果。

2 Chirp 信号浅剖仪垂直分辨力

2.1 Chirp 信号匹配滤波的脉宽压缩

针对 PCW 信号的不足,现代海测声纳采用了 Chirp 信号技术。Chirp 信号即为线性调频脉冲信号 LFM。其瞬时频率为:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} = f_0 + \frac{\omega}{\tau} \left(t - \frac{\tau}{2} \right)$$

τ 为脉宽, ω 为扫频信号带宽。

根据信号理论,检测噪声中已知信号的最有效方法是采用匹配滤波器,即匹配滤波器的脉冲响应等于输入信号的时间到置复共轭。

在这种情况下,匹配滤波器的输出信噪比最大,且最大输出信噪比仅与信号能量和噪声功率谱密度有关,与波形无关。图 4 为 Chirp 信号及经匹配滤波器后的包络。

由图 4 可见矩形包络的 LFM 信号经匹配滤波器后包络为被 $(1-\tau/T)$ 加权的 $\sin X/X$ 型函数,能量主要集中在第一对零点所夹的主瓣之内,可认为其所夹的时间间隔为输出脉宽的宽度^[2]。其两个零

点分别是:

$$\frac{\pi}{bT} = \frac{1}{W}, \quad -\frac{\pi}{bT} = -\frac{1}{W}$$

压缩后的脉宽为 $\tau' = \frac{1}{W}$, 脉冲压缩比为 $D = \frac{\tau}{\tau'} = W\tau$ 。其中 $b = \pi W/T$, W 为扫频带宽, T 为 Chirp 信号未经匹配滤波处理之前的脉冲宽度。

2.2 Chirp 信号浅剖仪垂直分辨力

由以上分析,Chirp 信号经匹配滤波处理,产生了脉冲压缩现象,输出一个比发射脉冲持续时间短得多的窄脉冲。由于窄脉冲的获得,从而可以取得比 PCW 信号高得多的距离分辨力 $\Delta R = \frac{1}{2} C\tau'$, 且通过增加扫频带宽以获取任意精细的距离分辨力。此外,在与 PCW 信号具有相同分辨率时,通过增大发射脉宽以增加发射信号能量,改善信噪比,提高抗干扰能力。

3 国产 GPY 与 SIS-1500 浅剖仪垂直分辨率比较

根据 GPY 浅地层剖面仪的参数^①,影响其地层垂直分辨力各因素如表 1 所示。

从理论上分析,GPY 浅地层剖面仪的地层垂直分辨力在 0.3~1.0 m 之间,这一结论也同钻孔资料基本吻合。表 2 给出了某海域 GPY 浅地层剖面仪地层垂直分辨力与地层钻孔资料的比对数据。

钻孔资料与剖面仪声学资料之间存在相对误差,其原因在于以下几点:(1)两种作业所采用的物



图 4 Chirp 信号及经匹配滤波器后的包络

Fig. 4 Chirp signal and its envelop through matched filter

① GPY 浅剖仪技术专辑,上海声学学会

表 1 GPY 浅剖仪垂直地层分辨力数值计算 (m)

Tab.1 GPY profiler's calculation of vertical resolving power

$\Delta h_1 = C\tau/2$	$\tau = 0.2\text{ms}$ 0.15	$\tau = 0.4\text{ms}$ 0.3	$\tau = 1\text{ms}$ 0.75	$\tau = 2\text{ms}$ 1.5
$\Delta h_2 = C/2\Delta f$	$\Delta f = 5\text{kHz}$ 0.15	$\Delta f = 2.5\text{kHz}$ 0.3	$\Delta f = 1\text{kHz}$ 0.75	$\Delta f = 500\text{Hz}$ 1.5
$\Delta h_3 = h(\sec\Theta/2-1)$	$\Theta/2 = 15^\circ, h = 10\text{m}$ 0.353	$h = 20\text{m}$ 0.706	$h = 30\text{m}$ 1.06	$h = 50\text{m}$ 1.76
$\Delta h_4 = d R_M/Q$	1:200 0.1	1:400 0.2	1:500 0.25	1:800 0.4

表 2 GPY 浅剖仪垂直地层分辨力与地层钻孔资料对比

Tab.2 A comparison of vertical resolving power between GPY profiler and sea bottom drilling

站位编号	1	2	3	4	5	6	7	8
声图层厚(m)	0.48	0.76	0.89	1.05	1.37	1.53	1.69	1.80
孔芯标高(m)	0.32	0.39	0.40	0.64	0.80	1.05	1.20	1.25
误差值(m)	0.12	0.37	0.48	0.41	0.57	0.48	0.49	0.55

理方法不同,浅剖仪是一种无扰动原位探测,而钻孔则破坏海底原始地层层厚,不同海底底质其影响不同;(2)采样位置偏差,特别在海底地层起伏变化剧烈时,影响较大;(3)浅剖仪设计声速与实际海底地层沉积物声速不符。

SIS-1500 海底成像系统为双侧侧扫声纳加浅地层剖面仪的综合系统^①,侧扫声纳和浅地层剖面仪都采用了 Chirp 信号,浅地层剖面仪的扫频频率为 2~7 kHz,其扫频频率带宽为 5 kHz,其理论距离分辨率为 $\Delta R = C/2W = 15 \text{ cm}$ 。由上面计算数值可见,相同的发射脉宽,由于采用了 Chirp 信号,其浅地层剖面仪距离分辨率理论上提高了 10 倍。此外,采用 Chirp

信号的匹配滤波器技术,压缩了接收信号带宽,在混响受限的噪声环境中,有效地压缩了噪声,提高了信噪比。

参考文献

- 1 陈兴荣. 海测水声仪器. 大连:海军大连舰艇学院出版社,1990.111-116
- 2 肖国有,屠庆平. 声信号处理及其应用. 西安:西北工业大学出版社,1994.44-46

① DatasonicsSIS-1000 System Manual. datasonics. 1998

AN ANALYSIS OF VERTICAL RESOLVING POWER FOR SUB-BOTTOM PROFILER

WANG Qi LIU Yan-Chun BAO Jing-Yang

(Department of Hydrography & Charting, Dalian Naval Academy, Dalian, 116018)

Received: Aug., 9, 2002

Key Words: Profiler, Pulse signal, Vertical resolution power

Abstract

According to the PCW and Chirp signals' characteristic used in profiler, we deduce the vertical resolving power with these two kinds of profiler, particularly analyze the influence of various aspects on profiler's vertical resolving power and compare the vertical resolving powers of two typical profilers. (本文编辑:张培新)