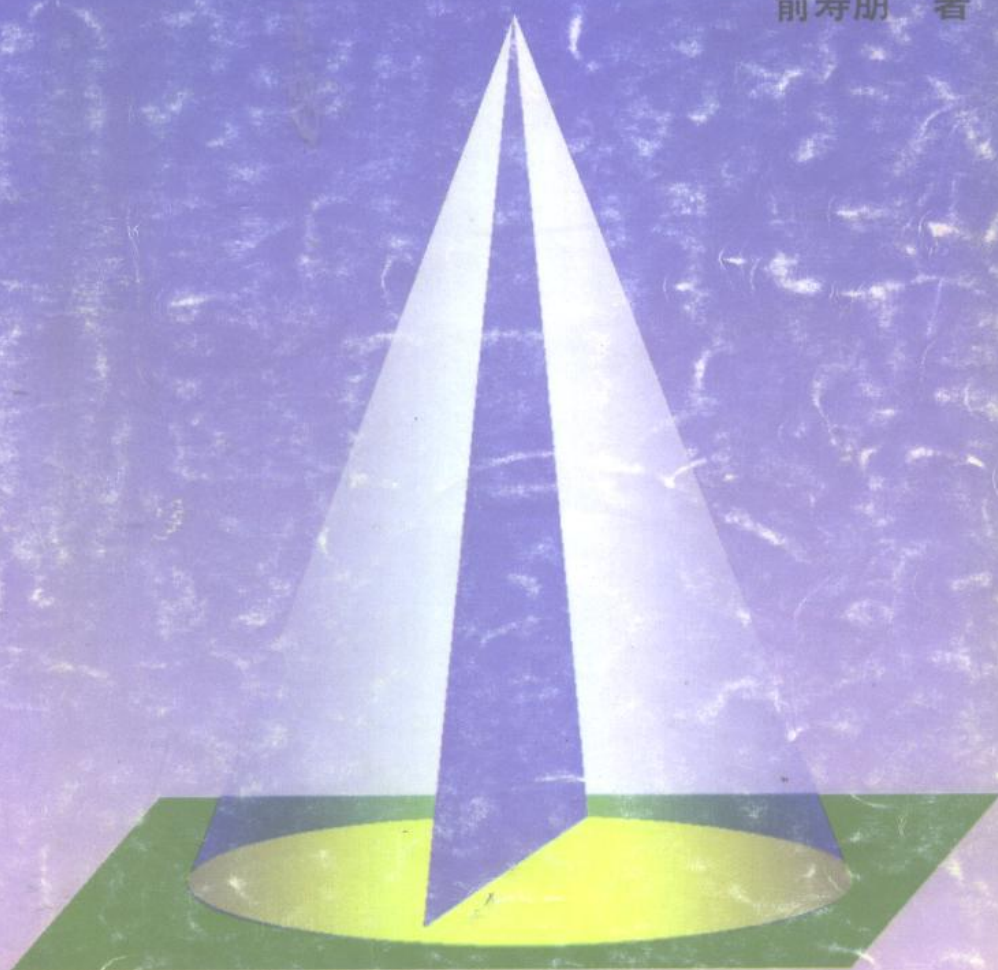


高分辨率 地震勘探

俞寿朋 著



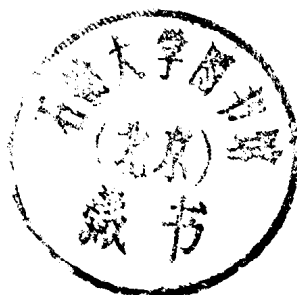
石油工业出版社

北京)

登录号	086964
分类号	P631.4
种次号	054

高分辨率地震勘探

俞寿朋 著



52/62 / 18



石油工业出版社

(京) 新登字 082 号

内 容 提 要

本书共分八章。前两章介绍了地震分辨率的概念和影响分辨率的地质因素，后面六章从高分辨率的观点出发讨论了地震仪器性能、地震数据的采集、处理和解释中的一些主要问题，并介绍了有关的新方法和新技术。内容着重讲清问题的地球物理概念，所介绍的方法大多是经过实践验证后，效果明显的，其中有一部分是作者和同事们新的研究成果。

本书可供地震勘探工作者、地质人员及高等院校有关专业的师生参考。

高分辨率地震勘探

俞寿朋 著

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 $12\frac{1}{4}$ 印张 303 千字 印 1 001—4 000

1993 年 4 月北京第 1 版 1994 年 9 月北京第 2 次印刷

ISBN 7-5021-0955-2 / TE · 893

定价: 11.00 元

序

高分辨率地震勘探技术已得到地震勘探界的普遍重视，利用地震资料的地质界人士也对此给予高度关注。目前还没有一本专门从高分辨率角度写的地震勘探读物，本书是填补这一空白的尝试。

考虑到各方面读者的不同要求，本书的写法是以高分辨率的地球物理概念为主要线索，每一节都把有关数学方面的叙述独立出来，以便尽可能保持主要线索的连贯性。某些读者对部分章节可能只希望了解基本概念，暂时还不想涉及数学关系，就可以跳过数学部分，这样并不会影响掌握这些章节的主要论点。

虽然现在大家都在谈论分辨率，但一些学术论文和实际工作中还不时出现与分辨率概念不一致的提法。比如在复数道分析技术创始人的论文中把振幅包络称为反射强度；有的论文提出用分块动校正方法避免拉伸；在“亮点”和 AVO 分析中都把振幅看成与反射系数成正比；有些反褶积方法把反射系数序列假定为稀疏序列；又如有人相信地震构造图与某个确定的界面对应等等。这里有些做法是由于地震分辨率还不能满足需要而采取的权宜之计，但如果把这些提法绝对化，不仅会造成概念上的混乱，甚至会造成工作上的失误。因此本书试图在概念上适当多说几句，不希望使注意力过多陷入数学推导而对问题的物理背景有所忽略。

有关高分辨率的文献散见于一些期刊，数量很多，时间跨度超过半个世纪，绝大多数是关于某项具体的方法和技术，其中尤以处理方面居多。近年来我国科技人员在期刊和学术会议上发表的有关高分辨率的论文已达百篇以上。本书不可能也不企图概括这些内容。我们只选择了一些已由自己的实践证明有效的、或已见到很好苗头的方法，其中包括石油地球物理勘探局研究院物探方法研究所的同事们和我本人的部分研究成果，按照统一的思路叙述。叙述的角度和侧重点与原来的论文一般有所不同。希望全面了解这些内容的读者可参照原文。

当前地震勘探的分辨率还不是很高。在工作做得比较好的情况下，对于 3~5km 的深度大约可分辨厚度 10~15m 的地层。可能还能提高一些。这与研究油气储集层的需要还有差距。虽然高分辨率技术已在油气勘探上发挥了不小的作用，但较大幅度地提高分辨率仍然是我们面临的重要任务。分辨率要能有较大幅度提高，主要困难是高频成分的信噪比和仪器的记录精度两方面，解决这些问题需要多方面长期的努力。

本书分成八章，讨论了整个地震勘探过程中的分辨率问题。第一章是地震分辨率的基本概念，希望能讲清分辨率在频域中的表现形式。第二章是影响分辨率的地质因素，介绍了估算 Q 值的方法。第三章是从分辨率的角度考察了记录仪器的性能，及如何利用其性能增强高频成分。第四章是采集方法，其中包括对炸药震源特性的介

绍。第五章是保证同相叠加，介绍了速度分析、动校正和静校正的一些新方法。第六章和第七章是关于信噪比和分辨率的讨论，除介绍了几种衰减噪声的方法外，还对最佳分辨率问题做了讨论。第八章则是解释中的一些问题，其中对波阻抗剖面的定量解释提出了新的认识。整个结构大体与一般的地震勘探教材接近，因此本书尽可能不涉及这些教材中已经充分讨论的问题。

在本书撰写及酝酿过程中，从与周兴元同志的多次讨论中得到不少帮助，罗斌、蔡希玲、万海涛、赵波等同志在资料准备上给予了支持和帮助，在此表示衷心的感谢。不幸英年早逝的郑玉莹同志生前曾向作者提供了重要的参考资料，他在地震处理方面研究的成就，也给我不少启发，在此表示深切的怀念。

李庆忠同志多年来系统的开拓性的研究工作对高分辨率地震技术做出了重大的贡献，除了已发表的一系列有影响的论文外，经常在讨论中通报他新的研究成果，得益颇深。作者热诚地向读者推荐他的论文。

本文撰写期间，得到国家自然科学基金会、中国科学院、中国石油天然气总公司和大庆石油管理局联合资助项目“陆相薄互层油储地球物理理论与方法研究”的资助。

作 者

1992年8月

目 录

第一章 地震分辨率	(1)
第一节 地震记录与子波	(1)
第二节 关于分辨率的极限	(5)
第三节 子波与子波频谱	(9)
第四节 分辨率与子波相位谱的关系	(14)
第五节 分辨率与炮检距的关系	(20)
第六节 分辨率与信噪比	(23)
第七节 横向分辨率	(28)
参考文献	(34)
第二章 影响分辨率的地质因素	(35)
第一节 岩石的吸收作用	(35)
第二节 品质因数 (Q) 的估算	(41)
第三节 Q 与 ν 的统计关系	(45)
第四节 表层影响	(49)
第五节 层间反射	(50)
第六节 小结	(53)
参考文献	(57)
第三章 高分辨率地震与观测仪器的性能	(58)
第一节 地震数据的数字记录	(58)
第二节 相对于系统噪声的仪器动态范围	(60)
第三节 量化误差	(63)
第四节 记录精度	(68)
第五节 前置滤波	(70)
第六节 采样率与防混叠滤波器	(73)
第七节 记录道数	(77)
第八节 检波器	(79)
参考文献	(82)
第四章 高分辨率地震数据的采集	(83)
第一节 可控震源	(83)
第二节 炸药震源的频率特性与药量的关系	(86)
第三节 炸药震源的频率特性与药包深度的关系	(91)

第四节	检波器安置条件	(99)
第五节	组合	(101)
第六节	多次覆盖参数	(103)
第七节	环境噪声调查	(107)
第八节	高分辨率采集的设计	(108)
参考文献		(110)
第五章	高分辨率叠加	(111)
第一节	高分辨率速度分析	(111)
第二节	高精度动校正	(117)
第三节	共反射点叠加与倾角时差校正(DMO)	(120)
第四节	零炮检距剖面的最小平方拟合	(125)
第五节	静校正量的分频估算	(131)
第六节	二阶差分静校正	(133)
第七节	利用折射波估算静校正量	(137)
参考文献		(141)
第六章	噪声衰减	(142)
第一节	信号的多项式拟合	(142)
第二节	频率域信号空间预测	(145)
第三节	K.L.变换	(149)
第四节	信噪比的定义	(152)
第五节	分频信号加强	(153)
参考文献		(157)
第七章	子波长度压缩	(158)
第一节	关于最小平方统计反褶积	(158)
第二节	反 Q 滤波	(162)
第三节	子波零相位化	(165)
第四节	频域外推	(167)
第五节	有噪声情况下的最佳分辨率	(170)
参考文献		(176)
第八章	高分辨率资料的解释问题	(177)
第一节	用 VSP 资料确定层位	(177)
第二节	用合成记录确定层位	(178)
第三节	薄层的厚度解释	(179)
第四节	薄层的波阻抗异常	(181)
第五节	薄层速度估算	(187)
参考文献		(189)

第一章 地震分辨率

分辨率是指分离出两个十分靠近的物体的能力⁽¹⁾。一般用距离来表示。如果两个物体间的距离大于某个特定距离时可以辨认出是两个分离的物体，而小于这个特定距离时就不再能辨认出是两个物体，则这个特定距离就表示分辨率。一个典型的例子是视力表，表中每一排字符的笔划之间的距离是不同的，受检查人的视力实际上就是双眼的分辨率。显然分辨率与观测者离被观测物体的远近有关。分辨率又是可以改进的，例如借助于望远镜可分辨肉眼不能分辨的远处物体。

这种分辨率有点类似于地震勘探中的横向分辨率。此时被观测的物体在地下，需要分辨的两个物体可以是两个断层、一个砂岩体的两个边缘等。被观测物体埋藏深度越大，得到的地震图像就越模糊，即分辨率越差。

但在地震勘探中往往更关心纵向分辨率，即分离薄层顶底反射的能力。纵向分辨率在日常生活中很难找到类似的例子。而地震勘探中所讲的分辨率，在大多数场合如不特别说明，总是指纵向分辨率。纵向分辨率一般不用距离（地层厚度）表示，而用时间表示，因此又称时间分辨率。与此对应有一个术语叫“时间厚度”，指一个地层顶底反射时间之差。

本章主要介绍地震分辨率的基本概念。

第一节 地震记录与子波

稍为接触过一点地震资料解释的人都会发现，地震记录与柱状剖面或测井曲线的特征不可能一一对应。一个 1000m 的井段往往可以划分几百个薄层，而一段 1s 的记录只有几十个波峰和几十个波谷，而 1s 时间对应的厚度往往超过 1000m。因此每个波峰或波谷必须是多个界面的反射波联合作用的结果，决不是只代表某一个界面。这个道理是显而易见的。

由此可以推断，每个反射波必然有一个延续度。因为如果每个反射波是一个尖脉冲，那末各个反射波就不会互相影响，每个波峰或波谷就不可能是多个反射波联合作用的结果。

这样的有一定延续度的单个反射波，是组成记录的基本单位，因此给它起了个名字叫“子波”。Ricker⁽²⁾ 在 1940 年就提出了“记录是子波的复合体”的概念。后来在工业中得到广泛应用的合成地震记录技术⁽³⁾，更直观地阐明了记录与子波的关系。

图 1-1 是制作合成地震记录的简单过程。图的左边 R 包含 15 个反射系数，出现

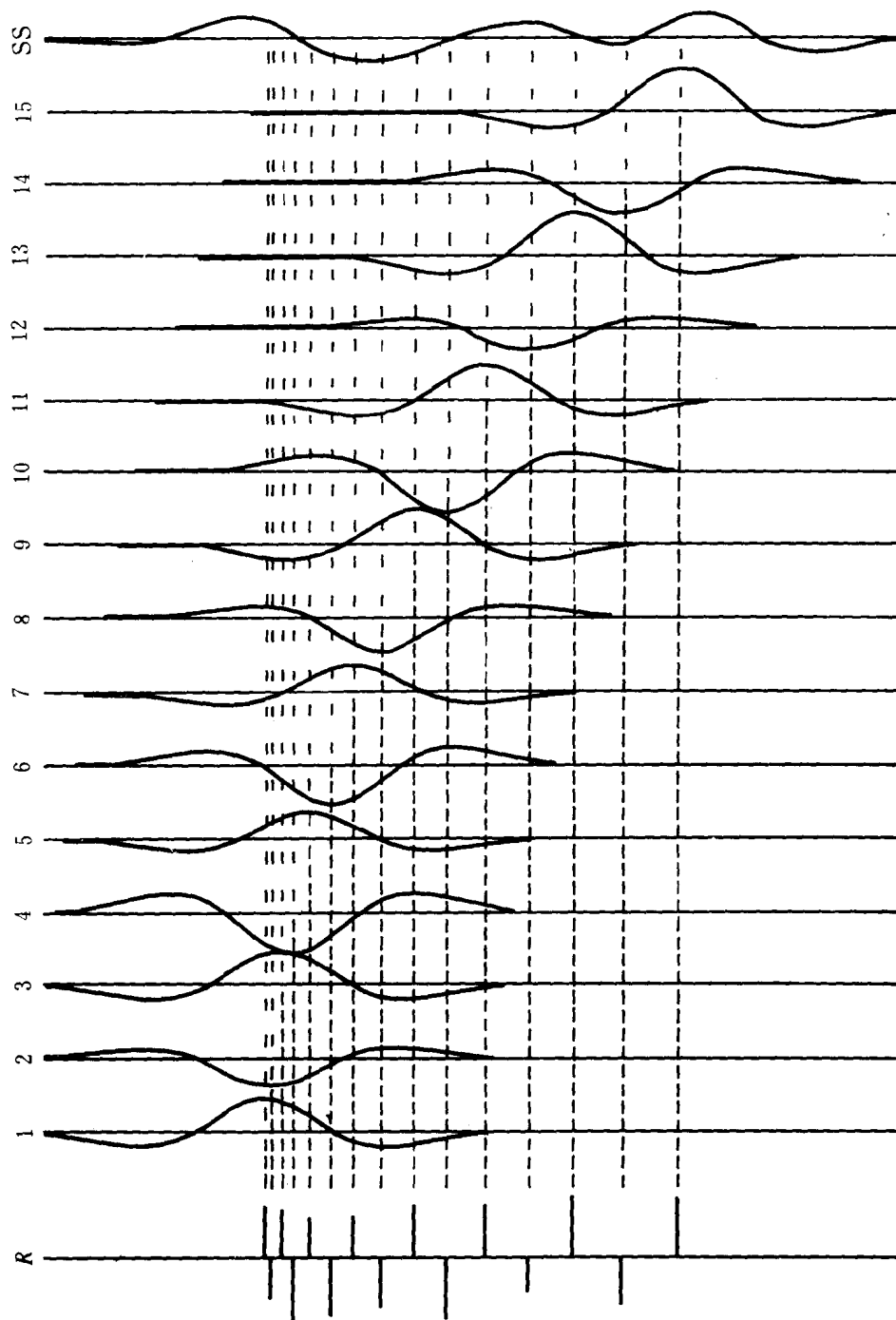


图 1-1 合成记录的简单制作过程
 R 为反射系数序列, 1~15 为子波, SS 为合成记录

在不同时间, 其中 8 个反射系数是正的, 7 个反射系数是负的。图中间 1~15 是 15 个子波, 它们的时间、极性和幅度与 R 的 15 个反射系数相对应。可以看出, 在一个子波的时间延续范围内, 有多个反射系数, 各个子波在时间上彼此有很大的重叠。图的右边 SS 是合成记录, 是 1~15 相加的结果。 SS 只有三个波峰和两个波谷, 不可能区分出 15 个子波。

实际记录形成的过程要比合成记录制作过程更为复杂, 在后面将逐步讨论。这里介绍的虽然过于简化, 但对本章叙述基本概念来说已经够用了。

由图 1-1 可得以下一些结论:

- (1) 从记录一般不能辨认出反射界面的位置, 也看不出有多少个反射面。
- (2) 从记录一般也不能看出子波的形状, 实际上这与上一点是一个问题的两面。
- (3) 因此记录上某个波峰或波谷一般不能代表某个反射界面。
- (4) 因此由波峰或波谷的幅度一般不能确定反射系数的大小和符号 (极性)。
- (5) 缩短子波长度是提高纵向分辨率的关键。

记录 $x(t)$ 与子波 $b(t)$ 和反射系数序列 $r(t)$ 的关系可表达为

$$x(t) = r(t) * b(t) \quad (1-1)$$

式中 $*$ ——表示褶积;

t ——时间。

在现今的地震勘探中, 时间是离散采样的。在计算合成记录时, 往往假设每一个地层的时间厚度是一个采样间隔。这种模型称为等时层模型, 或称为 Goupillaud 模型⁽⁴⁾。此时合成记录可用图 1-2 那样的表格计算。

表中假设子波是 3 个点 (实际子波长度要长得多), 反射系数序列是 4 个点。反射系数 r_0 对应的反射波是 r_0b_0, r_0b_1, r_0b_2 ; 反射系数 r_1 对应的反射波是 r_1b_0, r_1b_1, r_1b_2 ; r_1 比 r_0 晚一个采样间隔, 所以 r_1b_0 也比 r_0b_0 晚到一个采样间隔。记录为各个反射波的总和。由表可见

$$x_n = \sum_{k=0}^n r_k b_{n-k} \quad (1-2)$$

这就是褶积的离散表达式。

在理论分析中, 用 z 变换往往更为方便。在图 1-2 的例中, 子波的 z 变换为

$$b(z) = b_0 + b_1 z + b_2 z^2 \quad (1-3)$$

反射系数序列的 z 变换为

	b_0	b_1	b_2			
r_0	$r_0 b_0$	$r_0 b_1$	$r_0 b_2$			
r_1		$r_1 b_0$	$r_1 b_1$	$r_1 b_2$		
r_2			$r_2 b_0$	$r_2 b_1$	$r_2 b_2$	
r_3				$r_3 b_0$	$r_3 b_1$	$r_3 b_2$
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5

图 1-2 合成记录计算原理的表格形式

b 、 r 、 x 分别为子波、反射系数序列和记录。

下标为样点序号

$$r(z) = r_0 + r_1 z + r_2 z^2 + r_3 z^3 \quad (1-4)$$

这里可以把 z 理解为延迟因子， z 表示延迟一个时间单位（采样间隔）， z^2 代表延迟两个时间单位。此时式 (1-2) 可写成

$$x(z) = r(z) b(z) \quad (1-5)$$

即

$$\begin{aligned} & x_0 + x_1 z + x_2 z^2 + x_3 z^3 + x_4 z^4 + x_5 z^5 \\ &= (r_0 + r_1 z + r_2 z^2 + r_3 z^3) (b_0 + b_1 z + b_2 z^2) \end{aligned} \quad (1-6)$$

对比式 (1-6) 两端 z 同次幂项的系数，可以看出式 (1-6) 与式 (1-2) 等价。例如按式 (1-2)，

$$x_2 = r_0 b_2 + r_1 b_1 + r_2 b_0$$

而式 (1-6) 右端 z^2 项的系数 (把乘积展开后) 也是 $r_0b_2+r_1b_1+r_2b_0$ 。

第二节 关于分辨率的极限

上一节我们讲了记录上各个子波彼此重叠, 影响分辨。现在要讨论的问题是, 能分辨的条件并不一定要两个子波彼此没有重叠, 在有重叠的情况下有时还是可以分辨的。对此一些学者提出了不同的准则, 这一节将予以扼要地介绍。

(1) Rayleigh 准则^[5]: 两个子波的到达时间差大于或等于子波的半个视周期, 则这两个子波是可分辨的, 否则是不可分辨的 (见图 1-3)。这里半个视周期是指子波主极值与相邻异号次极值的时间间隔。显然, 当子波的主极值幅度显著大于次极值幅度时, 这个准则是比较合理的。

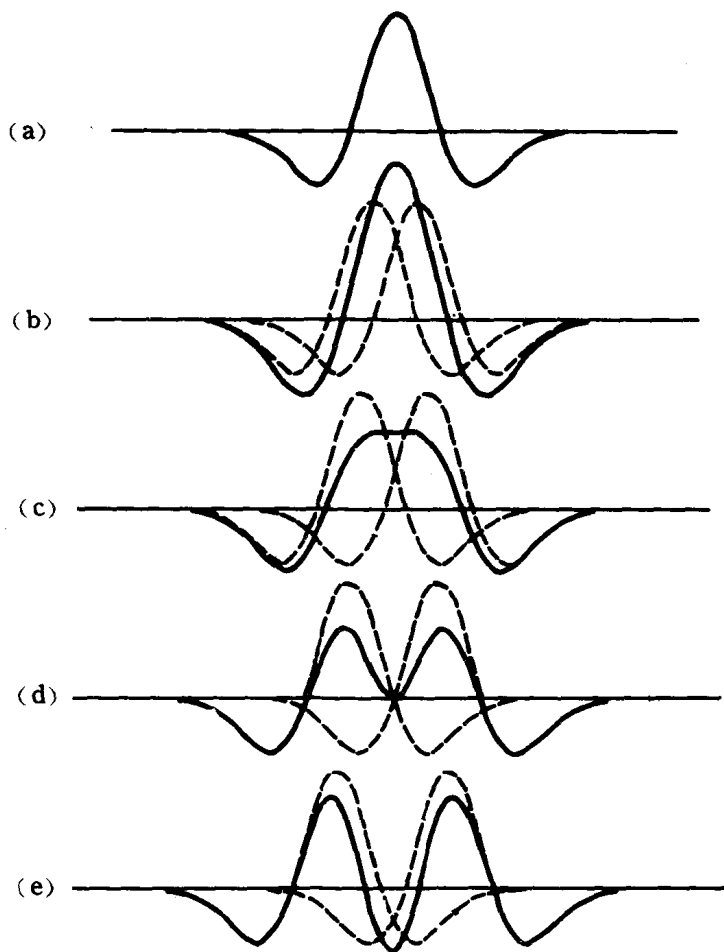


图 1-3 Rayleigh 准则和 Ricker 准则

(a) 为子波; (b) 两子波到达时间差较小, 不能分辨;

(c) 时间差达到 Ricker 极限; (d) 时间差达到

Rayleigh 极限; (e) 时间差较大, 易分辨

(2) Ricker 准则^[6]：两个子波的到达时间差大于或等于子波主极值两侧的两个最大陡度点的间距时，这两个子波可分辨（见图 1-3）。如果用子波的时间导数来表示，则 Ricker 极限是子波导数两个异号极值点的间距。而 Rayleigh 极限则是子波导数两上过零点的间距。

(3) Widess 准则^[7]：两个极性相反的子波到达时间差小于 $1/4$ 视周期时，合成波形非常接近于子波的时间导数，极值位置不能反映到达时间差，两个异号极值的间距始终等于子波的 $1/2$ 视周期（图 1-4）。但此时合成波形的幅度与到达时间差近于正比，利用振幅可解释薄层厚度。

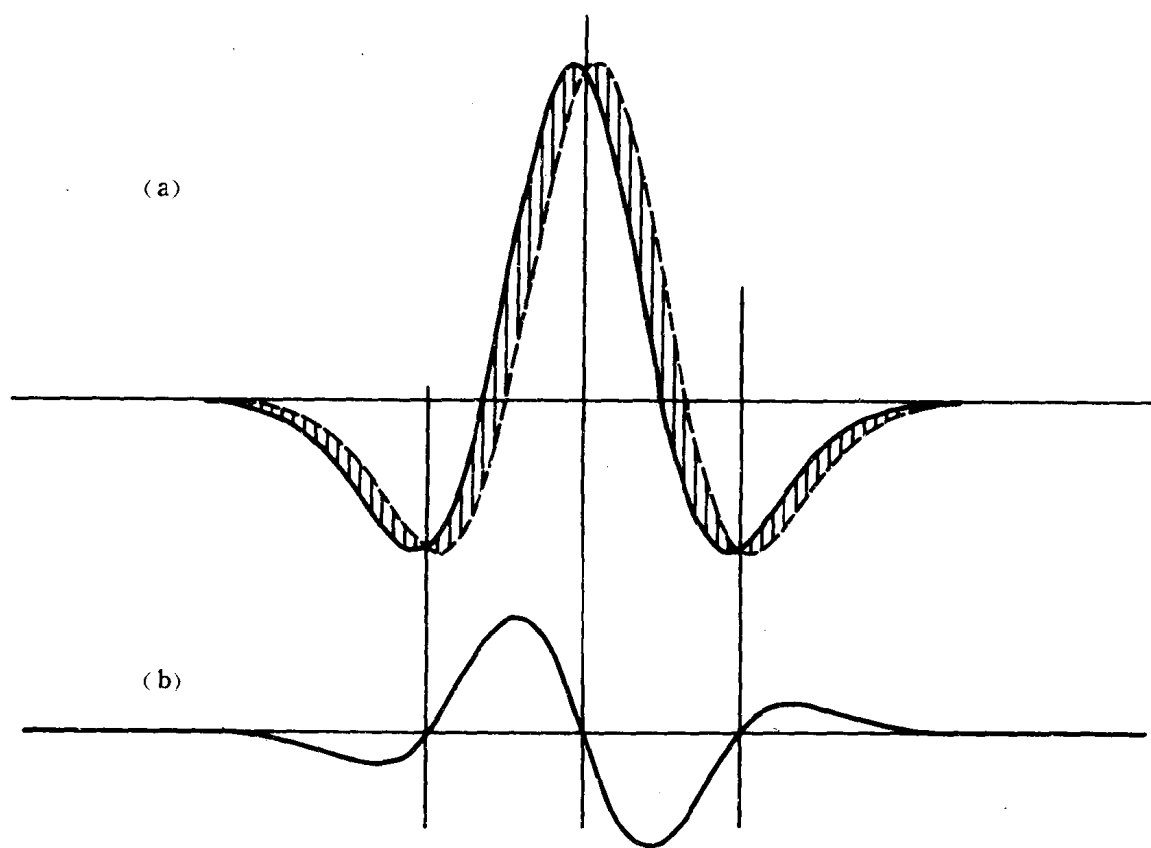


图 1-4 Widess 准则

(a) 两个子波到达时间差小于 $1/4$ 视周期，画纵线的面积表示它们相减的差；(b) 表明两子波之差形成的合成波形与子波时间导数一致

从以上叙述可以看出以下两点：

(1) 他们所用的子波都是零相位子波，子波是对称的。

(2) 他们所用的子波都只有很少的波峰和波谷，主极值的幅度明显大于次极值的幅度。说明子波的振幅谱是比较宽的。

如果不满足以上两点，则分辨率达不到所指出的极限。一个简单的例子是有人认为单纯提高主频就能提高分辨率，采用高频窄带滤波，实际上这样做使子波相位增多，主极值与次极值幅度差减小，上面的准则就不适用了。

分辨率与子波长度有关。但子波形状千变万化。长度相同的子波，有的绝大部分能量集中很短的一段长度内，有的则能量相对分散。显然简单地用长度来衡量分辨率不能反映实际情况，需要利用其他特征。

Widess⁽⁸⁾ 利用子波主极值 b_M 的能量与子波总能量 E 之比来定义分辨能力 P :

$$P = \frac{b_M^2}{E} \quad (1-7)$$

而

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} b^2(t) dt = \Delta \cdot \sum_k b_k^2 \quad (1-8)$$

即子波 $b(t)$ 所有样点值的能量之和与采样间隔 Δ 的乘积。可以看出 P 一般小于 $1/\Delta$ ，只有当子波是冲激函数时，分辨能力 P 才达到 $1/\Delta$ 。

以 Ricker 子波为例，此时

$$b(t) = [1 - 2(\pi ft)^2] \exp[-(\pi ft)^2] \quad \text{Ricker 子波} \quad (1-9)$$

显然 $b_M = 1$ ，而

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} [b(t)]^2 dt \quad (1-10)$$

以式 (1-9) 代入式 (1-10)，得到

$$E = \frac{3}{4\sqrt{2\pi}f} \quad (1-11)$$

代入式 (1-7)，就得到

$$P = \frac{4\sqrt{2\pi}}{3} f \doteq 3.34f \quad (1-12)$$

以上各式中 f 为 Ricker 子波的一个参数, 大约是视频率的 0.9 倍。可见分辨能力与视频率成正比。这是因为不同 f 的 Ricker 子波形状相似, 只是在时间方向延续程度上不同。

再以带通子波为例。频带范围从 f_1 至 f_2 的零相位子波为

$$b(t) = \frac{1}{\pi t} (\sin 2\pi f_2 t - \sin 2\pi f_1 t) \quad (1-13)$$

可见

$$b_M = 2(f_2 - f_1) \quad (1-14)$$

而

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} [b(t)]^2 dt = 2(f_2 - f_1) \quad (1-15)$$

于是

$$P = \frac{b_M^2}{E} = 2(f_2 - f_1) \quad (1-16)$$

此处 $f_2 - f_1$ 为频带宽度, 可见分辨能力与频带宽度成正比。

需要指出的是, 带通子波的形状随 f_1 和 f_2 的变化而变化, 而 Ricker 子波的形状不随 f 变化而变化, 当 f 变化时只表现为时间方向的缩放。

Berkhout⁽⁹⁾ 提出一种“信号长度”的概念, 并对单边子波做了深入的讨论, 揭示了一些重要性质。把这个概念应用到双边子波, 只要把子波的主极值位置作为时间原点。此时零阶长度定义为

$$L_0 = \left(\sum_{k=-\infty}^{\infty} b^2(k) - b_M^2 \right) / \sum_{k=-\infty}^{\infty} b^2(k) \quad (1-17)$$

可见 L_0 与 Widess 的分辨能力有相似的形式。

第三节 子波与子波频谱

由上节可见，纵向分辨率与子波特征有关，而子波一般又是未知的。因此实际工作中往往不用子波而用子波振幅谱宽度来衡量分辨率。

这里出现了一个问题，既然我们不知道子波，又如何得到子波振幅谱的宽度呢？

这个问题的解决办法是用记录的振幅谱近似地代替子波的振幅谱⁽¹⁰⁾。这是因为反射系数序列的振幅谱是近于白色的，就是每个频率成分的幅度大致相等。又因为记录的振幅谱等于反射系数序列的振幅谱与子波的振幅谱的乘积。所以记录的振幅谱与子波的振幅谱只差一个比例因子。这个关系由图 1-5 表示。

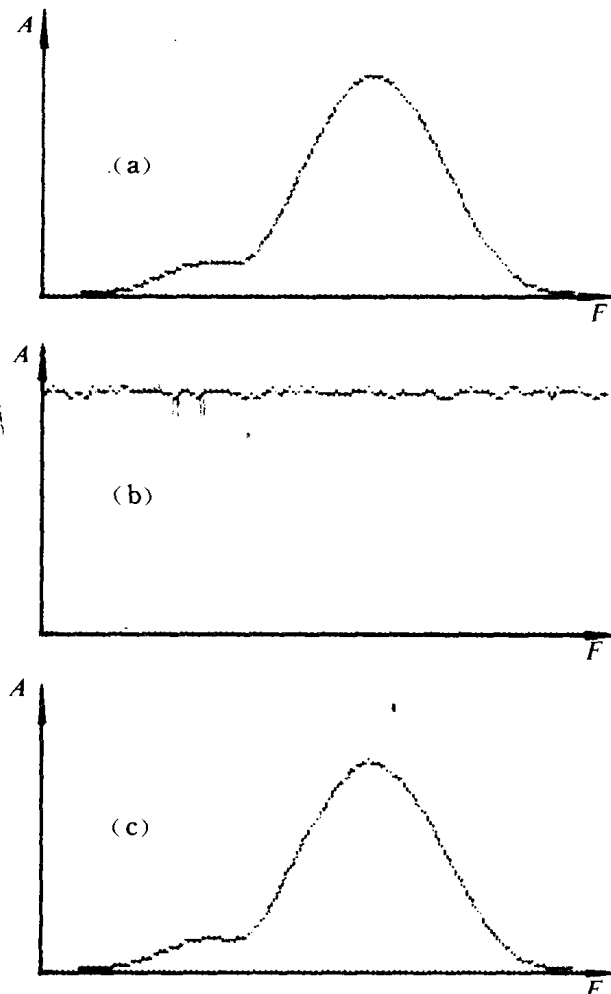


图 1-5 子波、反射系数序列和记录的振幅谱

(a) 子波的振幅谱；(b) 反射系数序列的振幅谱；

(c) 记录的振幅谱，它等于 (a) 与 (b) 的乘积

记录的振幅谱可由常规的频谱分析程序求出。现在的问题是振幅谱宽度与子波长度有什么关系？一般地回答这个问题比较困难，但在一定条件下，例如子波是零相位的条件下，振幅谱宽度与子波长度成反比。一个正弦波只有一个频率成分（单色波），其子波长度是无限的。而一个冲激函数（尖脉冲）的振幅谱则无限宽。图 1-6 是几种零相位子波的振幅谱。

上面说的是振幅谱的绝对宽度，即宽度是多少赫。实际工作中还常用到相对宽度的概念，即多少倍频程。倍频程说明在振幅谱宽度范围内的最高频率与最低频率的关系。如果最高频率与最低频率之比是 2 的 k 次方，则相对宽度是 k 个倍频程。例如比值是 2，就是一个倍频程；比值是 4 就是 2 个倍频程（ $4=2^2$ ）；比值是 5.6 就是 2.5 个倍频程（ $5.6=2^{2.5}$ ）。10~40Hz（宽度 30Hz）是 2 个倍频程；20~80Hz（宽度 60Hz）也是 2 个倍频程。

在子波是零相位的情况下，倍频程数越大，子波的相位数越少。

总起来说，在子波是零相位的情况下，振幅谱宽度与分辨率有如下关系：

- (1) 振幅谱绝对宽度越大，则子波越短，即分辨率越高。
- (2) 振幅谱绝对宽度不变，则不论主频如何，分辨率不变。
- (3) 振幅谱绝对宽度不变，则主频越高相对宽度越小，也就是子波相位数越多，分辨率与主频无关。
- (4) 振幅谱相对宽度不变，则子波相位数不变。此时主频越高，绝对宽度就越大，分辨率也越高。

因此，决定分辨率的是振幅谱的绝对宽度，而相对宽度决定子波的相位数，与分辨率没有直接关系。

当子波不是零相位时，以上关系不再成立。

子波的振幅包络⁽¹¹⁾可作为衡量分辨率的一种特征。现在我们来推导零相位情况下振幅包络与振幅谱绝对宽度的关系。

设振幅谱在频率 f_1 至 f_2 之间为 1，此范围之外为 0，则子波可由如下的 Fourier 变换得到

$$b(t) = 2 \int_{f_1}^{f_2} \cos 2\pi f t df = \frac{1}{\pi t} (\sin 2\pi f_2 t - \sin 2\pi f_1 t) \quad (1-18)$$

而 $b(t)$ 的 Hilbert 变换也可由 Fourier 变换得到

$$\hat{b}(t) = 2 \int_{f_1}^{f_2} \sin 2\pi f t df = \frac{-1}{\pi t} (\cos 2\pi f_2 t - \cos 2\pi f_1 t) \quad (1-19)$$

由此得到子波的振幅包络