

地震勘探的高分辨率技术

石油工业部石油科学技术情报研究所



26349

地震勘探的高分辨率技术

任 命

11/13



200398756

5471/13



石油工业部科学技术情报研究所

一九八六年十月

目 录

第一部分 模式分析	(1)
一、影响分辨率关键性因素的分析	(1)
1. 频带宽度与上限频率	(2)
2. 噪声因素	(3)
3. 波谱形状因素	(3)
4. 横向分辨率探讨	(4)
二、薄层	(7)
1. 薄层定义	(8)
2. 薄层类别及其特征	(8)
三、提高分辨率的几种新途径	(10)
1. 从时域进入频域—频谱与积分能谱分析法	(10)
2. 应用最大熵原理提高地震分辨率	(13)
3. 波速分析对于薄层分辨的效益	(15)
第二部分 实用手段	(20)
一、野外采集	(20)
1. 高频震源	(20)
2. 检测系统与排列设计	(24)
二、高分辨率分析处理方法	(26)
1. 常规地震处理流程中的几点特殊要求	(26)
2. 苏联地震“高分辨分析处理方法”的一些特点	(27)
3. 几种有效反褶积处理方法	(29)
4. 偏移技术简评	(39)
三、新方法的应用	(42)
1. VSP法在提高分辨率中的作用	(42)
2. 横波勘探法的分辨能力	(50)
3. 有关“三维地震法”分辨实效的评价	(55)
第三部分 勘探实例	(59)
一、在苏联推行的一种“高分辨率地震勘探法”实例	(59)
二、高分辨率数据采集的实例	(62)
三、利用真幅值地震波形特征分辨薄层数例	(65)
四、应用 VSP 资料探出小断距断层二例	(67)
结语	(72)
主要参考文献	(73)

地震勘探的高分辨率技术

编者按本文是石油科技情报研究所为石油部大庆科委提供的专题咨询调研项目之一。主要是针对松辽盆地油气勘探中存在的实际问题，搜集了一些国外有关的技术资料编写而成，对于我国其它探区也具有一定参考价值。

在我国各大探区，譬如说，松辽盆地的油气勘探中，不论是浅层薄泥砂互层、“三小”（小青斜、小断块、小砂体）构造还是深层古潜山构造、基岩断裂带、大三角洲砂体等隐蔽油气藏的勘探皆迫切需要提高地震法纵（垂）、横向的分辨能力。近十多年来有关的文献虽不少，但因其论述观点、出发角度与目的对象皆各有不同，只有根据我国探区的实际需要，将有关成果归纳一下，分为以下三个方面作一介绍。在调研过程中曾获得大庆物探公司技术领导的帮助，在此表示感谢。

第一部分 模式分析

模式分析主要依靠数学运算与简化物理模型以合成记录与试验分析作为手段，针对在各种波阻抗结构下，薄层（包括互层）、楔形体、透镜体断块及其各类组合体的地质模式进行实验室的分析研究，从理论上为提高地震分辨率的有利因素、有效途径及可能性提供了依据。

为使模式结果具有指导意义，模式分析中要作出若干基本符合实际的简化假设（如假设薄层所在上、下介质的密度不变、泊松比值为常数、震源子波恒定等），忽略某些非关键性参数的影响（如吸收和扩散引起的衰减、多次反射等），围绕几个主要参数（如界面上、下的波速比值、目的层厚与深度等），模拟几种具有代表性的单元地质结构（如尖灭、透镜体、薄层、小断块等）进行大量实验与分析，现已取得不少成果。

一、影响分辨率关键性因素的分析^[55]

纵向分辨率是区分薄层的能力，而横向分辨率是区分横向波阻抗细节变化的能力，如分出断层、河道、岩性异体和断裂带等。

纵向分辨率主要取决于信-噪比值、子波频谱宽度与上限频率、相位谱和波谱形状等；笼统地说，也就是优势信-噪比信息的频带宽度；而横向分辨率除受上述因素的影响之外，检波点距与偏移速度的准确度也很重要。

下面首先着重分析一下影响纵向分辨率的几个关键性因素：信-噪比值、地震子波频谱宽度、上限频率、相位谱、波谱形状以及相互之间存在的相互影响。

Widess 为纵向分辨率 P_a (Resolving Power) 作出的定义^{*}，在不计噪声的情况下是：信号波峰幅值平方 a_m^2 与子波总能量 E 的相对比值。

$$Pa = a_m^2 / E$$

按此定义, 尖峰信息 (频谱无限宽) 具有无限大的分辨率, 而一无限延长的信息 (频谱为单一频率), 其分辨能力为零。借此可以评价不同子波波形的分辨能力。

Widess 曾对分辨力 Tr (Resolution) 给出定义, 作为: 分辨率的倒数, 可以导出:

$$Tr = 1 / (2 \times \text{频带宽度})$$

而 Kallweit 给出的分辨力定义则取决于频谱的上限频率 f_u :

$$Tr = 1 / 1.5 f_u$$

当子波频宽接近二个倍频程时, 按此二定义算得的结果十分相近。实用中: 在子波频宽偏低时 (低于二倍频程) 常以 Widess 上述定义为主; 而在子波频宽偏高时 (高于二倍频程), 则以 Kallweit 定义为主。

1. 频带宽度与上限频率

在信号频带宽度不超过二倍频程时, 利用 Widess 对分辨力的定义可以看出, 它主要取决于信号频带的宽度。图 1 表明, 具有 5—35 赫频带宽度的子波与 120—150 赫子波的分辨力相同。由于子波的持续时间是带宽的函数。中心频率升高时, 单个周期虽小, 持续时间却与低频的相同, 因而分辨率不能借此提高。高频可使主峰周期缩短, 低频成分可以减小子波的旁瓣幅值。实际上因为地震波在运行中高频成分衰减较快, 观测与分析中提高高频成分就成为一项重要任务。

在子波频谱较宽 (>二倍频程) 时, 由于这时子波的旁瓣已很微弱, 不再成为影响分辨率提高的关键因素, 就宜根据 Kallweit 对分辨力所下定义, 依靠进一步提高频谱的上限频率 f_u ($=f_2$) 来缩短其子波主峰的宽度, 才能进一步提高地震记录的分辨率。

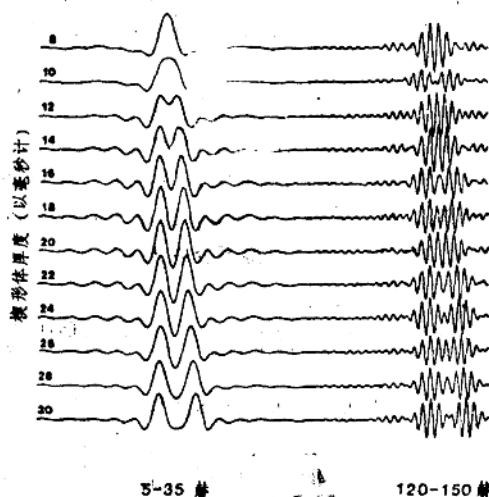


图 1 在信号频带不宽时, 中心频率不同而频宽相同时, 分辨率相近示意图

注* 衡量纵向分辨率的尺度还有多种: Rayleigh 用的是峰-谷距; Ricker 用的是主瓣宽度; Berkhout 用的是元阶信号长度 (first-order signal length)

2. 噪声因素

上面的分辨力定义是在假设噪声为零时作出的, 实际上, 野外信息是脱离不了噪声的。在噪声甚强 ($S/N \ll 1$) 反射信号根本无法识别时, 所谓“高分辨”的宽频信息也就失去了实际意义, 因此实际分辨力必须将信-噪比值 (r) 这一重要因素也考虑在内。又因噪声频谱成分中超出有效信息之外的部分可以滤除, 可以认为信、噪二者的频带宽度是相同的。这里, Widess与Kallweit对分辨力的定义分别变为:

$$Tr = (1 + 1/r^2) / (2 \times \text{频带宽度});$$

$$Tr = (1 + 1/r^2) / 1.5fu$$

在信-噪比值低于1时, 提高记录的信-噪比值成为改善分辨力的关键因素 (当 r 从0.5升为1时, 分辨力可以改善2.5倍!), 但是在 $S/N > 2$ 以后, 进一步提高 S/N 值, 对于分辨力的改善来说就意义不大了 (当 r 从2升为4时, 分辨力仅改善了18%)。

下面给出一张楔形体模型试验对比图 (图2), 人为控制噪声, 使得信-噪比值分别为0.5与1。从图上可以明显看出二者直观分辨力的明显差别。

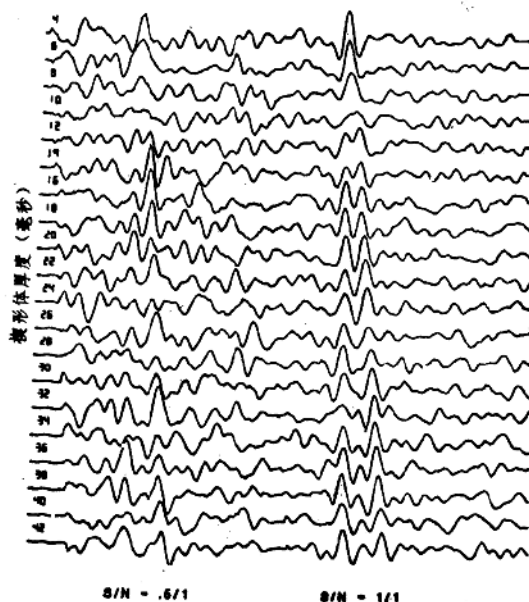


图2 噪声对于楔形体分辨率的影响。

3. 波谱形状因素

模式分析表明, 在相同的频带宽度之下, 只要波谱形状不同, 实际分辨率也会有所差别的。分辨率最佳的是盒形 (Box-Shaped) 波谱, 其次是正弦倾斜 (sin ramp) 谱、更差一些的是直线倾斜 (Line ramp) 谱。直线倾斜谱只有在频带宽一些 (约22%) 的情况下, 才能取得与盒形谱相同的分辨能力 (见图3示意)。

因此, 要想提高分辨率, 使用可控震源时, 应当尽可能地锐启锐止, 不宜拖头带尾。

地震信号的相位谱对波形的影响也很大, 信号频率成分的相位愈接近零值, 波峰就愈加

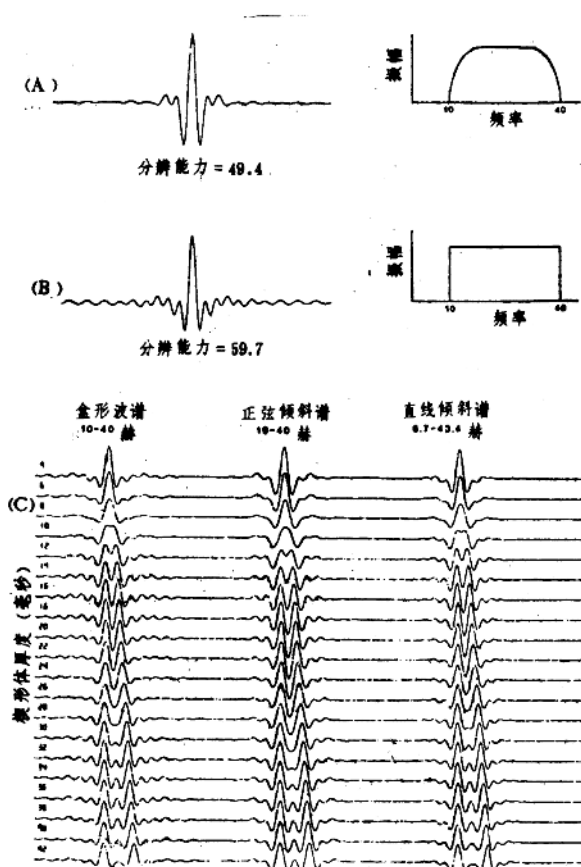


图 3 波谱形状对于楔形体分辨能力(分辨率)的影响(实验结果对比)

(A) 盒形频谱; (B) 正弦倾斜谱; (C) 对楔形体的分辨能力示意。

突出, 这样记录上的直观分辨率也就愈高。因此, 在选择震源和记录系统时要尽可能选择相位谱近零的震源(如炸药、气枪等)与相移小的仪器设备。但是, 由于在分析处理过程中, 还有可能运用一些先进的反褶积手段(如维纳滤波等)人为地将所录信号的相位谱朝最小相位方向调整, 以补偿已有的相移。这些方法现已取得较好结果。所以在评价记录系统的分辨率时, 现在一般并不将相位谱作为主要因素予以考虑。

此外, 一薄层顶、底反射波的极性是否一致还会影响到复合反射波幅的大小, 如果极性已知, 就可根据复合波波幅来估测薄层的厚度。为了估计正确, 这时要求记录的信-噪比值最好能大于或等于 4。

上述分析为人们提高分辨能力指明了一条十分明确的途径:

在 $S/N < 1$ 的地区, 要以提高 S/N 作为主攻方向;

在 $S/N > 2$ 的地区, 则应以提高原始地震信息的频带宽度与上限频率作为主攻方向;

在 S/N 比值甚高的地区, 必要时甚至可以不惜以稍稍牺牲一些 S/N 值作为代价, 千方百计提高最终记录的频带宽度与上限频率。

4. 横向分辨率探讨^[59]

研究横向分辨率对于勘探非背斜构造及地层学油气藏十分重要,但有关的论著不多。过去多以菲涅尔(Fresnel)带的理论为基础,将 $1/2$ 菲涅尔带深视作横向分辨的最小距离。自从引入“空间子波”的概念以后,才开始细致、定量地研究横向分辨率。

横向分辨率的定义是:二个绕射点得以分辨的最小水平向距离(ΔX)。从理论计算所得的检波排列响应 $A(\phi)$ 曲线图中(图4)可以看出:当二绕射点所产生的排列响应曲线相离一定距离,使二曲线在相交点处的幅值低于总幅值的35%时,就可以从合成的总曲线上清晰地分辨出此二反射点来。依此可以推得横向分辨率 Δx 的计算公式为:

$\Delta x \leq 0.7\lambda Z_0 / (2N\Delta X_s)$; 式中: $2N$ ——排列内的检波点数; ΔX_s ——排列内的检波点距; Z_0 ——反射点深度; λ ——信号波长($=v/f$)。

从公式可见,要想提高横向分辨率(减小 ΔX),必须提高信号频率和排列长度,而且波速误差和检波点距过大也会降低其分辨率。下面将有关的一些实验分析结果引述一下。

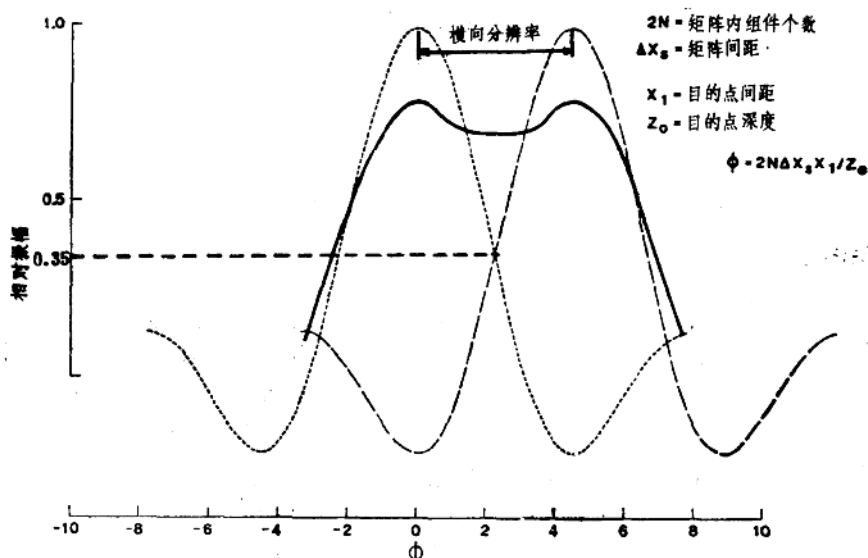


图4 在检测反射点时所取得的合成源-检排列响应曲线图,虚线表示单个反射点的响应,实线表示二反射点的总合响应。

$$A = \sin\phi / \sin(\phi/2N); \phi = 2N\Delta X_s K x_1 / Z_0$$

参量说明如前文; K 表示波数; x_1 表示反射点间距。

(1) 从图5可见,在 $\Delta X_s = 25$ 米、 $V = 2500$ 米/秒、 $Z_0 = 2000$ 米、信号频率为8—40赫($f_{\pm} = 26$ 赫)、二反射点横向相距100米时,随着排列内检波点数量 $2N$ 的增加:41→61→81→101(与此相应,排列长度分别为1000、1500、2000、2500米),分辨能力在逐步上升。当 $2N = 61$ 时,图上已可分辨,这与按照上式推算所得的结果($2N = 54$)相符甚佳。

(2) 图6表明,在信号频带逐步提高的情况下,横向分辨率的改善十分明显。

(3) 文献[59]还表明,如果偏移处理时所取波速有误差的话,它不仅会引起反射点的深度误差,也会使横向分辨率有所下降,而且信号频带愈窄,分辨率下降就愈加明显;在信号频带较宽时(8—80赫),反射点深度误差即使达8%($\Delta Z/Z_0 = 160/2000$),相距100米的

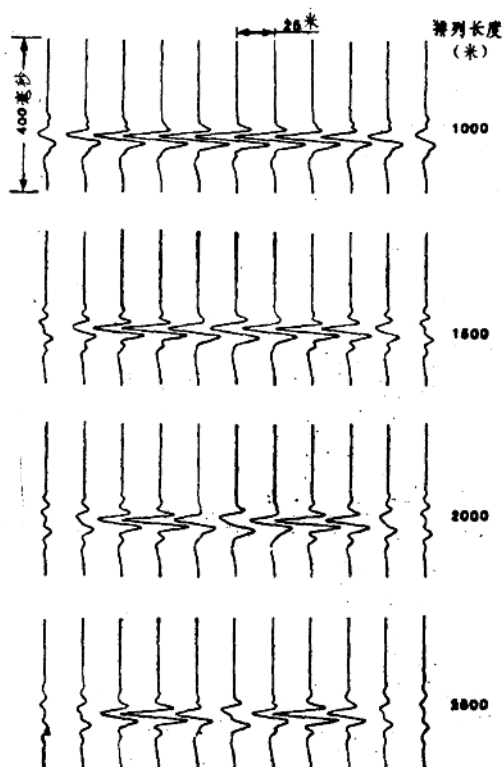


图 5 在 $\Delta x_s = 25\text{m}$ 、 $V = 2500\text{m/s}$ 、 $Z_0 = 2000\text{m}$ 、 $ff = 8 - 40\text{Hz}$ 、反射点相距100米时， $2N$ 分别为41、61、81、101时所获地震记录的横向分辨图

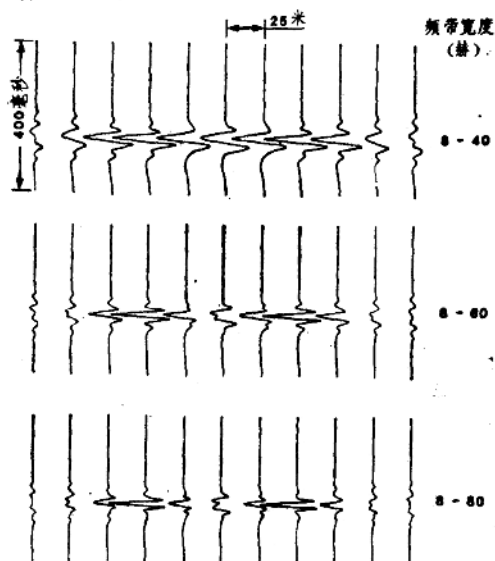


图 6 在信号频率逐步提高时(其它参数同图 5)，所获地震道记录的横向分辨图改善的情况

二反射点仍能清晰分辨；而当频带变窄时（8—40赫），只有在深度误差 $\leq 2\%$ ，才得以分辨（见图7）。

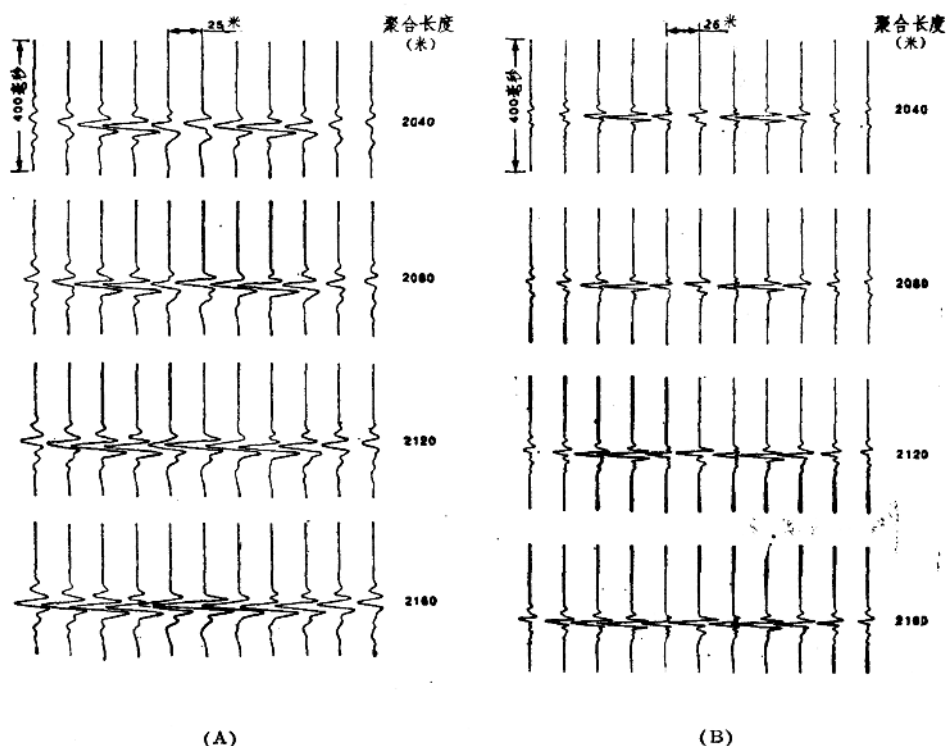


图7 在信号频带分别为8—40赫(A)与8—80赫(B)的不同情况下，由于所取介质波速误差所引起的横向分辨率恶化记录图(其它参量相同：排列长度为2500米，反射点横向间距100米，实际深度2000米，正确的介质波速应为2500米/秒)

4. 检波点距 ΔX_s 值不能过大，因为空间采样间隔过大会引起伪噪声（见图8），一般不得超过信号的半波长。

总之，提高信号频带宽度与上限频率、适当提高排列长度、检波点距不得过大是野外采集时必须十分注意的事。处理时，选取合适的反褶积和偏移技术，以较高精度求取介质的平均波速是提高横向分辨率的要害所在。反褶积处理有助于进一步提高信号的有效频带宽度，偏移技术则可看成是缩短空间子波的一种横向反褶积过程。选取偏移方法时应尽可能不要过早、过小地限制偏移处理中的倾角范围，才能有助于横向分辨率的提高，如克希荷夫波动方程偏移法就是相当得用的一种。

二、薄 层

所谓“薄层”从概念上讲，指的是厚度较小的地层，当其厚度低得使人们无法从地震图上将顶、底信息直观地区别开来时，就可列入“薄层”范畴。实际上，薄层的厚度信息仍是包涵在信号的振幅函数、波形、频谱等动力学特性之中的。依靠一番分析处理之后，往往还

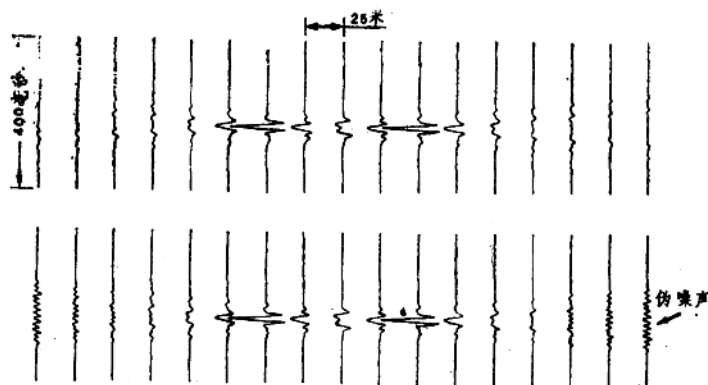


图 8 当空间采样间隔过大, 分别为75米(上)与150米(下)时,
记录上出现的伪噪声合成图
(信号频带: 8—80赫, 排列长度: 1500米)

是能够加以分辨的。由此可见, 所谓“薄层的勘探问题”实际上属于对纵向分辨率更进一步的要求。

1. 薄层定义

早在1956年苏联顾尔维奇, 1961年 Sengbush 就分别发现当地层厚度等于 $1/4$ 子波波长 (λ) 时, 反射波幅会出现异常, 因此将 $\lambda/4$ 称为地层的调谐厚度。1973年, Widess 用零相移子波作实验时, 发现当层厚为 $\lambda/8$ 时, 反射波形正好是入射波形的导数, 并可直观鉴别其顶、底反射, 从而将厚度低于 $\lambda/8$ 者定义为薄层。但此结论只限于单频零相的理想情况。1982 年 Kallweit 利用可控震源研究了薄层响应的频谱后, 提出分辨地震波的实际极限, 以双程旅行时表示等于 $1/1.4f_u$ (f_u 为子波上限频率), 经主频换算后此值近似等于 $\lambda/4$ 。因此, 实用中薄层被定义为: 厚度低于入射子波调谐厚度 ($\lambda/4$) 的地层。

2. 薄层的类别与特征

大量数学模拟运算结果^[5]表明, 只要抓住了影响薄层分辨率的关键性参数——顶、底层反射系数相互关系——的特征所在, 就可以将复杂多样的地下薄层结构合理地归纳成为两种基本类型的组合, 这两类薄层产生的反射波各具明显不同的动力学特点。研究清楚这些特征将十分有助于根据地质条件不同, 选择不同的措施来提高其分辨能力, 也可以避免一些错误的地质解释, 如实用中就曾多次发生过将薄层当作岩性相变, 超复而作出错误解释的教训。

(1) 第一类是韵律性薄层 (即异速性) (即 $m < 0$; $m = k_2/k_1$; k_1 与 k_2 分别为薄层顶、底的反射系数), 当薄层波阻抗高于或低于上、下介质时, 皆属此类, 通过波动方程演算可以证明:

①在厚度 $= \lambda/4$ 时, 出现调谐性波幅增大 (Q值出现极大), 相位为零, 反射波 t_0 值不偏移。

②反射波强度随着厚度减小甚缓, 当厚度 $= \lambda/40$ 时, 反射波强度仍为单层界面反射波幅的30%而不消失, 唯其相位明显超前, t_0 时间偏小。

③ 它对反射波所起作用与一带通滤波器相似。此“滤波器”主频随厚度而变，厚度 τ （以时差表示）愈小，反射波主频愈高，相互关系见表1（在 $V=2000$ 米/秒时）。

表 1

层厚时差 τ (毫秒)	主 频 f_0 (赫)	对应的层厚(米)
2	250	2—3
4	125	4—6
10	50	10—15
20	25	20—30

④ 此类薄层的滤波特性曲线具周期性，以 $f\tau=1$ 为周期，当 $f\tau=N$ （ N 为整数）时，输出极小，而 $f\tau=N+1/2$ 时输出极大。

（2）第二类是渐变型薄层（ $m>0$ ），薄层的波阻抗界于上、下介质之间（海进或海退时的沉积或页岩覆盖含油砂层时皆属此类）。其特点与第一类大不相同：

① 当层厚 $=\lambda/4$ 时，反射波幅极小（ Q 值极小，当 $m=1$ 时， Q 值为零），相位特性有突变，反射波极性转换。

② 当层厚 $<\lambda/4$ 时， Q 值增大，并逐步过渡到上、下界面合并的单界面状态，相位特性由滞后恢复到零。

③ 其作用相当于一低通滤波器，随着厚度增加，反射波主频朝低频方向移动。

④ 其滤波特性曲线也以 $f\tau=1$ 为周期，但是当 $f\tau=N$ 时出现极大，而 $f\tau=N+1/2$ 时出现极小。

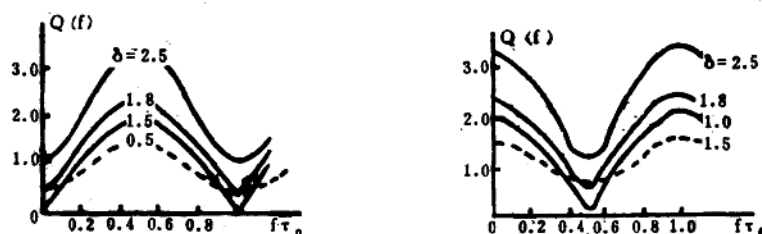


图 9 两类薄层频率特性对比

(A) 韵律型（ $m<0$ ）；(B) 渐变型（ $m>0$ ）； δ 是薄层底、顶纵波反射波幅的比值。

（3）与泥沙互层极其相似的是由多个韵律薄层构组的合层，通过运算、分析，表明其特点是：

① 单层厚度达1米以上的多互层也可以形成相当强的反射波。

② 当反射系数不很高时（设 $K \leq 0.1$ ）反射波振幅谱具有极大和极小点——多峰谱，可以借此鉴别与分辨薄互层。

③ 当反射系数 K 值增大或层数无限增加时，峰点会减少。

④ 薄层间距 τ' 与薄层厚度 τ 之比值 $L(=\tau'/\tau)$ 对峰值点的数量与频谱周期皆有显著影响，只有当 L 为整数时，频谱曲线的周期才为 $f\tau=1$ 。

这些数学运算结果基本上与物理模型实验结果相符。由于在勘探区内,反射系数(K值)甚低的情况还是相当常见的。因此,利用反射波作频谱分析来分辨薄互层的前途是鼓舞人心的。

三、提高分辨率的几种新途径

1. 从时域进入频域——频谱与积分能谱分析法^[25]

通过对单层韵律型薄层(“偶极”式)模型所得反射函数的频谱分析表明:在入射子波已知的情况下,影响薄层反射子波频谱幅值的主要参数是岩床的厚度 d 。单偶极产生的频谱曲线具有 $1/\tau$ 的周期性。当偶极厚度 d 等于入射波调谐厚度 $\lambda/4$ 时,其反射函数频谱曲线第一周期内的主频值将与入射子波主频相同。当 $d < \lambda/4$ 时,反射主频偏低,反之偏高。尽管当 $d < \lambda/4$ 时,在时域地震图上难以直观识别薄层的存在,但是通过反射信息的频谱分析,就有可能借助其反射波主频与入射子波主频间的差别来发现薄层并估算出其厚度来。因而反射信号的频谱分析法可以作为提高地震法分辨率的一种有效手段。

但是在地下存在互薄层或更为复杂的情况下,利用一般振幅频谱分析法也难以分辨时,还可采用分辨能力更高的积分能谱[INTENS]分析法。这是1983年Marangakis通过数学分析与模型实验双重论证取得的成果。积分能谱 $[E(f)]$ 是按照子波波谱频带宽度为10—60赫时作出定义,以百分率值来计算的:

$$E(f) = 100 \int_{10}^f A(f) A^*(f) df / \int_{10}^{60} A(f) A^*(f) df$$

式中: $f \leq 60$, $A(f)$ 是频谱成分的振幅, A^* 是其共轭复数。

尽管推论是以辛克(sinc)子波作为基础的($\text{sinc} \omega t = \frac{\sin \omega t}{\omega t}$),但是对于其它地震子波来说,结论仍然适用:与一般振幅频谱相比,积分能谱曲线宽度更窄,相对于层厚度的变化更为灵敏,振幅频谱中的峰值部分转换成INTENS中的高陡度线段,而谷值部分则转换为低陡度线段。积分能谱不仅受新频谱幅值的影响,也受新频谱形状(动力学特征)的影响。

为证实推论,Marangakis针对几种常见的地质薄层模式单元进行了实例分析:

(1) 双偶极模式——即当偶极间距等于偶极厚度时的情况。这时振幅频谱曲线的形状与单偶极所得结果相同,峰值皆出现在调谐频点上不变,因此难以鉴别二者差别。然而能谱图上却出现了具有更窄的旁瓣曲线图形式。旁瓣的数量与幅度取决于偶极的厚度与偶极间距。偶极(互薄层)数量的进一步增加将产生更多的旁瓣。而且这些曲线图可以与厚岩床频谱中出现的周期性区别开来。

(2) 两种楔形模式

一种是高速楔形体,另一种是变速层楔形体(模式参数与结果见图10、11)。

从图10上积分能谱恒值线的统一拐点所在,可以明确指出楔形体的终端所在。减薄方向可由等值线的倾斜方向看出。而这些参量从多道地震反射波形图与振幅频谱分析上都是难以确定的。

变速楔形体内的波速随深度作线性变化: ($V = V_0 + aZ$)。用它可以模拟地质上颗粒逐渐变粗的碎屑岩楔形构造,从图11可以看出,随着变速区厚度的增加,变速楔形体的积分能谱在低频部分加强了,也就是等值线具有朝变速层加厚方向倾斜的特点。楔形体终端位置

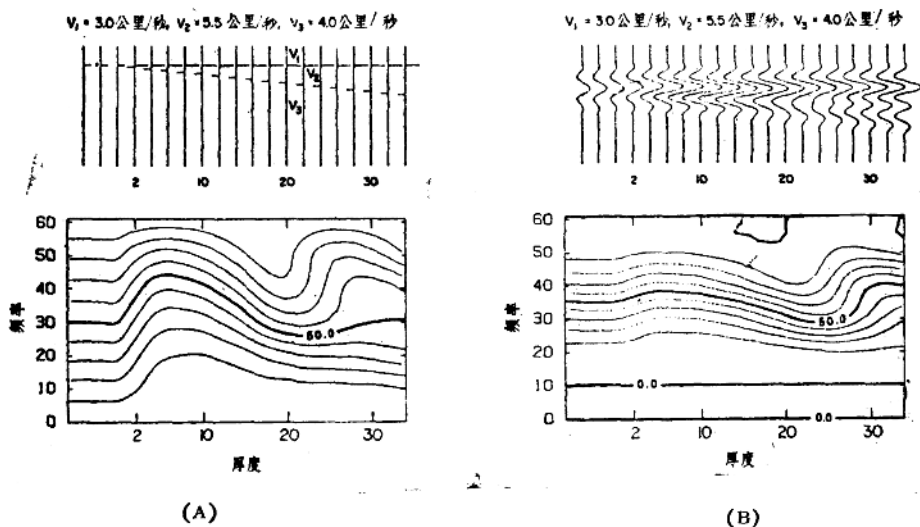


图 10 高速楔形体多道反射波形图与其积分能谱等值线图。楔形体厚度自第三道后开始朝右线性增加，每道增加 2 毫秒，最长达 34 毫秒
(A) 根据反射率函数直接运算的结果；
(B) 入射子波经过褶积处理后的反射率函数运算结果。

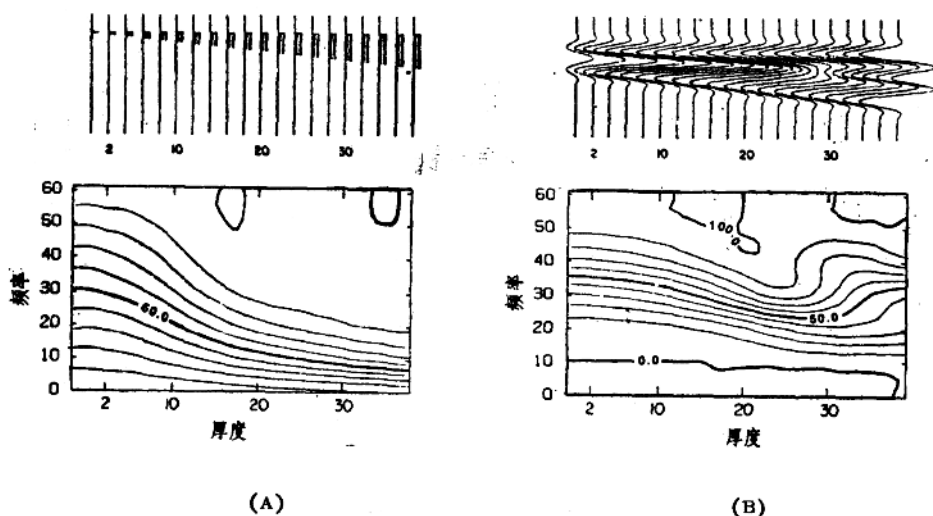


图 11 变速楔形体多道反射波形图与其积分能谱等值线图 (A、B 注释同图 10)

同样可以从等值线倾角稳定为零之处确定，而这些参量依靠地震图与振幅频谱分析是更加难以识别的。

比较图 10 与 11 可以看出：尽管两种楔形体外形相同，但是高速（或低速亦然）楔形体具有与变速楔形体不同的积分能谱等值线图。

通过图中 (A) 与 (B) 的相互对照也可看出，尽管在 (B) 图中由于子波受到褶积的滤波作用使曲线变得较为平滑，但总的趋向与特点仍是改变不了的。

(3) 两种薄透镜体模式：一种是递变型（或称阶梯式）薄透镜（ $m < 0$ ），另一种是高速薄透镜体（说明见图 12、13）。

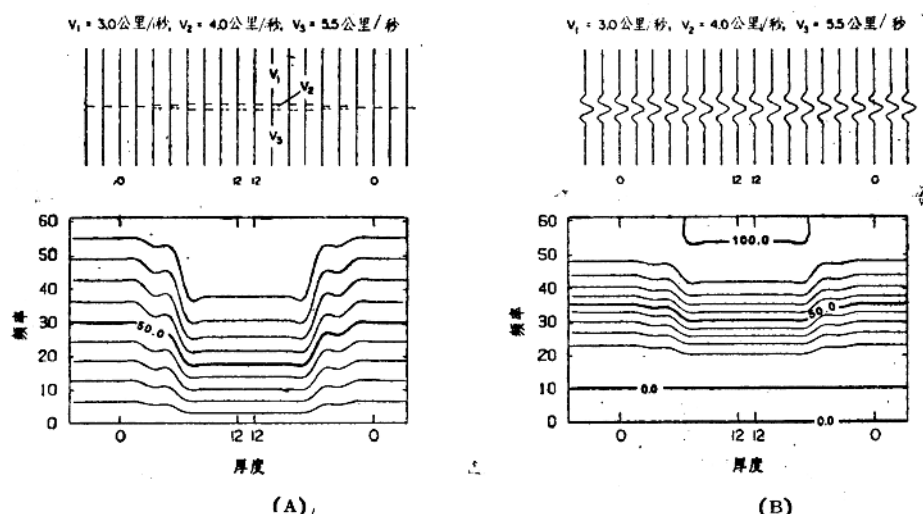


图 12 一种递变型薄透镜体多道反射波形图与其积分能谱等值线图，透镜体最大厚度 12 毫秒（A、B 注释同图 10）

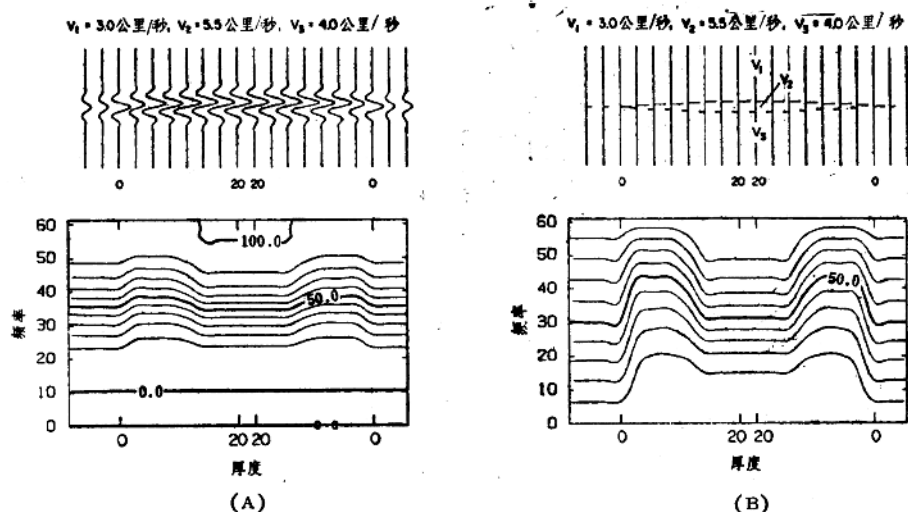


图 13 一种韵律型高速薄透镜体的多道反射波形图与其积分能谱等值线图，透镜体最大厚度 20 毫秒（A、B 注释同图 10）

由图 12 可见，由于波速阶梯式上升，从反射波形图上看不到明显的调谐效应，因此直观上几乎无法觉察该透镜体的存在。但是从积分能谱等值线图，尽管由于透镜体的曲率半径很大，使得曲线的偏移起伏不大，但也可以检测出透镜体的边缘所在和减薄方向来。

同样，在图 13 中，高速薄透镜体的尖端位置以及透镜体变薄的方向也可由积分能谱等值线的拐点（陡度骤增处）所在和曲线的倾斜方向明显看出。上述两种薄透镜体形状尽管相同，但由于上、下介质的波速关系不同（即薄层类型不同）它们产生的积分能谱等值线图

象也就大不相同。由此可得结论：

① 只要将厚层与上述几类薄层单元体合理地加以组合,就可以模拟任意垂向与水平向的波速分布状态,并可绘制出合成数据的二维积分能谱恒值曲线图来,将其与实际地震数据的积分能谱进行比较,有助于复杂地区地震资料的正确解释。

② 通过实验还表明:积分能谱的等值曲线图形与相邻道间的相对幅值无关,而且根据时移论,也不会受道间静态时差的影响。尽管此法对于空间采样率较为敏感,然而,即使在共深度点相距较远的情况下,积分能谱等值曲线的图形特征也能保持不变。

③ 尽管两种楔形体与两种薄透镜体的外形相似,但是只要其波速特征不同,从它们的积分能谱等值线图上,也可以看出差别来。

目前能谱分析法在薄层勘测中的应用尚处于初始阶段,但是已有依据可以相信,它不仅在薄层构造的勘查中,而且在岩性圈闭的勘探中也是大有发展前途的。

2. 应用最大熵原理提高地震分辨率

熵(Entropy)是信息论中一概念,用它可以量度信息的不确定性。最大熵原理要求一个时间序列在时窗内符合已知数据条件,在分析对象时窗以外的未知部分则保持最大不确定性(即最大熵)。这一假设比通常地震资料处理中对时窗以外全部充零的做法(如付氏变换)要更加符合实际,因此在频谱分析中能够较好地保持地震记录原有的频谱成分,具有较高分辨能力。尤其是在薄层分析中,时窗往往不能取得过长,当计算时窗小于信号延续时间时,用付氏变换求频谱就会产生极大畸变,这里应用最大熵原理估算频谱或进行反褶积处理时就显得格外重要。

有关最大熵原理的数学推导与论述的文献很多〔4、11、12、54〕,在此从略。下面仅仅引述能表明国内外在提高地震分辨率中应用此法实效的几个例子〔6〕。

(1) 用最大熵谱估算法来提高主频成分分辨率。

① 在小时窗下,与付氏变换法分辨率的对比一例(图14)

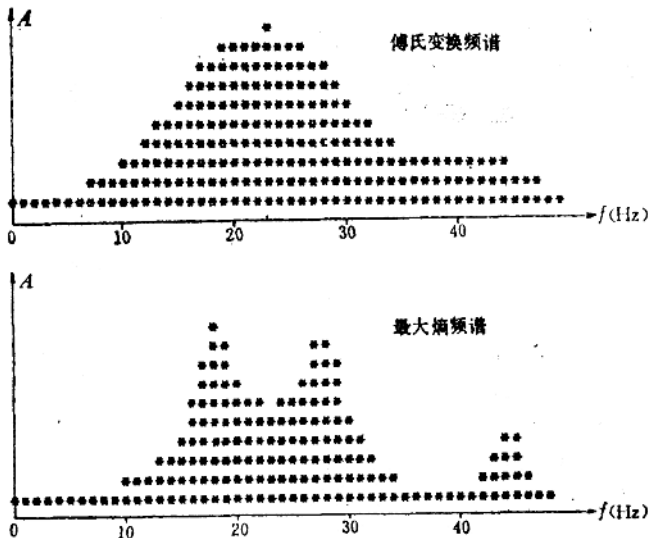


图 14 付氏变换和最大熵频谱分析结果的对比(同一记录段)

用某段地震记录，以 100 毫秒时窗作频谱分析时，用最大熵谱估算法可以较清晰地分辨出三个不同的频率成分（18、28、45 赫），而付氏变换法却由于频谱受畸变（加宽），相互掩迭而无法分辨。

② 气层分辨实例（图 15）

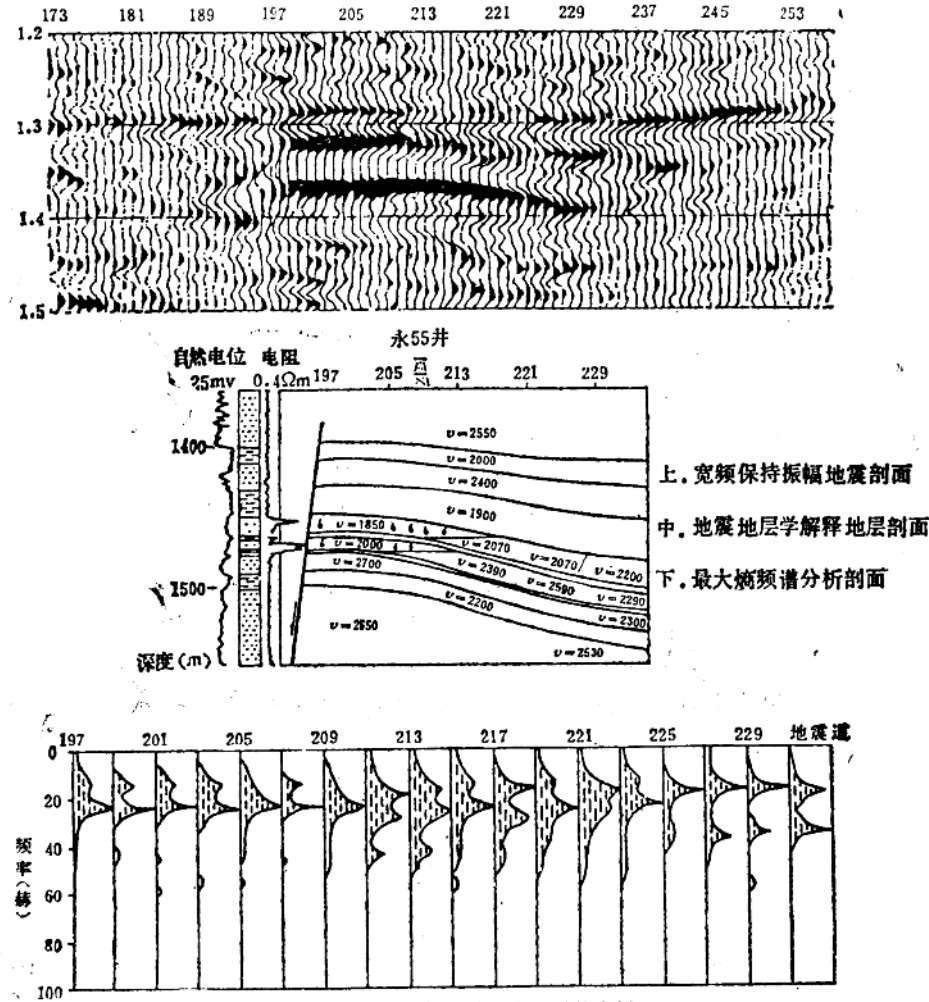


图 15 应用最大熵频谱研究气层的实例

在深度为 1450 米处两气层共厚 18.4 米。取 100 毫秒的时窗宽度，每隔一道记录作一次最大熵谱分析结果表明：在气层顶部频谱出现 14、23 赫二尖峰，反映了气层反射频谱偏低的特点与气层分布范围。而在气层尖灭处的气水界面之上，信号频率偏高，出现了 17、26、43 赫三个尖峰，这反映了气水界面的分布范围。这样的分辨率是付氏法达不到的。

（2）用最大熵反褶积法来提高时间（纵向）分辨率。

首先要求对地震信息进行最小相位化处理，计算最小相位转换滤波器，从而提取最小相位化子波（为此可用测井反射系数和井旁地震道计算子波；也可用仪器响应对记录作最小相位转换等多种方法），然后根据已知子波进行伯格（最大熵）反褶积处理，其特点仍是假设