

地震勘探数字技术问答

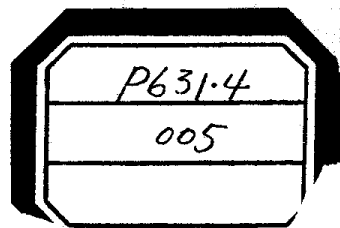
石油化学工业部石油地球物理勘探局数字处理会战指挥部译

石油化学工业出版社

地震勘探数字技术问答

石油化学工业部石油地球物理勘探局
数字处理会战指挥部译

石油化学工业出版社



本书译自美国 1966 年版《**APICTORIAL DIGITAL ATLAS**》一书 中译本定名为《地震勘探数字技术问答》。

书中以问答形式介绍了地震勘探数字技术有关问题的基本概念。主要内容包括地震勘探数字记录的离散采样、编码、信号的恢复及富氏变换、各种滤波算子的设计和自相关分析等。

本书的特点是每个问题都举例说明并附有相对应的定性说明图,文字简练、通俗易懂,可供初从事地震勘探数字技术的工人、技术干部参考。

United Geophysical Corporation
A PICTORIAL DIGITAL ATLAS
(1966 Edition)

地震勘探数字技术问答

石油化学工业部石油地球物理勘探局
数字处理会战指挥部译

*

石油化学工业出版社出版
(北京和平里七区十六号楼)

石油化学工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ 印张 $17\frac{1}{8}$ 字数 41千字 印数 1—6,400

1977年10月北京第1版 1977年10月北京第1次印刷

书号15063·油129 定价0.17元

限国内发行

目 录

1. 地震数据的离散采样和量化	1
2. 采样值的编码	3
3. 二进制增益控制放大器	5
4. 地震信号的恢复	9
5. 信号的近似恢复	11
6. 频率折叠和假频	14
7. 频率分析	19
8. 富氏变换	22
9. 余弦变换对	24
10. 简单函数的富氏变换	26
11. 截尾函数的富氏变换	29
12. 时移信号的富氏变换	31
13. 时间域滤波	34
14. 频率域滤波	37
15. 逆富氏变换	39
16. 数字低通滤波算子的设计	42
17. 数字高通和带通滤波算子的设计	45
18. 数字带阻滤波算子的设计	47
19. 自相关分析	49
20. 功率谱	51
21. 振幅谱和相位谱之间的关系	54
22. 最小相位函数和最大相位函数	57

1. 地震数据的离散采样和量化

问：在磁带上，地震数据的数字记录与通常的模拟方法记录有什么不同？

答：根本的差别是：在模拟方法中，是把地震放大器输出电压连续地记录在磁带上；而在数字方式中，只把离散时间间隔内（例如每隔 0.001 或 0.002 秒）测量到的地震放大器输出电压不连续地记录在磁带上，在采样点之间的时间上，信号电压值是不记录的。

问：离散样是怎样记录下来的？

答：利用高速电子开关装置将“采样和保持”放大器同放大器的输出端作瞬时地接触，从而对放大器的输出电压采样。采样时间是非常短的，大约是十分之一微秒。然后，把储存在采样和保持放大器中的电压在模数转换器中与以阶梯状变化的参考电压相比较。由此查明信号是落在那个电压区间或“基本数量”之内，并由模数转换器按编码形式传送到磁带记录系统。这个过程要在离散的时间间隔内依次不断地重复进行。

问：这个过程是否可以唯一地确定被采样的信号，并且以后还能从磁带记录上精确地再现出来？

答：不能。因为用离散数据来表示连续信号只能是近似的。近似到什么程度，要看信号的振幅和振幅的基本单位（即基本数量）的大小关系。图 1 中表示了正弦波的一个周期，频率为 62.5 周/秒，峰值为 ± 2.9 个基本数量单位，每 2 毫秒采样一次。采样和量化的过程用矩形来表示。在此情况下，该讯号这些采样矩形不能完全固定。

信号可以在图中用阴影表示的面积内活动：振幅大些或小些，向左右上下都可以移动，这样就可以有无穷多个信号都能穿过这些采样矩形，以后它们都可以相等地恢复成同样的信号。这个含糊或不肯定的阴影区，好像是围绕着测定信号时出现的统计误差分布范围。

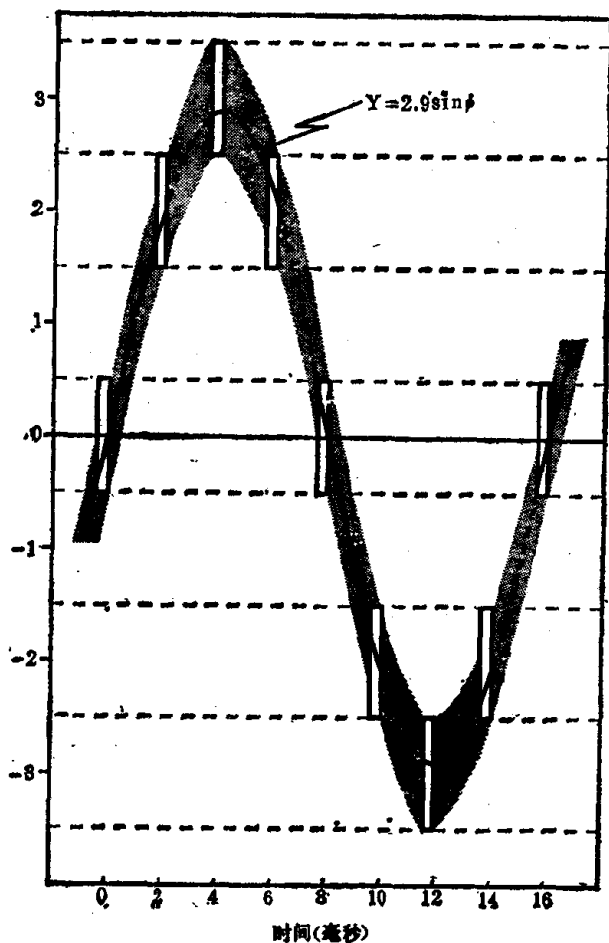


图1 采样和量化过程

2. 采样值的编码

问：一定有好几种数字代码可以用来表示量化了的采样值。

你能以图 1 中的信号为例来做个说明吗？

答：图 2 上表示了四种不同的二进制代码。在这个特定的例子中，量化了的值是用三个二进制数 2^0 , 2^1 , 2^2 (即 1, 2, 4) 和一个符号位 (通常指最高有效位) 的各种组合来表示的。在偏置二进制代码中，零用 +8 来表示，正数和负数就以 +8 为基础，而不是以零为基础。

问：这些代码可以由一种转换成另一种吗？

答：可以。这种转换在数字计算机中由程序控制很容易实现。如果还希望更高的速度的话，可以在计算机里附加一个特殊线路来进行这种转换。

问：你举的例子是以四位二进制来说明的，在实践中用的是多少位的字？

答：通常用 13 位到 15 位二进制数来表示地震采样的振幅。

问：与此相应的分辨率或精度怎样？

答：举例来说，考虑一个 14 位大小 (13 位加符号位)，用反码表示的负值。从 0 到满刻度值 ± 8191 之间所有的整数值，都可以用这种代码表达。信号电平量化成整数，实际信号值与这个整数的差值不会超过 $1/2$ 个基本数量。因此，对于满刻度值来说，相应的标定分辨率为：

(a) 16382 分之一或近似于 2^{-14}

(b) 0.0061%

(c) -84.3 分贝

实际上能否取得这样的分辨率，决定于模数转换设备的

性能、整个地震记录系统的特性和没有干扰噪声。实际上，诸如地震放大器和仪器其他部分的畸变或互馈等因素，比起采样量化产生的误差或不肯定性来，对整个系统的总精度的限制要更严重些。

时间(毫秒)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	
振幅	0	21	29	21	0	-21	-29	-21	0	位值
量化振幅	0	2	3	2	0	-2	-3	-2	0	

反码	0	0	0	0	0	1	1	1	0	S	±
	0	0	0	0	0	1	1	1	0	2 ²	4
	0	1	1	1	0	0	0	0	0	2'	2
	0	0	1	0	0	1	0	1	0	2°	1

补码	0	0	0	0	0	1	1	1	0	S	±
	0	0	0	0	0	1	1	1	0	2 ²	4
	0	1	1	1	0	1	0	1	0	2'	2
	0	0	1	0	0	0	1	0	0	2°	1

符号和数值代码	0	0	0	0	0	1	1	1	0	S	±
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2 ²	4
	0	1	1	1	0	1	1	1	0	2'	2
	0	0	1	0	0	0	1	0	0	2°	1

偏置二进制代码	1	1	1	1	1	0	0	0	1	2 ³	8
	0	0	0	0	0	1	1	1	0	2 ²	4
	0	1	1	1	0	1	0	1	0	2'	2
	0	0	1	0	0	0	1	0	0	2°	1

图2 二进制代码

3. 二进制增益控制放大器

问：你能描述一下二进制增益控制放大器工作的特点，并说明一下在这种情况下采样值是如何编码的吗？

答：二进制增益控制放大器本质上是这样的一种自动增益控制放大器。在这种放大器中，增益是精确地按二比一的梯级突变的，而不象通常的自动增益控制放大器那样增益缓慢、连续地变化（有些类型中可以向上或向下变化）。在两次突变之间，增益保持固定。放大器增益对时间关系的图形好似楼梯。图 3 以稍微理想化的形式来说明工作的方式。图中横比例尺代表时间。纵比例尺代表放大器输入或输出信号的电压或振幅，用二进制对数比例分度（即与以 2 为底数的对数成正比）。纵比例尺最左一列标的是近似的电压值，第二列标的是以 2^n 形式计数字的指数。假定放大器的输入是一个振幅逐渐减小的正弦信号，其振幅曲线如图 3 中虚线所示。规定这个信号从开始时的大约 0.8 伏（均方根值）到 t_1 时刻衰减到 0.1 微伏均方根值。又假定，我们是在放大器中这样一个点上测量输出电压的，即时间小于 T_1 时整个增益为 1。输出信号的均方根值在图中以实线绘出。这个放大器设计成这样：假若输入信号衰减到 0.1 伏均方根值，则放大器的增益（在采样瞬时之间）突然按准确的 2:1 的倍数增加。此时输出电压的相应增加用时间 T_1 标出。此后，输入和输出电压继续衰减，直到输入信号达到 0.05 伏均方根值（以 2^{19} 标出），放大器的增益再次急剧地增加一倍，而输出电压也相应地按两倍突然增加。当输入

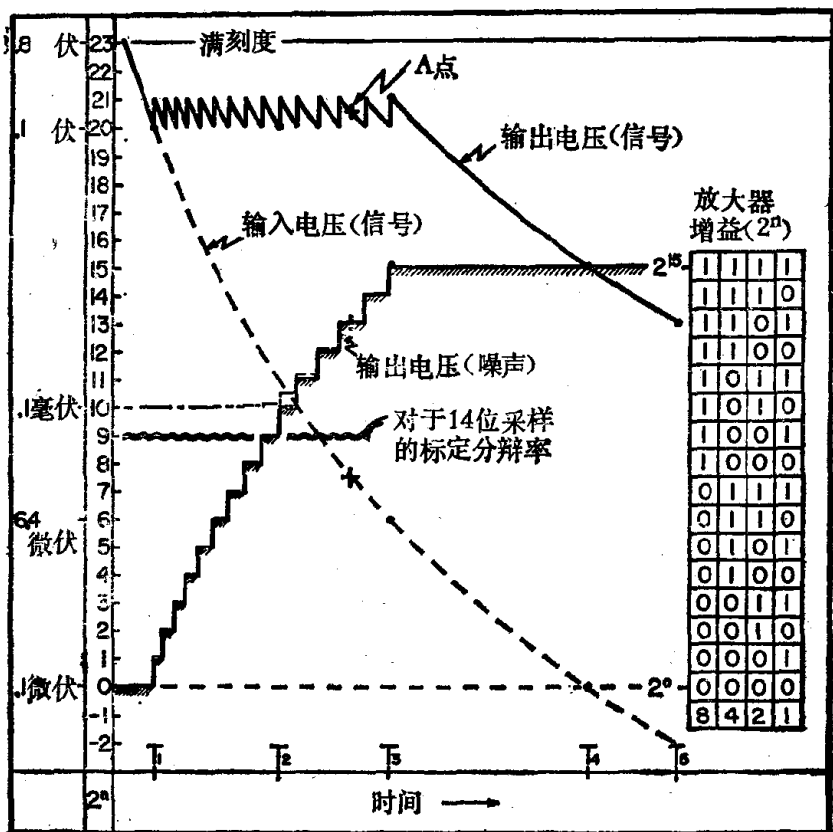


图 3 二进制增益控制放大器的工作特性

信号继续衰减，又重复同样的过程，增益总共增加 15 个两倍。在时间 T_3 ，放大器已达到最大增益，以后输出电压的衰减速度正好与输入信号一样。总的结果是：从时间 T_1 到时间 T_8 ，输出信号近似地保持在相同水平上。这种锯齿形的变化被放到以后的数字计算机处理中去考虑。假如放大器在增益变化单元前面的各级中，电噪声水平保持在 0.1 微伏均方根值（相当于输入的大

小)的常量上,则放大器输出的相应噪声可用带有斜阴影的线表示。可以想象出来,这一条曲线也就是放大器的相对增益状态(是时间的函数)曲线。16个固定增益级(每级被2的因子分离)用阶梯形曲线表示。假如在放大器输出级还存在噪声(此例中取0.1毫伏),则总的输出噪声水平将如长短虚线曲线所示。

问: 以数字形式在磁带上记录放大器的瞬时输出电压时,也记录放大器的增益状态吗?

答: 是的。在每个采样瞬时,线路也同时读取了增益状态,其结果用4位二进制数表达,与输出信号的瞬时振幅的二进制码一起记录下来。在图3的右侧列出了可能的增益码。以A点为例,假定在这个特定的采样瞬间,输出电压的瞬时值相应于十进制数1511(满刻度为8191),而放大器增益状态为 2^{13} ,则输入信号的相应瞬时值为 $+1511 \times 2^{-13}$ 基本数量单位。这个样的二进制码可以写成

1 1 0 1	0 0 0 1 0 1 1 1 1 0 0 1 1 1
---------	-----------------------------

当然,用于处理的数字计算机必须有适应于处理这种编码数据的程序。

问: 如果输出电压数字化用的是14位采样字(13位加符号位),那么图3上表示的放大器系统的动态范围是多大?

答: 假如模数转换器的满刻度值是置于图示的 2^{23} 水平上,那么标定分辨率的限度(对输出信号而言)在 2^9 水平上,在图中用横波纹线表示。对于小于 T_2 的时间,这条波纹线指出了有意义输出信号的下限。当接近这个下

限时，小信号成分就要受亏损，如前面 1 中叙述过的那样。例如，假设有一个接近于满刻度的某个频率的输出信号与一个低电平（譬如说 2^{-10} ）的不同频率的信号成分同时存在。这时，只有 +3 到 -3 范围内的整数值能用来表示这个低电平信号成分。假如信号成分的电平还要更低些，譬如说 2^{-10} ，那么，只有 +1, 0, -1 三个整数值能用来表示它。对于输出信号为 2^9 的电平，已经不能表示成有意义的数了。这样，我们在回答这个问题时可以说：动态范围（对于输出信号而言）稍小于 84 分贝。若要求更全面回答，则要有完善的统计分析。至于对 T_3 和更大的时间，动态范围（对于输出信号）接近于 48 分贝。对于放大器的输入信号来说，动态范围还要加上 90 分贝。因此，对于输入信号的总动态范围近似为 138 分贝。

4. 地震信号的恢复

问：上面我们已经讨论了信号的采样、量化和编码。那么，把这个过程反过来，由离散非连续的采样值恢复成平滑的连续信号的过程又是怎样的呢？

答：关于这个极为复杂的课题，已经写了大量的著作。然而，对其近似性做一个适当的简单解释，还是有可能的。假定原始连续信号已被每隔 2 毫秒采样，再假定在采样之前已对整个信号进行了滤波，使所有超过 250 周/秒的信号频率成分基本上已被滤去。如图 4 中 *a* 用竖线表示采样序列的 5 个相邻值。采样定理的基本说明为：给定了上述条件后，可以将采样序列数据以任何希望的精度来恢复滤波后的原始信号。恢复的方法是将每一采样线条用等于其峰值高度的“内插函数”来代替（如图 4-b 所示）。内插函数是 $\sin x/x$ 形式的“sinc”函数。这个函数可以在 0.002 秒采样点之间按我们所要求的点数来规定它的值。在图中，各中间点的间隔是 0.0005 秒。将所有内插函数的作用加在一起，就组成了要恢复的信号，如图 4-c 的曲线所示。

问：到底能不能达到“完全恢复”的目的呢？

答：不能。理由是：内插函数在理论上是无限长的。所以，恢复的每个点都包含无限远的、在时间上有早有晚的采样值的影响。此外，在图 4 中，内插点距离为 0.0005 秒，然而，它是可以内插到任何适当的希望的精度的。当然，处理的费用是个限制。同原先量化误差有关的“统计亏损”（第 1 中），在恢复信号中还仍然保留着，成

为有意义精度的上限。

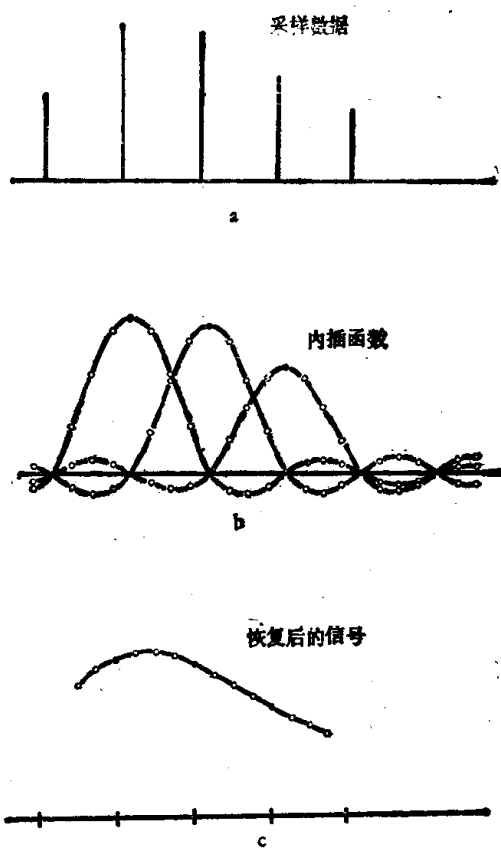


图4 用内插法恢复信号

5. 信号的近似恢复

问：有没有既经济又能高速度恢复信号的方法？

答：有。通常是用象“零阶数据保持”设备那样工作的数模转换器来完成的。每个采样值通过电子线路保持一个采样间隔的时间，然后电压迅速地与下一个新的采样值接通（见图 5-a 中的左半部）。结果就得到一个阶梯形的电压输出，它由两个部分组成：一个平滑信号加上一个剩余波纹。图 5-a 中用虚线表示的原始信号，是振幅为 1.00 的 62.5 周/秒的正弦波，每 2 毫秒采样一次，产生阶梯形的数模输出信号。阶梯形信号由两部分组成：一个振幅为原始信号 97% 的 62.5 周/秒的正弦波，和由高次谐波（3 次，5 次，7 次……，频率为 187.5，312.5，437.5 周/秒……，）组成的波纹成分。如果波纹成分可以用理想的高截（低通）电滤波器完全滤掉，那么恢复后的信号成为振幅为原始信号 97% 的正弦波。对于 500 周/秒的分谐波，即 $166\frac{2}{3}$ ，125，100， $83\frac{1}{3}$ ， $71\frac{1}{7}$ ， $62\frac{1}{2}$ ， $55\frac{5}{9}$ ，50 周/秒等频率的正弦信号，情况都相似。代表恢复后信号基频分量的振幅的各个点，是沿着一条“sinc”曲线分布的，如图 5-b 右半部中虚线所示。然而，波纹滤波器通常不能完全消除所有的谐波。因此，这样恢复出来的信号可以小于或大于虚线所示的峰值振幅。

问：一个 250 周/秒的信号，每周只有 2 个采样点，会发生什么情况呢？

答：这个情况表明在图 5-b 左半部图上。若在波峰和波谷上

采样和“保持”，得到的方波信号如图中上面一道波形图所模拟。如果此信号通过一个对 750, 1250, 1750 周/秒等“波纹”频率有剧烈衰减作用的滤波器，那么，滤波器输出的 250 周/秒信号，实际上要超过原始峰值 27%。但若在 250 周/秒信号的零点上采样，则输出值为零。

问：整个加起来，总的结果是什么？

答：结果是恢复后的信号振幅（相对于原始信号振幅）有一个逐渐增大的模糊或不确切区域。这个区域在图 5-b 右半部图中以阴影区表示。从统计角度讲，恢复后的振幅可以落在这个区域中的任何位置（以不同的概率），它依赖于采样“梳”与原始信号间随机的相位关系。恢复后的信号振幅在模糊区上下限之间来回摆动。对于用小圆圈标出的分谐波频率，这种摆动被“冻结”。在阴影区内的某个值上，振幅保持常数。这个值是由于碰巧，并决定于信号和采样“梳”之间碰巧的相位关系。阴影区的精确界限决定于所用的波纹滤波器的特性。整个问题的实际解决方法为：在采样之前，先对原始信号剧烈地滤去 125~135 周/秒以上的信号频率；对恢复后的信号，用一个类似的滤波器滤去波纹。

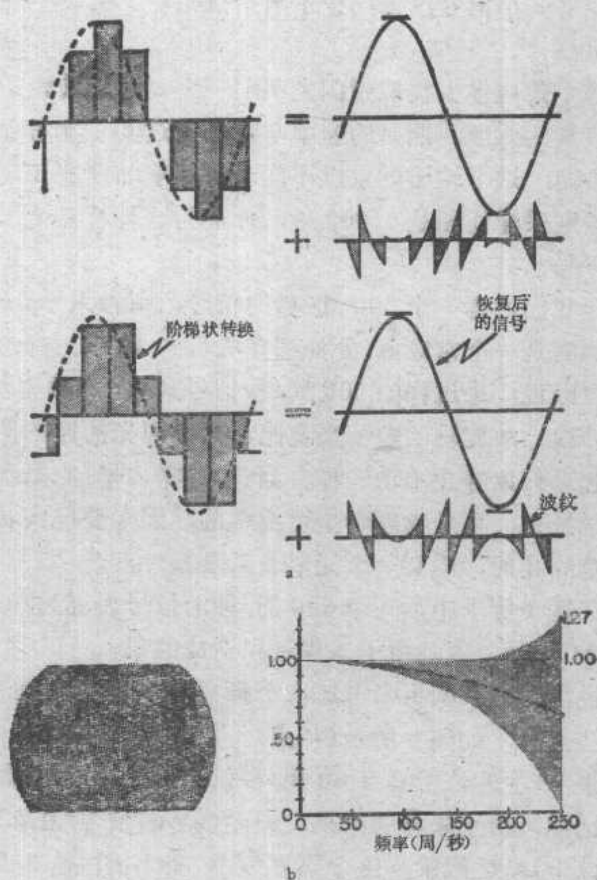


图5 信号的近似恢复