

组合F-K滤波器

李克沛 陈正华 孙月珍

(地矿部05项目工程处) (地矿部北京计算中心)

李克沛, 陈正华, 孙月珍: 组合F-K滤波器, 《石油地球物理勘探》, 24 (3) 1989: 359~364

关键词: F-K滤波

在强干扰区, 由于有效波的频率和干扰波的频率在频率一波数域中呈条带状相间分布, 因此, 用频率滤波方法难以消除干扰波, 而用二维滤波方法往往比较有效。为了进一步改善二维滤波的效果, 本文介绍一种组合F-K滤波方法。

二维滤波器的特征

对称陷波器 适用于滤除共炮点道集记录上的折射波, 而且仅仅滤除二维谱中的一个窄带, 因此剖面具有很好的保真性。但是, 它对深层的高速低频波有一定程度的压制。

带通滤波器 滤波性能虽能依据视速度进行选择, 但其斜率参数却受到高速干扰波的上限视速度的限制, 因而往往压制了高频、低速的浅层弱信号。

为了扬长避短, 我们将上述两种滤波器组合串联使用。下面将详细地分析一下这种组合滤波器的模型和应用效果。

组合F-K滤波器模型

任何类型的二维滤波器都可由理想扇形滤波器经有限次加、减运算组合而成。二维滤波的实质在于对每个滤波组内的输入数据道的上下界视速度 (v_1 、 v_2) 范围采用T-x变换, 即

$$\begin{cases} v = 2v_1v_2/(v_1 + v_2) \\ t = t + x'/v \\ x = x' \end{cases} \quad (1)$$

进行整体时移校正, 以改变有效波与干扰波的视速度, 然后用高通或高截扇形滤波器将干扰波消除。可见, 任何形式的二维滤波器组合, 其总效应也相当于一个高通或高截扇形滤波器, 只不过校正速度和频率应由原来的 v_i 、 v_j 、 f_i 、 f_j 变为

$$v = 2v_i v_j / (v_i + v_j)$$

$$f = 2f_i f_j / (f_i + f_j)$$

按此理论, 我们可以写出带通滤波器和对称陷波器组合的滤波函数。

对称陷波器脉冲响应函数可由切饼式和扇形滤波器的脉冲响应函数之和求得。切饼式滤波器的脉冲响应函数为

$$h_1(x, t) = \frac{1}{2\pi^2 x} \left[\frac{\cos 2\pi f_1(t + x/v_1) - \cos 2\pi f_2(t + x/v_1)}{t + x/v_1} \right]$$

$$- \frac{\cos 2\pi f_1(t+x/v_2) - \cos 2\pi f_2(t+x/v_2)}{t+x/v_2} \quad (2)$$

令式(2)中 $f_1=0$, $f_2=f$, 则有

$$h_1(x,t) = \frac{1}{2\pi^2 x} \left[\frac{1 - \cos 2\pi f(t+x/v_1)}{t+x/v_1} - \frac{1 - \cos 2\pi f(t+x/v_2)}{t+x/v_2} \right] \quad (3)$$

式(2)和式(3)对应的频波响应如图1所示。

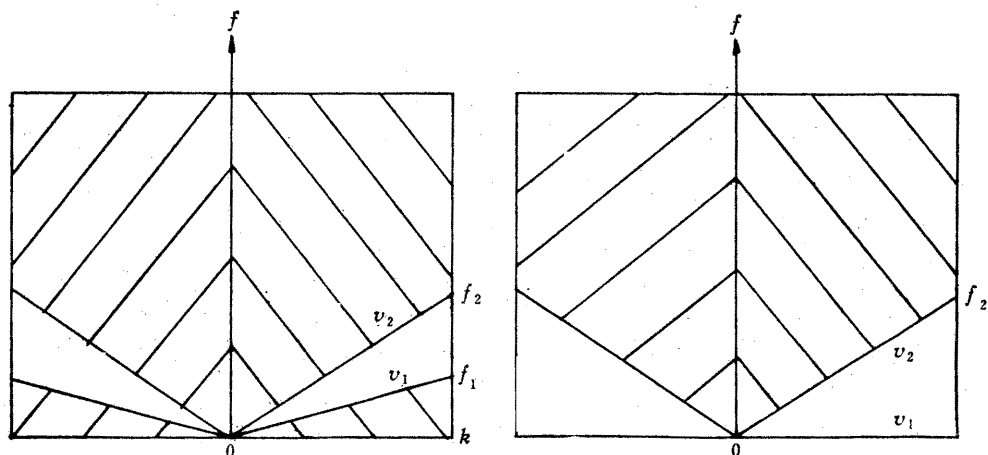


图1 切饼滤波器的频波响应
(左)式(2)计算结果; (右)式(3)计算结果

扇形滤波器的脉冲响应函数为

$$h_2(x,t) = \frac{1}{2\pi^2 x} \left[\frac{1 - \cos 2\pi f(t+x/v_3)}{t+x/v_3} + \frac{1 - \cos 2\pi f(t-x/v_3)}{t-x/v_3} \right] \quad (4)$$

将式(3)和式(4)相加, 得到

$$h_3(x,t) = \frac{1}{2\pi^2 x} \left[\frac{1 - \cos 2\pi f(t+x/v_1)}{t+x/v_1} - \frac{1 - \cos 2\pi f(t+x/v_2)}{t+x/v_2} \right. \\ \left. + \frac{1 - \cos 2\pi f(t+x/v_3)}{t+x/v_3} + \frac{1 - \cos 2\pi f(t-x/v_3)}{x/v_3 - t} \right] \quad (5)$$

在式(5)中令 $v_1 \rightarrow 0$, 使括号内第一项为零, 则式(5)变成

$$h_3(x,t) = \frac{1}{2\pi^2 x} \left[\frac{1 - \cos 2\pi f(t+x/v_3)}{t+x/v_3} + \frac{1 - \cos 2\pi f(x/v_3 - t)}{x/v_3 - t} \right. \\ \left. - \frac{1 - \cos 2\pi f(t+x/v_2)}{t+x/v_2} \right] \quad (6)$$

式(6)即为对称陷波器的脉冲响应函数, 其对应的频波响应如图2所示。

若将对称陷波器与带通滤波器(图3)串联组合, 并利用 $1 - \cos 2x = 2\sin^2 x$ 关系

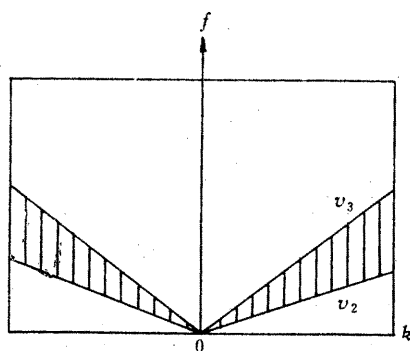


图2 对称陷波器的频波响应

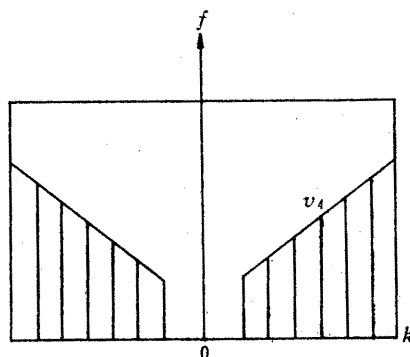


图3 带通滤波器的频波响应

式, 可得组合 F-K 滤波器, 其脉冲响应函数为

$$h(x, t) = \frac{1}{2\pi^2 x} \left[\frac{\sin^2 \pi f(x/v_3 + t)}{\frac{1}{2}(x/v_3 + t)} + \frac{\sin^2 \pi f(x/v_3 - t)}{\frac{1}{2}(x/v_3 - t)} \right. \\ \left. + \frac{\sin^2 \pi(x/v_4 + t)}{\frac{1}{2}(x/v_4 + t)} + \frac{\sin^2 \pi(x/v_4 - t)}{\frac{1}{2}(x/v_4 - t)} - \frac{1 - \cos 2\pi f(t + x/v_2)}{t + x/v_2} \right] \quad (7)$$

因为式 (7) 中方括号内各项均为正数, 故可利用 $a + b \geq 2\sqrt{ba}$ ($a, b \geq 0$), 将上式化简 (详见附录), 得

$$h(x, t) = \frac{1}{\pi^2 x} \left[\frac{1 - \cos \pi f(x/v' + t)}{x/v' + t} + \frac{1 - \cos \pi f(x/v' - t)}{x/v' - t} \right. \\ \left. - \frac{1 - \cos 2\pi f(x/v_2 + t)}{2(x/v_2 + t)} \right] \quad (8)$$

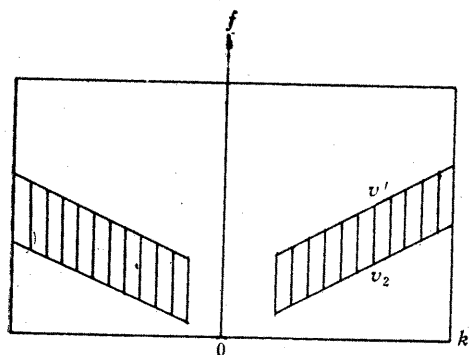


图4 组合 F-K 滤波器的频波响应

$$v' = 2v_3 v_4 / (v_3 + v_4)$$

其对应的频波响应如图 4 所示。从形式上看, 式 (8) 和式 (6) 是十分相似的, 只不过是 将 v_3 变成 v' , 即 $v' = 2v_3 v_4 / (v_3 + v_4)$ ($v_4 > v_3$) (见附录)

应用

参数 v_4 的选择依据

设二维信号

$$f(x, t) = \begin{cases} S(t - x/v) & |x| \leq x_N \\ 0 & |x| > x_N \end{cases}$$

其谱为

$$F(f, k) = \int_{-x_N}^{x_N} dx \int_{-\infty}^{\infty} S(t - x/v) e^{-i(2\pi kx + 2\pi ft)} dt$$

根据延迟定理, 上式变为

$$F(f, k) = \int_{-x_N}^{x_N} S(f) e^{-i2\pi x(k + f/v)} dx$$

$$= S(f) \frac{\sin 2\pi x_N(k+f/v)}{\pi(k+f/v)x_N} \cdot x_N$$

令

$$G(f,k) = \frac{\sin 2\pi x_N(k+f/v)}{\pi(k+f/v)x_N} \cdot x_N$$

将上式变化为

$$G(f,k) = \frac{\sin \pi x_N(k+f/v) \cos \pi x_N(k+f/v)}{\frac{1}{2x_N} \cdot \pi x_N(k+f/v) v} \quad (9)$$

由极限定理知道, 当 $k \rightarrow -f/v$ 时, $G(f, k)$ 有极大值, 且令 $G(f, k) = 2x_N = L$ 。

由式 (9) 可知, $G(f, k)$ 函数的能量主要集中在以 $k = -f/v$ 为中心的某一宽度 δ 内。令 $\delta = L/2x_N$, 并由 $\omega = 2n\pi/N\Delta t = 2\pi n f_0$, $f_0 = 1/N\Delta t$, $f_L = Lf_0$, $f_C = 1/2\Delta t$, $k_C = 1/2\nabla$, $v = M\nabla/N\Delta t$, 得到

$$k_L = f_L/v = L/M\nabla$$

故有

$$\begin{aligned} v_L &= f_C/(k_C - k_L) \\ &= M\nabla/(M - 2L)\Delta t \quad (L = 0, 1, 2, 3, \dots) \end{aligned} \quad (10)$$

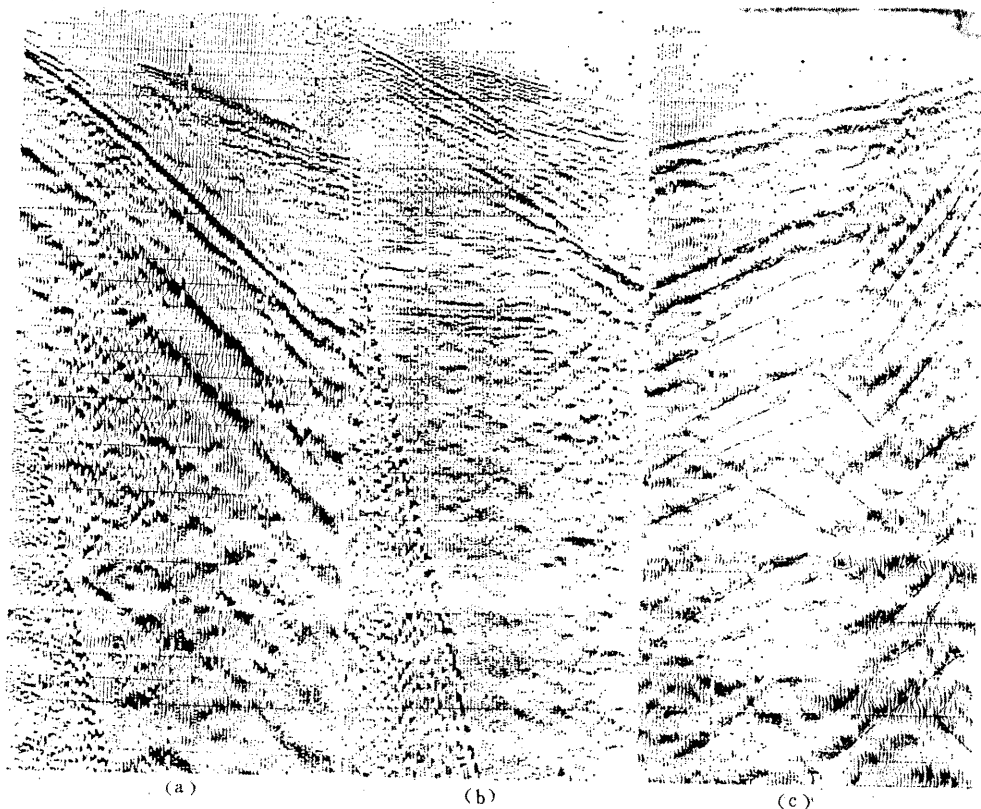


图 5 干扰波特征不同的炮集记录

式中: M 为接收道数; ∇ 为道间距; Δt 为采样间隔。

资料处理

1. 对炮集或 CDP 道集作频率滤波与反褶积处理, 以消除有效波频带范围外的高低频噪声, 扩展较弱的中高频有效信息。

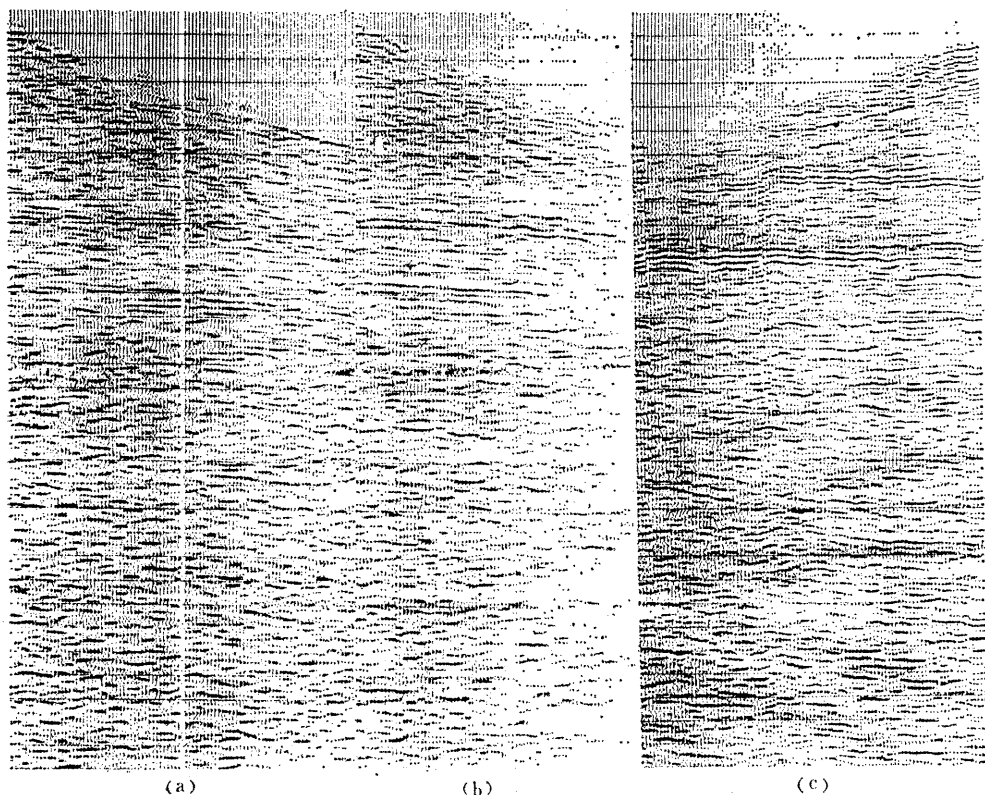


图 6 图 5 经组合 F - K 滤波处理的炮集记录

2. 将对称陷波器与带通滤波器组合成一个新的滤波器, 对记录作组合 F - K 滤波。

3. 为了说明这种叠前处理方法的效果, 我们选择具有不同特征的三炮记录(图 5)。图 5a 和图 5b 中存在声波干扰引起的三角带。图 5b 中存在与初至波平行的强能量折射波, 图 5c 中存在不同视速度的双向干扰波。经过上述处理, 图 5 中分布的各种干扰波, 都得到很好的压制, 有效波清晰可见, 部分反射层可以连续追踪(图 6)。

参考文献

- [1] 地矿部北京计算中心: 《编码员手册》, 第一册, 第 62 页
- [2] 中原敏明, 山崎乔: 对地震记录作 f - k 滤波, 《石油物探》, 13(1)1974: 73~74

附录

由 $a + b \geq 2\sqrt{ab}$ ($a, b \geq 0$), 可得

$$\begin{aligned} & \frac{\sin^2 \pi f(x/v_3 + t)}{\frac{1}{2}(x/v_3 + t)} + \frac{\sin^2 \pi f(x/v_4 + t)}{\frac{1}{2}(x/v_4 + t)} \\ & \geq \frac{\cos \frac{1}{2} \pi f(x/v_3 - x/v_4) - \cos \frac{1}{2} \pi f(x/v_3 + x/v_4 + 2t)}{\frac{1}{2} \sqrt{(x/v_3 + t)(x/v_4 + t)}} \end{aligned} \quad (\text{A})$$

$$\begin{aligned} & \frac{\sin^2 \pi f(x/v_3 - t)}{\frac{1}{2}(x/v_3 - t)} + \frac{\sin^2 \pi f(x/v_4 - t)}{\frac{1}{2}(x/v_4 - t)} \\ & \geq \frac{\cos \frac{1}{2} \pi f(x/v_3 - x/v_4) - \cos \frac{1}{2} \pi f(x/v_3 + x/v_4 - 2t)}{\frac{1}{2} \sqrt{(x/v_3 - t)(x/v_4 - t)}} \end{aligned} \quad (\text{B})$$

令

$$\frac{1}{2} \sqrt{(x/v_3 + t)(x/v_4 + t)} = \frac{x}{v_5} + \frac{t}{2} \quad \frac{1}{2} \sqrt{(x/v_3 - t)(x/v_4 - t)} = \frac{x}{v_5} - \frac{t}{2}$$

解此方程组得两个根

$$\begin{aligned} v_5 &= 4v_3v_4/(v_3 + v_4) \\ v_5' &= \sqrt{v_3v_4} \end{aligned} \quad (\text{C}) \quad (\text{此根舍去})$$

将式 (A)、式 (B)、式 (C) 代入正文中式 (6)，则得

$$\begin{aligned} h(x, t) &= \frac{1}{\pi^2 x} \left[\frac{\cos \frac{1}{2} \pi f x \left(\frac{v_4 - v_3}{v_3 v_4} \right) - \cos \pi f \left(\frac{x}{2v_3 v_4 / (v_3 + v_4)} + t \right)}{\frac{x}{2v_3 v_4 / (v_3 + v_4)} + t} \right. \\ &+ \frac{\cos \frac{1}{2} \pi f x \left(\frac{v_4 - v_3}{v_3 v_4} \right) - \cos \pi f \left(\frac{x}{2v_3 v_4 / (v_3 + v_4)} - t \right)}{\frac{x}{2v_3 v_4 / (v_3 + v_4)} - t} \\ &\left. - \frac{1 - \cos 2\pi f(x/v_2 + t)}{2(x/v_2 + t)} \right] \end{aligned} \quad (\text{D})$$

若令

$$\frac{2v_3v_4}{v_3 + v_4} = v' \quad \frac{\pi f x}{2} \left(\frac{v_4 - v_3}{v_3 v_4} \right) = 2k\pi \quad (k = 0, 1, 2, \dots)$$

则式 (D) 写成

$$\begin{aligned} h(x, t) &= \frac{1}{\pi^2 x} \left[\frac{1 - \cos \pi f(x/v' + t)}{x/v' + t} + \frac{1 - \cos \pi f(x/v' - t)}{x/v' - t} \right. \\ &\left. - \frac{1 - \cos 2\pi f(x/v_2 + t)}{2(x/v_2 + t)} \right] \end{aligned}$$

上式即正文中的式 (8)。