

MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA FILTRACJI WIELOWYMIAROWEJ W SEJSMICIE REFLEKSYJNEJ *

UKD 550.894.5.05:681.3

W ostatnim dziesięcioleciu coraz więcej uwagi poświęca się w literaturze wielokanałowemu, a coraz mniej jednokanałowemu procesom przetwarzania. Do najważniejszych procesów wielokanałowego przetwarzania materiałów sejsmicznych zaliczyć można:

- 1) procesy umożliwiające tłumienie różnego rodzaju fal zakłócających, w tym cieni, rewerberacji, fal dyfrakcyjnych i odbitej refrakcji oraz refleksów wielokrotnych dzięki wykorzystaniu koherencji tych fal w czasoprzestrzeni;
- 2) procesy umożliwiające obliczanie i wprowadzanie poprawek czasowych w celu uzyskania optymalnych rezultatów składania;
- 3) procesy optymalnego składania;
- 4) procesy wielokanałowej filtracji i dekonwolucji;
- 5) procesy analizy rozkładu prędkości;
- 6) procesy matematycznego modelowania budowy ośrodka;
- 7) procesy odwzorowania budowy ośrodka skalnego;
- 8) procesy ekstrakcji informacji oraz zintegrowanej interpretacji.

Zauważmy, że w pierwszej połowie ubiegłego dziesięciolecia główny nacisk położono na opracowanie i stosowanie procesów 1—5, a na przełomie lat 1972/73 — na opracowanie i zastosowanie procesów 5—8.

Cztery pierwsze z wymienionych grup procesów stanowią typowe operacje mające na celu uzyskanie sekcji z możliwie maksymalnym stosunkiem S/N . Cztery ostatnie rozpatrywane mogą być z dwóch punktów widzenia. W pierwszym przypadku procesy wykorzystywane są do zwiększenia czytelności uzyskiwanych sekcji lub do możliwie wiernego przedstawienia wydzielonych form strukturalnych czy też litologiczno-stratygraficznych. W tym przypadku wyznaczone prędkości wykorzystywane są do obliczenia poprawek kinematycznych oraz do zamiany skal czasowych na głębokościowe. Natomiast w drugim przypadku te cztery procesy wykorzystywane są do bezpośredniego rozwiązywania problemów geologicznych lub poszukiwawczych. Zastosowanie metody sejsmicznej do bezpośredniego rozwiązywania problemów geologicznych bądź poszukiwawczych nazywać będziemy ekstrakcją informacji (12, 4).

FILTRACJA WIELOKANAŁOWA ORAZ FILTRACJA WIELOWYMIAROWA

Przed przystąpieniem do omawiania konkretnych typów filtrów zapoznajmy się bliżej z pojęciami „filtracja wielokanałowa” oraz „filtracja wielowymiarowa”. Już na wstępie trzeba powiedzieć, że filtracja wielowymiarowa może być rozważana jako szczególny przypadek filtracji wielokanałowej.

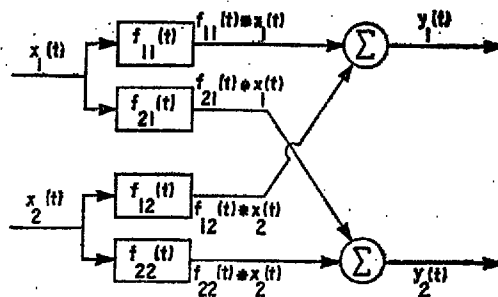
Jak wiemy na profilu sejsmicznym rejestrowane są sejsmogramy, z których można wybierać trasy sejsmiczne według różnych zasad. Najczęściej wy-

biera się trasy sejsmiczne na podstawie wspólnego punktu głębokościowego. Wielokanałowa filtracja stosowana jest do wybranej, określonej ilości tras, a celem jej jest przepowiedzenie i usunięcie zakłóceń (11, 6, 17). Można określić zarówno cel filtracji, jak i sposób doboru odpowiednich parametrów w zależności od konkretnych warunków.

Na ryc. 1 przedstawiono schemat stosunkowo prostej filtracji dwukanałowej (17). Próbkowana trasa sejsmiczna $x_1(t)$ wchodzi równolegle na dwa filtry $f_{11}(t)$ i $f_{21}(t)$. Podobnie trasa $x_2(t)$ wchodzi równolegle na filtry $f_{12}(t)$ i $f_{22}(t)$. Na omawianym rysunku zaznaczono schematycznie sposób sumowania przefiltrowanych tras; w rezultacie uzyskuje się dwie trasy po filtracji $y_1(t)$ i $y_2(t)$.

Teoria filtrów wielokanałowych jest w swej istocie taka sama jak filtrów jednokanałowych. Matematycznie rzecz biorąc w filtracji wielokanałowej zamiast algebry skalarnej stosuje się algebrę macierzową (19). Tak więc dla każdego rodzaju filtracji jednokanałowej możliwe jest wykonanie filtracji wielokanałowej drogą podstawienia zamiast skalarów — macierzy.

Trzeba zauważyć, że wbrew oczekiwaniom zastosowanie w praktyce filtracji wielokanałowej nie przyniosło oczekiwanych rezultatów, mimo podjęcia i prowadzenia w tej dziedzinie szerokiego zakresu prac naukowo-badawczych (6, 12), tym bardziej że w niektórych przypadkach zastosowanie filtracji wielokanałowej pogarsza uzyskiwane wyniki. Z tego względu wykonywanie zwykłego składania jest konieczne, aby porównać uzyskiwane wyniki oraz zabezpieczyć się przed napotykanymi pułapkami przy zastosowaniu optymalnych, wielokanałowych filtracji. Warto również zauważyć, iż stosowane ostatnio



Ryc. 1. Schemat filtracji wielokanałowej (według Treitela, 1970).

$x_1(t)$ i $x_2(t)$ — trasy wejściowe, $y_1(t)$ i $y_2(t)$ — trasy wyjściowe po zrealizowanym procesie, $f_{11}(t)$, $f_{21}(t)$, $f_{12}(t)$ i $f_{22}(t)$ — odpowiednie operatory filtrów.

Fig. 1. Scheme of multichannel filtering (after Treitel, 1970).

$x_1(t)$ and $x_2(t)$ — input traces, $y_1(t)$ and $y_2(t)$ — output traces when the process is complete, $f_{11}(t)$, $f_{21}(t)$, $f_{12}(t)$ and $f_{22}(t)$ — appropriate filter operators.

* Duża część niniejszej pracy została zrealizowana w latach 1968—70 w Przedsiębiorstwie Poszukiwań Geofizycznych.

coraz częściej 24, a nawet 48-krotne pokrycie** redukuje coraz bardziej potrzebę stosowania optymalnych filtracji wielokanałowych.

Dość efektywne w praktyce okazały się natomiast procesy wielokanałowe, realizowane za pomocą filtracji wielowymiarowej, która stanowi rozciągnięcie pojęcia filtracji częstotliwościowej (jednowymiarowej) na więcej wymiarów (5). Wymiarami tymi mogą być czas oraz współrzędne przestrzenne lokalizacji odbiorników x, y lub z . W naszych rozważaniach ograniczymy się wyłącznie do filtrów dwuwymiarowych, gdzie jedną współrzędną stanowi czas, a drugą odległość x lub głębokość z . Podobnie jak w filtracji jednowymiarowej wyróżnić możemy filtry dwuwymiarowe oraz dwuwymiarowe filtry optymalne.

Filtrację dwuwymiarową można realizować zarówno w czasie, częstotliwości, jak i transformacji z . Podobnie jak i w jednowymiarowej filtracji częstotliwościowej stosuje się najczęściej filtry zerofazowe, które w uzyskanym po filtracji rezultacie pozostawiają widmo fazowe trasy wejściowej:

$$Y(f, k) = |X(f, k)| |H(f, k)| e^{i\varphi_x(f, k)} \quad [1]$$

Tak więc, w dziedzinie częstotliwości dwuwymiarowej proces filtracji zerofazowej polega na wyrównaniu lub wymnożeniu przez odpowiednie współczynniki widma amplitudowego, a następnie powrót poprzez odwrotne przekształcenie Fouriera do funkcji pierwotnej.

W czasoprzestrzeni zerofazową filtrację dwuwymiarową realizuje się za pomocą funkcji $\text{sinc } t \text{ sinc } x$, której w transformacji Fouriera odpowiada funkcja $\pi^2(f, k)$. W transformacji z filtracja dwuwymiarowa sprowadza się do operacji na macierzach.

W podobny sposób jak jednowymiarowe filtry optymalne określa się również dwuwymiarowe filtry optymalne, których prawidłowy dobór wymaga znajomości dwuwymiarowego sygnału i zakłócenia (15). Parametry sygnału i zakłócenia otrzymywane są za pomocą funkcji korelacyjnych, a sama operacja doboru parametrów optymalnego filtru może być realizowana w dziedzinie dwuwymiarowych przekształceń Fouriera, w dwuwymiarowej funkcji czasoprzestrzeni lub za pomocą dwuwymiarowego przekształcenia z .

Na ryc. 2 przedstawiono schemat wielowymiarowej filtracji optymalnej. Kryterium doboru filtrów stanowi minimum średniego odchylenia kwadratowego między sygnałem uzyskanym na wejściu procesu $y(t)$ a sygnałem oczekiwanym na jego wyjściu $s(t)$:

$$\min [s(t) - y(t)]^2 = \min \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \left[s(t) - \sum_{i=1}^n x_i(t) * h_i(t) \right]^2 dt \quad [2]$$

gdzie:

$x_i(t)$ — trasy wejściowe ($i = 1, 2 \dots n$),
 $h_i(t)$ — operatory filtrów ($i = 1, 2 \dots n$).

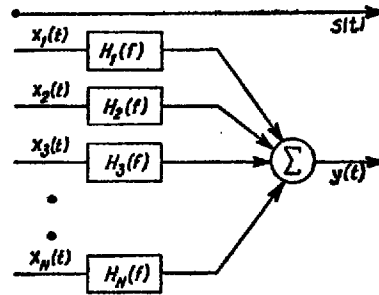
Równanie powyższe zostało rozwiązane przez Wienera w 1950 r. w dziedzinie częstotliwości, a następnie zaadaptowane do sejsmiki (10, 5, 13, 14):

$$[S_{ij}^*(f) + N_{ij}^*(f)] [H_i(f)] = [S_{io}^*(f)] \quad [3]$$

gdzie:

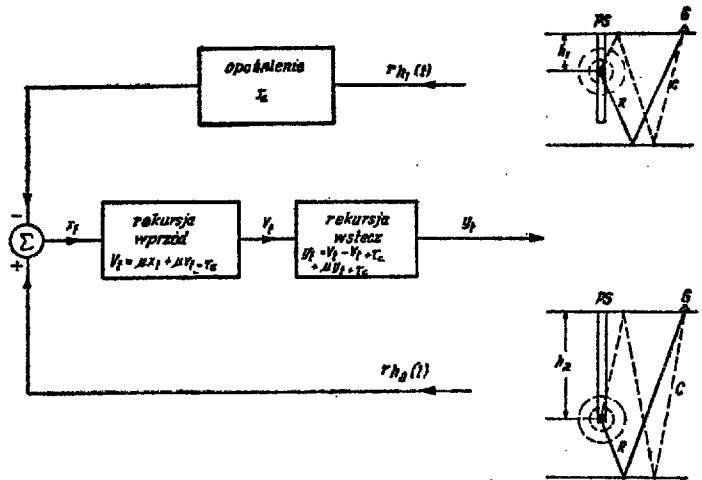
$S_{ij}(f)$ — widma mocy funkcji korelacji wzajemnej między trasą i a j dla oczekiwanego sygnału ($i = 1, 2 \dots n$), ($j = 1, 2 \dots n$),

** Na morzu stosuje się już na wstępnym pokryciu 96-krotne.



Ryc. 2. Schemat filtracji wielowymiarowej. $x_1(t), x_2(t) \dots x_n(t)$ — trasy wejściowe, $y(t)$ — trasa wyjściowa, $H_1(t), H_2(t) \dots H_n(t)$ — odpowiednie filtry, $s(t)$ — oczekiwany sygnał.

Fig. 2. Scheme of multidimensional filtering. $x_1(t), x_2(t) \dots x_n(t)$ — input traces, $y(t)$ — output traces $H_1(t), H_2(t) \dots H_n(t)$ — appropriate filters, $s(t)$ — signal expected.



Ryc. 3. Schemat filtracji odcieniania realizowanej na podstawie algorytmu Shanksa (1967).

$rh_1(t)$ — trasa uzyskana z małej głębokości (h_1), $rh_2(t)$ — trasa uzyskana z dużej głębokości (h_2), $\tau_c = t_2 - t_1 = \frac{2(h_2 - h_1)}{v}$ — czas przebiegu fali sejsmicznej pomiędzy punktami, w których była dokonana generacja fal dla otrzymania opracowywanych tras sejsmicznych, $x(t) = rh_2(t) - rh_1(t)$, $v(t)$ — wynik pośredni pomiędzy zastosowaniem zwykłego i odwrotnego filtru rekursywnego, $y(t)$ — trasa wyjściowa uzyskana po przeprowadzeniu odcieniania.

Fig. 3. Scheme of deghosting performed with the use of Shanks (1967) algorithm.

$rh_1(t)$ — trasy from small depth (h_1), $rh_2(t)$ — trasy from large depth (h_2), $\tau_c = t_2 - t_1 = \frac{2(h_2 - h_1)}{v}$ —

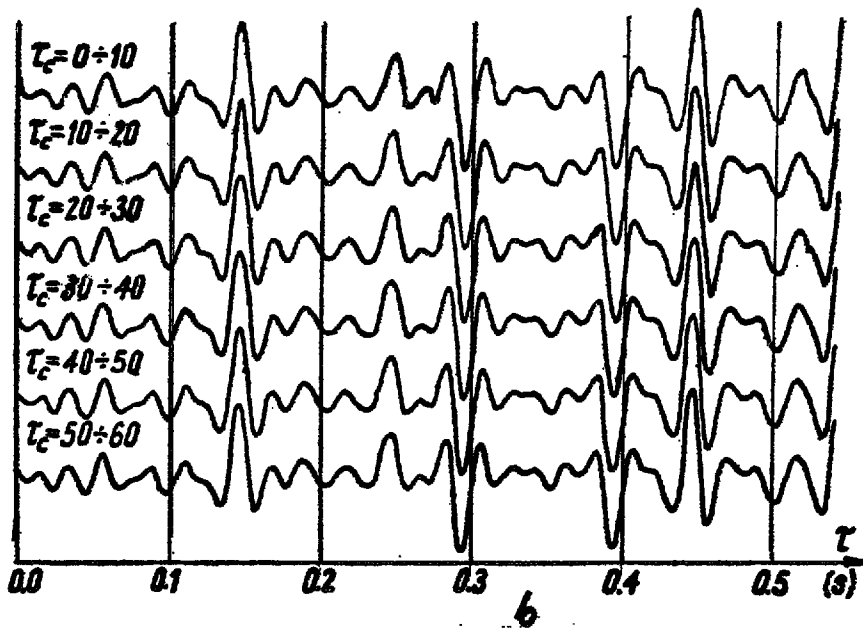
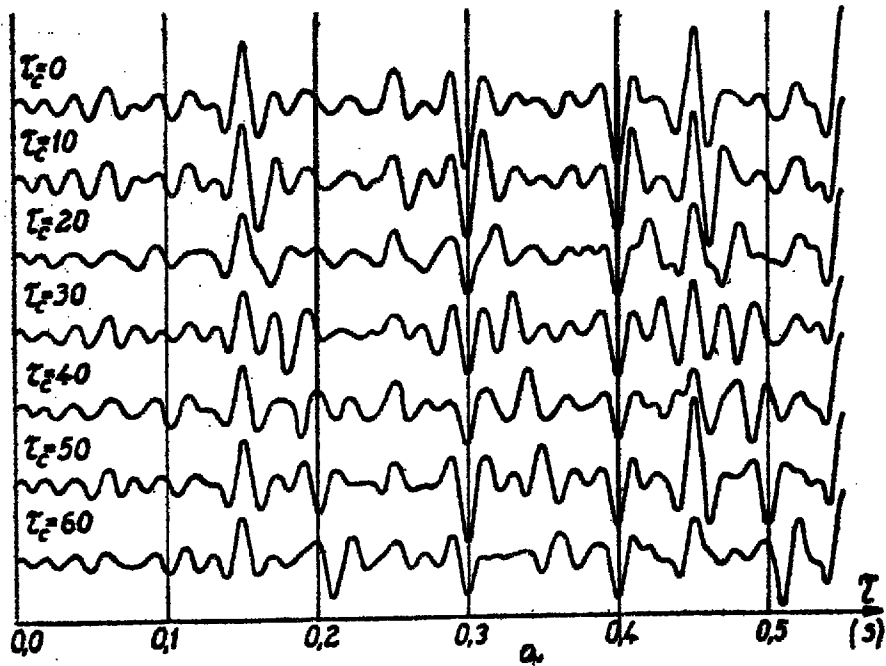
time of run of seismic wave between the points where the waves were generated for recording seismic paths studied, $x(t) = rh_2(t) - rh_1(t)$, $v(t)$ — intermediate value between those obtained with the use of normal and reverse recursive filters, $y(t)$ — output traces obtained after performing deghosting.

$N_{ij}(f)$ — widma mocy funkcji korelacji wzajemnej między trasą i a j dla zakłócenia; ogólnie zakłada się, że występujące na kolejnych trasach zakłócenie złożone jest z zakłóceń skorelowanych $w_i(t)$ oraz z zakłóceń przypadkowych $\tau_i(t)$:

$$n_i(t) = w_i(t) + \tau_i(t)$$

$H_i(f)$ — poszukiwany zestaw filtrów częstotliwościowych,

$S_{io}(f)$ — widma mocy funkcji korelacji wzajemnej między sygnałem występującym na trasie i a sygnałem oczekiwanym.



Ryc. 4. Porównanie sekcji uzyskanych przed (a) i po zastosowaniu procesu usuwania cieni według algorytmu Shanksa (1967).

a — sekcja złożona z obliczonych teoretycznych zapisów zawierających refleksy i ich cienie, ($K = -0,8$ — współczynnik odbicia fali od powierzchni ziemi, Δt — okres próbkowania tras = 2 ms, $\tau_c = 0, 10, 20, 30, 40, 50$ i 60 ms), b — uzyskany rezultat po filtracji (filtrację zrealizowano dla kolejnych par tras sejsmicznych 0—10, 10—20, 20—30, 30—40, 40—50, 50—60 ms).

Fig. 4. Comparison of sections obtained (a) before and after deghosting involving the use of Shanks (1967) algorithm.

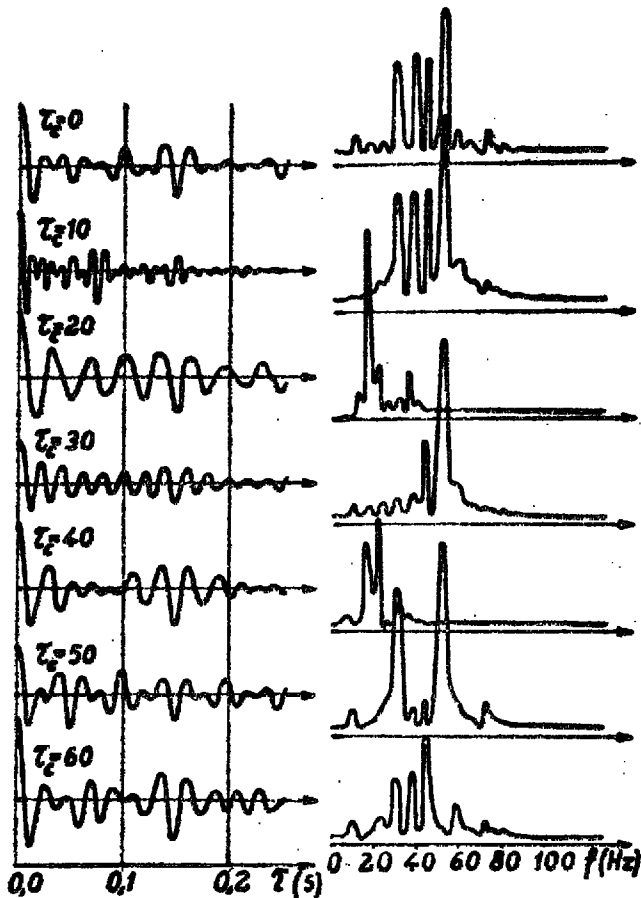
a — section consisting of theoretically calculated records comprising reflexes and their ghosts, ($K = -0,8$ — coefficient of reflection of wave from ground surface, Δt — time of sampling = 2 ms, $\tau_c = 0, 10, 20, 30, 40, 50$ and 60 ms), b — result obtained after filtering (the filtering was performed for successive pairs of seismic traces 0—10, 10—20, 20—30, 30—40, 40—50, 50—60 ms).

Równanie powyższe rozwiązuje się dla kolejnych częstotliwości $f_0, f_1, f_2 \dots f_{max}$ w zakresie interesującego pasma częstotliwości. Uzyskane z rozwiązania układu równań filtry częstotliwościowe (dziedzina częstotliwości) mogą być za pomocą transformacji Fouriera przekształcone w operatory (dziedzina czasu) i splatane z trasami wejściowymi zgodnie ze schematem przedstawionym na ryc. 2.

W praktyce najszersze zastosowanie znalazła filtracja prędkości (8, 9), filtracja odcieniania (13, 16) oraz filtracja usuwania refleksów wielokrotnych (14, 7).

ODCIENIANIE

W praktyce cyfrowego przetwarzania materiałów sejsmicznych można stosować dwie metody dwukanałowego usuwania cieni. Pierwsza została opracowana przez Schneidra i in. (13), a druga przez Shanksa (16). Oba procesy usuwania cieni opierają się na uzyskanych dla każdego rozstawu dwu zapisach sejsmicznych, zarejestrowanych przy różnych głębokościach wzbudzenia, najlepiej różniących się o $1/4$ długości fali sejsmicznej. Podstawę do obliczenia wielokanałowych filtrów optymalnych stanowi wyrażenie [2]. Wspomniane filtry mogą być określane zarówno w czasie, jak i częstotliwości (5, 8, 13, 14).



Ryc. 5. Zestawienie funkcji autokorelacji i widm mocy obliczonych dla teoretycznych zapisów zawierających cienie refleksów (ryc. 4a).

$k = -0,8$ — współczynnik odbicia fali od powierzchni ziemi, Δt — okres próbkowania = 2 ms, $\tau_c = 0, 10, 20, 30, 40, 50$ i 60 ms.

Fig. 5. Set of autocorrelations and power spectra calculated for theoretical records comprising ghosts. (Fig. 4a).

$k = -0,8$ — coefficient of reflection from ground surface, Δt — time of sampling = 2 ms, $\tau_c = 0, 10, 20, 30, 40, 50$ and 60 ms.

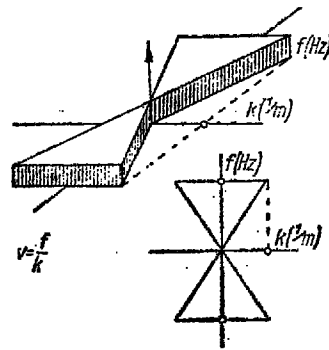
W niniejszym artykule nieco bardziej szczegółowo zajmiemy się algorytmem Shanksa, który jest realizowany w transformacji z, dzięki czemu pozwala na znaczne skrócenie czasu prowadzonych obliczeń.

W celu usunięcia cieni fal, trasy uzyskane z mniejszej głębokości przesuwa się w prawo o taką wielkość czasu τ_c , aby cienie uzyskane na obu trasach znalazły się w tym samym czasie. Przedtem jednak dokonuje się takiego przesunięcia tras, by nastąpiła zgodność osi fazowych refleksów. Odjęcie od siebie przesuniętych tras prowadzi do całkowitego usunięcia cieni fal przy jednoczesnym zniekształceniu refleksów. W rezultacie takiego postępowania uzyskana z odejmowania trasa:

$$\begin{aligned} x(t) &= x_B(t) - x_A(t - \tau_c) = s(t) + g(t - \tau_c) + \\ &+ n_B(t) - s(t - \tau_c) + g(t - \tau_c) + n_A(t - \tau_c) = \\ &= s(t) - s(t - \tau_c) + n(t) \end{aligned} \quad [4]$$

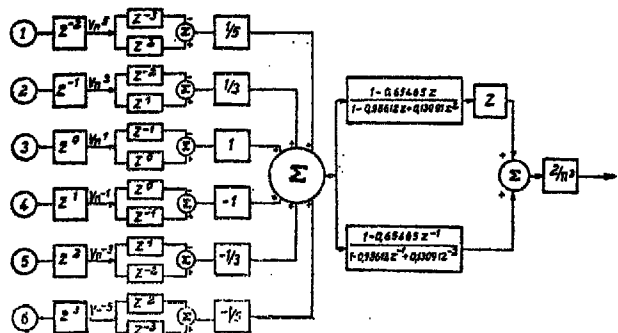
gdzie:

$s(t)$ — sygnał refleksu jednokrotnego,
 $n(t) = n_B(t) + n_A(t)$ — suma zakłóceń przypadkowych,
 τ_c — opóźnienie czasów prowadzące do sfazowania cieni.



Ryc. 6. Widmo dwuwymiarowe zestawione w układzie częstotliwości i liczby falowej z zaznaczonymi parametrami idealnej filtracji prędkości.

Fig. 6. Two-dimensional spectrum plotted in the frequency and wave number with marked parameters of ideal velocity filtering.



Ryc. 7. Schemat filtracji prędkości zrealizowanej według algorytmu opublikowanego przez Treitela i innych w 1967 r, rozpisany dla sześciu tras ($M = 6$).

Fig. 7. Scheme of velocity filtering made according to the algorithm proposed by Treitel et al. (1967), transcribed for six channel ($M = 6$).

Punktem wyjścia do przesuwania tras jest uprzednie sfazowanie refleksów jednokrotnych. Następnie znajdujemy i stosujemy do uzyskanej po zsumowaniu trasy $x(t)$ optymalny filtr Wienera, mający na celu zrekonstruowanie sygnałów refleksyjnych. Algorytm potrzebny dla przeprowadzenia wspomnianej filtracji został otrzymany przez Shanksa w transformacji z, przy dodatkowych upraszczających założeniach dotyczących sposobu określenia widma sygnałów i zakłóceń. Dla znalezienia filtru Wienera konieczna jest znajomość funkcji autokorelacji dotyczącej wejścia $\Phi_{xx}(z)$ oraz funkcji korelacji wzajemnej między wejściem a oczekiwanym wyjściem $\Phi_{xs}(z)$:

$$\begin{aligned} \Phi_{xx}(z) &= \Phi_{ss}(z) + \Phi_{ss}(z) - z^{\tau_c} \Phi_{ss}(z) - z^{-\tau_c} \Phi_{ss}(z) + \\ &+ \Phi_{nn}(z) = \Phi_{ss}(z) \left[-\frac{1}{z^{\tau_c}} + 2 - z^{\tau_c} \right] + \Phi_{nn}(z) \end{aligned} \quad [5]$$

$$\Phi_{xs}(z) = \Phi_{ss}(z) [1 - z^{-\tau_c}] \quad [6]$$

(W rezultacie na filtr optymalny otrzymamy następujące wyrażenie:

$$F(z) = \frac{\Phi_{xs}(z) [1 - z^{-\tau_c}]}{\Phi_{ss}(z) \left[-\frac{1}{z^{\tau_c}} + 2 - z^{\tau_c} \right] + \Phi_{nn}(z)} \quad [7]$$

Zakładając następnie, iż zarówno sygnały, jak i zakłócenia posiadają białe widmo $\Phi_{ss}(z) = \delta_z^2$ i $\Phi_{nn}(z) = \delta_n^2$, otrzymamy:

$$F(z) = \frac{[1 - z^{-\tau_c}]}{-\frac{1}{z^{\tau_c}} + 2\left[\frac{1 + \gamma^2}{\gamma^2}\right] - z^{\tau_c}} \quad [8]$$

Wyrażenie powyższe można również zapisać w następującej postaci:

$$F(z) = \frac{\mu[1 - z^{-\tau_c}]}{(1 - \mu z^{\tau_c})\left(1 - \frac{\mu}{z^{\tau_c}}\right)} \quad [9]$$

gdzie:

$$\mu = \frac{\gamma^2}{1 + \gamma^2 + \sqrt{1 + 2\gamma^2}}$$

Efektywność przeprowadzonego procesu odcieniania zależy od poprawnego określenia wielkości stałej μ , która zależy od poziomu zakłóceń oraz od intensywności sygnału. Obie te wielkości znajdują swoje odzwierciedlenie we współczynniku γ^2 :

$$\gamma^2 = \frac{\delta_s^2}{\delta_n^2} \quad [10]$$

gdzie:

δ_s^2 — średnia kwadratowa wartość sygnału,
 δ_n^2 — średnia kwadratowa wartość zakłócenia.

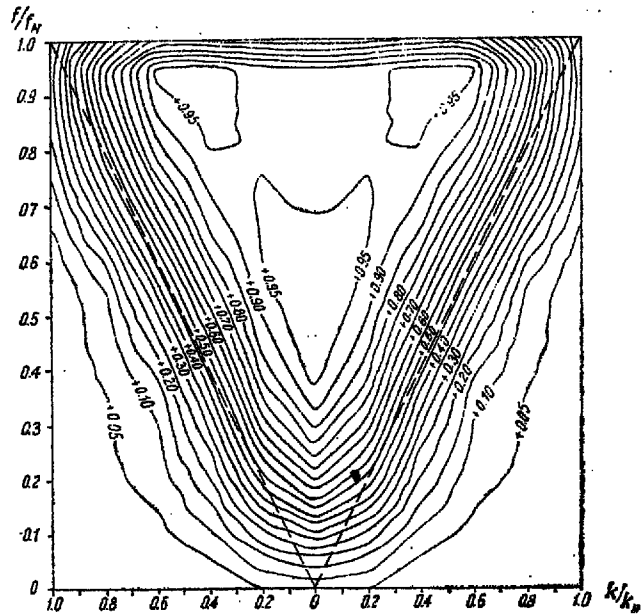
Na ryc. 3 przedstawiono schemat realizacji filtracji odcieniania omówioną powyżej metodą [9]. Dla zilustrowania jej efektywności przedstawimy przykład teoretyczny (ryc. 4a), opracowany na podstawie trasy sejsmicznej zawierającej refleksy jednokrotne i wielokrotne oraz zakłócenia przypadkowe z amplitudą równą 0,1 występującego w zapisie refleksu (A). Do obliczenia tras testowych zastosowano współczynnik odbicia fali sejsmicznej od powierzchni ziemi $k = -0,8$, przy kolejno zmieniającym się dla poszczególnych tras czasie pionowym $\tau = 0,5, 10, 15, 20, 25$ i 30 ms. Podwójna wielkość tych czasów odpowiada odpowiednim opóźnieniom cieni refleksów w stosunku do refleksów podstawowych $\tau_c = 0, 10, 20, 30, 40, 50$ i 60 ms.

Na ryc. 5 zestawiono funkcje autokorelacji oraz widma mocy obliczone dla otrzymanych tras. Porównanie obliczonych funkcji autokorelacji oraz widm mocy wskazuje, jak olbrzymie zniekształcenia w kształcie widm mogą powstawać w wyniku nakładania się cieni fal na rejestrowany zapis sejsmiczny.

Na ryc. 4b zestawiono przykład usunięcia cieni refleksów omówioną metodą. Usuwanie cieni fal zrealizowano dla kolejnych par tras sejsmicznych uzyskanych dla czasów $\tau_c = 0, 10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60$ ms. Otrzymana w wyniku przeprowadzonej operacji sekcja została pozbawiona cieni refleksów. Z przedstawionego przykładu widać wyraźnie wysoką efektywność omawianej metody usuwania cieni refleksów. Należy jednak zauważyć, że opracowany przykład spełnia warunki stałości sygnału i cienia na wchodzących do procesu trasach sejsmicznych. W warunkach rzeczywistych założenie to nie jest na ogół ściśle spełnione, co prowadzi do obniżenia efektywności omawianego procesu.

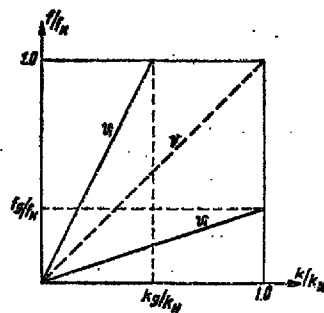
FILTRACJA PRĘDKOŚCI

Filtracja prędkości (8, 9, 2, 3) jest szczególnym sposobem dwuwymiarowego przetwarzania zapisów



Ryc. 8. Znormalizowane dwuwymiarowe charakterystyki filtrów wykreślone w bezwymiarowym układzie współrzędnych $\left(\frac{f}{f_N}, \frac{k}{k_N}\right)$. Idealna granica między obszarem przenoszenia i obszarem tłumienia oznaczona została linią przerywaną (według Treitela i innych, 1967).

Fig. 8. Normalized two-dimensional characteristics of filters drawn in undimensional system of coordinates $\left(\frac{f}{f_N}, \frac{k}{k_N}\right)$. Ideal boundary between the areas of propagation and attenuation marked with broken line (after Treitel et al. 1967).



Ryc. 9. Sposób określania parametrów zakresu przenoszenia i tłumienia filtracji prędkości na podstawie bezwymiarowych charakterystyki filtracji (ryc. 8).

Fig. 9. The mode of evaluation of parameters of ranges of velocity filtering with the use of undimensional filtration characteristics (Fig. 8).

sejsmicznych uzyskanych po wprowadzeniu poprawek statycznych i kinematycznych, stosowanym w celu tłumienia skorelowanych zakłóceń charakteryzujących się określonymi wielkościami prędkości ich rozchodzenia się. Idealną charakterystykę filtru prędkościowego określa następująca zależność (ryc. 6):

$$H(f, k) = \begin{cases} 1 & \text{dla } -\frac{f}{v} \leq k \leq \frac{f}{v} \\ 0 & \text{dla pozostałych } k \end{cases} \quad [11]$$

Czasowo-przestrzenny operator filtru prędkościowego można uzyskać poprzez zastosowanie dwuwymiarowej transformacji Fouriera z podanej w wyrażeniu [11] idealnej charakterystyki filtru:

$$h(t, x) = \int_{-f_N}^{f_N} \int_{k=-\frac{f}{v}}^{k=\frac{f}{v}} e^{2\pi i(f t - k x)} df dk \quad [12]$$

gdzie:

$$f_N = \frac{1}{2\Delta t} \quad \text{najwyższa częstotliwość wynikająca z zastosowanego okresu próbkowania;}$$

$$k_N = \frac{1}{2\Delta x} \quad \text{najwyższa częstotliwość w liczbach falowych wynikająca ze stosowanych odległości między odbiornikami.}$$

Jeżeli przyjmiemy, że:

M — ilość tras sejsmicznych,
 x_m — odległość między m -tym geofonem a środkiem filtrowanej grupy tras,
 $T_n = n\Delta t$ — czas n -tej próbki określonego zapisu sejsmicznego, to otrzymać możemy następujące wyrażenie (8):

$$h(T_n, x_m) = \frac{1}{\pi^2 \left[\left(\frac{x_m}{\Delta x} \right)^2 - n^2 \right]} \quad [13]$$

Z powyższego wzoru wynika, iż otrzymany operator jest symetryczny zarówno względem czasowego, jak i przestrzennego punktu ($m=0, n=0$). Rozważmy obecnie powtórnie wchodzący do procesu filtracji układ tras sejsmicznych oznaczonych indeksem m oraz nowy wskaźnik μ :

$$\mu = \frac{x_m}{\Delta x} = 2m \pm 1 \quad [14]$$

Z wyrażenia [14] widać, że istnieje następująca zależność między indeksem tras sejsmicznych m a wskaźnikiem μ :

indeks m — 2, -1 -0 1 2
 wskaźnik μ — 5 -3 -1 1 3 5

Po wprowadzeniu wskaźnika μ , czasoprzestrzenny operator filtracji prędkości określony jest równaniem:

$$h_n^\mu = \frac{1}{\pi^2 \left(\frac{\mu^2}{4} - n^2 \right)} \quad [15]$$

gdzie:

$$\mu = \pm 1, \pm 3, \pm 5 \dots \pm l$$

$$m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$$

Łatwo zauważyć, że całkowita liczba wchodzących do procesu tras jest równa $M = l + 1$.

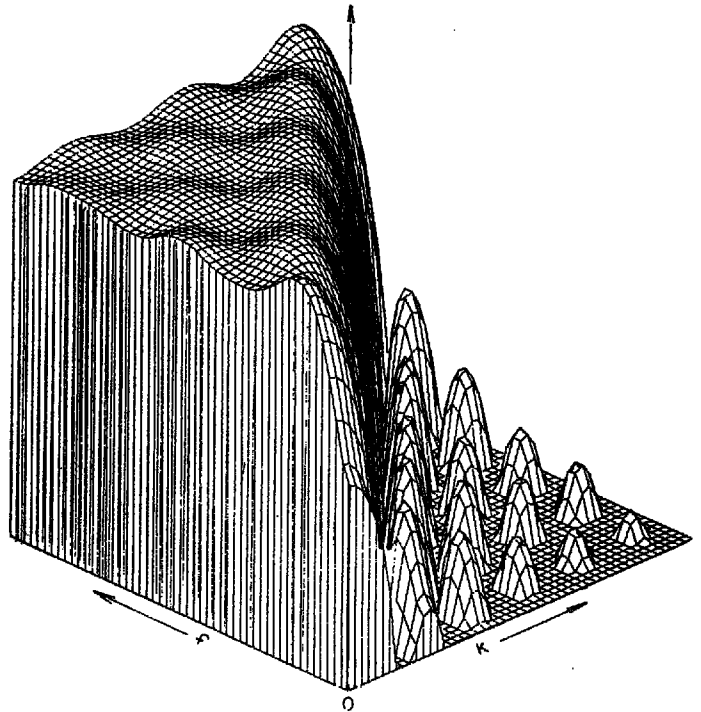
Realizacja filtracji prędkości polega na spleceniu poszczególnych tras sejsmicznych V_n^μ z odpowiednimi operatorami h_n^μ i zsumowaniu otrzymanych ze splotów rezultatów:

$$y_n = \sum_{\mu=1}^l (V_n^\mu \cdot h_n^\mu) \quad (16)$$

gdzie $\pm l$ — skrajne wielkości wskaźników μ .

Wyrażenie powyższe drogą odpowiednich przekształceń doprowadzić można do takiej formy algorytmu (18), przy której wykonywany jest tylko jeden splot:

$$y_n = \frac{1}{\pi^2} r_n^1 \cdot \sum_{\mu=1}^l \frac{1}{\mu} \left[V_{n-\frac{\mu-1}{2}}^\mu - V_{n+\frac{\mu-1}{2}}^\mu \right] \quad [17]$$



Ryc. 10. Amplitudowa charakterystyka filtracji prędkości zestawiona w układzie częstotliwości i w liczbach falowych (realizowana według algorytmu wprowadzonego przez Embree'a i innych (1963). $M = 12$. Na rysunku zestawiono prawą połowę charakterystyki, która jest symetryczna z lewą połową w stosunku do osi częstotliwości. Płaszczyzna przechodząca pionowo przez początek układu współrzędnych „0” i linię τ_c określa przedział przenoszenia filtru, który w danym przypadku wyrażony jest wielkością przyrostu czasu na trasę $\tau_c = \frac{\Delta x}{v} / \Delta x$ — odległość między odbiornikami, v — prędkość graniczna filtru (według Sengbusha i Foster, 1967).

Fig. 10. Amplitude characteristics of velocity filtering plotted in the system of frequency and in wave numbers (realized according to algorithm introduced by Embree et al., 1963). $M = 12$. The figure shows right half of the characteristics, symmetric to the left half in relation to the frequency axis. Plane passing vertical through the zero-point of the system of coordinates and line τ_c determines the interval of propagation of the filter, here expressed by the magnitude of time increase pass trace $\tau_c = \frac{\Delta x}{v} / \Delta x$ — distance between receivers, v — limit velocity of the filter (after Sengbush and Foster, 1967).

gdzie:

$$r_n^1 = \frac{1}{\frac{1}{2} - n}$$

Wyrażenie powyższe można wygodnie zapisać w transformacji z . Po podstawieniu zamiast

$$r_n^1 R^1(z)$$

$$V_n^\mu V^\mu(z)$$

$$V_{n-\frac{n-1}{2}}^\mu V^\mu(z) z^{+\frac{\mu-1}{2}}$$

$$V_{n+\frac{n+1}{2}}^\mu V^\mu(z) z^{-\frac{\mu+1}{2}}$$

i uwzględnieniu, że spłot w dziedzinie czasu odpowiada mnożeniu w transformacji z , otrzymamy:

$$Y(z) = \frac{1}{\pi^2} R^1(z) \sum_{\mu=1}^i \frac{V^\mu(z)}{\mu} \left[z^{\frac{\mu-1}{2}} - z^{-\frac{\mu+1}{2}} \right] \quad [18]$$

gdzie:

$$R^1(z) = F(z^{-1}) - zF(z)$$

$$F(z) = \frac{2(1 - 0,65465z)}{1 - 0,98612z + 0,13001z^2}$$

Jak więc widzimy operację filtracji prędkości udało się sprowadzić do cyklu obliczeń dającego się przedstawić za pomocą schematu blokowego zestawionego na ryc. 7. Omówiony powyżej algorytm zezwala na realizację następujących dwóch rodzajów filtracji prędkości:

a. Filtracja wachlarzowa bez pochylenia. Filtrację wachlarzową bez pochylenia stosuje się dla wydzielenia refleksów jednokrotnych. W danym przypadku stosuje się Δt pochylenia (Δt_p) równe zero. Z kolei przyjęte Δt wachlarza (Δt_w) określa przedział prędkości, na których wydzielenie nastawiona jest realizowana operacja filtracji wachlarzowej. Istnieje możliwość stosowania Δt wachlarza równego wielokrotności okresu próbkowania, jaki jest stosowany w czasie prowadzonych obliczeń tzw. Δt operacyjne (Δt_{op}):

$$\Delta t_w = k \Delta t_{op} \quad [19]$$

$$k = 1, 2, 3 \dots K$$

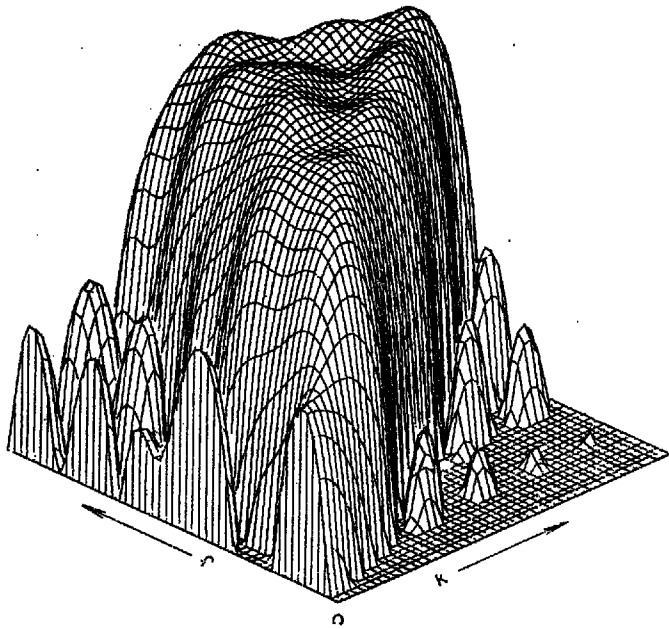
Wielkość czasu Δt określa się na podstawie istniejących odległości między opracowywanymi trasami (Δx) oraz minimalnych prędkości (v_{min}) rozchodzenia się fal, które chcemy wydzielić:

$$\Delta t_w = \frac{\Delta x}{v_{min}} \quad [20]$$

Ze wzoru [12] wynika, iż parametry filtru idealnego są możliwe do uzyskania jedynie dla operatorów o nieskończenie wielu współczynnikach. W praktyce realizacja takich filtrów nie jest możliwa. Istnieje konieczność ograniczenia liczby współczynników filtru do tego stopnia, aby uzyskać kompromis między skutecznością działania filtracji, a czasem prowadzonych obliczeń. Praktyka stosowania filtrów prędkościowych wykazała, że liczbę czasowych współczynników filtru ograniczyć można do 22 ($n = -10, -9, \dots, 0, 1, \dots, 11$), natomiast liczbę współczynników przestrzennych (ilość tras wejściowych) do 6. Można również stosować filtry czterokanałowe.

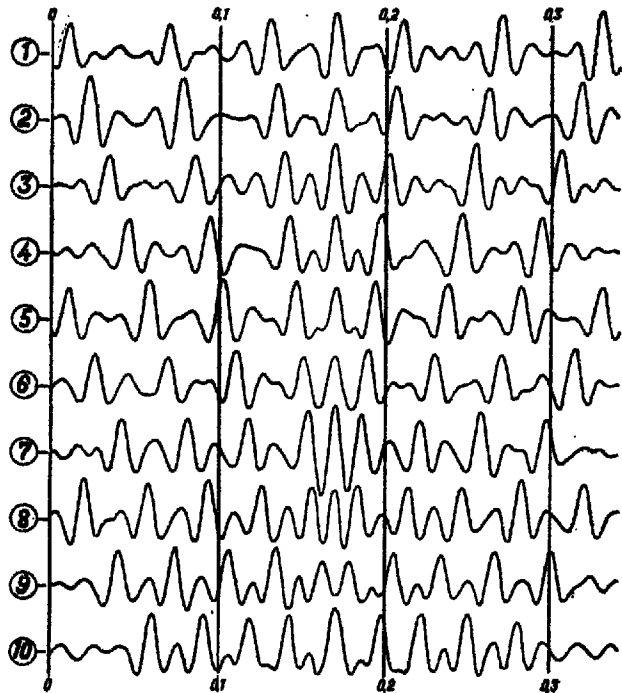
Ryc. 12. Składający się z 10 tras sejsmogram zastosowany do sprawdzenia efektywności działania filtracji prędkości. Poszczególne trasy sejsmogramu uzyskano drogą splecenia trasy współczynników odbicia i zakłóceń przypadkowych ($A_{zakl} = 0,1 A_{max}$) z impulsem typu cosinus — Puzyrjewa ($a = 2,5, T = 18$ ms, $\varphi = 0^\circ$). Okres próbkowania obliczonych tras sejsmicznych $\Delta t = 2$ ms. Na sejsmogramie śledzą się zliniowania impulsów posiadające następujące nachylenia wyrażone w przyroście czasu na jedną trasę sejsmiczną: $0, \pm 4, \pm 8, \pm 12, \pm 16, \pm 20$ ms. Przyjawszy odległość między kanałami $\Delta x = 20$ m, otrzymamy odpowiednio następujące pozorne prędkości rozchodzenia się fal sejsmicznych: $\infty, \pm 5, \pm 2,5, \pm 1,66, \pm 1,25, \pm 1$ km/s.

Fig. 12. Seismogram used in testing the effectiveness of operation of velocity filtering, consisting of 10 traces. Particular traces of the seismogram were obtained by convolution of reflection coefficient and

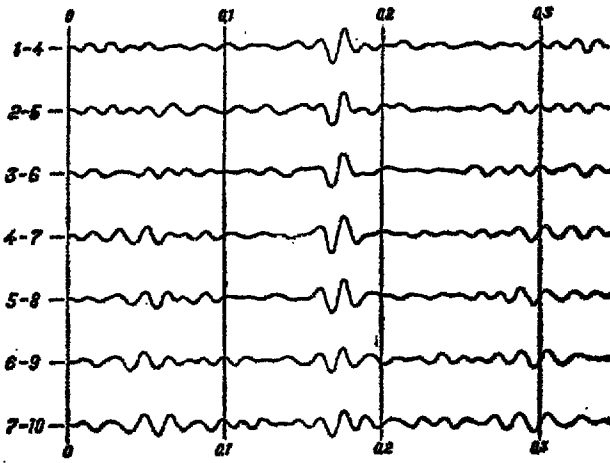


Ryc. 11. Amplitudowa charakterystyka filtracji prędkości zestawiona w układzie częstotliwości i w liczbach falowych $M = 12$. W danym przykładzie charakterystyki, tłumione są fale zarówno o wysokich jak i o niskich prędkościach, to znaczy przepuszczane są fale zawarte między prędkościami $v_1 \leq v \leq v_2$ (według Sengbusha i Fostera, 1967).

Fig. 11. Amplitude characteristics of velocity filtering plotted in the frequency and wave numbers; $M = 12$. In this example the attenuation concerns both high and low velocity waves; i.e. the propagated waves are those with velocities $v_1 \leq v \leq v_2$ (after Sengbush and Foster, 1967).

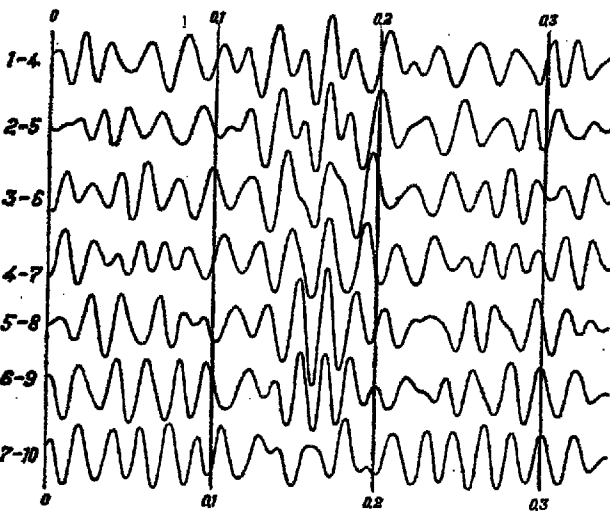


random disturbance traces ($A_{distrb.} = 0,1 A_{max}$) with Puzyrjev cosine type impulse ($a = 2,5, T = 18$ ms, $\varphi = 0^\circ$). Time of sampling $\Delta t = 2$ ms. On the seismogram are lineups of impulses with deviations expressed by time: $0, \pm 4, \pm 8, \pm 12, \pm 16, \pm 20$ ms per trace. Providing that the distance between channels equals $\Delta x = 20$ m, apparent velocities of seismic wave propagation are as follows: $\infty, \pm 5, \pm 2,5, \pm 1,66, \pm 1,25, \pm 1$ km/s.



Ryc. 13. Rezultat przeprowadzonej czterokanałowej filtracji prędkości dla testu z rys. 12. Δt wachlarza = ± 1 ms, Δt operacyjne = 1 ms, Δt wejściowe i wyjściowe = 2 ms, Δt pochyleń = 0 ms.

Fig. 13. The result of four-channel velocity filtering for the test from Fig. 12; Δt of fan = ± 1 ms, operational Δt = 1 ms, input and output Δt = 2 ms, Δt of inclination = 0 ms.



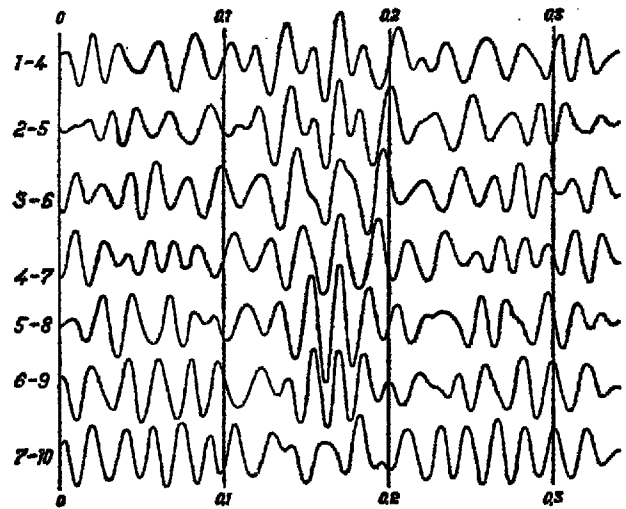
Ryc. 15. Rezultat przeprowadzonej czterokanałowej filtracji dla testu z rys. 12.

Δt wachl = ± 6 ms, Δt oper = 1 ms, Δt wejś i Δt wyjś = 2 ms, Δt poch = 6 ms.

Fig. 15. The result of four-channel filtering for the test from Fig. 12.

Δt of fan = ± 6 ms, operational Δt = 1 ms, input and output Δt = 2 ms, Δt of inclination = 6 ms.

Na ryc. 8 przedstawiono obliczone (18) znormalizowane dwuwymiarowe charakterystyki filtrów, które wykreślono w bezwymiarowym układzie współrzędnych $\left(\frac{f}{f_N}, \frac{k}{k_N}\right)$. Przedstawione charakterystyki filtrów służyć mogą do określenia oczekiwanego tłumienia fal o określonych prędkościach. Aby znaleźć stopień tłumienia fali o prędkości pozornej V_f widmie częstotliwościowym zawartym w pasmie $(f_1 - f_2)$ konieczne jest naniesienie jej na odpowiednią charakterystykę filtracji. W celu umożliwienia wykreślenia parametrów danej fali na wykres charakterystyki filtracji należy sprowadzić ją do bezwymiarowych osi współrzędnych $\frac{f}{f_N}$ i $\frac{k}{k_N}$. Podczas realizacji tego zadania można wyróżnić dwa przypadki, w pierwszym z nich prędkość rozpatrywanej fali jest mniejsza od prędkości obrotu filtru v .



Ryc. 14. Rezultat przeprowadzonej czterokanałowej filtracji prędkości dla testu z rys. 12.

Δt wachl = ± 6 ms, Δt oper = 1 ms, Δt wyjś = Δt wejś = 2 ms, Δt poch = 0 ms.

Fig. 14. The result of four-channel velocity filtering for the test from Fig. 12.

Δt of fan = ± 6 ms, operational Δt = 1 ms, input and output Δt = 2 ms, Δt of inclination = 0 ms.

Otrzymujemy więc:

$$f_g = v_i k_N \quad [21]$$

Stąd współrzędne fali w bezwymiarowym układzie współrzędnych będą (ryc. 9):

$$\frac{f_g}{f_N} \text{ i } \frac{k_g}{k_N} = 1 \quad [22]$$

Z kolei w drugim przypadku, gdy $v_i > v$ otrzymujemy:

$$k_g = \frac{f_N}{v_i} \quad [23]$$

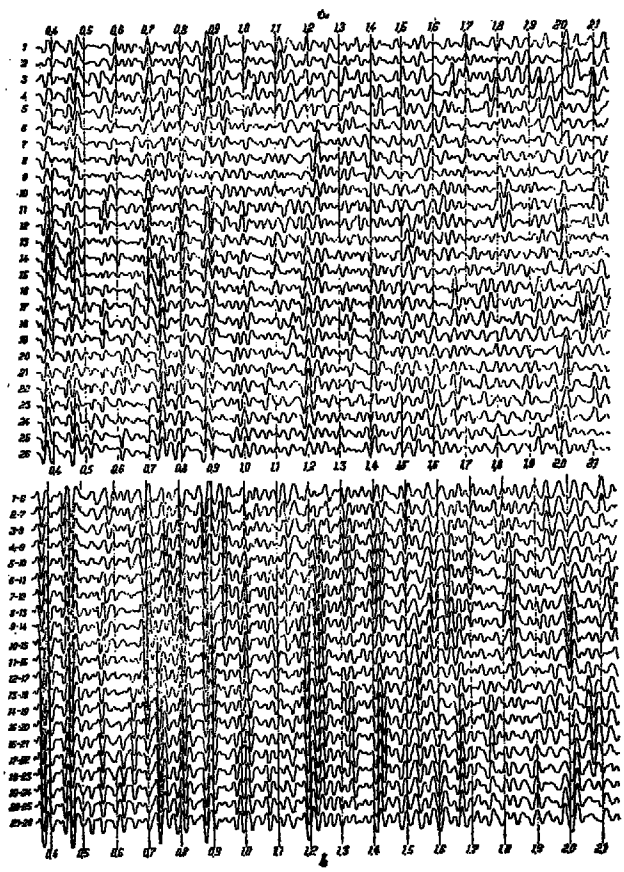
Stąd współrzędne fali w bezwymiarowym układzie współrzędnych będą:

$$\frac{f_N}{f_N} = 1 \text{ i } \frac{k_g}{k_N} \quad [24]$$

Po wykreśleniu na dwuwymiarowej charakterystyce filtru (ryc. 8) prostej odpowiadającej rozpatrywanej fali można znaleźć wielkość tłumienia tej fali dla dowolnych składowych częstotliwości widma dwuwymiarowego ($0 - f_N, 0 - k_N$).

b. Filtracja wachlarzowa z pochylem. Ten typ filtracji wachlarzowej można stosować do wydzielenia refleksów w przypadku istnienia upadów granic odbijających, wydzielenia fal refrakcyjnych (2) lub badania obrazu falowego, mającego np. na celu wydzielenie fal dyfrakcyjnych bądź odbitej refrakcji. Różnica między omawianą odmianą filtracji wachlarzowej a odmianą omówioną poprzednio polega jedynie na zastosowaniu opóźnienia pomiędzy wprowadzonymi trasami sejsmicznymi. Wielkość tego opóźnienia jest określona dla każdej trasy oddzielnie i nazywana pochylem:

$$\Delta t_{poch} = -\left(\frac{\mu}{2} - \frac{1}{2}\right) p \Delta t_{op} \quad [25]$$



Ryc. 16. Porównanie sekcji uzyskanych przed (a) i po zastosowaniu sześciokanałowej filtracji prędkości dla sejsmogramu z niecki Nidy.

a — część sejsmogramu po wprowadzeniu poprawek kinematycznych (poprawki wprowadzono z okresem próbkowania $\Delta t = 2$ ms) b — część sejsmogramu po filtracji prędkości ($\Delta t_{wachi} = \pm 2$ ms, $\Delta t_{oper} = 2$ ms, $t_{wejs} i \Delta t_{wyjs} = 4$ ms, $\Delta t_{poch} = 0$ ms).

Fig. 16. Comparison of sections obtained before (a) and after application of six-channel velocity filtering for seismograph from Nida Basin.

a — part of seismogram after introducing dynamic corrections (corrections introduced with sampling time $\Delta t = 2$ ms), b — part of seismograph after velocity filtering (Δt of fan = ± 2 ms, operational $\Delta t = 2$ ms, input and output $\Delta t = 4$ ms, Δt of inclination = 0 ms).

gdzie:

$$p = 1, 2 \dots P$$

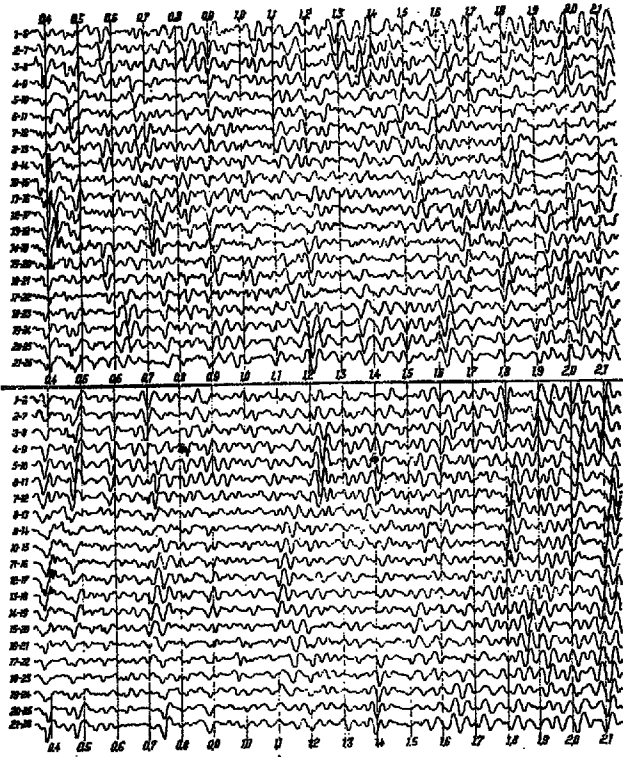
Podobnie jak poprzednio określona wielkość pochylecia jest wielokrotnością czasu Δt_{op} . Wielkość czasu Δt_{poch} na jedną trasę określa się w taki sposób, aby stosowaną operację filtracji nastawić na wydzielenie fali o oczekiwanej (żądaney) prędkości (v_{zd}):

$$\Delta t_{poch} = \frac{\Delta x}{v_{zd}} \quad [26]$$

Przeprowadzona operacja filtracji prędkości zezwala na wydzielenie fal, których prędkości będą zawarte w założonym wachlarzu występującym około prędkości wynikającej z przyjętego czasu pochylecia (Δt_{poch}).

Przed rozpoczęciem realizacji właściwej filtracji prędkości wskazane jest przeprowadzenie normowania wszystkich kolejnych tras sejsmicznych w taki sposób, aby odpowiadająca im energia była jednakoowa:

$$\sum_{k=0}^K s_f^2(k\Delta t) = const \quad [27]$$



Ryc. 17. Rezultat przeprowadzonej sześciokanałowej filtracji prędkości dla sejsmogramu z Niecki Nidy (ryc. 16a).

$\Delta t_{oper} = 2$ ms, $\Delta t_{wejs} = t_{wyjs} = 4$ ms, $\Delta t_{wachi} = \pm 4$ ms, a — $\Delta t_{poch} = -4$ ms, b — $\Delta t_{poch} = 4$ ms.

Fig. 17. The result of six-channel velocity filtering for the seismogram from Nida Basin. (Fig. 16a); a — Δt of inclination = -4 ms, b — Δt of inclination = 4 ms, Δt of fan = ± 4 ms, operational $\Delta t = 2$ ms, input $\Delta t =$ output $\Delta t = 4$ ms.

gdzie:

- s_p — kolejne trasy sejsmiczne,
- $k\Delta t$ — kolejne punkty próbkowania tras sejsmicznych.

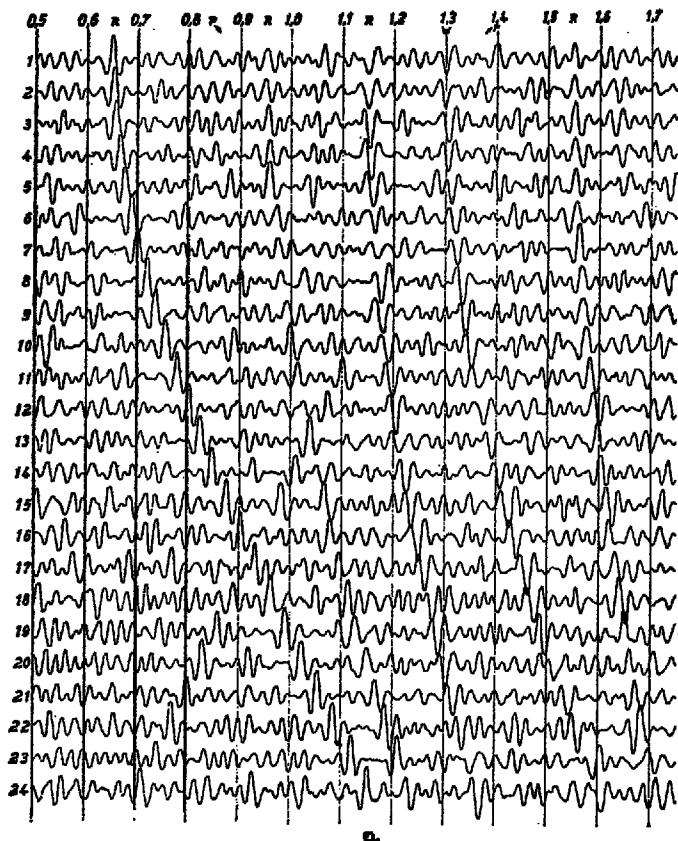
W celu pełniejszego zobrazowania dwuwymiarowych charakterystyk filtracji, zestawionych w częstotliwościach i w liczbach falowych, przedstawiono je w układzie przestrzennym na ryc. 10 i 11, zaczerpniętych z pracy Sengbusha i Fostera (15), w której dokonana została szczegółowa analiza efektywności różnych sposobów realizacji optymalnych — wielokanałowych filtracji prędkości.

Przejdźmy teraz do omówienia rezultatów filtracji sejsmogramu teoretycznego dla zilustrowania możliwości wydzielenia z zarejestrowanego sejsmogramu fal o określonych prędkościach.

Na ryc. 12 przedstawiono test, wykorzystany następnie również do sprawdzenia efektywności działania filtracji prędkości. Otrzymany wynik przeprowadzonej operacji filtracji prędkości zestawiono na ryc. 13. W czasie prowadzonej operacji zmieniono okres próbkowania z $\Delta t = 2$ ms dla tras wejściowych i wyjściowych na $\Delta t_{op} = 1$ ms dla realizacji filtracji prędkości. Wykonano filtrację czterokanałową ($M = 4$) z niewielkim rozwarciem wachlarza $\Delta t_w = \pm 1$ ms. Przy zastosowaniu 20 m odległości między kanałami uzyskuje się następujący przedział wydziałonych prędkości:

$$|\pm \infty| \geq v | \pm 20 | \text{ km/s}$$

Na ryc. 14 przedstawiono wyniki przeprowadzonej czterokanałowej filtracji prędkości ($M = 4$) w przypadku zastosowania większego wachlarza ($\Delta t_w = \pm 6$ ms). W wyniku przeprowadzonej filtracji wydzielono zliniowania impulsów o prędkości 5 km/s. Z przykładu widać, iż zastosowanie filtracji prędkości



Ryc. 18. Porównanie sejsmogramu teoretycznego przed i po wprowadzeniu poprawek kinematycznych.

a — sejsmogram teoretyczny obliczony na podstawie hodo-
grałów, b — sejsmogram (a) uzyskany po wprowadzeniu
poprawek kinematycznych. Objasnienia sejsmogramu (a):
 $x_1 = 50$ m, $x_{24} = 2350$ m, $\Delta x = 100$ m, $t_p = 0,5$ s, $N =$
 $= 500$ pkt, $\Delta t = 2,5$ ms, $t_k = 1,75$ s. Do splotu sejsmogra-
mu współczynników zastosowano zmienny w czasie impuls
Puzyrjewa: w $t = 0$, $T_0 = 5$ ms, w $t_p = 0,5$ s, $T_p = 20$ ms,
oraz w $t_p = 1,5$ s, $T_r = 30$ ms, $a = 2,5$, $\varphi = 0$. Do zakłóceń
zastosowano stały w czasie impuls Puzyrjewa: $T = 25$ ms, $a =$
 $= 2,5$, $\varphi = 0$, poziom zakłóceń $A_2 = 0,00004 A_{max}$, liczby
przypadkowe generowane poczynając od dowolnych liczb
nieparzystych, λ_{RA} : długość okna 50 pkt.

Objasnienia sejsmogramu (b): zastosowano ograniczenie ma-
ksymalnej wielkości poprawki do 700 ms.

kości w danym przypadku spowodowało wyraźne
zwiększenie poziomu zakłóceń przypadkowych.

Na ryc. 15 przedstawiono przykład testowego za-
stosowania filtracji prędkości dla wydzielenia fal
charakteryzujących się wyłącznie dodatnimi przyro-
stami czasów Δt_w . Nastawiono się tu głównie na wy-
dzielenie fali posiadającej prędkość $v_{zad} = 5000$ m/s
($\Delta t_{poch} = 4$ ms). Zastosowany w tym przypadku
wachlarz ($\Delta t_w = \pm 6$ ms) pozwolił na wydzielenie
fal charakteryzujących się prędkością $\infty \gg v >$
 > 2500 m/s. Podobnie jak i w poprzednim przypadku
zastosowanie filtracji prędkości spowodowało wyraź-
ne zwiększenie poziomu zakłóceń nieskorelowanych.

Dla zilustrowania efektywności działania filtracji
prędkości wykonano ją również dla sejsmogramu po-
lowego uzyskanego w obszarze Niecki Nidy (1). Na
ryc. 16a przedstawiono spróbkowaną część tego sejs-
mogramu po wprowadzeniu poprawek kinematycz-
nych. Na ryc. 16b zestawiono ten sam sejsmogram
otrzymany w wyniku zastosowania filtracji prędkości
nastawionej na wydzielenie fal występujących w wa-
chlarzu $-2 \leq \Delta t_w \leq 2$ ms, zrealizowanej przy
 $\Delta t_{poch} = 0$ ms. Zrealizowana filtracja pozwoliła na
wydzielenie fal sejsmicznych, o prędkościach zmie-
niających się w przedziale $|\pm \infty| \gg v > |\pm 10|$ km/s. Na
ryc. 17a zestawiono wynik filtracji wachlarzowej



Fig. 18. Comparison of theoretical seismogram before
and after introduction of dynamic corrections.

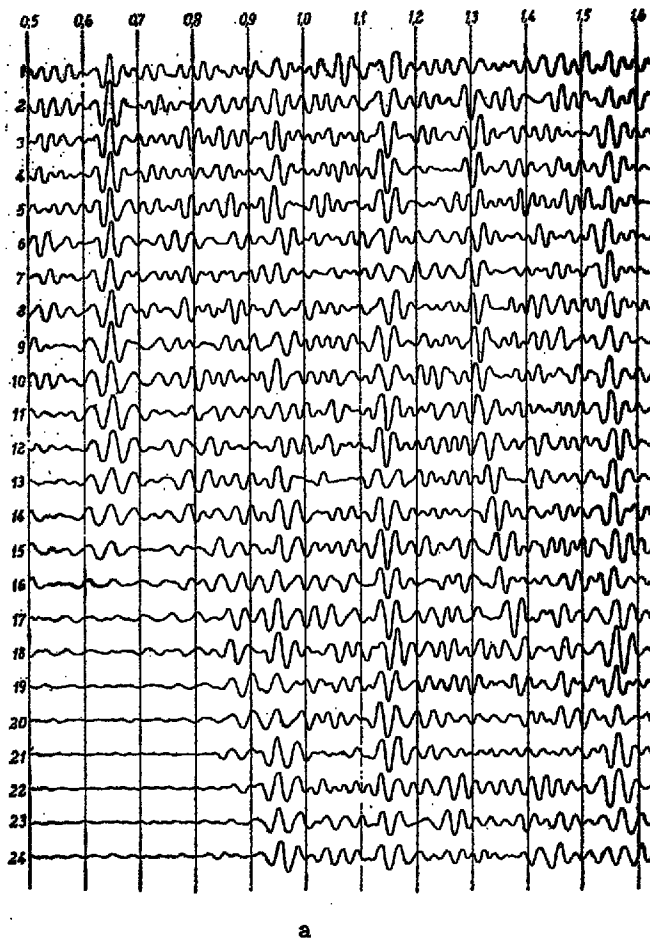
a — theoretical seismogram calculated on the basis of ho-
dographs, b — seismogram (a) obtained after introduction
of dynamic corrections. Explanations to the seismogram: (a):
 $x_1 = 50$ m, $x_{24} = 2350$ m, $\Delta x = 100$ m, $t_p = 0,5$ s, $N = 500$
points, $\Delta t = 2,5$ ms, $t_k = 1,75$ s. In order to plot seismogram
coefficients the Puzyrjev time-variable impulse was used:
w $t = 0$; $T_0 = 5$ ms, w $t_p = 0,5$ s, $T_p = 20$ ms, and
w $t_p = 1,5$ s, $T_r = 30$ ms, $a = 2,5$, $\varphi = 0$. Noise were de-
fined by time-constant Puzyrjev impulse: $T = 25$ ms, $a =$
 $= 2,5$, $\varphi = 0$, level of noise $A_2 = 0,00004 A_{max}$, random num-
bers were generated starting from any odd numbers, AGC;
length of window — 50 points.

Explanations to the seismogram (b): maximum magnitude
of dynamic correction was limited to 700 ms.

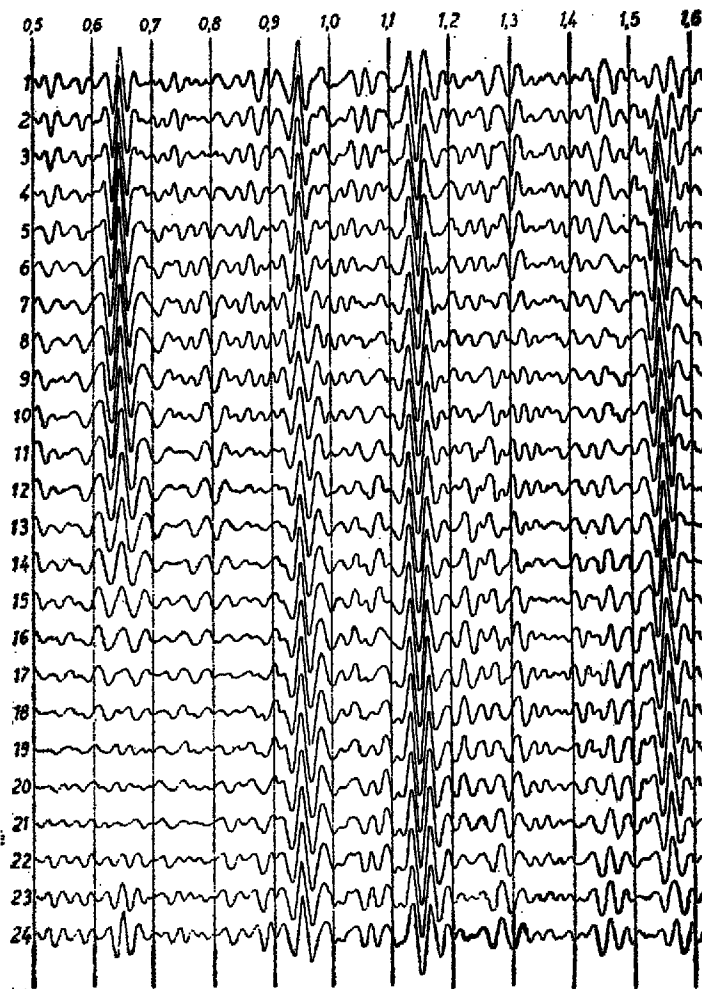
uzyskany w przypadku zastosowania pochylenia
($\Delta t_{poch} = -4$ ms) przy wachlarzu $\Delta t_w = \pm 4$ ms.
Podobne rezultaty (ryc. 17b) uzyskano również pod-
czas zastosowania dodatniego pochylenia ($\Delta t_w =$
 $= 4$ ms). Na otrzymanych sejsmogramach brak wy-
raźnych zminiowań impulsów, z czego wynika, że
opracowywany sejsmogram nie jest w poważnym
stopniu zakłócony falami o prędkościach charaktery-
stycznych dla fal dyfrakcyjnych i odbitej refrakcji.

FILTRACJA DWUWYMIAROWA

Jak już wspomniano, zarejestrowane w terenie
sejsmogramy lub odpowiednio zestawione trasy są
funkcjami dwóch zmiennych — czasu i odległości.
Zestawione w ten sposób zapisy mogą być poddane
dwuwymiarowej transformacji Fouriera. Podobnie
jak w filtracji jednowymiarowej określone mogą być
również filtry dwuwymiarowe, realizowane w dzie-
dzinie częstotliwości (3). Dla każdego punktu widma
dwuwymiarowego określona jest wartość amplitudo-
wej i fazowej charakterystyki filtru. W praktyce
stosowane są najczęściej jednak filtry zerofazowe.
Stąd operacja filtracji polega na pomnożeniu uzyska-
nego rezultatu przekształcenia Fouriera przez zadane
współczynniki charakterystyki filtru. Odwrotne prze-
kształcenie Fouriera uzyskanego iloczynu daje prze-
filtrowany sejsmogram.



a



b

Fig. 19. The result of two-dimensional filtering of seismicogram from Fig. 18b.

Length of trace $M = 500$ points, $2n = N = 512$ points. Number of zero-points added $N - M = 12$ points, $\Delta t = 2.5$ ms. Parameters of filtering in frequency: $f_a = 10$ Hz, $f_b = 70$ Hz, $\Delta f = 0.5$ Hz; in wave numbers: $k_a = 0 \frac{1}{m}$, $k_b = 0.05 \frac{1}{m}$, $\Delta k = 0.002 \frac{1}{m}$. The range of wave distinguished: a — $|\pm \infty| \geq v \geq |\pm 10|$ km/s, b — $|\pm \infty| \geq v \geq |\pm 50|$ km/s.

Ryc. 19. Rezultat przeprowadzonej dwuwymiarowej filtracji dla sejsmogramu z rys. 18b. Długość trasy $M = 500$ pkt, $2^n = N = 512$ pkt. Dodanych punktów zerowych $N - M = 12$ pkt, $\Delta t = 2,5$ ms. Parametry filtracji w częstotliwości $f_a = 10$ Hz, $f_b = 70$ Hz, $\Delta f = 0,5$ Hz. Parametry filtracji w liczbach falowych: $k_a = 0 \frac{1}{m}$, $k_b = 0,05 \frac{1}{m}$, $\Delta k = 0,002 \frac{1}{m}$. Zakres wydzielanych fal: a — $|\pm \infty| \geq v \geq |\pm 10|$ km/s, b — $|\pm \infty| \geq v \geq |\pm 50|$ km/s.

Realizacja filtracji w dziedzinie częstotliwości i liczb falowych ma pewną przewagę nad klasyczną filtracją realizowaną za pomocą splotu w dziedzinie czasoprzestrzeni. Przewaga ta wynika z faktu, że w dziedzinie częstotliwości nie ma na ogół potrzeby obliczania współczynników operatora, gdyż łatwo jest dobrać parametry dowolnie skomplikowanych filtrów, charakteryzujących się lepszymi charakterystykami oraz nie traci się informacji w brzożnych częściach filtrowanych sejsmogramów. Nie bez znaczenia jest również szybkość wykonywania obliczeń. Bardziej wyczerpujące omówienie filtracji dwuwymiarowej, przykładów dwuwymiarowych widm oraz zrealizowanych przykładów obliczeń dla materiałów refrakcyjnych znaleźć można w pracy autora (3). W niniejszym artykule przedstawimy przykłady zrealizowanej filtracji w zastosowaniu do materiałów refleksyjnych.

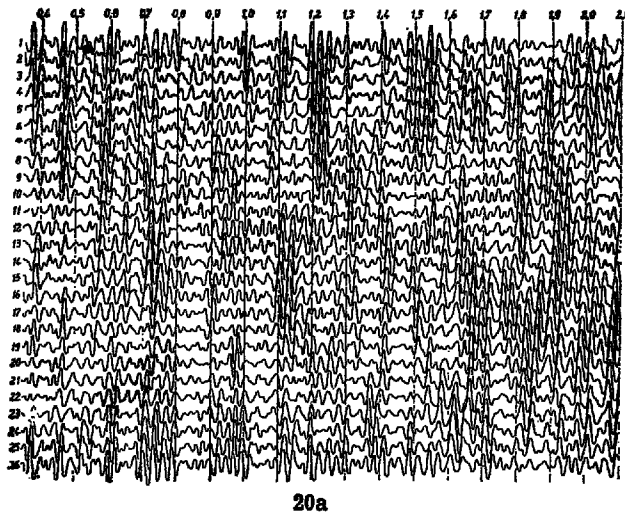
Na ryc. 18a przedstawiono sejsmogram teoretyczny otrzymany przed wprowadzeniem poprawek kinematycznych. Odpowiadający mu sejsmogram uzyskany po wprowadzeniu poprawek widoczny jest na ryc. 18b. Na omawianych sejsmogramach występują cztery refleksy jednokrotne: A, B, C i D, jeden refleks wielokrotny związany z granicą A oraz dwa hodografy ilustrujące fale odbitej refrakcji (R). Hodografy fal refleksyjnych obliczono według krzywej prędkości średniej pomierzonej w głębokim otworze

Niedzwica 2. Na podstawie współczynników amplitudowych uzyskanych dla każdej trasy (dla refleksów współczynnik odbicia) — po uwzględnieniu dywergencji obliczono kolejne, zmienne w czasie trasy sejsmogramu, do których dodano stałe w czasie***, lecz różne dla różnych tras zakłócenia przypadkowe. Obliczone w ten sposób trasy sejsmiczne poddano następnie automatycznej regulacji wzmocnienia.

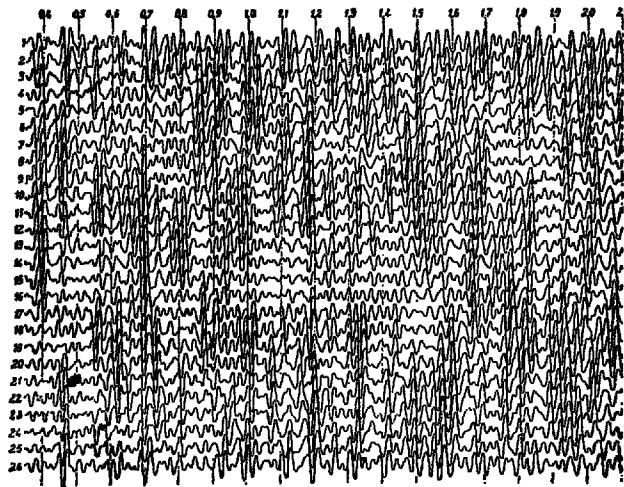
Jak widać obliczenie i wprowadzenie poprawek kinematycznych według dokładnego rozeznania rozkładu prędkości pozwoliło na poprawne skorygowanie refleksów: B, C i D, natomiast nieskorygowane zostały refleksy: A i A². Refleks A² jest wielokrotny i dlatego nie mógł być skorygowany. Z powodu ograniczenia wielkości poprawek nieskorygowano również występujący na czasie $t_0 = 0,65$ s refleks A. Omawiany refleks uległ na trasach uzyskanych przy dużych odległościach silnemu zniekształceniu wskutek obniżenia jego częstotliwości, a ponadto posiada przesunięcia fazowe.

Rozważmy obecnie rezultaty uzyskane w przypad-

*** Mówiąc „zmienne w czasie trasy sejsmiczne” mamy na myśli trasy uzyskane w wyniku splotu sejsmogramów współczynników z impulsami zmiennymi w czasie. Mówiąc z kolei „zakłócenia stałe w czasie” mamy na myśli trasy otrzymane w wyniku splotu uzyskanych z generatora liczb wartości przypadkowych z impulsami stałymi w czasie.



20a



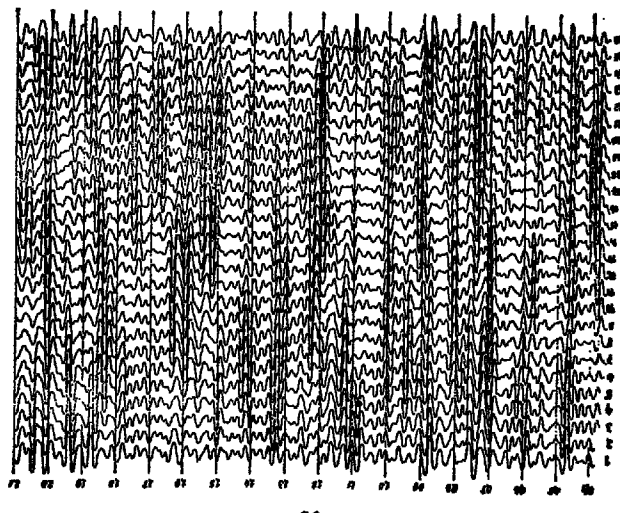
20b

ku zastosowania filtracji dwuwymiarowej do wydzielenia fal refleksyjnych na teoretycznym sejsmogramie refleksyjnym. Na ryc. 19a przedstawiono rezultat uzyskany po zastosowaniu szerokiego filtru, a na ryc. 19b podobny rezultat uzyskany po zastosowaniu filtru wąskiego (ostrego). Z ryc. 19a widać, że zastosowanie filtracji spowodowało usunięcie zniekształconej części płytkiego refleksu oraz tej części refleksu wielokrotnego, która posiadała większą krzywiznę resztkowej poprawki kinematycznej. Ponadto nieznacznie wzrosła czytelność całego sejsmogramu wskutek obniżenia poziomu zakłóceń przypadkowych. Z kolei na ryc. 19b przedstawiono rezultat przeprowadzonego procesu w przypadku zastosowania wąskiej (ostrej) filtracji. W tym przypadku wyrazistość refleksów wzrosła bardzo znacznie, niemniej na brzeżnych trasach zaobserwować można powstałe zniekształcenia. Z przedstawionego przykładu filtracji wynika, że optymalne parametry filtru powinny być zawarte między tymi, przy których uzyskano ryc. 19a, a tymi, przy których uzyskano ryc. 19b.

Na ryc. 20 przedstawiono wynik filtracji dwuwymiarowej zrealizowanej na sejsmogramie zarejestrowanym w obszarze Niecki Nidy. Porównanie uzyskanych rezultatów z podobnymi rezultatami uzyskanymi w przypadku zastosowania filtracji prędkości wskazuje na lepsze wydzielenie fal przy stosowaniu filtracji dwuwymiarowej. Dodatkową zaletą filtracji dwuwymiarowej w stosunku do filtracji prędkości jest możliwość uzyskania takiej ilości tras sejsmogramu, jaka była na sejsmogramie wejściowym.

WNIOSKI

1. W przedstawionej pracy omówiono przykłady zrealizowanych procesów filtracji wielowymiarowej. Oprócz omówionych procesów (odcinanie, filtracja



20c

Ryc. 20. Sejsmogram z niecki Nidy do przeprowadzeniu dwuwymiarowej filtracji w częstotliwościach i w liczbach falowych. Długość trasy $M = 450$ pkt, $2n = N = 512$ pkt. Dodanych punktów zerowych $N - M = 62$ pkt, $\Delta t = 4$ ms. Parametry filtracji w częstotliwości: $f_a = 18$ Hz, $f_b = 70$ Hz, $\Delta f = 0,5$ Hz.

Parametry filtracji w liczbach falowych: $k_a = 0 \frac{1}{m}$, $k_b = 0,02 \frac{1}{m}$, $\Delta k = 0,002 \frac{1}{m}$. Zakres wydzielenych fal: $a - |\pm \infty| \geq v \geq |\pm 10| \text{ km/s}$, $b - |\pm \infty| \geq v \geq |\pm 0| \text{ km/s}$, $c - |\pm \infty| \geq v \geq |\pm 0| \text{ km/s}$.

Fig. 20. Seismogram from the Nida Basin after performing two-dimensional filtering in frequencies and wave numbers. Length of trace $M = 450$ points, $2n = N = 512$ points. Number of zero-points added $N - M = 62$ points, $\Delta t = 4$ ms. Filtering parameters in frequencies: $f_a = 18$ Hz, $f_b = 70$ Hz, $\Delta f = 0.5$ Hz; in wave numbers: $k_a = 0 \frac{1}{m}$, $k_b = 0.02 \frac{1}{m}$, $k_c = 0.002 \frac{1}{m}$. Range of waves distinguished: $a - |\pm \infty| \geq v \geq |\pm 10| \text{ km/s}$, $b - |\pm \infty| \geq v \geq |\pm 0| \text{ km/s}$, $c - |\pm \infty| \geq v \geq |\pm 0| \text{ km/s}$.

prędkości i filtracja dwuwymiarowa) stosowane są w praktyce również procesy usuwania refleksów wielokrotnych. W artykule ograniczono się wyłącznie do omówienia algorytmów i zrealizowanych według nich przykładów obliczeń.

2. Z przedstawionych przykładów obliczeń widoczna jest wysoka efektywność wymienionych metod przetwarzania wielowymiarowego. Sugeruje to celowość podjęcia prac mających na celu opracowanie dla tych procesów programów dla realizacji obliczeń na komputerach EMR 6130/35. W pierwszej kolejności proponuje się podjęcie prac nad opracowaniem programu dla filtracji dwuwymiarowej.

3. Program dla filtracji dwuwymiarowej może być również wykorzystany do doboru parametrów grupowania geofonów i otworów oraz filtracji, a nawet metody wielokrotnych pokryć. Dane wyjściowe do tych badań stanowi zarejestrowany obraz falowy.

LITERATURA

1. Banaś H. — Omówienie rezultatów cyfrowego przetwarzania sejsmogramu refleksyjnego z obszaru Niecki Nidy. Geof. i Geol. naft. 1971, nr 10—12.
2. Banaś H. — Analiza możliwości zastosowania cyfrowego przetwarzania materiałów refrakcyjnych do wydzielenia fal charakteryzujących się określonymi prędkościami. Tech. Poszuk., 1973, z. 47—48.

3. Banaś H. — Zastosowanie dwuwymiarowej filtracji do rozdzielania interferujących fal refrakcyjnych. *Ibidem* 1974, z. 5.
4. Banaś H. — Zastosowanie ekstrakcji informacji do rozwiązywania problemów geologicznych oraz do poszukiwania bituminów. *Ibidem*, 1974, z. 4.
5. Burg J. P. — Three-dimensional filtering with an array of seismometers. *Geophysics*, 1964, nr 5.
6. Davies B. B., Mercado E. J. — Multi-channel deconvolution filtering of field recorded seismic data. *Ibidem* 1968, nr 5.
7. D'Hoeraene J. — Filtrage spatio temporel des courbures. *Geoph. Prosp.* 1966, nr 1.
8. Embree P., Burg J. P., Backus M. M. — Wide-band velocity filtering — the Pie-Slice process. *Geophysics*, 1963, nr 8.
9. Faill J. P., Grau G. — Le filtres en éventail. *Geoph. Prosp.*, 1963, nr 2.
10. Foster M. R., Sengbush R. L., Watson R. J. — Design of sub-optimum filter systems for multitrace seismic data processing. *Ibidem*, 1964, nr 2.
11. Robinson E. A. — Multichannel — z — transform and minimum-delay. *Geophysics*, 1966, nr 3.
12. Schneider W. A. — Developments in seismic data processing and analysis (1968—70). *Ibidem*, 1971, nr 6.
13. Schneider W. A., Lerner K. L., Burg J. P., Backus M. M. — A new data — processing technique for the elimination of ghost arrivals on reflection seismograms. *Ibidem*, 1964, nr 6.
14. Schneider W. A., Prince E. R., Giles B. P. — A new data — processing technique for multiple attenuation exploiting differential normal moveout. *Ibidem*, 1966, nr 3.
15. Sengbush R. L., Foster M. R. — Optimum multichannel velocity filters. *Ibidem*, 1968, nr 1.
16. Shanks J. L. — Recursion filters for digital processing. *Ibidem*, 1967, nr 1.
17. Treitel S. — Principles of digital multichannel filtering. *Ibidem*, 1970, nr 5.
18. Treitel S., Shanks J. L., Frasier C. W. — Some aspects of fan filtering. *Ibidem*, 1967, nr 5.
19. Wiggins R. A., Robinson E. A. — Recursive solution to the multichannel filtering problem. *Jour. Geoph. Res.* 1965, nr 8.

SUMMARY

The examples of performed processes of multi-dimensional filtering (deghosting, velocity filter — fan filter and two-dimensional filtering) are discussed. These processes along with the process of removal of multiple reflections are used in the current practise. The paper deals only with discussion of algorithms and examples of calculations made with their use. The examples of calculations presented here show high effectiveness of these methods of multidimensional transformations. It is suggested to initiate a research project aimed at preparation of programmes for calculations using computer EMR 6130/35. The works should start with preparation of the programme for two-dimensional filtering. That programme may be also used in selecting parameters of spacing geophones and drillings, and of filtering, and even in the technique of multiple covering. The input data for these studies are represented by recorded wave image.

РЕЗЮМЕ

В работе рассмотрены примеры проведенной многомерной фильтрации. Кроме рассмотренных процессов на практике применяется также устранение многократных отражений. В работе анализируются лишь алгоритмы и примеры проведенных по ним вычислений. Из приведенных примеров вычислений следует, что рассмотренные методы многомерного преобразования отличаются высокой эффективностью. В связи с этим целесообразно для этих процессов составить программы вычислений с помощью ЭВМ 6130/35. Предлагается в первую очередь разработать программу для двухмерной фильтрации. Эта программа может быть также использована в выборе параметров группировки геофонов и скважин и даже в методе многократного перекрытия. Исходными данными для этих работ является зарегистрированный волновой образ.