

Разработка быстрых алгоритмов обработки сейсмических данных: регуляризация, подавление шумов и кратных волн

Дучков А.А., ИНГГ СО РАН

Andersson F., Lund University

Темы

Будут рассмотрены два типа анализа данных:

1. Оптимальные представления (разложения) данных.
2. Выделение геометрических атрибутов (дальнейшее использование в обработке).

План

- реализация **быстрого преобразования Фурье на нерегулярных сетках (USFFT)**
- разложение данных по гауссовым волновым пакетам и приложения
- быстрое высокоразрешающее преобразование Радона и приложения
- структурные тензоры для определения наклонов и разделения полей

Методы

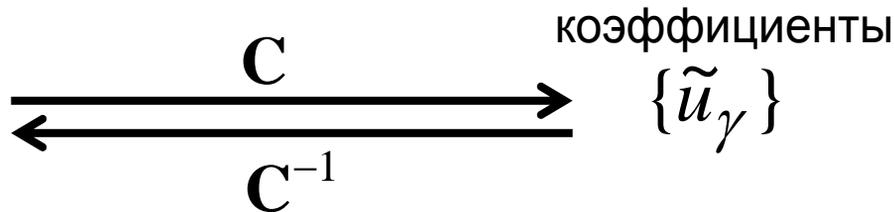
Разложение по базисам

$$u(\mathbf{x}) = \sum_{\gamma} \tilde{u}_{\gamma} \varphi_{\gamma}(\mathbf{x})$$

- базис (фрейм)
- эффективные процедуры разложения

данные

$u(\mathbf{x})$



коэффициенты

$\{\tilde{u}_{\gamma}\}$

$$\mathbf{C}^{-1}\mathbf{C} = \mathbf{I} \quad \mathbf{C}\mathbf{C}^{-1} = \mathbf{\Pi}$$

Разреженная инверсия (высокоразрешающая, sparse inversion)

$$\mathbf{u} = \mathbf{L}\mathbf{m}$$

$$\mathbf{u} \approx \mathbf{L}\mathbf{m}, \quad \mathbf{m} - \text{разреженное}$$

$$\| \mathbf{L}\mathbf{m} - \mathbf{u} \|_2^2 + \mu \| \mathbf{m} \|_p, \quad 1 \leq p \leq 2$$

- iterative soft thresholding, IRLS (*ll*)
[Daubechies et al., 2004, 2010]
- greedy methods
[Tanushev et al., 2010]
- combination
[Andersson et al., 2011]

Высокоразрешающее разложение

$$\mathbf{C}: \mathbf{u} = u(\mathbf{x}) \rightarrow \tilde{\mathbf{u}} = \{\tilde{u}_\gamma\}$$

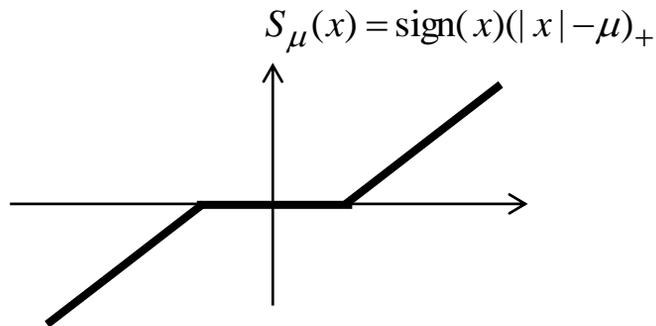
$$u(\mathbf{x}) \approx \mathbf{C}^{-1}\tilde{\mathbf{u}} = \sum_{\gamma} \tilde{u}_\gamma \varphi_\gamma(\mathbf{x})$$

Iterative soft thresholding

$$\tilde{\mathbf{u}}^{n+1} = S_\mu(\tilde{\mathbf{u}}^n - \mathbf{\Pi}\tilde{\mathbf{u}}^n + \mathbf{C}\mathbf{d})$$

$$\mathbf{\Pi} = \mathbf{C}\mathbf{C}^{-1},$$

$$\Pi_{\gamma'\gamma} = \langle \varphi_{\gamma'}, \varphi_\gamma \rangle$$

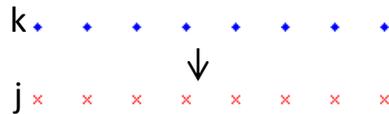


**Быстрое преобразование Фурье
на нерегулярных сетках
(USFFT)
(1D, 2D, 3D)**

Преобразование Фурье

- FFT (Fast Fourier Transform)

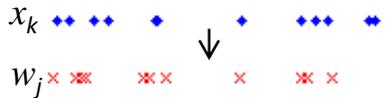
$$\hat{u}_j = \sum_{k=0}^{N-1} u_k e^{-i2\pi jk/N}$$



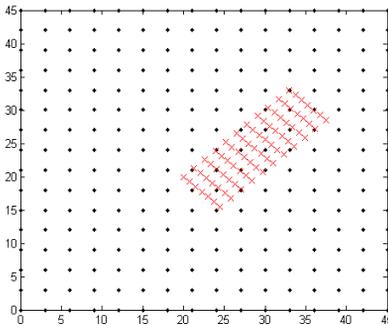
$O(N \log N)$

- USFFT (Unequally-spaced Fast Fourier Transform)

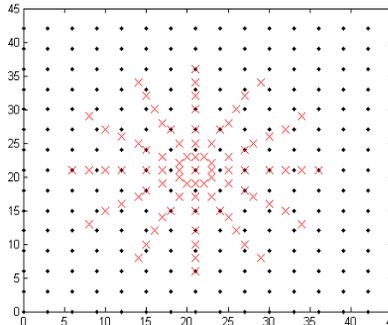
$$\hat{u}_j = \sum_{k=0}^{N-1} u_k e^{-i2\pi\omega_j x_k}$$



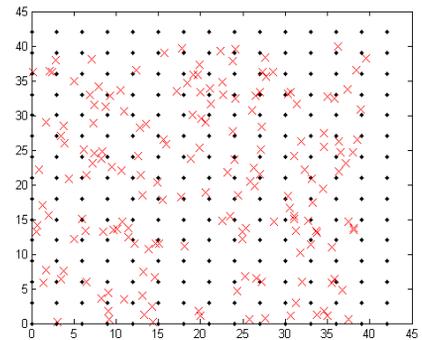
$O(N \log N)$



Гауссовы
волновые пакеты



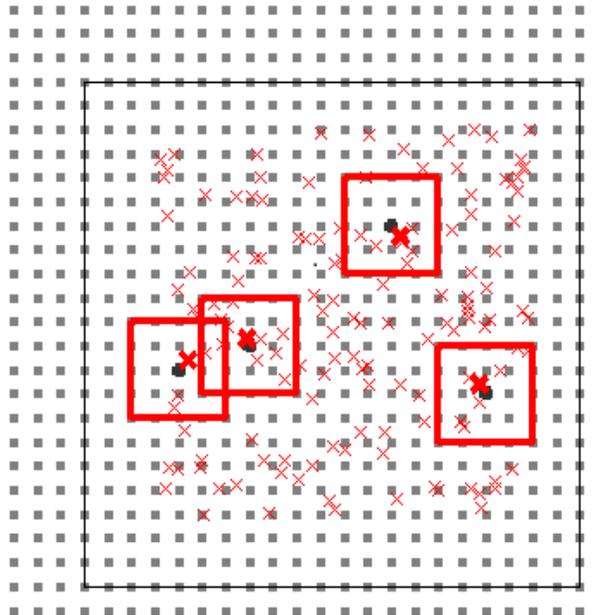
Преобразование Радона



Регуляризация данных

USFFT

1. Удвоение сетки (дополнение нулями) и умножение на весовую функцию
2. Прямое FFT на регулярную сетку, **~10% времени**
3. «Интерполяция», суммирование с весом в шаре для каждой точки нерегулярной сетки, **~90% времени**



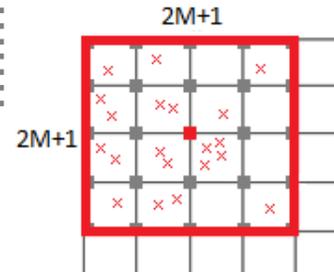
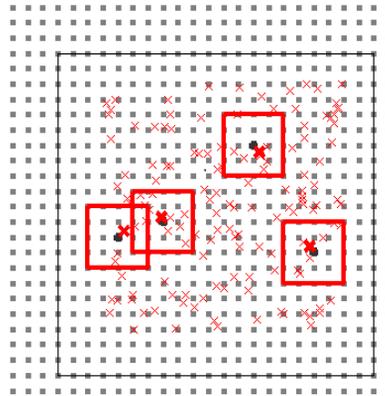
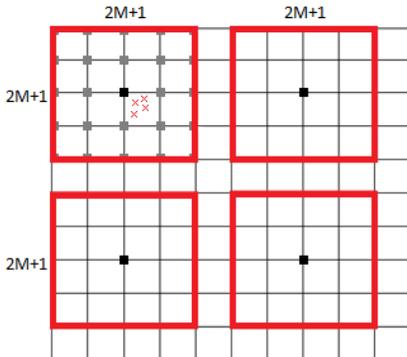
Ускорение USFFT

CPU

1. Intel MKL
2. Интерполяция

GPU

1. cuFFT, cuBlas
2. Интерполяция



Анализ производительности

Время прямого и обратного 3D USFFT (в секундах), $Nus=N^3$

N	Послед. версия Intel i7		Intel OpenMP(4)	MKL Intel i7	+	Nvidia Cuda Tesla C2050		
	пр.	обр.	пр.	обр.		пр.	обр.	
2^6	15.27	15.47	0.99	1.57		0.55	1.22	
2^7	129.35	136.22	8.06	13.50		2.7	12.41	
2^8	1070.92	1092.92	65.23	118.53		19.7	67.10	
				<u>~16x</u>		<u>~9x</u>	<u>53x</u>	<u>~16x</u>

Оптимизация для платформ Интел

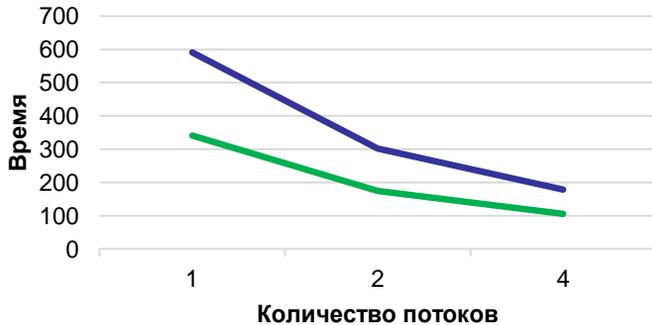
Профилирование: значительное время занимает вычисление весов (VTunes):

<code>for(k = -M1; k <= M1; k++){</code>	0.678s
<code>dz = (muz_j + k - x[j].z*(double)(2*N[2]));</code>	0.172s
<code>p3 = exp(-lambda*dz*dz);</code>	5.089s
<code>for(l = -M1; l <= M1; l++){</code>	0.720s
<code>dy = (muy_j + l - x[j].y*(double)(2*N[1]));</code>	0.830s
<code>p2 = exp(-lambda*dy*dy);</code>	45.205s
<code>for(m = -M1; m <= M1; m++){</code>	18.280s
<code>dx = (mux_j + m - x[j].x*(double)(2*N[0]));</code>	6.549s
<code>p1 = exp(-lambda*dx*dx);</code>	158.857s
<code>res.x += p1 * p2 * p3 * G[strides[0]+strides[3]*(muz_j+k+N[2])+strides[2]*(muy_j+l+M1)+strides[1]*(mux_j+m+M1)];</code>	314.572s
<code>res.y += p1 * p2 * p3 * G[strides[0]+strides[3]*(muz_j+k+N[2])+strides[2]*(muy_j+l+M1)+strides[1]*(mux_j+m+M1)];</code>	38.280s
<code>}</code>	
<code>}</code>	
<code>}</code>	

Ускорение

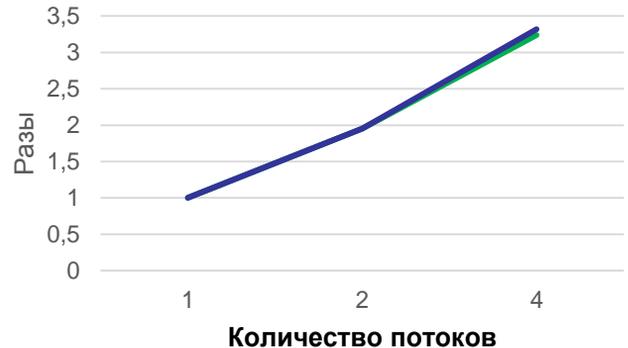
Различные стратегии: использование вспомогательных массивов для хранения “весов”

Время преобразования 3d,
N=256



— С использованием дополнительного массива
— Без использования дополнительного массива

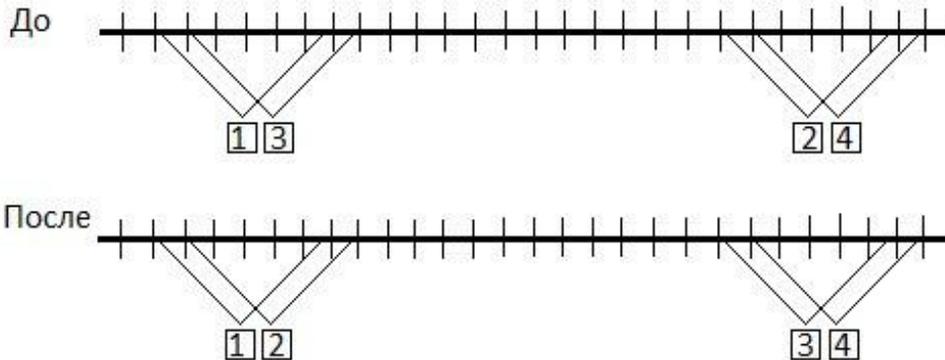
Ускорение



— С использованием дополнительного массива
— Без использования дополнительного массива

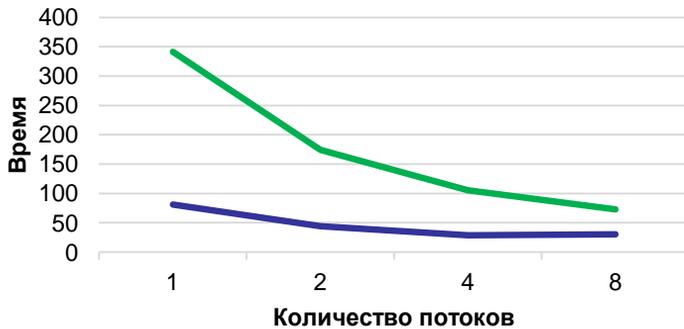
Оптимизация для платформ Интел

- Предварительная сортировка точек нерегулярной сетки может повысить вероятность попадания по кэшу.



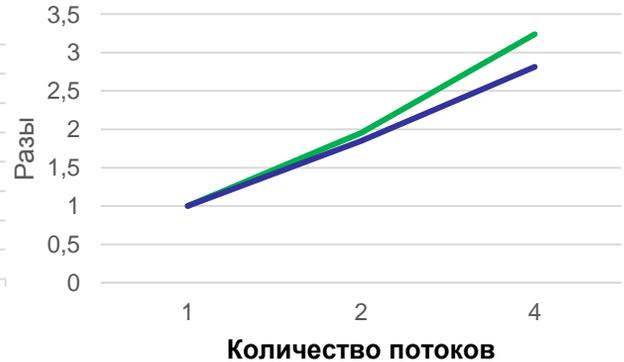
Ускорение

Время преобразования 3d, N=256



— Без предварительной сортировки
— С предварительной сортировкой

Ускорение

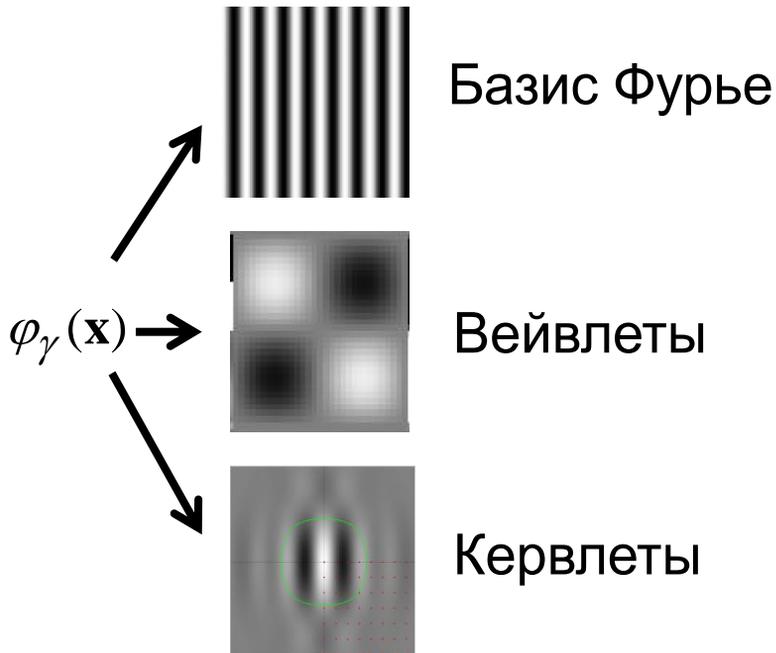
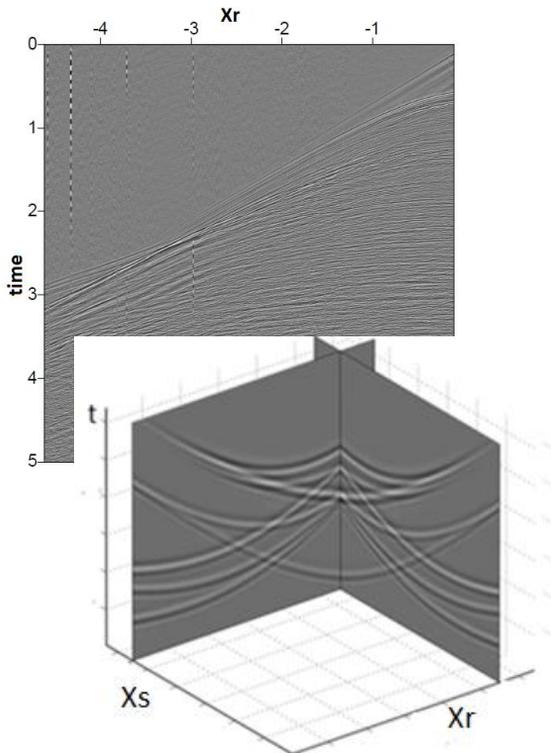


— Без предварительной сортировки
— С предварительной сортировкой

Разложение сейсмических данных по гауссовым волновым пакетам

Разложение данных по базисам

$$u(\mathbf{x}) = \sum_{\gamma} \tilde{u}_{\gamma} \varphi_{\gamma}(\mathbf{x})$$

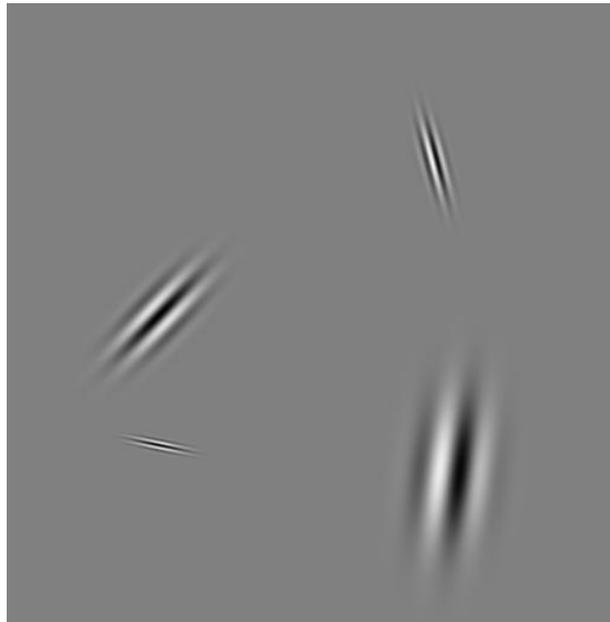
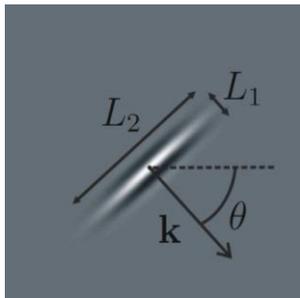


Разложение по гауссовым пакетам

$$u(\mathbf{x}) = \sum_{\gamma} \tilde{u}_{\gamma} \varphi_{\gamma}(\mathbf{x})$$

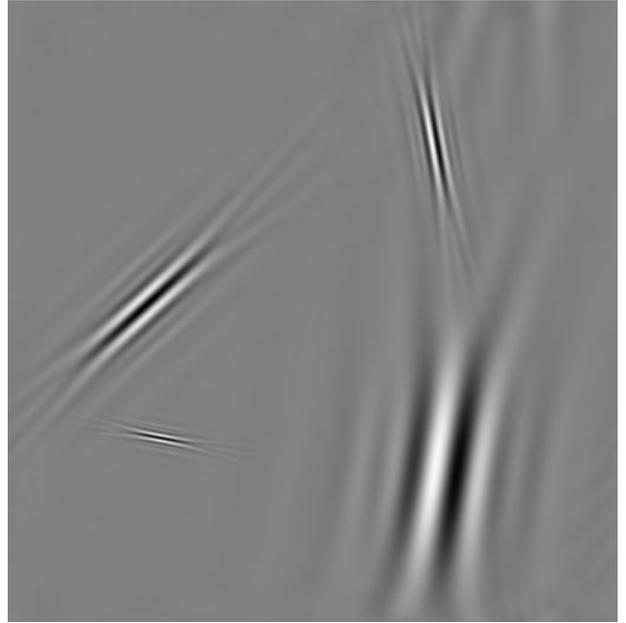
прямое/обратное преобр-е:

$$u(\mathbf{x}) \longleftrightarrow \{\tilde{u}_{\gamma}\}$$



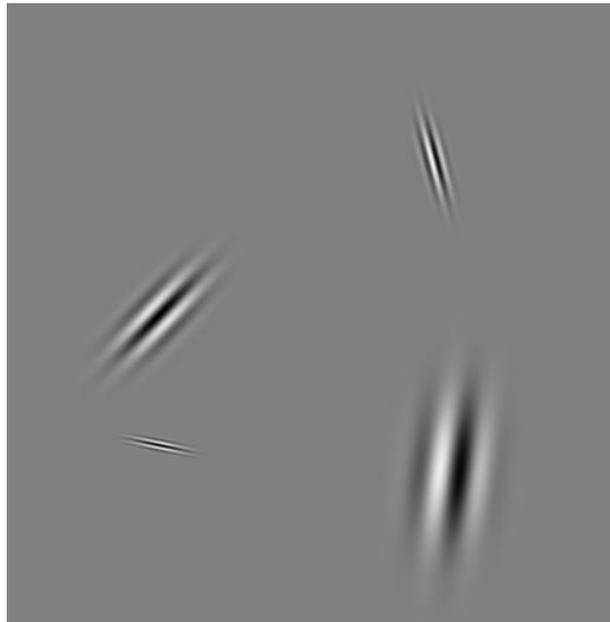
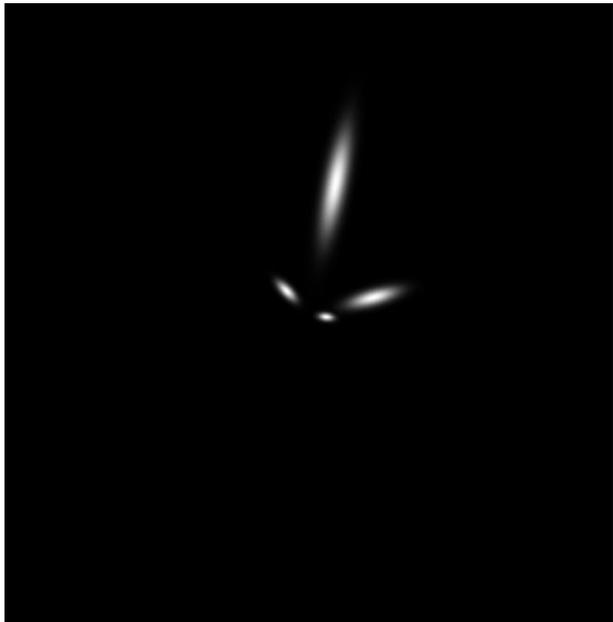
USFFT

Кервлеты



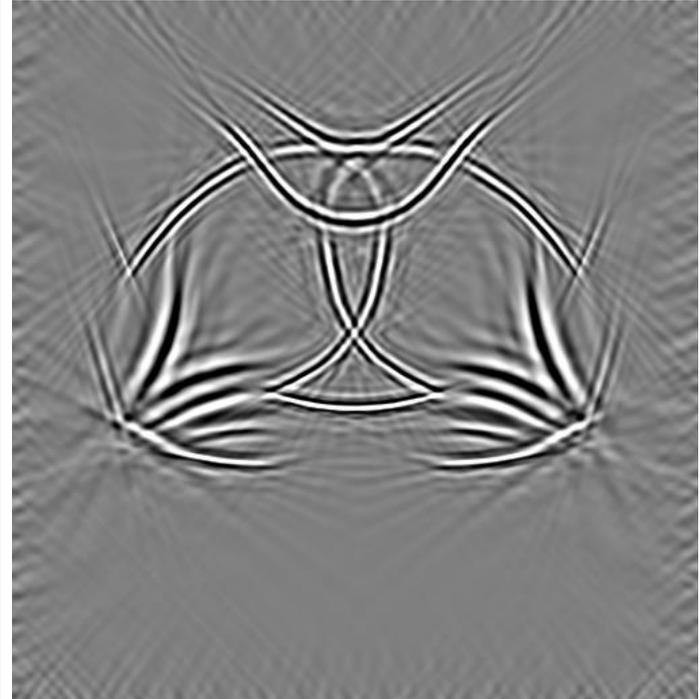
[Candes, Demanet, Donoho & Ying, 2006]

Гауссовы волновые пакеты



[Andersson, Carlsson & Tenorio, 2011]

Сжатие данных



~ 600 curvelets

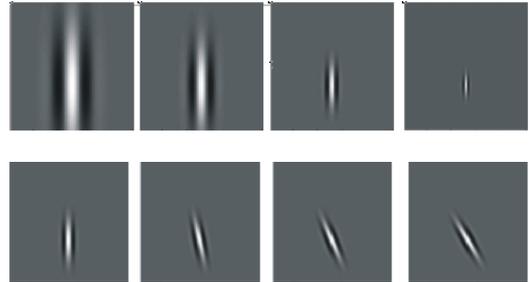
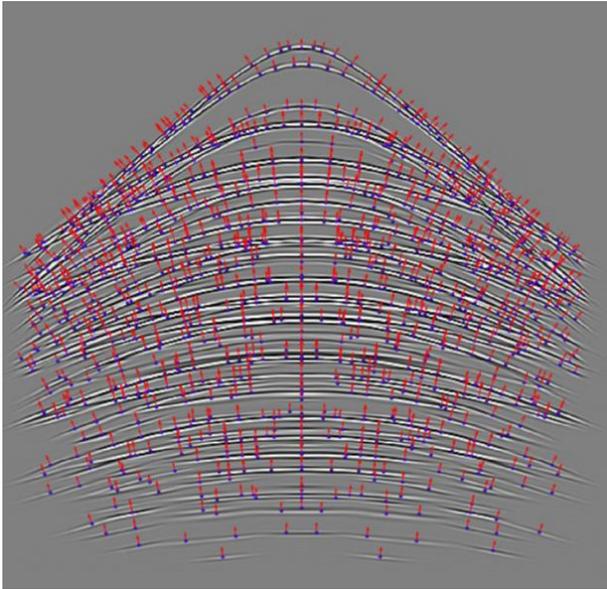
Сжатие данных



~ 500 GWP

Гауссовы волновые пакеты

$$u(\mathbf{x}) = \sum_{\gamma} \tilde{u}_{\gamma} \varphi_{\gamma}(\mathbf{x})$$



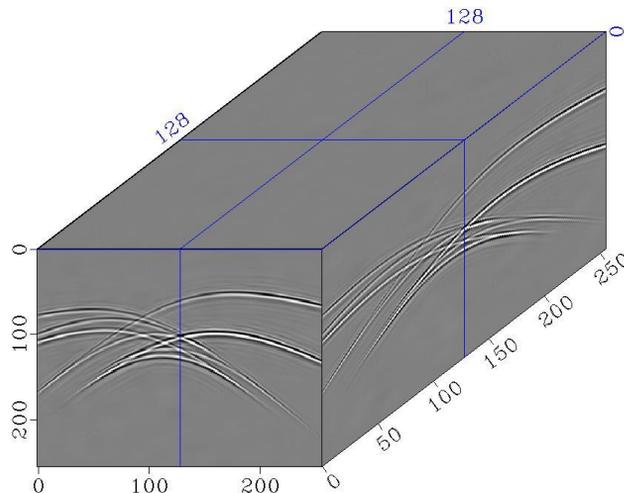
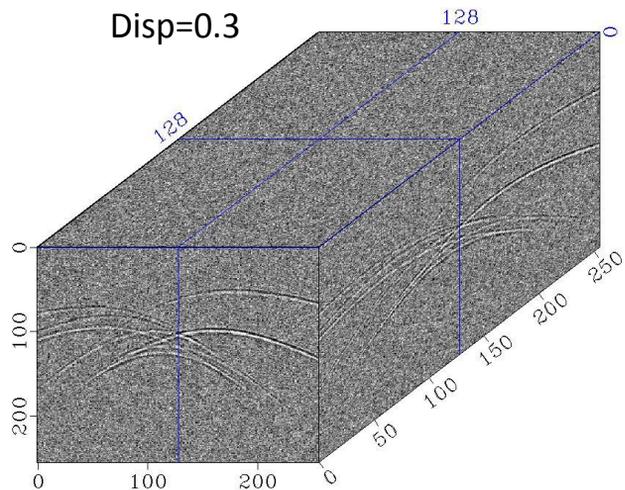
- Оптимальный базис для представления сейсмических данных (разреженное представление)
- Оптимальный для геометрического анализа набор характеристик базисных функций (поиск осей синфазности)

Подавление случайного шума

$$u(x) \longrightarrow \left\{ u_{\gamma} \right\} \xrightarrow{C} \left\{ u_{\hat{\gamma}} \right\} \xrightarrow{C^{-1}} u'(x)$$

отсев малых коэф – об

Disp=0.3



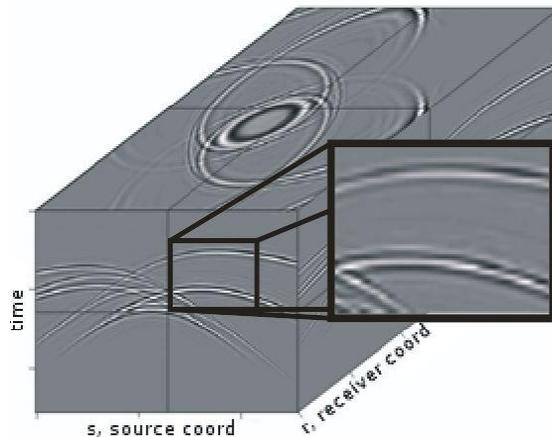
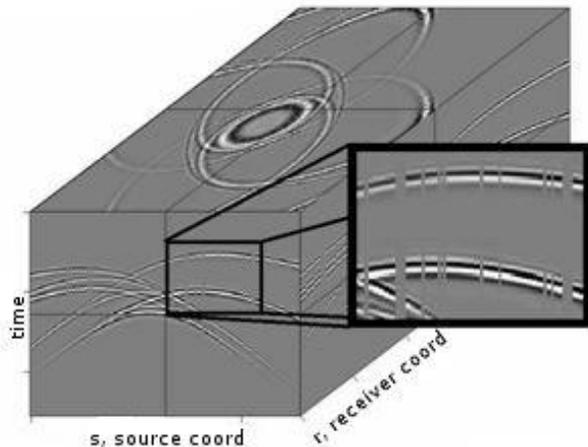
CR(Compression ratio)= Ncoeffs/Npixels=0.02



Интерполяция данных

$$u(x) \xrightarrow{C} \{u_\gamma\} \xrightarrow{\text{отсев малых коэф-ов}} \{u_{\hat{\gamma}}\} \xrightarrow{C^{-1}} u'(x)$$

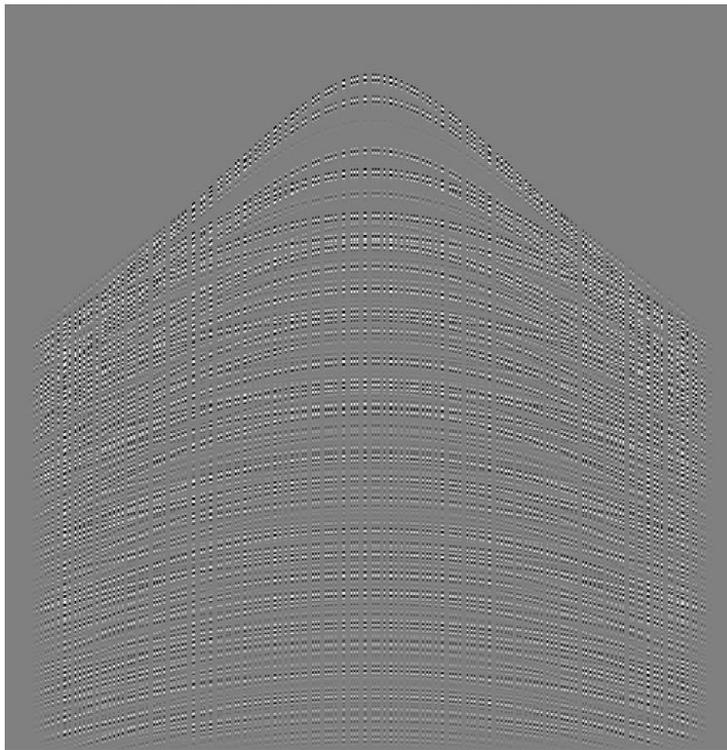
128x50 пропущенных трасс



$$CR(\text{Compression ratio}) = N_{\text{coeffs}} / N_{\text{pixels}} = 0.02$$

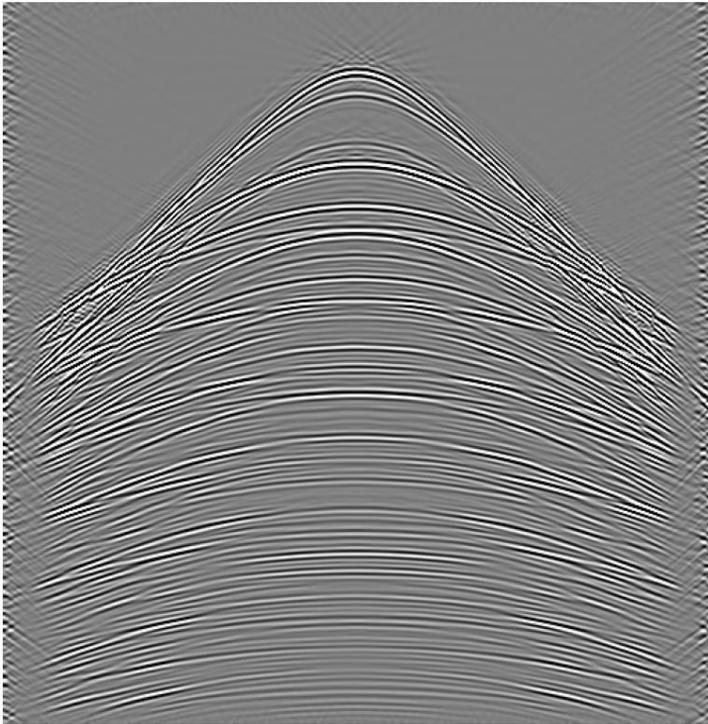


Интерполяция пропущенных данных

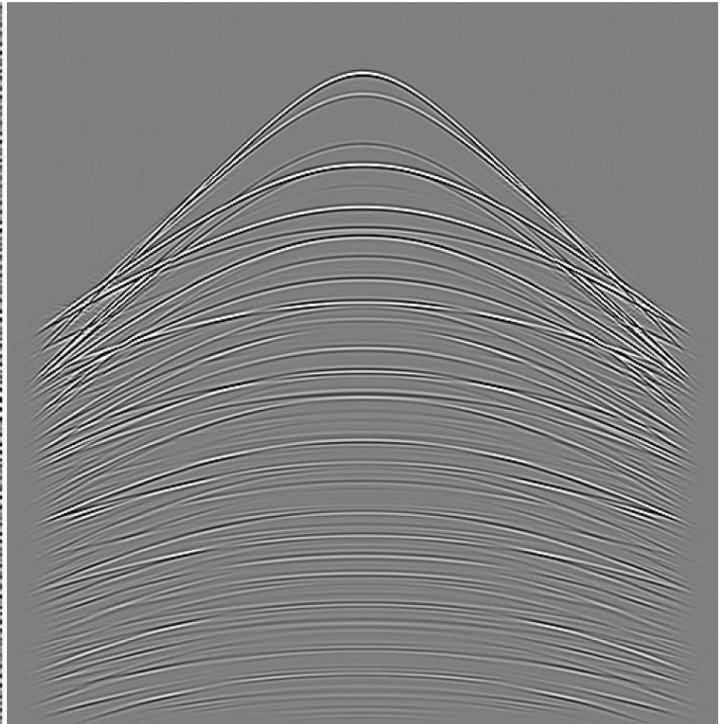


[SPARCO toolbox]

Интерполяция пропущенных данных

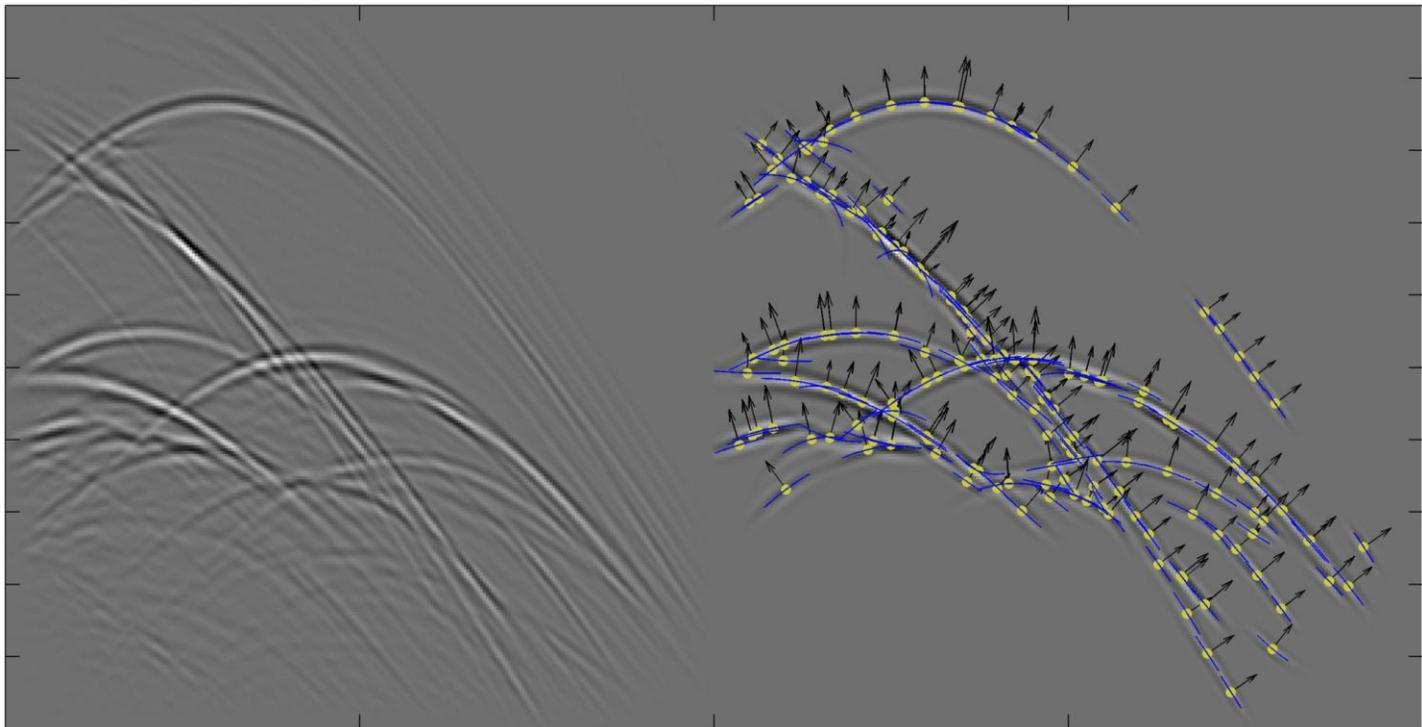


кёрвлеты



гауссовы волновые пакеты

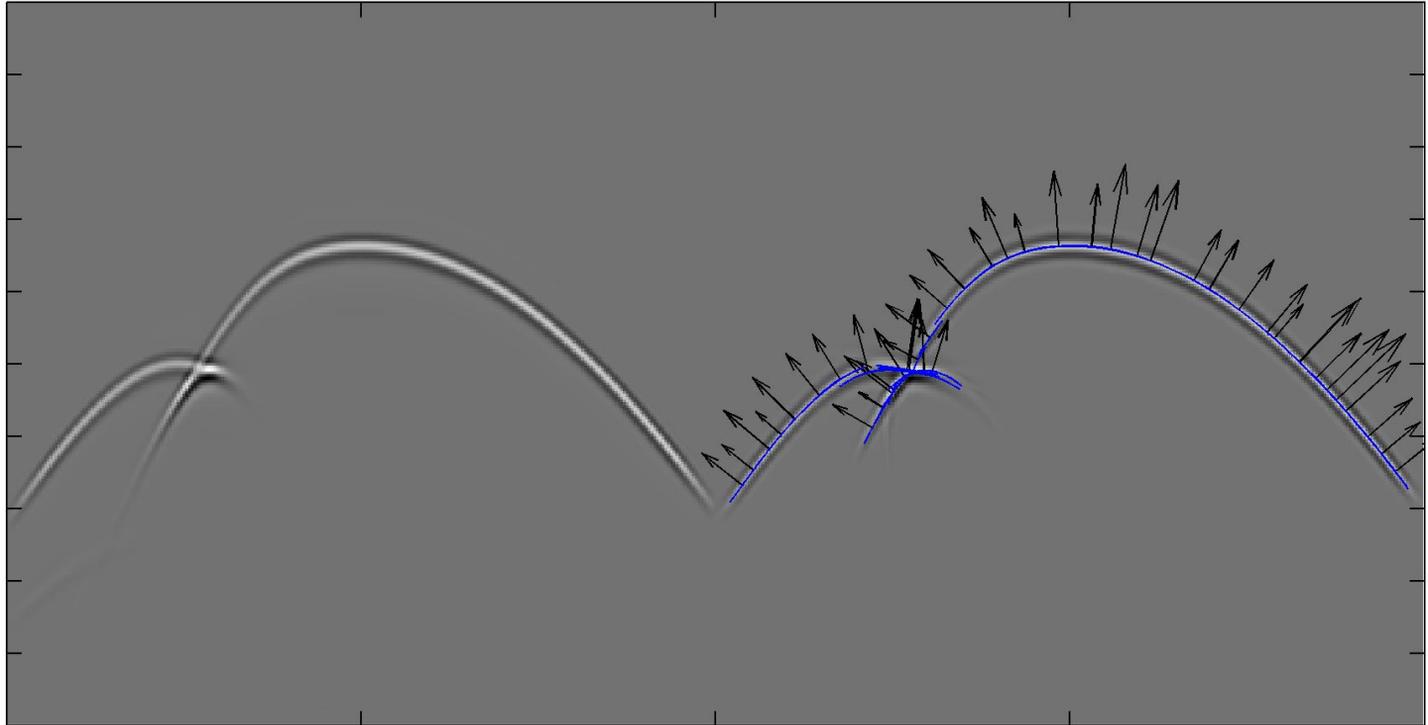
Определение наклонов



150 curved GWPs

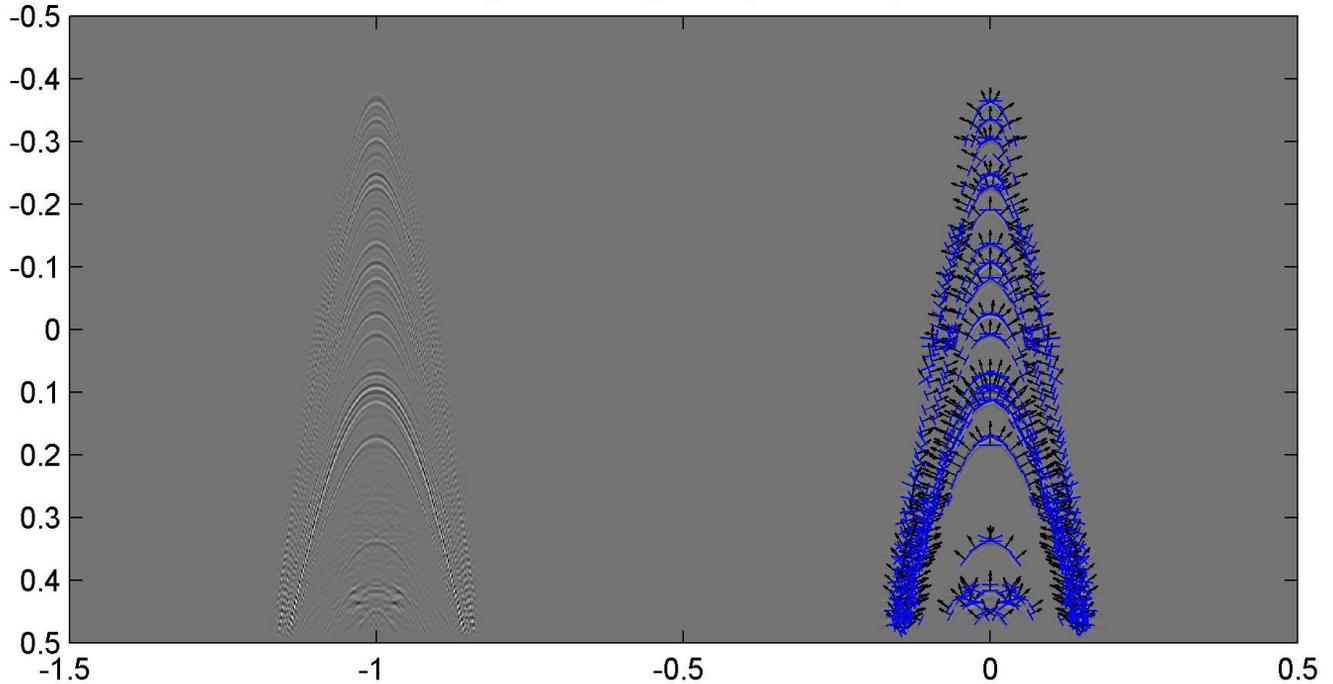
Определение кривизн

Shotgather 1



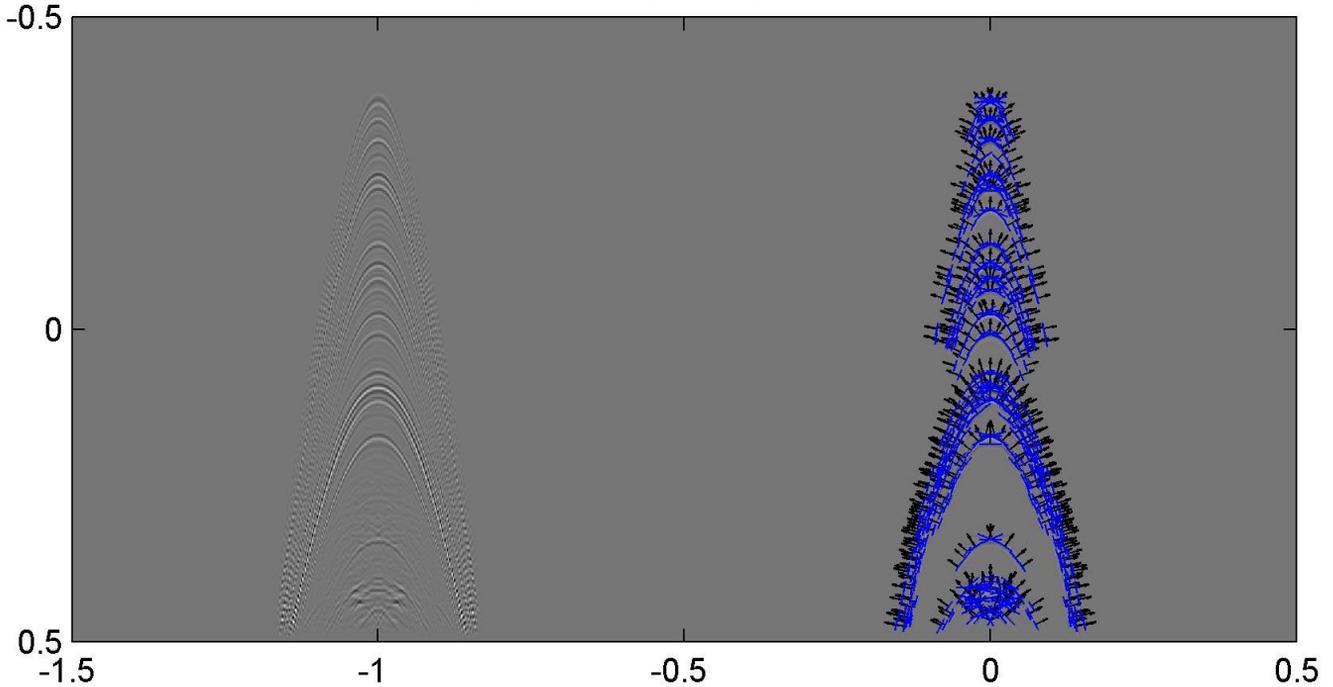
Anti-aliasing

Sigsbee CMP gather (698 GWPs)



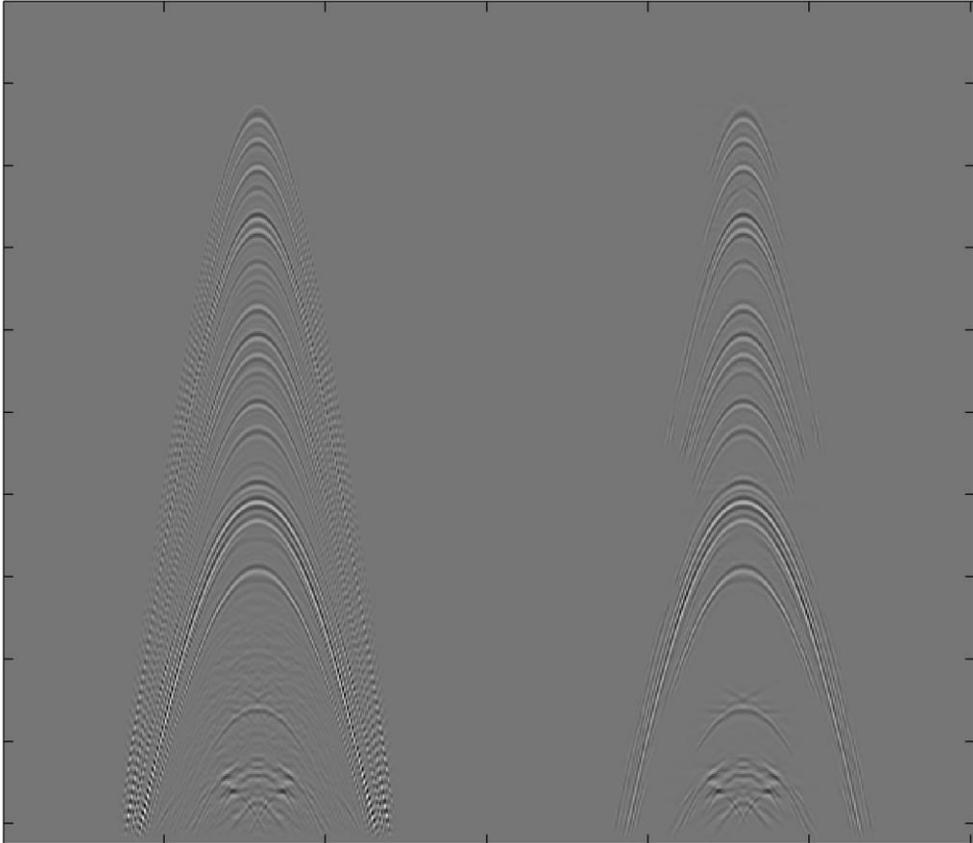
Anti-aliasing

Sigsbee CMP gather (575 GWP's)

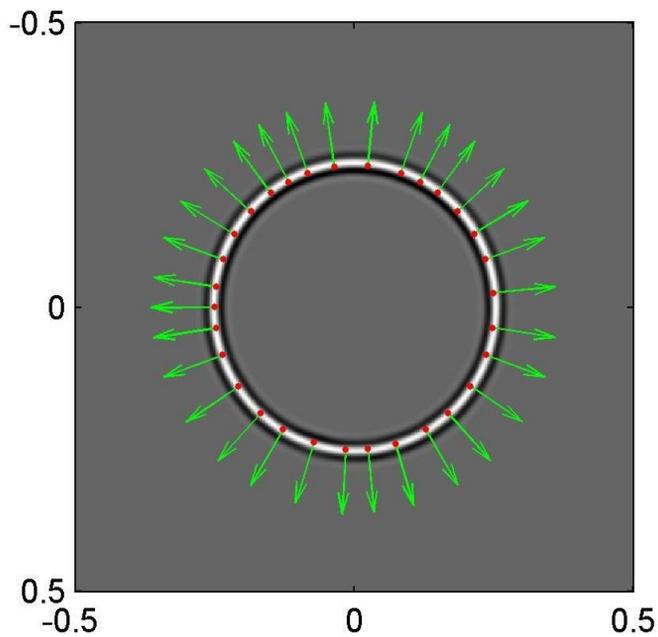
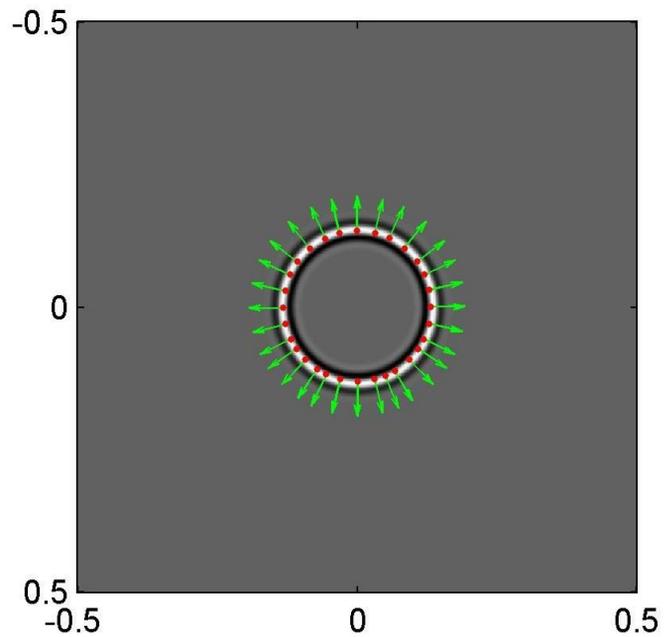


Anti-aliasing

Sigsbee CMP gather (1159 GWPs)



Продолжение поля



Быстрое преобразование Радона

Преобразование Радона

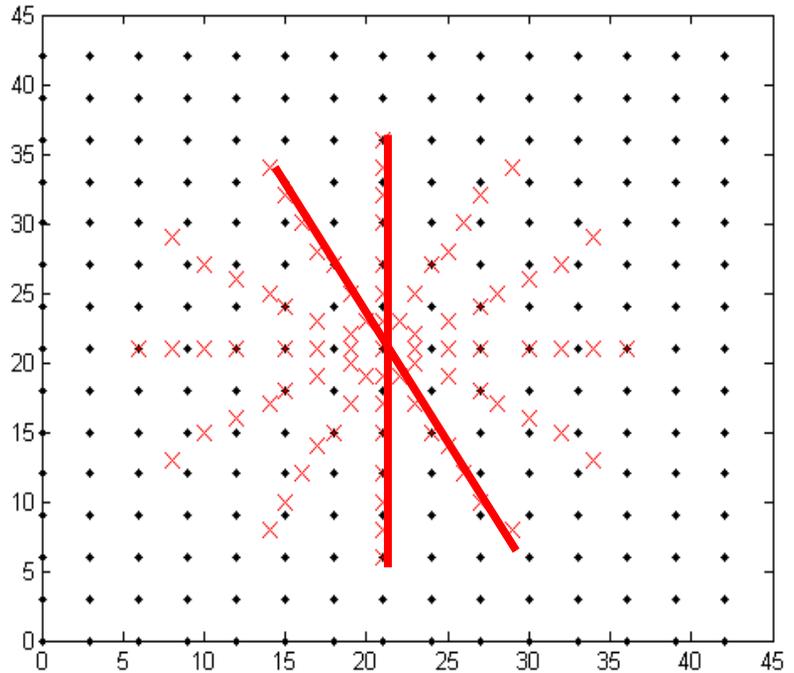
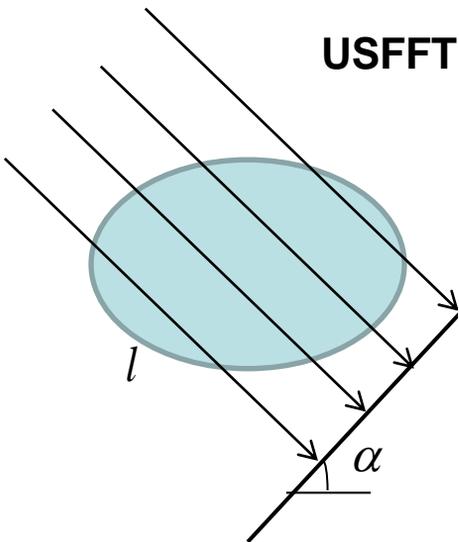
$$u(x, y)$$

$$R_\alpha(s) = \int u(s \cos \alpha + y \sin \alpha, s \sin \alpha - y \cos \alpha) dy$$

$$\hat{R}_\alpha(\omega \cos \alpha, \omega \sin \alpha)$$

$$u(x, y) = F^{-1}[\hat{R}_\alpha(\omega)]$$

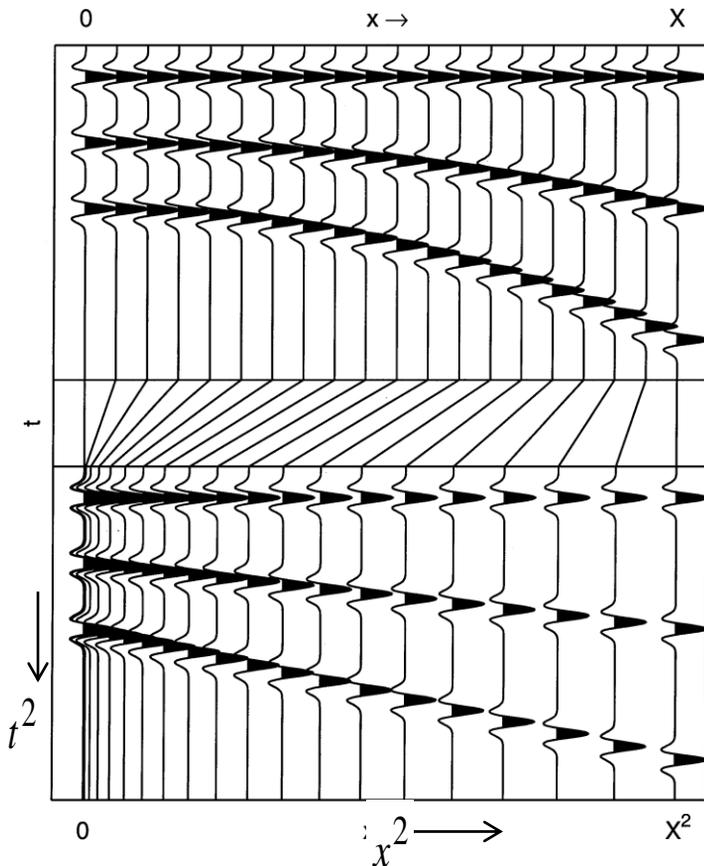
USFFT



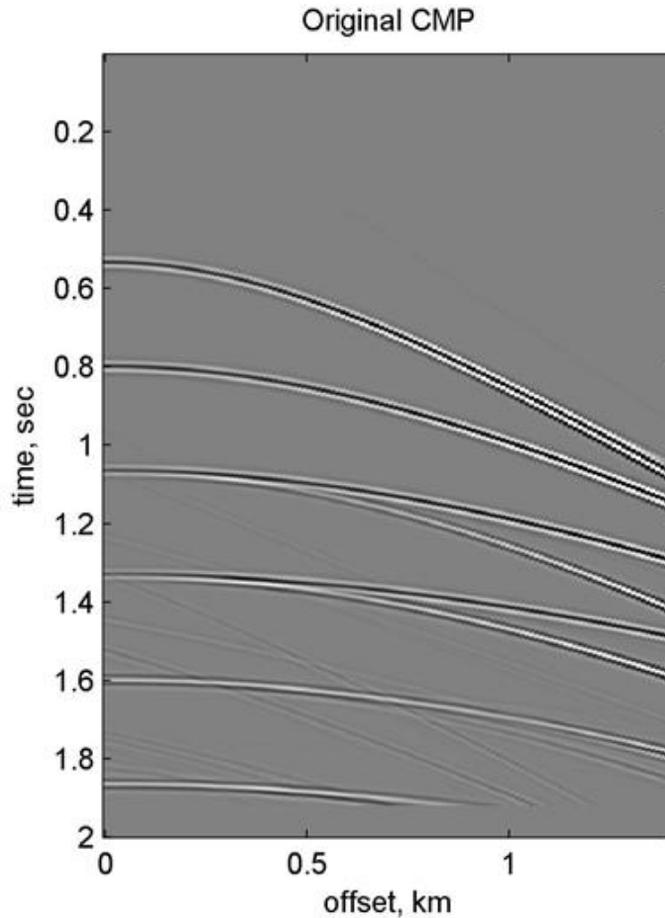
Быстрые алгоритмы суммирования

Быстрое преобразование
Радона
(параболическое,
гиперболическое,
многомерное)

USFFT

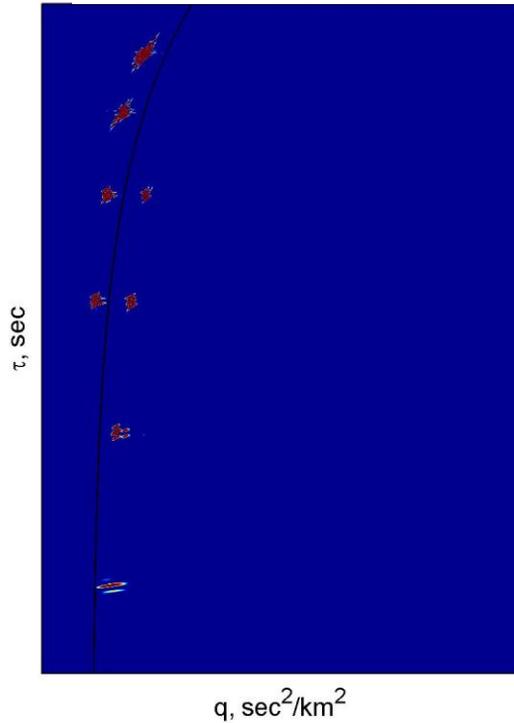


Подавление кратных волн

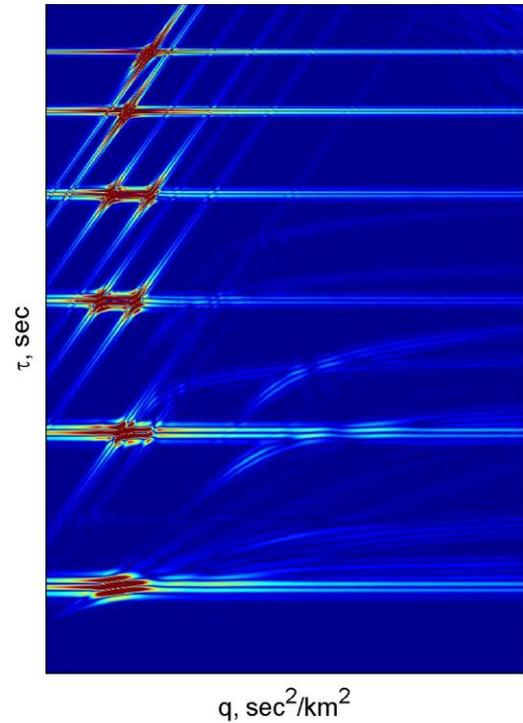


Спектр Радона

разреженная инверсия

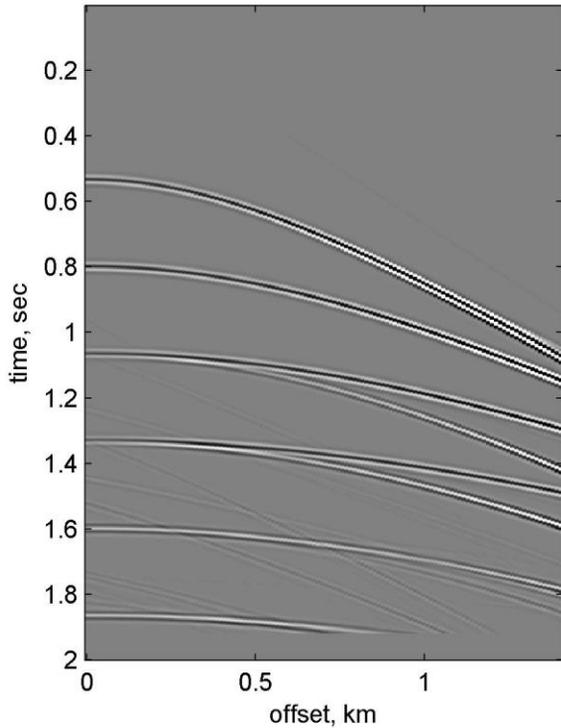


стандартное преобразование

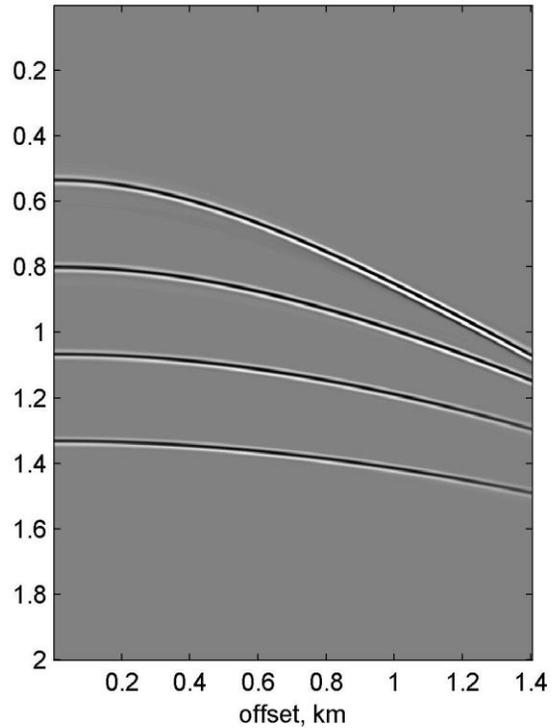


Подавление кратных волн

Original CMP

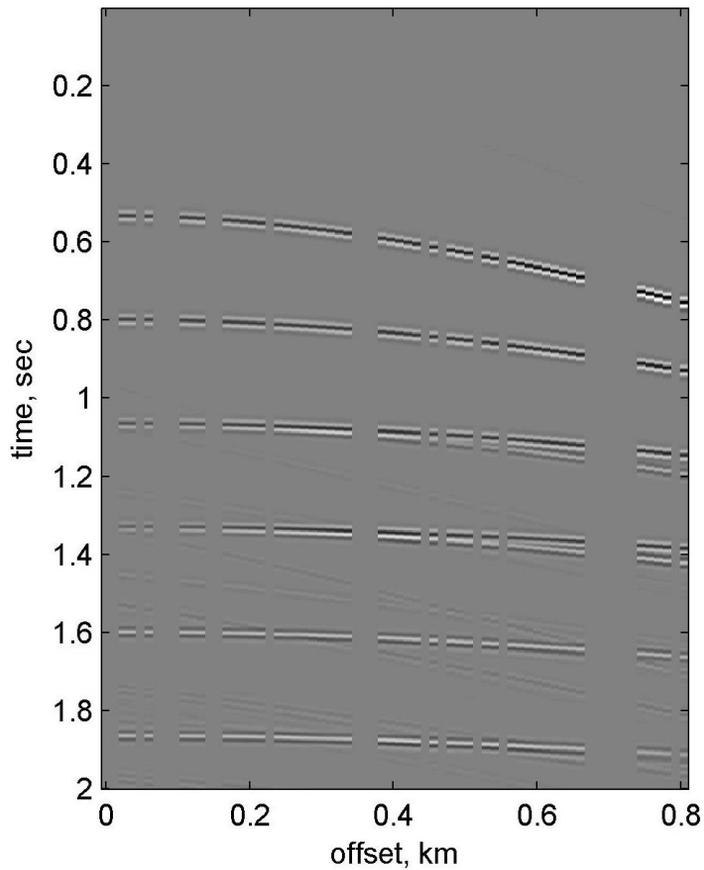


CMP after multiple removal



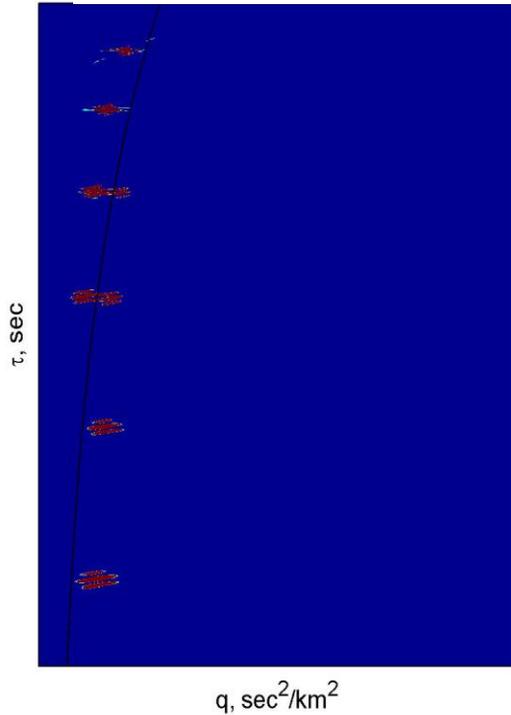
Интерполяция

Original CMP

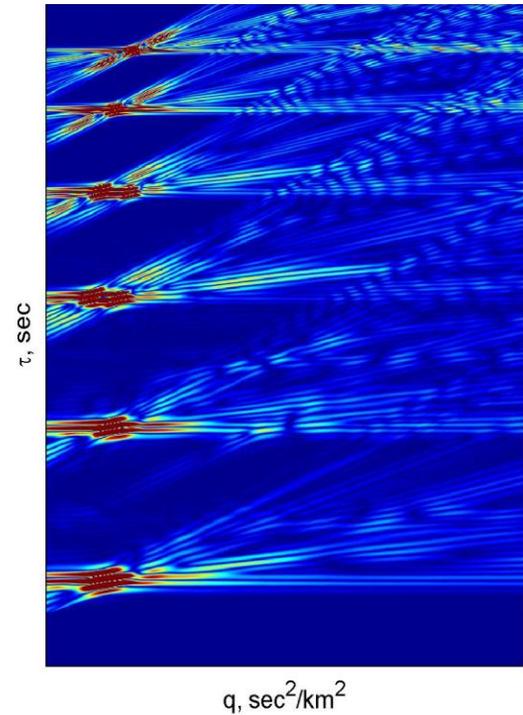


Спектр Радона

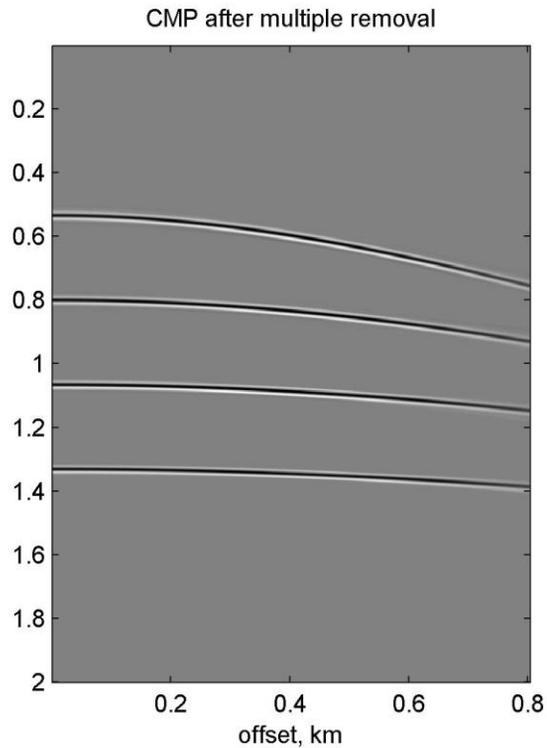
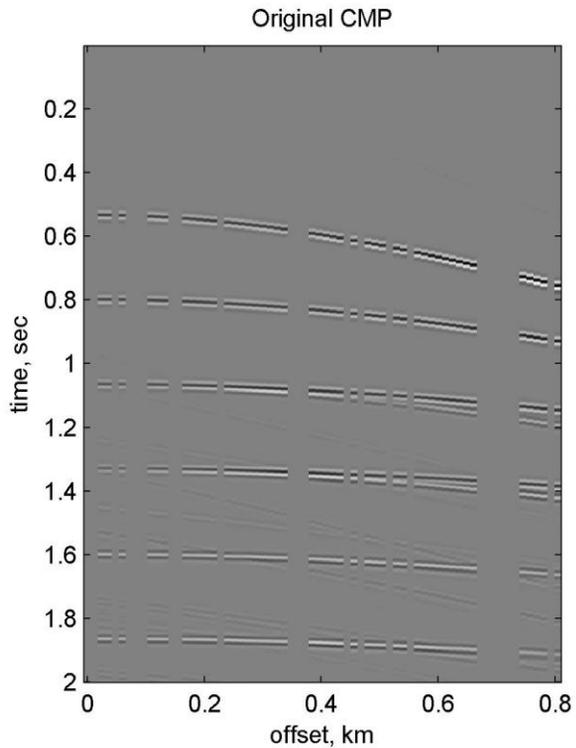
разреженная инверсия



стандартное преобразование



Интерполяция и подавление кратных



Структурные тензоры для определения осей синфазности

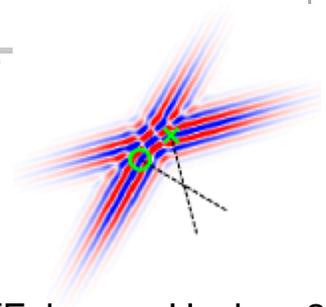
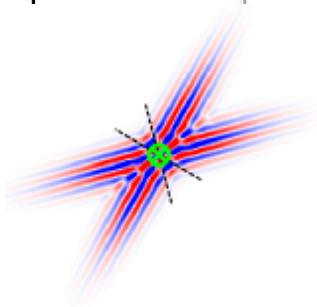
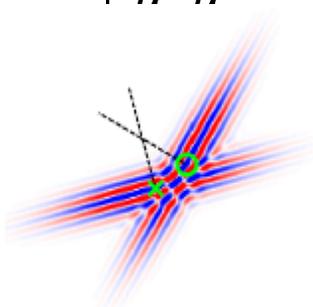
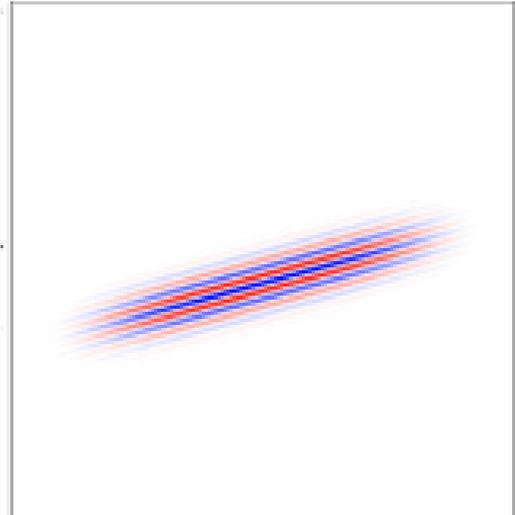
Определение осей синфазности

$$u(x, y)$$

$$\nabla u$$

$$Tu = \nabla u (\nabla u)^T =$$

$$= \begin{pmatrix} u_x^2 & u_x u_y \\ u_x u_y & u_y^2 \end{pmatrix}$$



Определение осей синфазности (2 интерферирующих волны)

$$u_0(x, y)$$

$$u(x, y, t) = \iint \hat{u}_0(\mathbf{k}) e^{2\pi i(\langle \mathbf{x}, \mathbf{k} \rangle - t \|\mathbf{k}\|)} dk_x dk_y$$

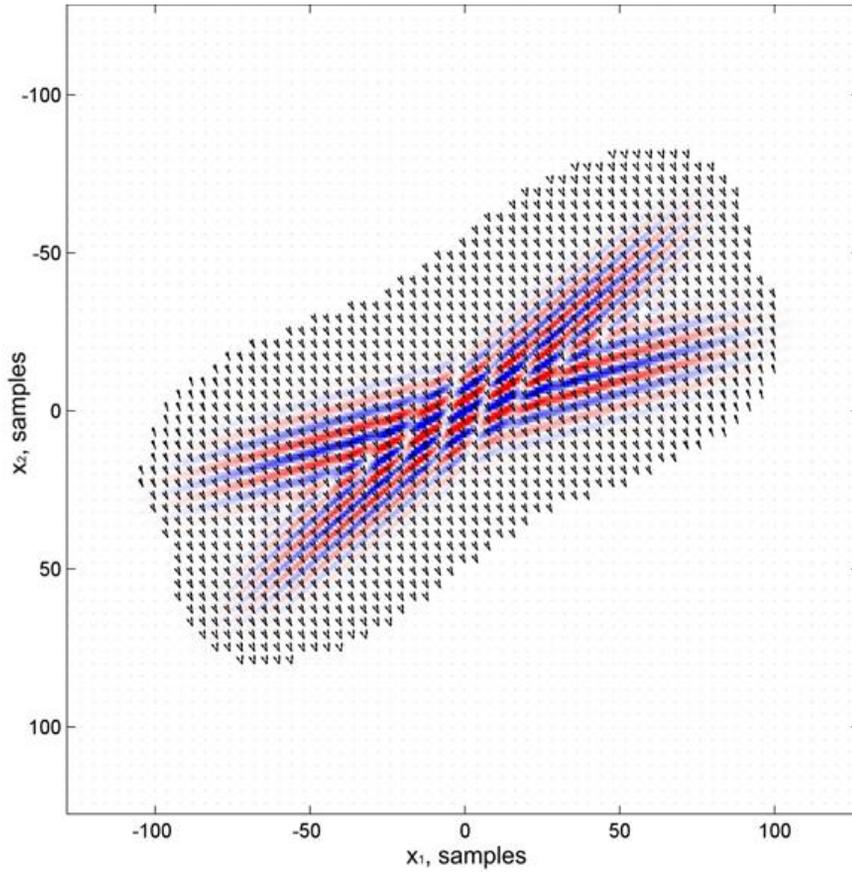
$$Tu = \begin{pmatrix} u_x^2 & u_x u_y & u_x u_t \\ u_y u_x & u_y^2 & u_y u_t \\ u_t u_x & u_t u_y & u_t^2 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{x} = (x, y)$$

$$\mathbf{k} = (k_x, k_y)$$

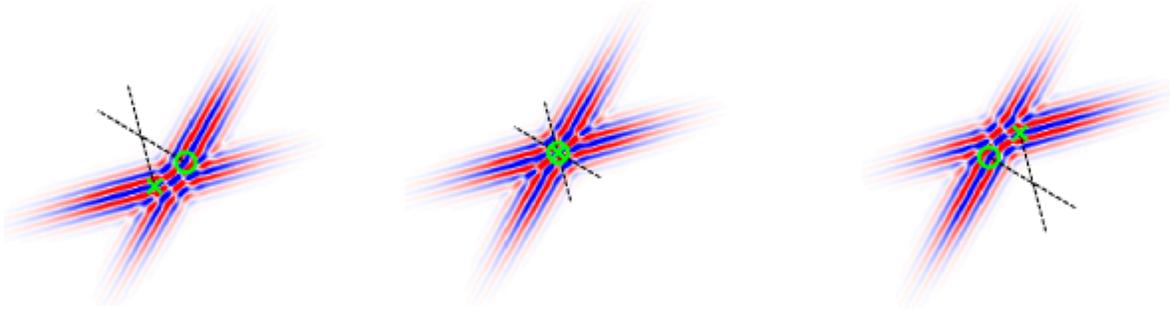
$$(\varphi_1(x, y), \varphi_2(x, y))$$

Направления (синфазности) в данных и разделение полей по направлениям

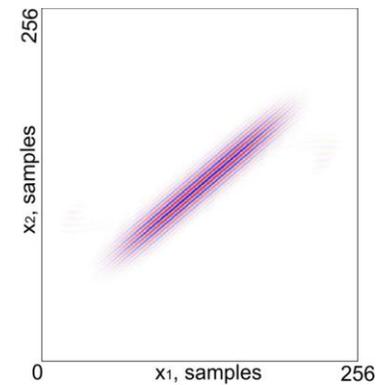
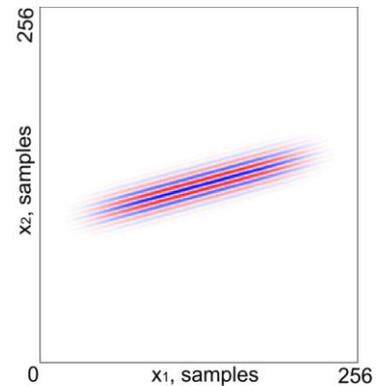
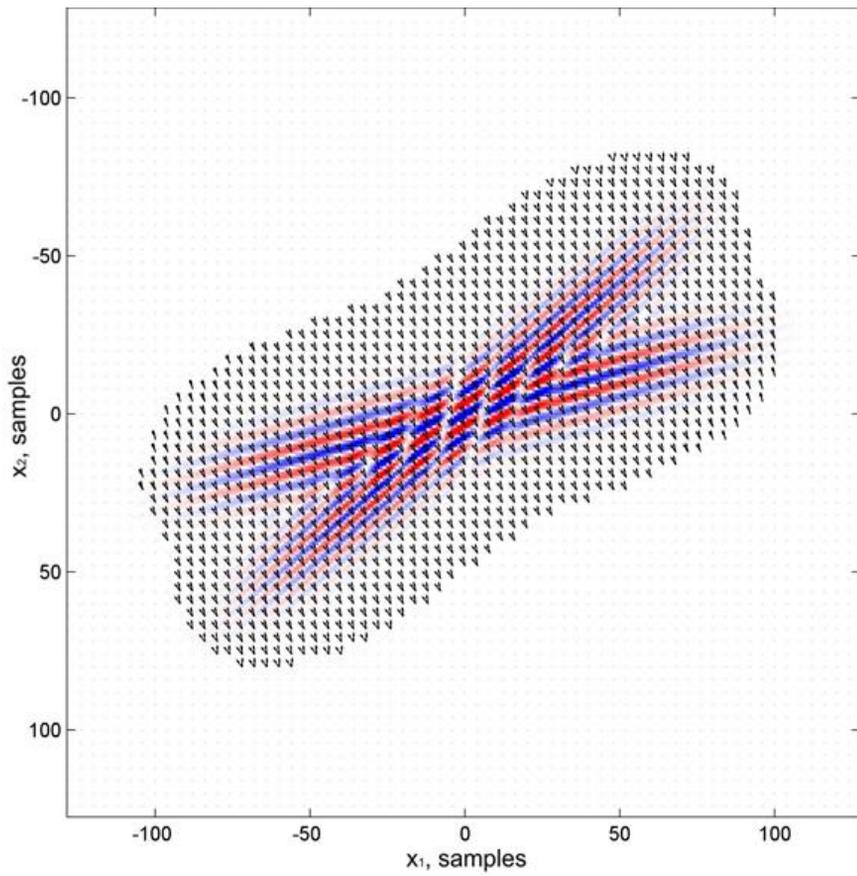


Разделение полей

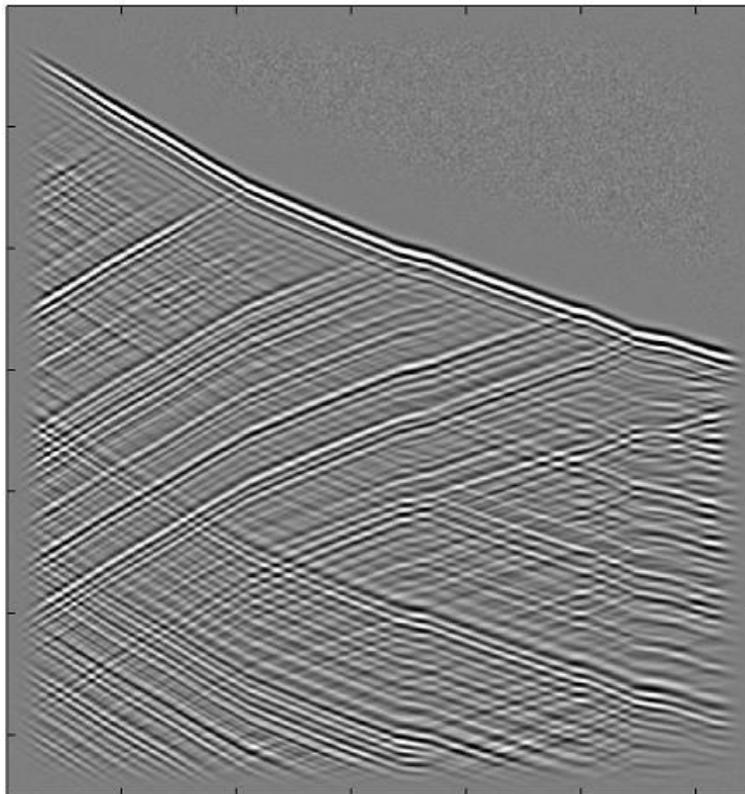
$$L_{\varphi}u_0(x, y) = \int \left(\iint \hat{u}_0(\mathbf{k}) e^{2\pi i(\langle \mathbf{x}, \mathbf{k} \rangle - t\|\mathbf{k}\| + \langle \mathbf{n}(\varphi(\mathbf{x})), \mathbf{k} \rangle)} dk_x dk_y \right) e^{-\beta t^2} dt$$



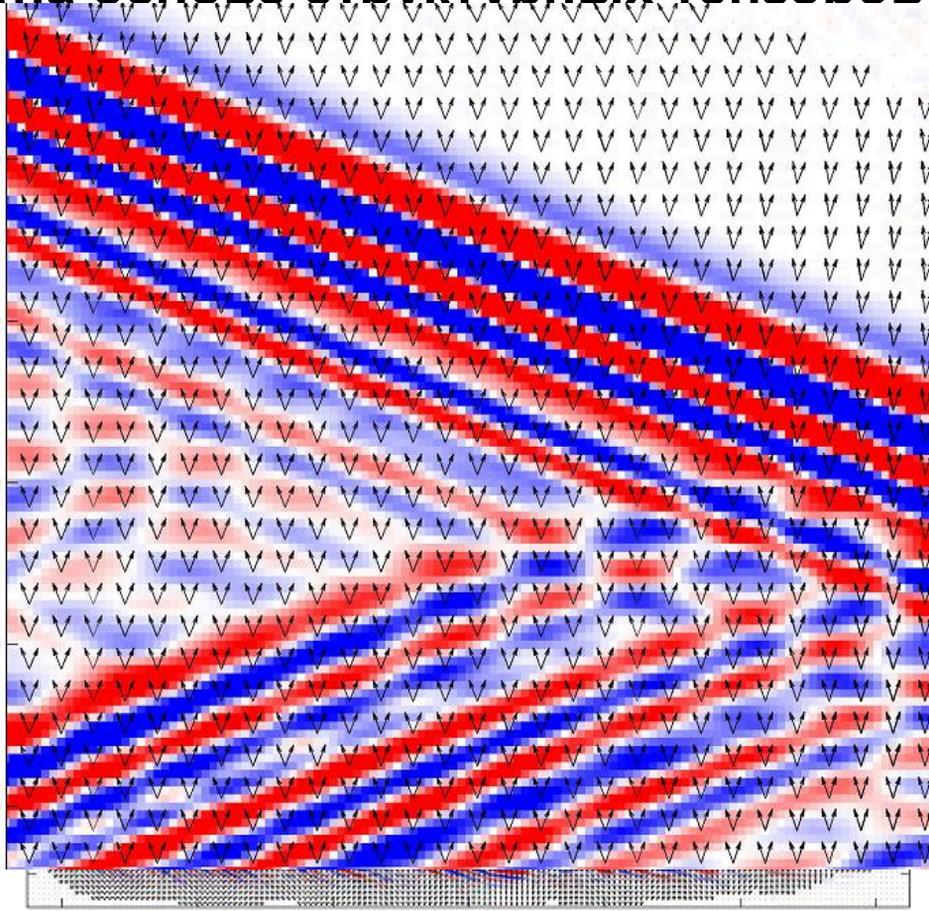
Разделение полей



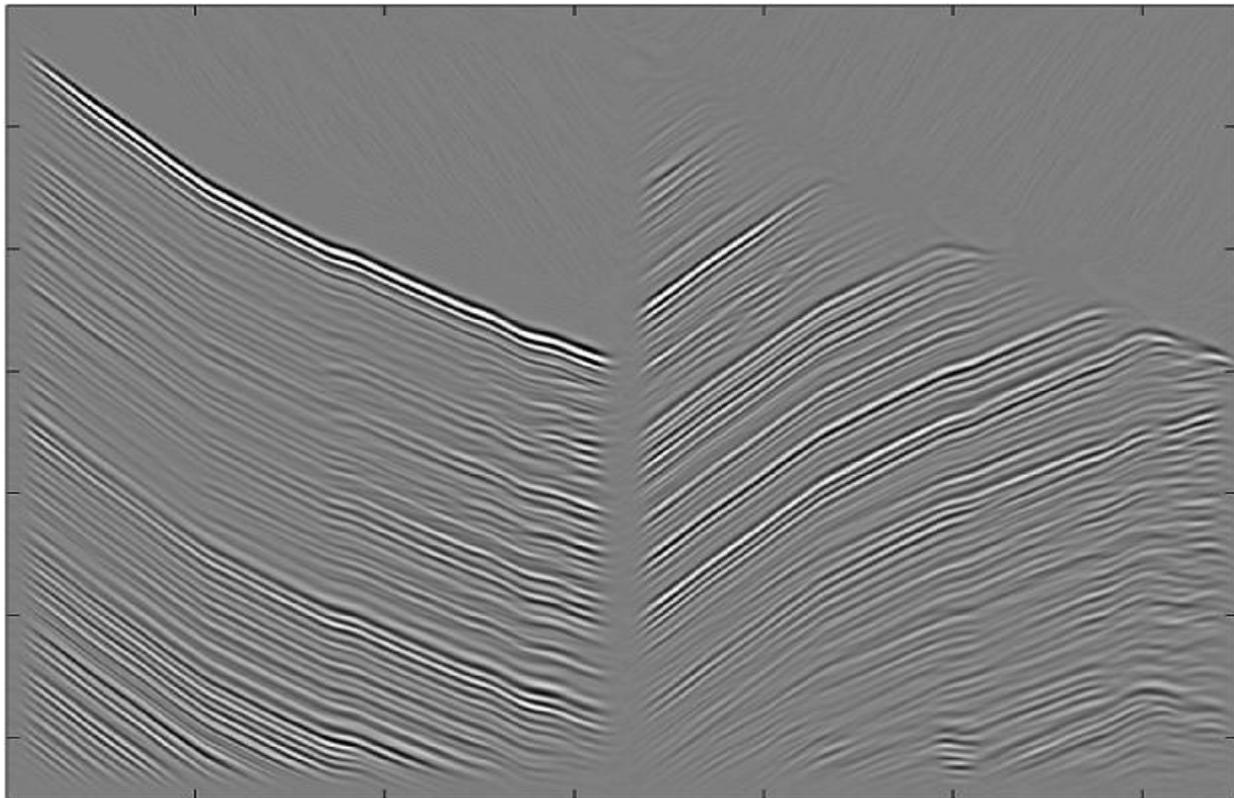
Данные для marmousi (ВСП)



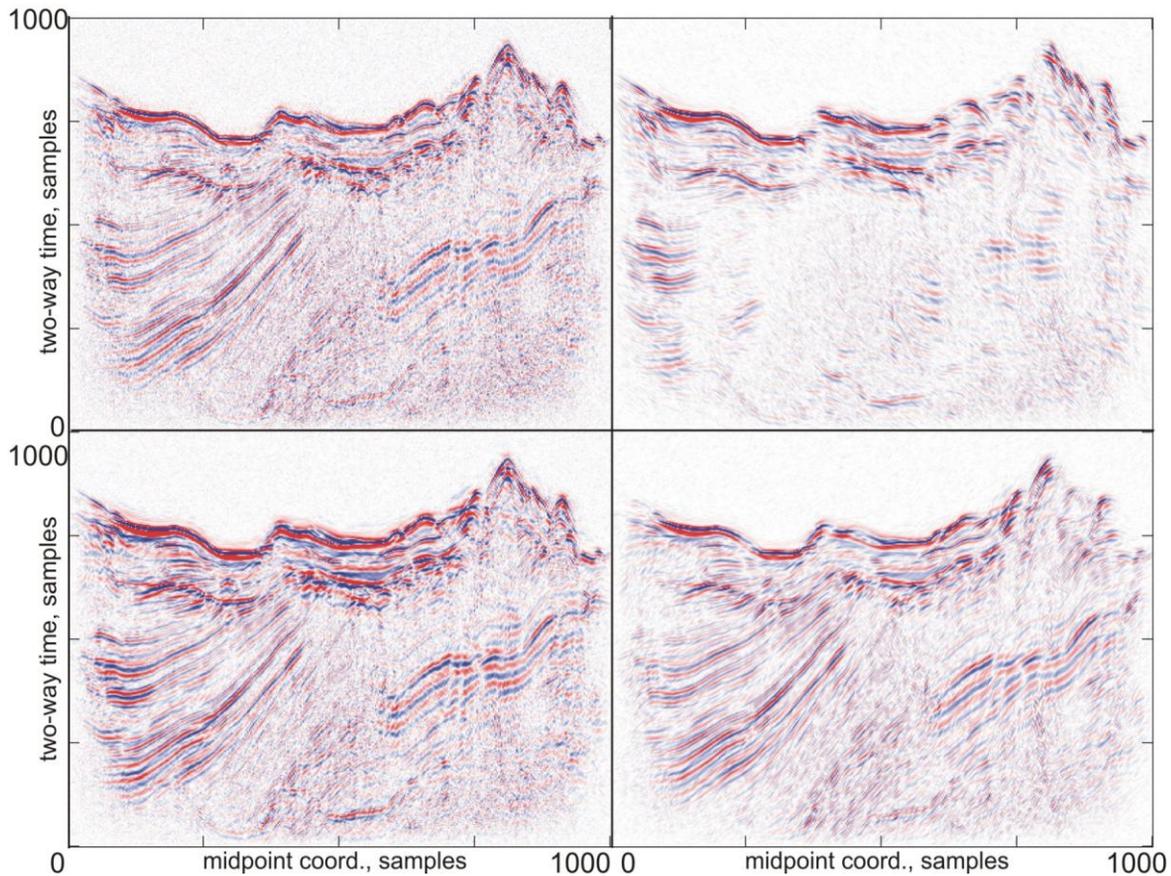
Направления в данных (на основе структурных тензоров)



Разделение полей



Разделение изображений



Выводы

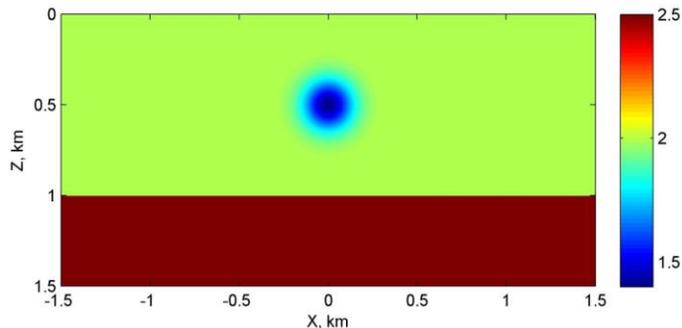
Рассмотрены процедуры обработки и анализа данных на основе быстрого преобразования Фурье на нерегулярных сетках (USFFT):

- разложение данных по гауссовым волновым пакетам и приложения
- быстрое высокоразрешающее преобразование Радона и приложения
- структурные тензоры для определения наклонов и разделения полей

Спасибо за внимание!

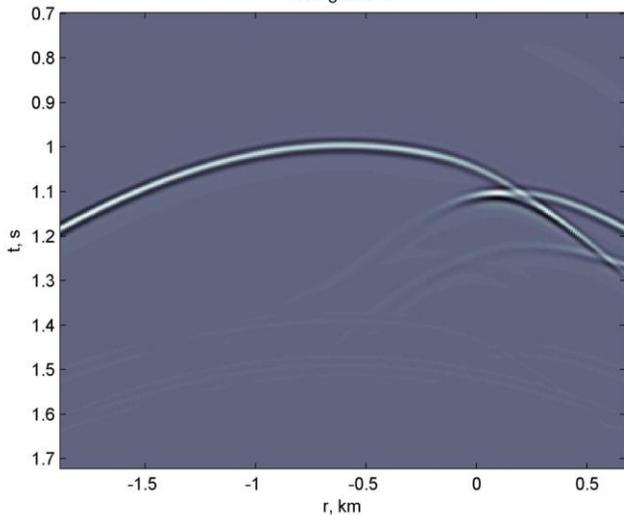
**Сейсмическая миграция,
миграционный скоростной анализ
(быстрые алгоритмы на основе
гауссовых волновых пакетов)**

Модель с низкоскоростной аномалией

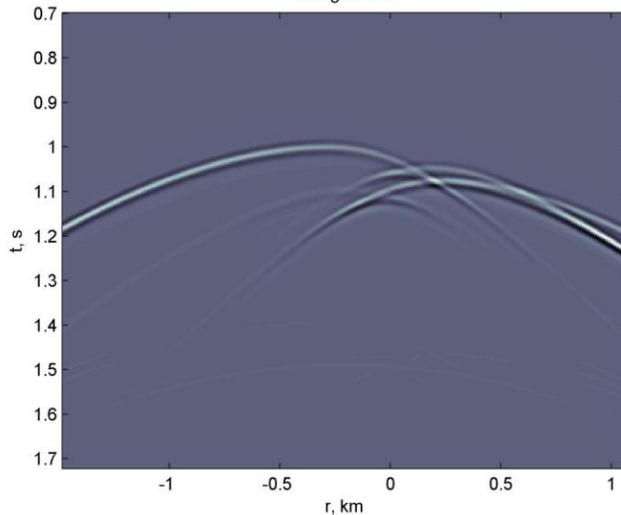


12 shot gathers
(every 100 m)

Shotgather 1

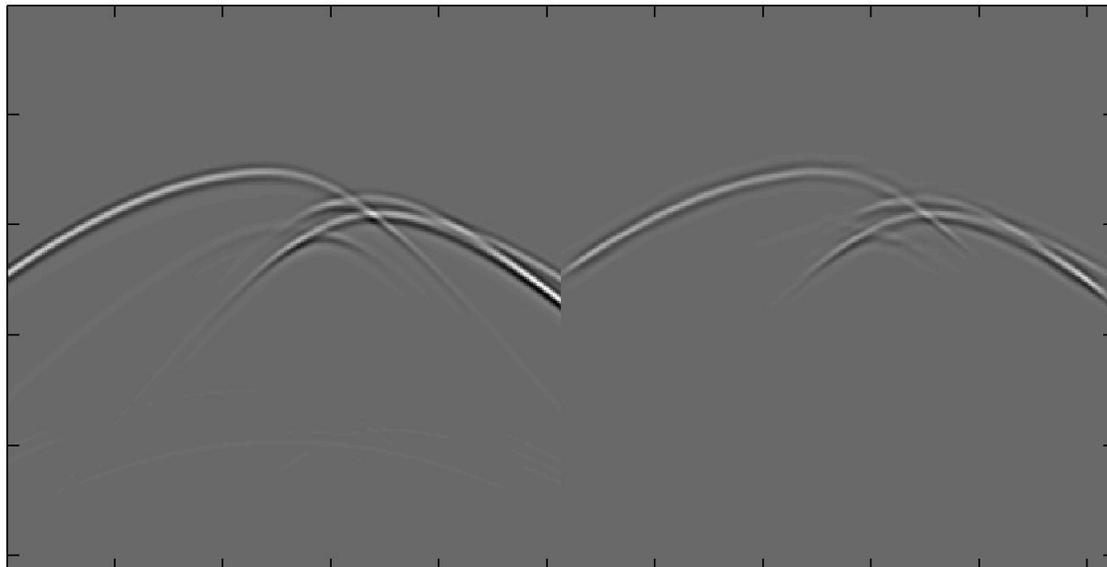


Shotgather 5



Разложение данных

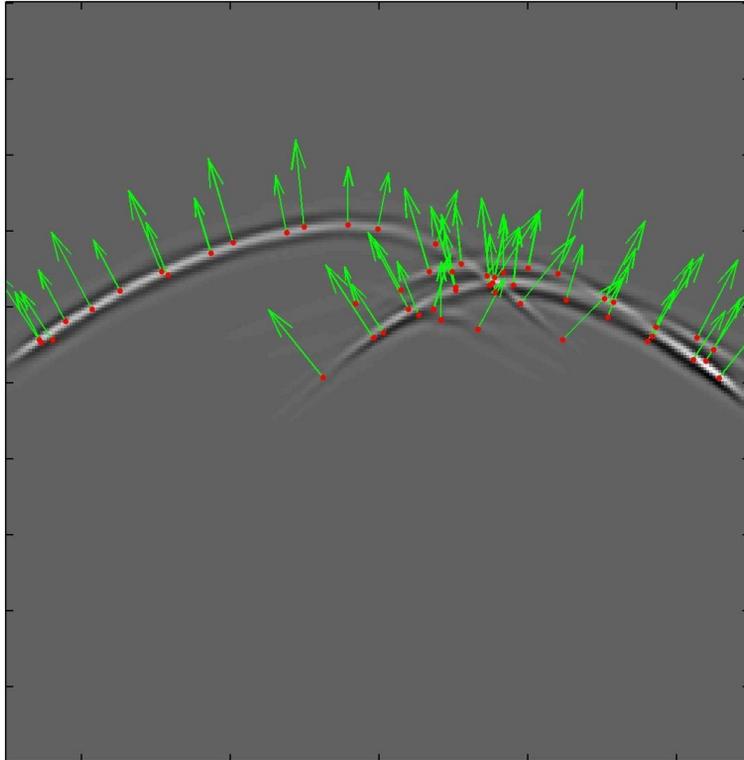
Shotgather 5



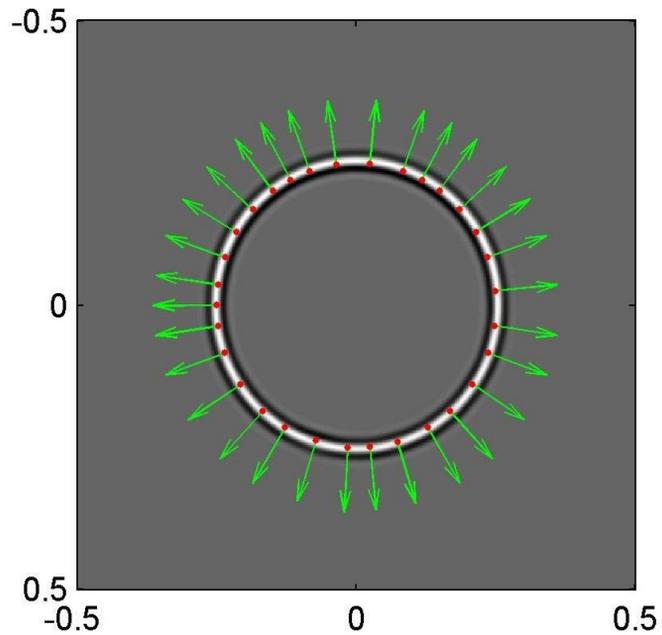
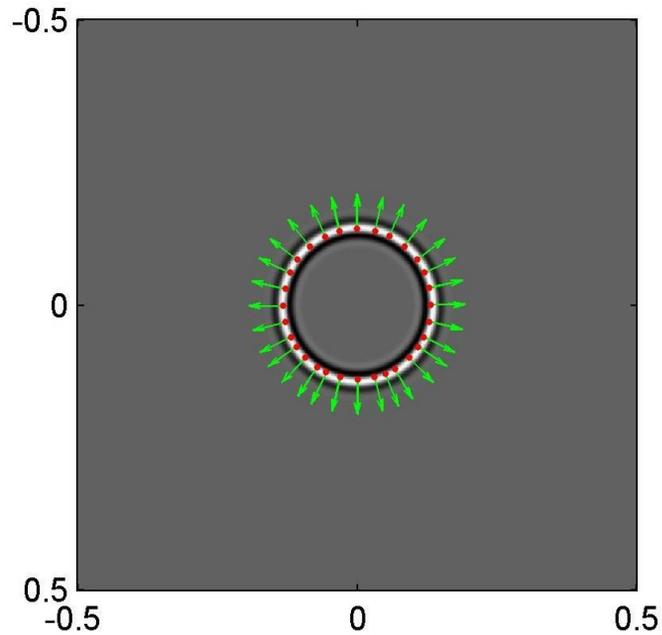
original

~ 50 flat GWP's

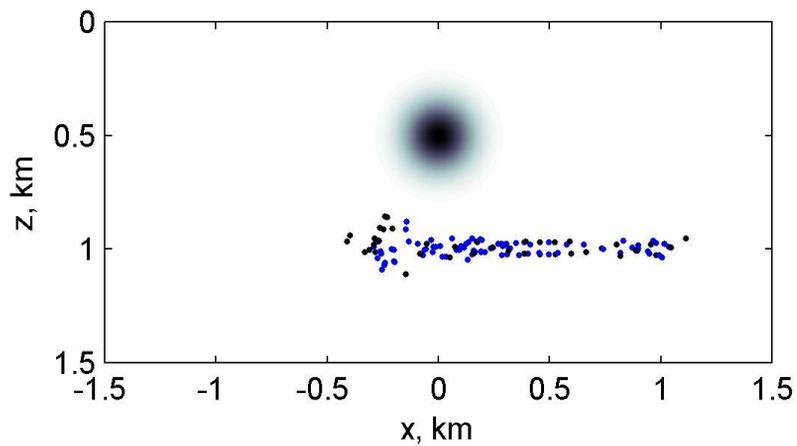
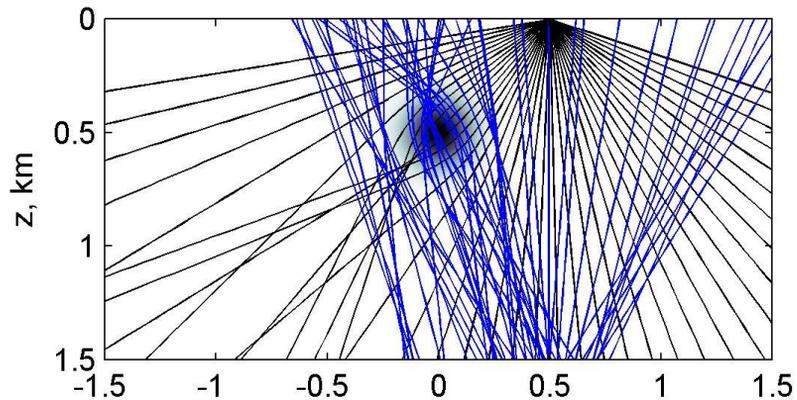
Shotgather 5



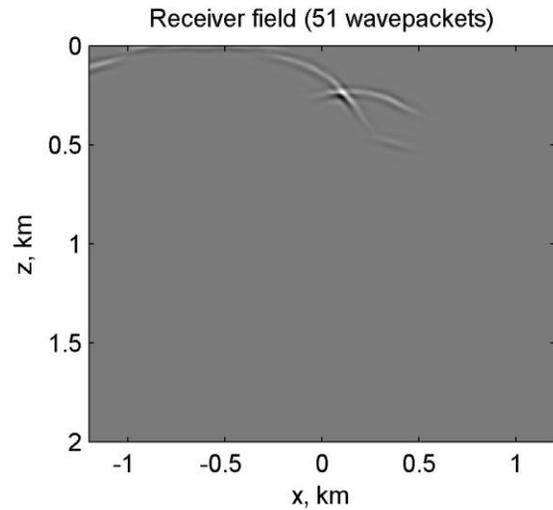
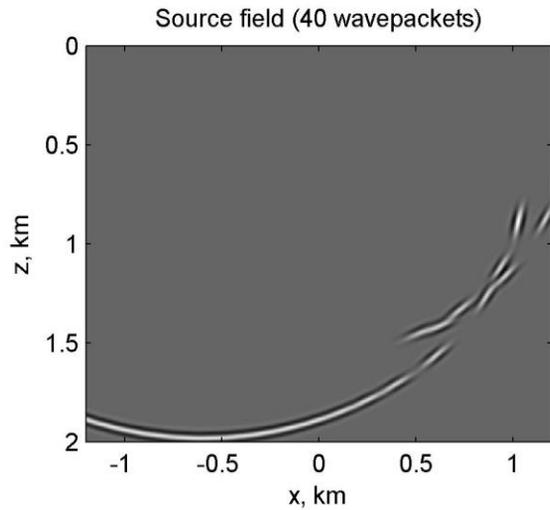
Propagation



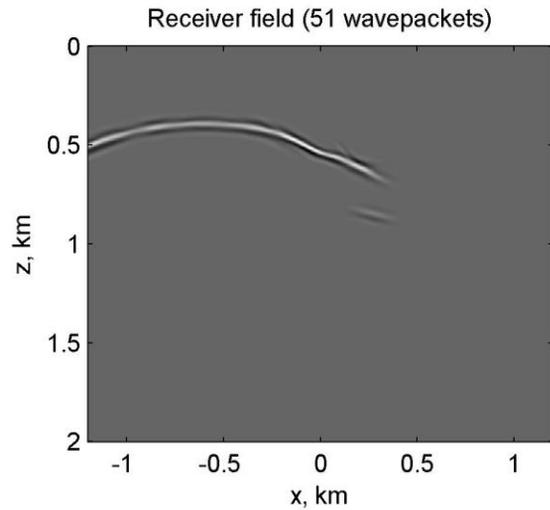
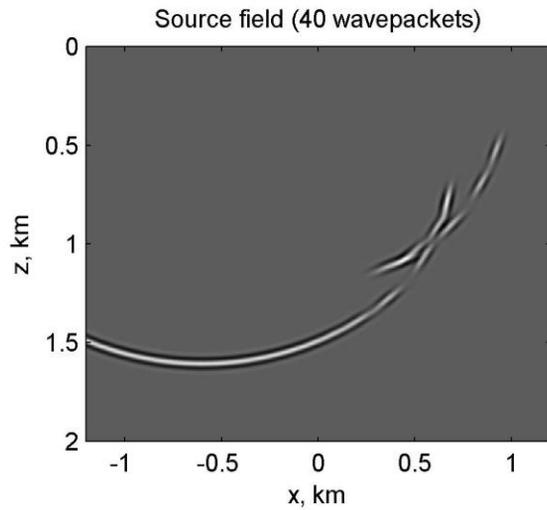
Shotgather 12, 170 packets



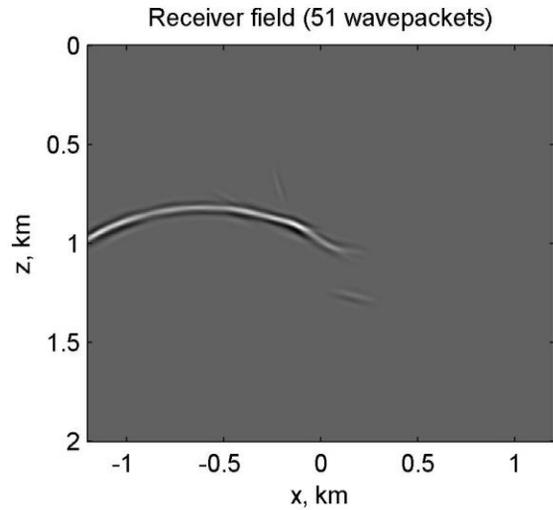
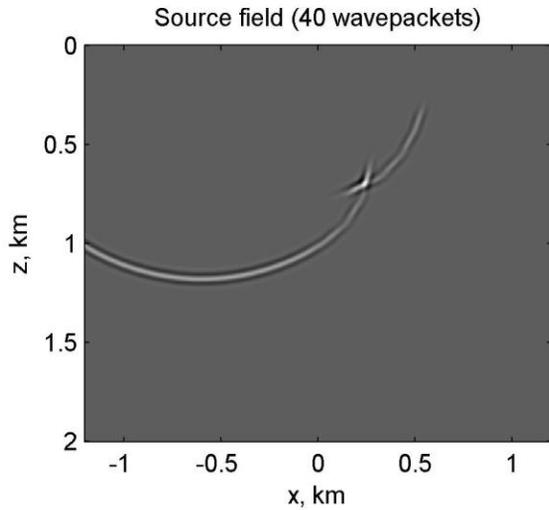
Snapshots for shotgather 1



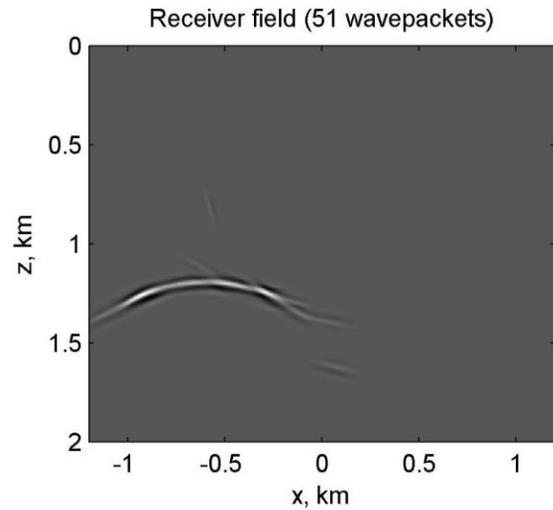
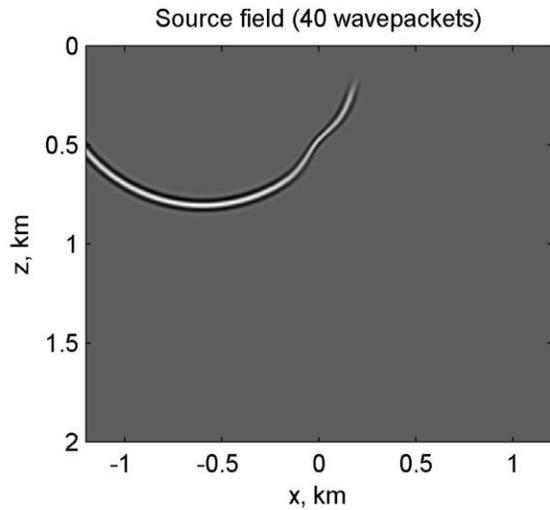
Snapshots for shotgather 1



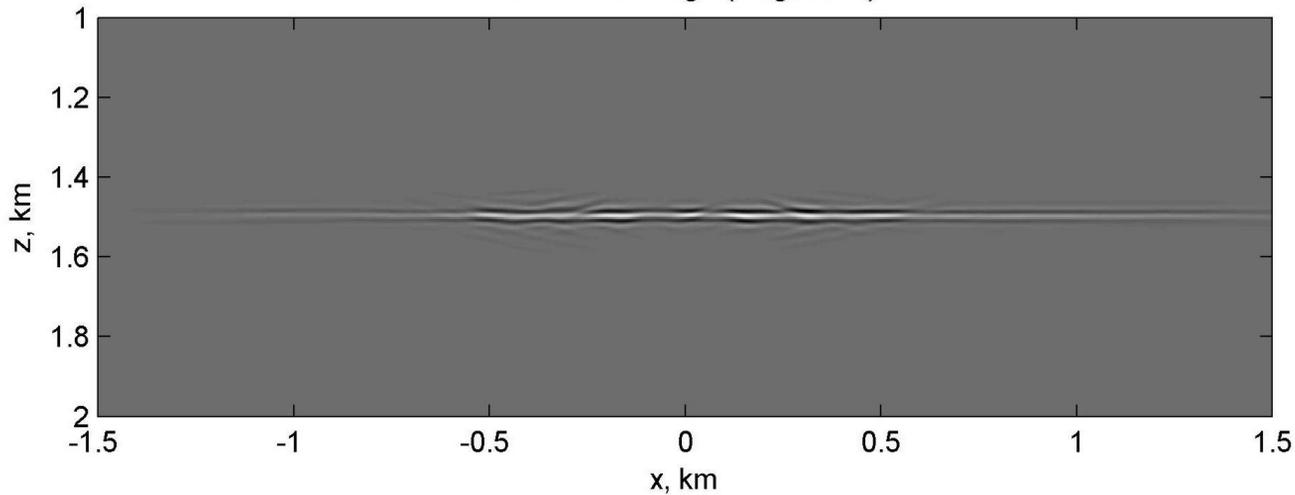
Snapshots for shotgather 1



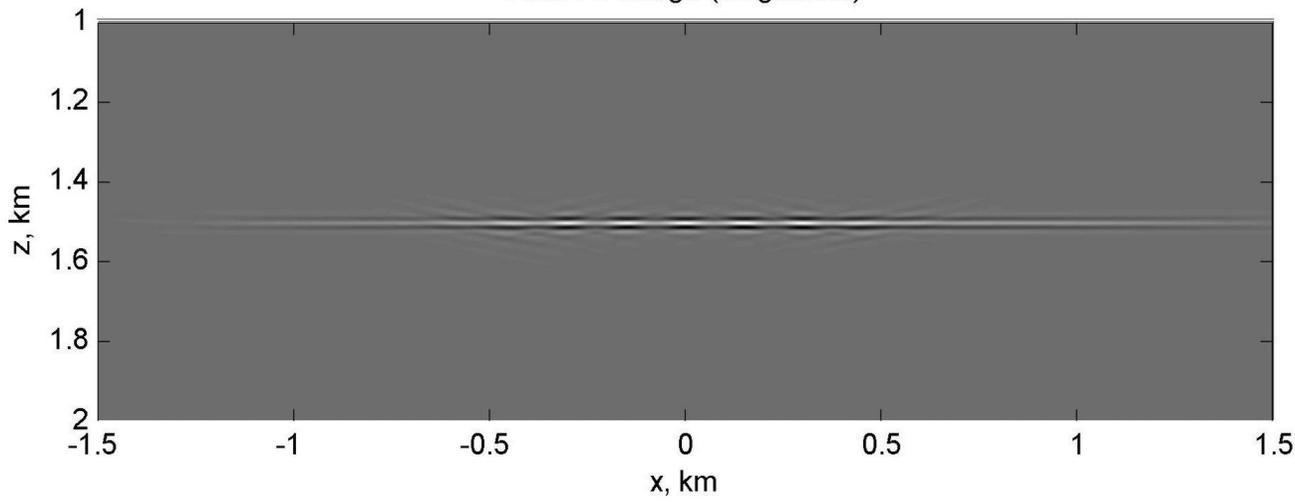
Snapshots for shotgather 1



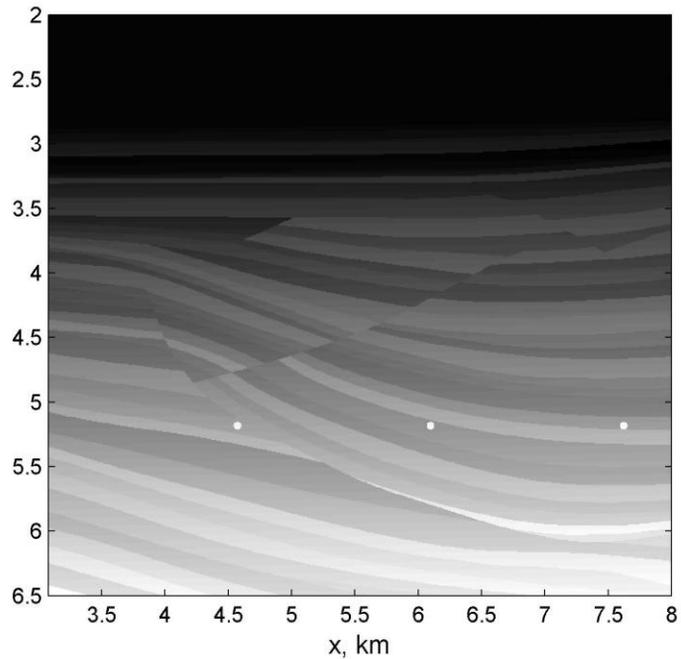
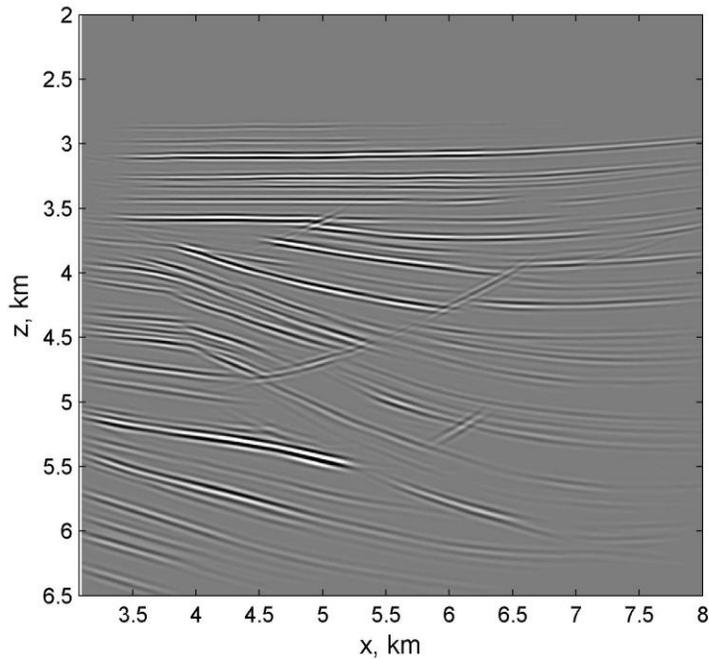
Final GWP image (12 gathers)



Final FD image (12 gathers)



Миграция в обратном времени



СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ
РАЗЛИЧНЫХ СТРАТЕГИЙ
РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ АЛГОРИТМА
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ НА
НЕРЕГУЛЯРНЫХ СЕТКАХ

Выполнил: Матвеев А.С., НГУ ФИТ, 4 курс
Руководители: Дучков А.А., Романенко А.А.

Transforms

$$u(\mathbf{x}) = \sum_{\gamma} \tilde{u}_{\gamma} \varphi_{\gamma}(\mathbf{x})$$

- basis (frame)
- efficient decomposition/reconstruction



Decomposition/reconstruction



image $u(\mathbf{x})$

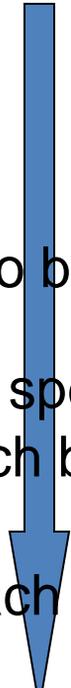
FFT

dividing into boxes

Interpolate spectrum
for each box

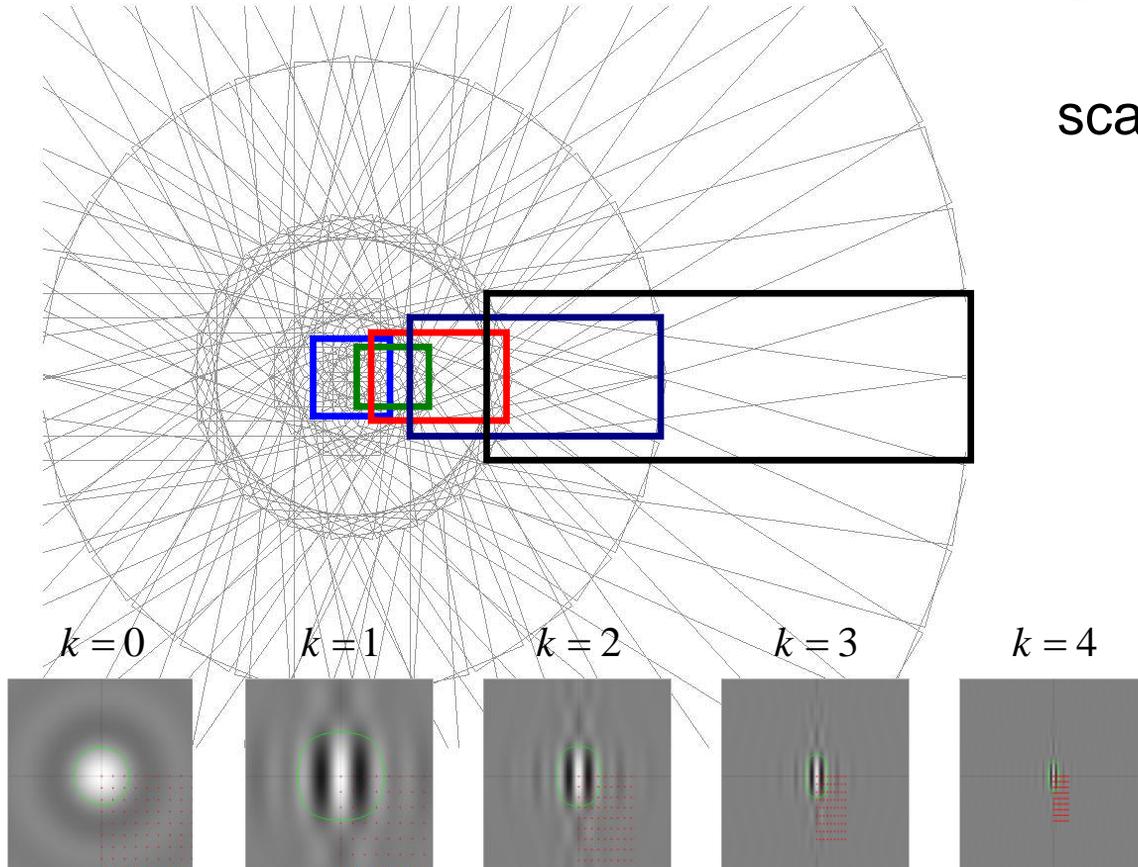
IFFT on each box

coefficients \tilde{u}_γ

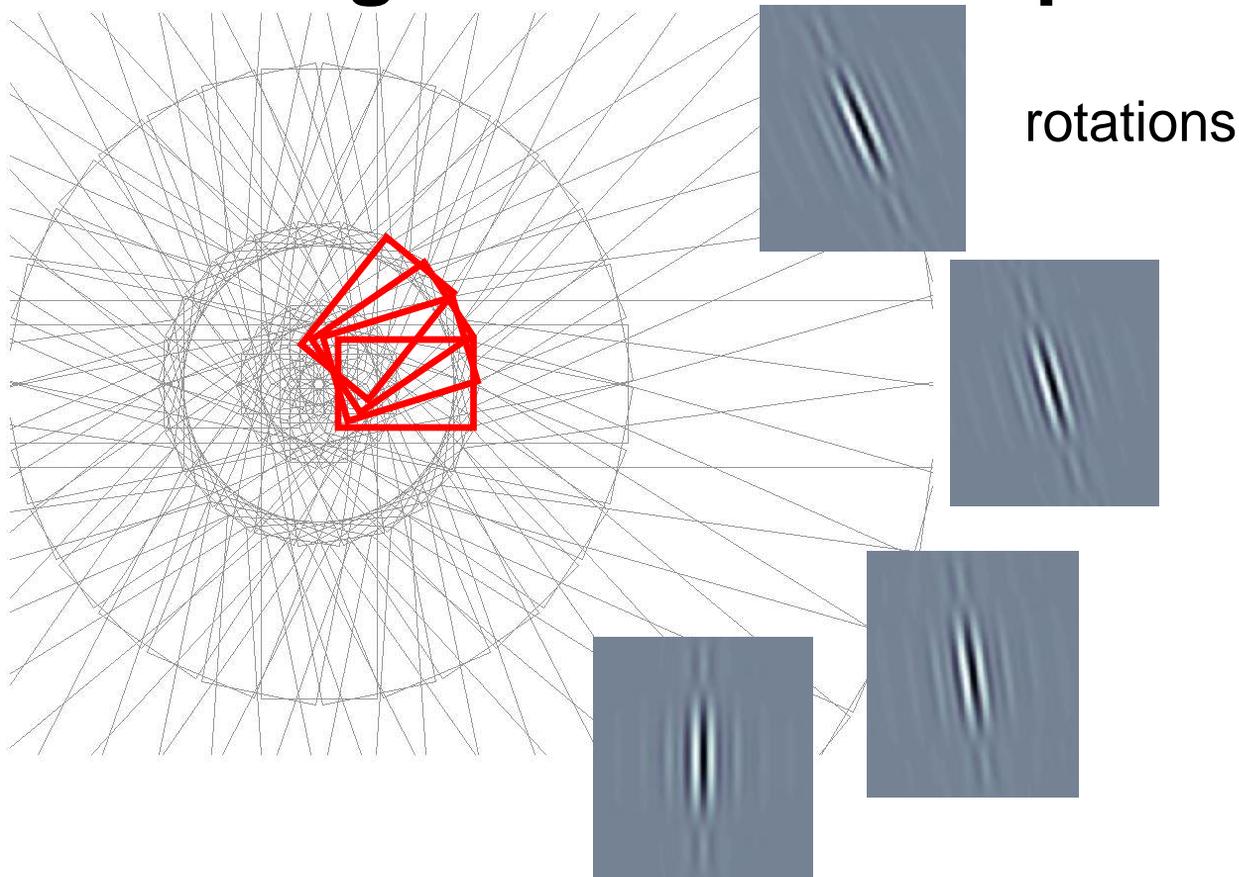


Box tiling of the Fourier space

scales

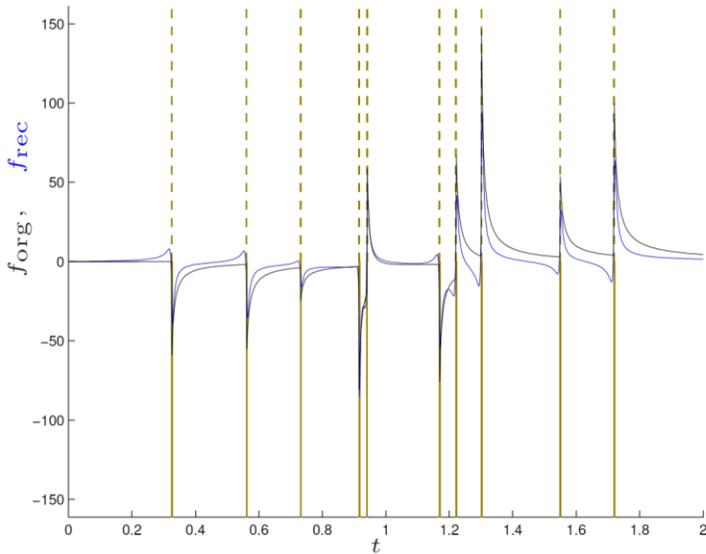


Box tiling of the Fourier space

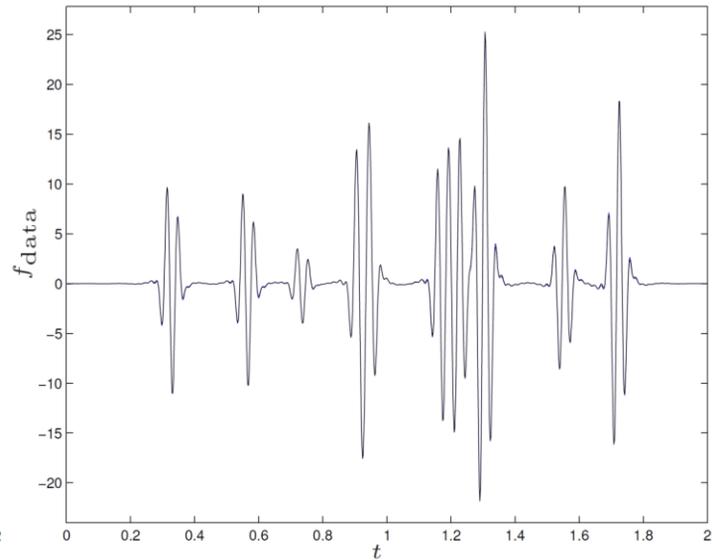


Акустическая инверсия (сверточная модель)

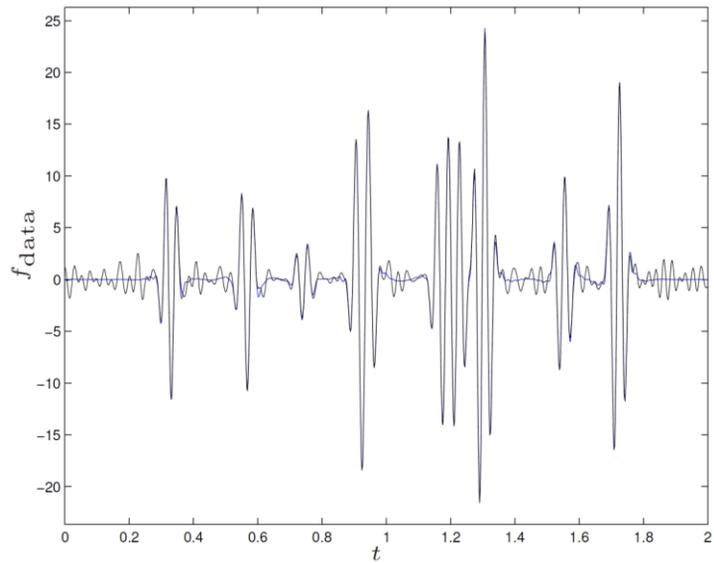
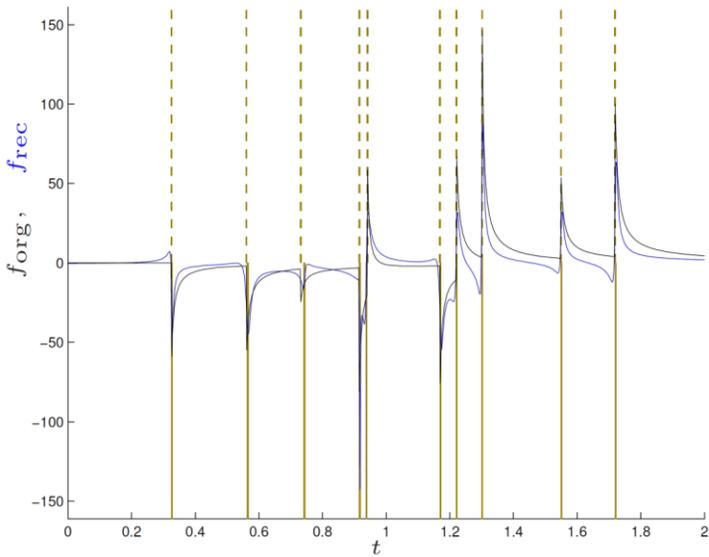
отражательная модель

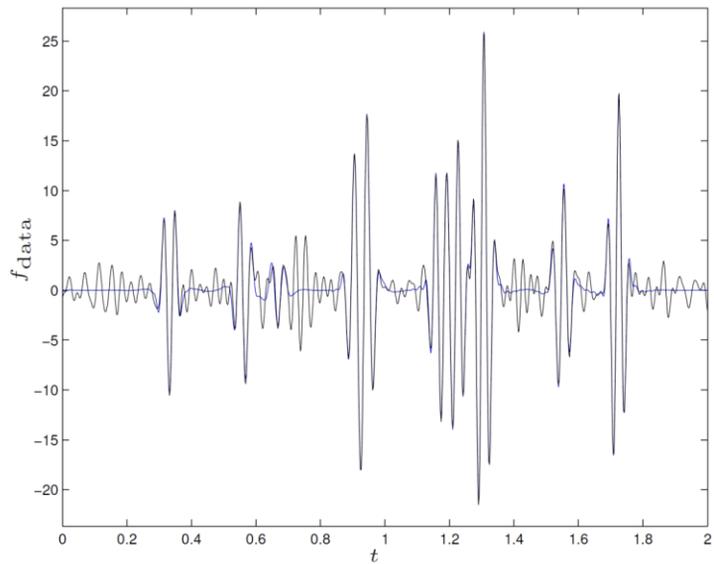
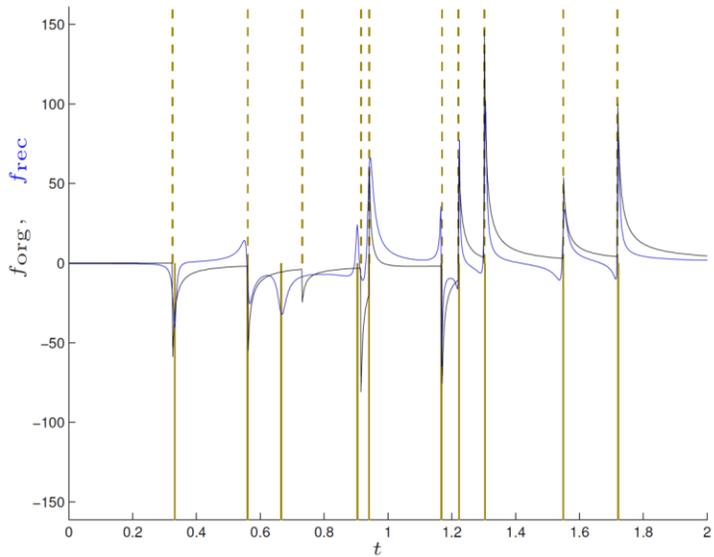


сейсмограмма

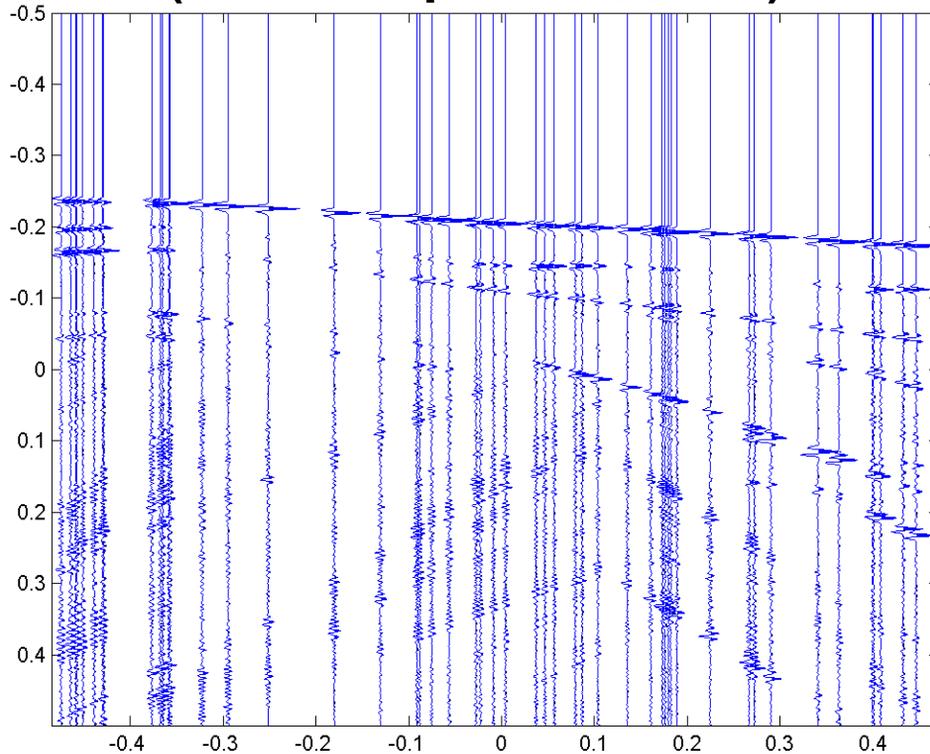


$$f_{\text{data}}(t) = f(t) * s(t) + n(t)$$

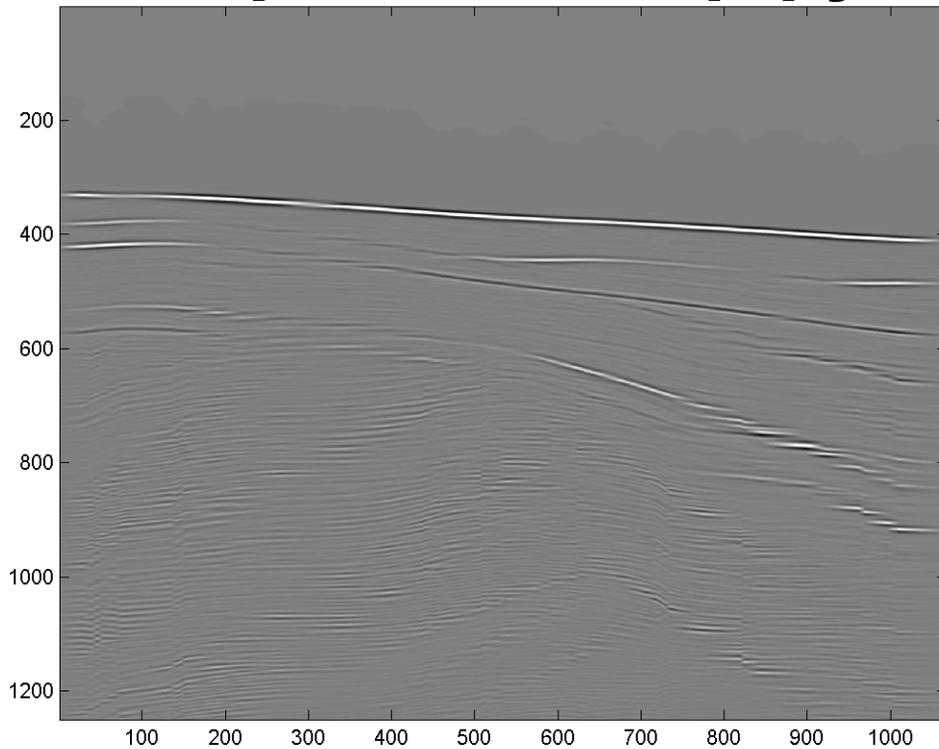




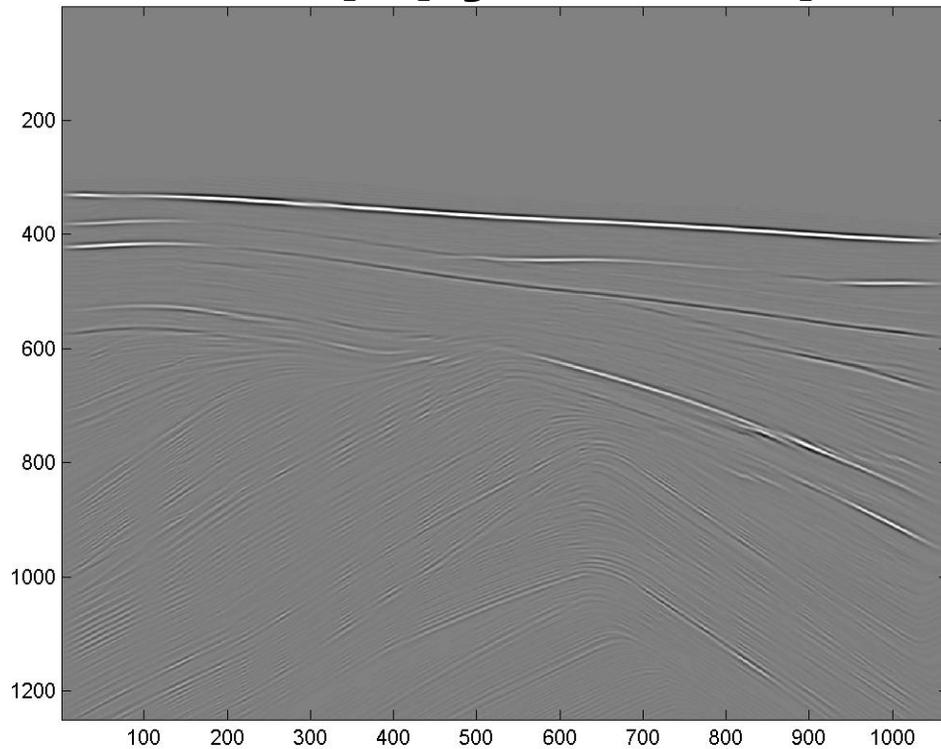
Интерполяция данных (знание производных)



Анизотропная диффузия



Изотропная диффузия с производными



Истинные данные

