

АДАПТИВНЫЙ МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ СКОРОСТИ ИЗ PDV-ДАННЫХ

Аникин Н. Б.

РФЯЦ-ВНИИТФ, отделение экспериментальной физики, Снежинск

Фундаментальные проблемы обработки сигнала PDV:

- *Связь временного разрешения и точности для метода PDV*

$$\delta\nu \cdot \delta\tau \geq \lambda/8\pi$$

- *Предположение о наличии единственной частоты в спектре сигнала позволяет повысить точность в несколько раз при том же разрешении [1]*

- *Использование преобразования Гильберта формально позволяет получить фазу в зависимости от времени с произвольным разрешением по времени*

[1] D. H. Dolan, REV. OF SCI. INSTRUMENTS **81**, 053905 2010

Использование преобразование Гильберта для вычисления фазы PDV – сигнала.

ПРОБЛЕМЫ

- *Наличие в сигнале высших доплеровских гармоник*
- *Амплитуда доплеровской гармоники существенно меняется за время эксперимента*
- *Наличие в сигнале неизвестной «средней линии», далее называемой нулевой гармоникой – составляющей сигнала, с частотой существенно меньшей доплеровской*
- *Наличие в сигнале случайного шума*
- ***Оценки погрешности и временного разрешения***

Альтернативный подход. Очистка сигнала.

➤ Пусть теперь нам известна зависимость фазы от времени $\psi(t)$, тогда сигнал можно очистить, усреднив его по половине периода

$$\langle S \rangle_{\pi} (\psi_0) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} S(\psi_0 + \psi) d\psi$$

➤ Усреднив сигнал по периоду можно вычислить нулевую гармонику

$$S_0 = \langle S \rangle_{2\pi} (\psi_0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} S(\psi_0 + \psi) d\psi$$

➤ Таким образом, зная $\psi(t)$, можно существенным образом улучшить качество сигнала

$$S_c(\psi_0) = \langle S \rangle_{\pi} (\psi_0) - \langle S \rangle_{2\pi} (\psi_0)$$

Альтернативный подход. Очистка сигнала с использованием приближенной зависимости φ

- Пусть теперь нам известна приближенная зависимость фазы от времени $\varphi(t)$, тогда сигнал можно очистить, свернув его с некоторой ЧЁТНОЙ функцией $F(\varphi)$

$$\langle F(\varphi) * S(\varphi_0 + \varphi) \rangle_{2\pi n} = \int_{-\pi n}^{+\pi n} F_n(\varphi) S(\varphi_0 + \varphi) d\varphi$$

- При этом можно найти такую функцию $F(\varphi)$ и интервал $[+\pi n, -\pi n]$, которые позволят очистить экспериментальный сигнал, от всех доплеровских гармоник, включая и нулевую, а также от составляющих случайного шума, спектрально удалённого от доплеровской гармоники.
- Отклонение очищенного сигнала от истинной первой гармоники будет второго порядка малости от величин $\frac{\partial A}{\partial \varphi}$ и $\varepsilon = (\psi - \varphi)$, то есть очищенный сигнал почти не отличается от 1-ой гармоники.

$$F_n(\varphi) = f_0 \cos \varphi + f_{-1} \cos \left(\varphi - \frac{\varphi}{n} \right) + f_{+1} \cos \left(\varphi + \frac{\varphi}{n} \right)$$

Альтернативный подход. Очистка сигнала с использованием приближенной зависимости φ_a

➤ Если свернуть экспериментальный сигнал на интервал $[\pi n, -\pi n]$ с НЕЧЁТНОЙ функцией $F_n^T(\varphi)$ следующего общего вида:

$$F_n^T(\varphi) = f_0^T \sin \varphi + f_{-1}^T \sin \left(\varphi - \frac{\varphi}{n} \right) + f_{+1}^T \sin \left(\varphi + \frac{\varphi}{n} \right)$$

➤ То можно получить сигнал, квадратурный по отношению к приближённой первой гармонике:

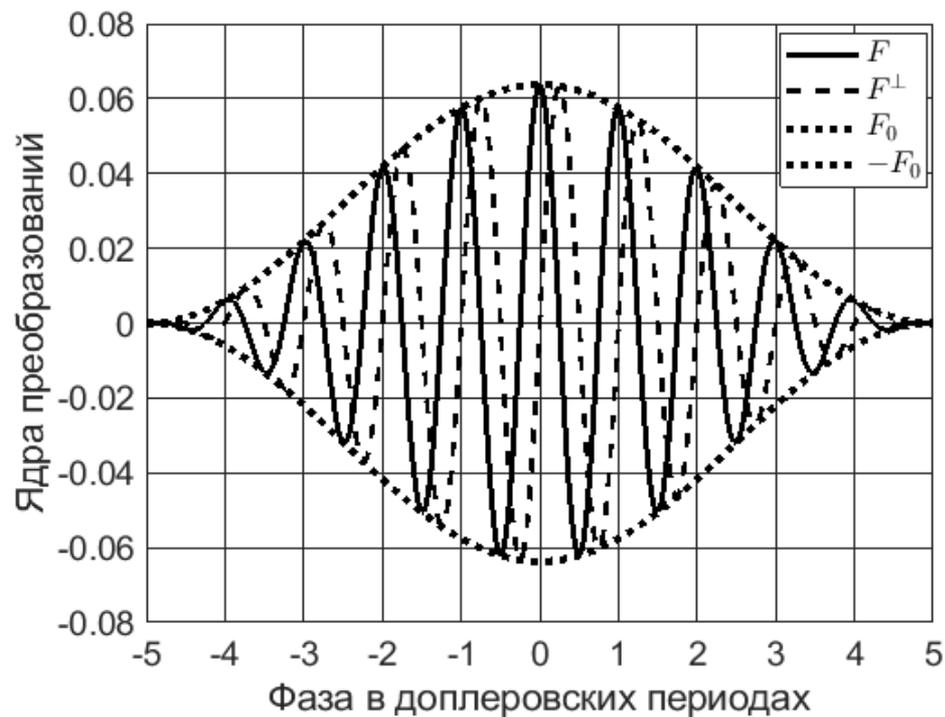
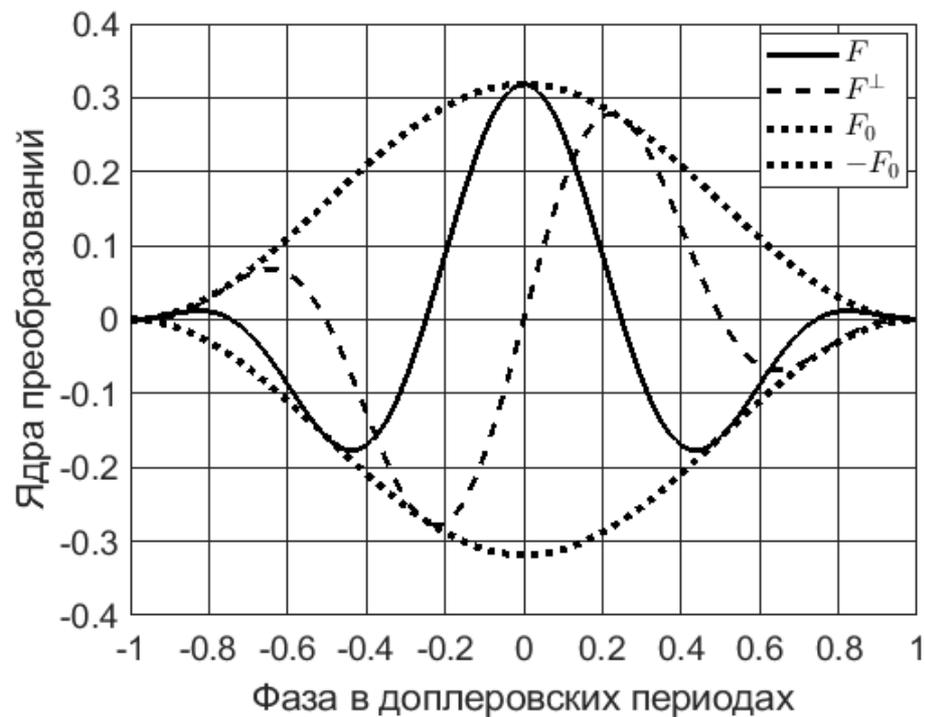
$$S_1^T(\varphi_0) = \langle F_n^T(\varphi) * S(\varphi_0 + \varphi) \rangle_{2\pi n} = \int_{-\pi n}^{+\pi n} F_n^T(\varphi) S(\varphi_0 + \varphi) d\varphi$$

➤ Отклонение полученного сигнала от сигнала квадратурного по отношению к истинной первой гармонике будет второго порядка малости от величин $\frac{\partial A}{\partial \varphi}$ и $\varepsilon = (\psi - \varphi)$.

Альтернативный подход. Ядра преобразований

$n=2$

$n=10$



Альтернативный подход. Вычисление фазы

➤ Приближённую доплеровскую гармонику и квадратурный по отношению к ней сигнал удобно представить в комплексном виде:

$$\begin{aligned}s_1(\varphi) &= S_1(\varphi) + i S_1^T(\varphi) \\ s_1^*(\varphi) &= S_1(\varphi) - i S_1^T(\varphi)\end{aligned}$$

➤ Квадрат амплитуды сигнала:

$$A_1^2(\varphi) = s_1^* s_1(\varphi)$$

➤ Истинная доплеровская фаза:

$$\frac{d\psi}{d\varphi} = \sqrt{\frac{S_1^{*'} S_1' - A_1'^2}{S_1^* S_1}}$$

Альтернативный подход. Вычисление фазы

➤ Квадрат погрешности определения производной фазы и квадрат относительной погрешности определения скорости :

$$D[\psi'](\varphi) \approx \frac{\pi D_\omega}{2A_1^2(\varphi)} \int_{-\pi n}^{+\pi n} [F_0'(\theta) + \ln(A_1)'(\varphi)F_0(\theta)]^2 \omega_D(\varphi + \theta) d\theta$$

➤ Квадрат погрешности в приближении постоянства доплеровской частоты на интервале $[\pi n, -\pi n]$:

$$D[\psi'](\varphi) \approx \frac{D_\omega \omega_D(\varphi)}{2n^3 A_1^2(\varphi)} \{1 + 3n^2 [\ln(A_1)']^2(\varphi)\}$$

Альтернативный подход. Вычисление фазы

➤ Приближённое решение с учётом погрешности. Контроль $\varepsilon' = \psi' - 1$:

$$\psi'_a(\varphi) \approx [\psi'(\varphi) - 1] \sqrt{1 - \frac{D[\psi'](\varphi)}{[\psi'(\varphi) - 1]^2}}$$

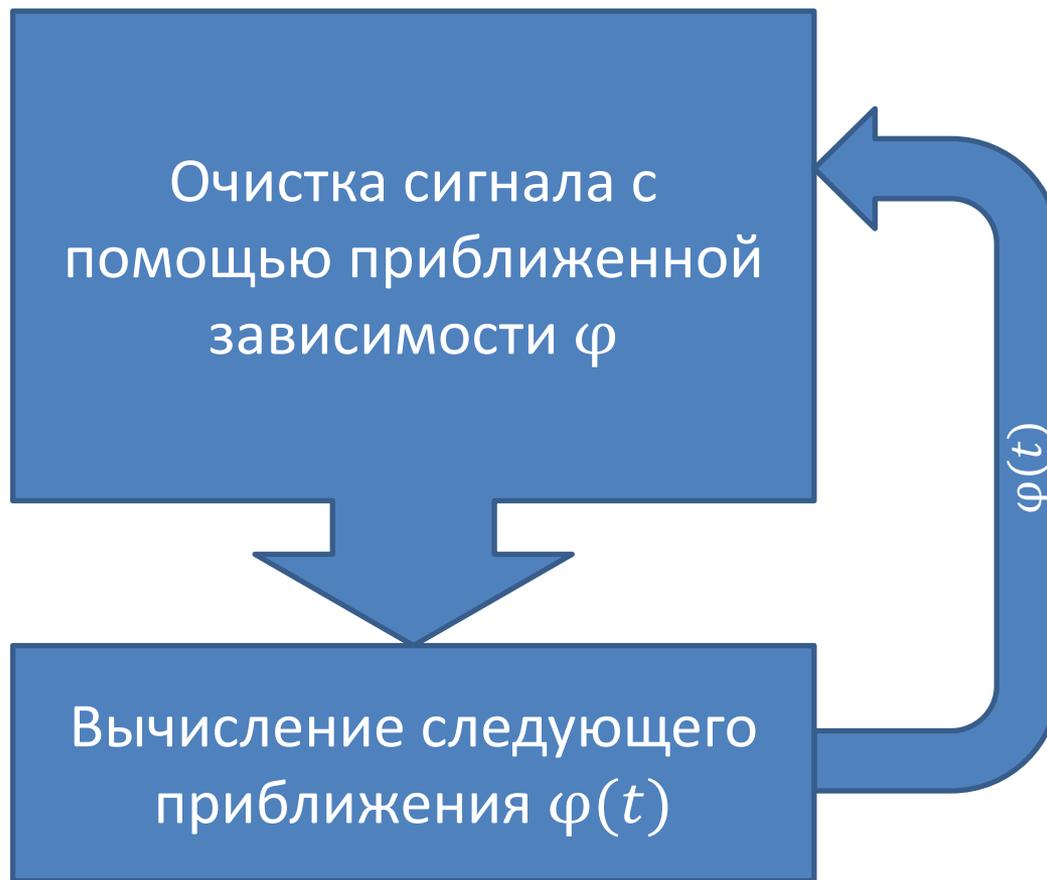
➤ Регуляризованное решение:

$$\psi'_r(\varphi) \approx \begin{cases} \psi'_a(\varphi) & \text{если } [\psi'(\varphi) - 1]^2 > rD[\psi'](\varphi) \\ 0 & \text{если } [\psi'(\varphi) - 1]^2 \leq rD[\psi'](\varphi) \end{cases} \quad r = 2 \div 3$$

➤ Доплеровская фаза:

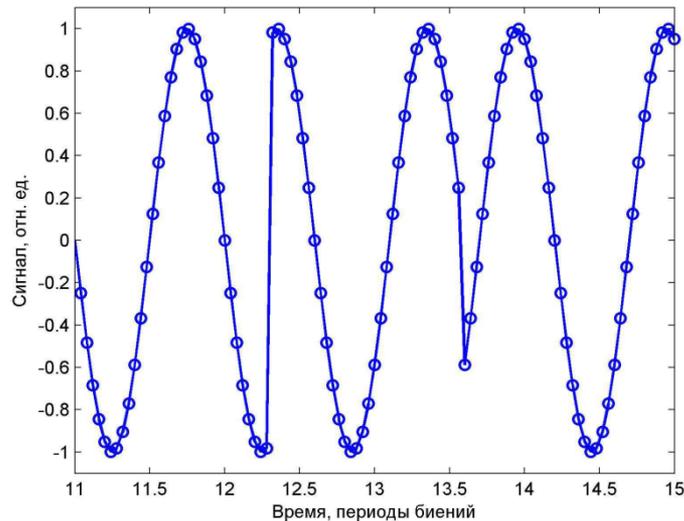
$$\psi(\varphi) \approx \varphi + \int_{\varphi_-}^{\varphi} \psi'_r(\tilde{\varphi}) d\tilde{\varphi}$$

Альтернативный подход. Алгоритм вычисления фазы

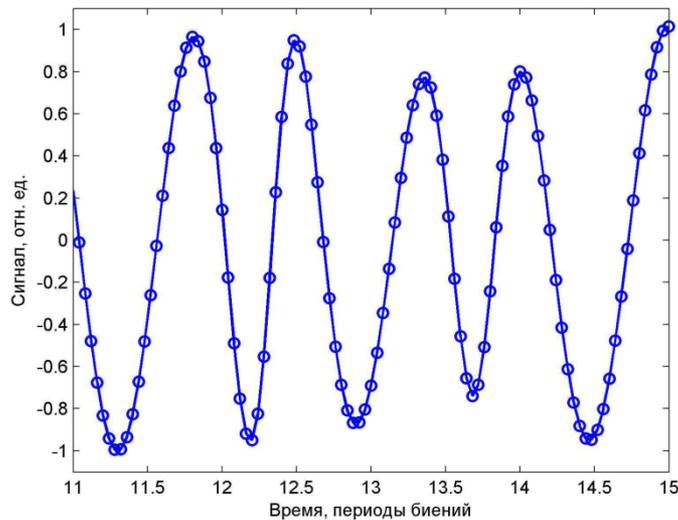


Временное разрешение. Синтетический сигнал

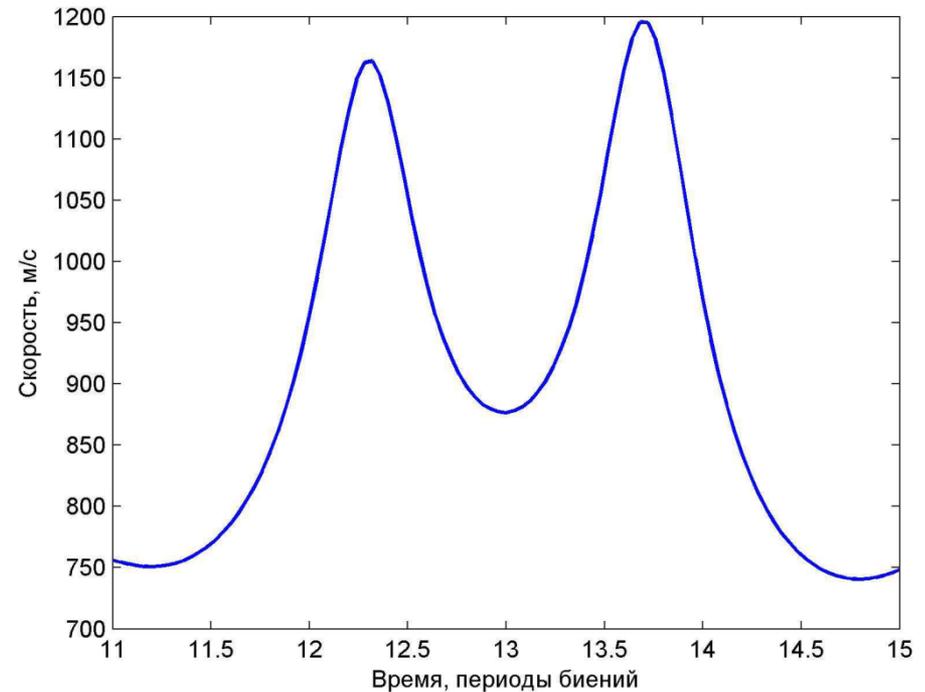
Исходный сигнал



Очищенный сигнал

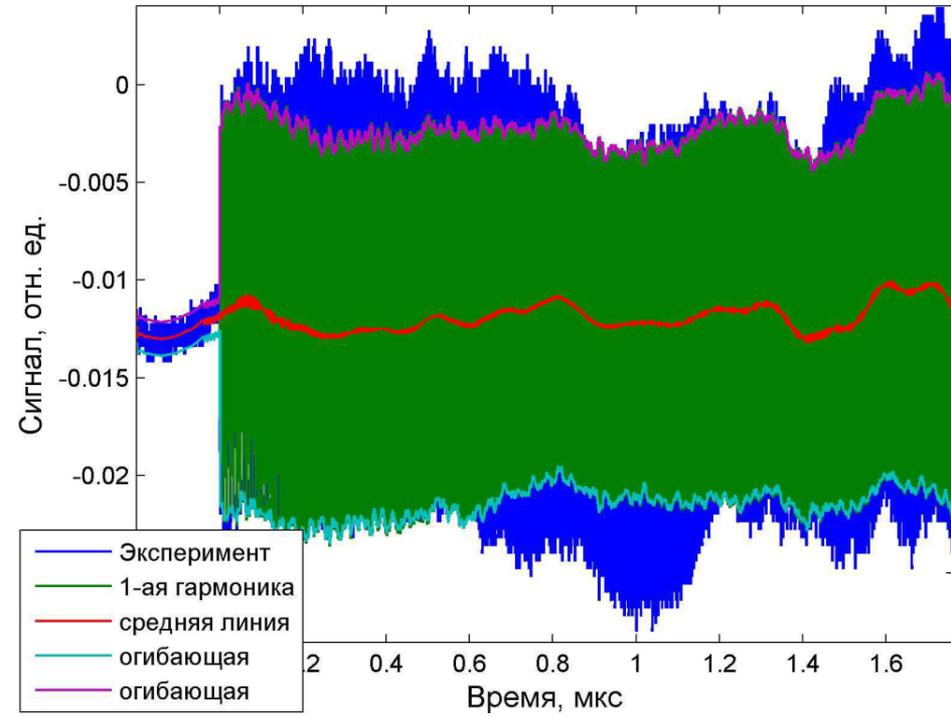
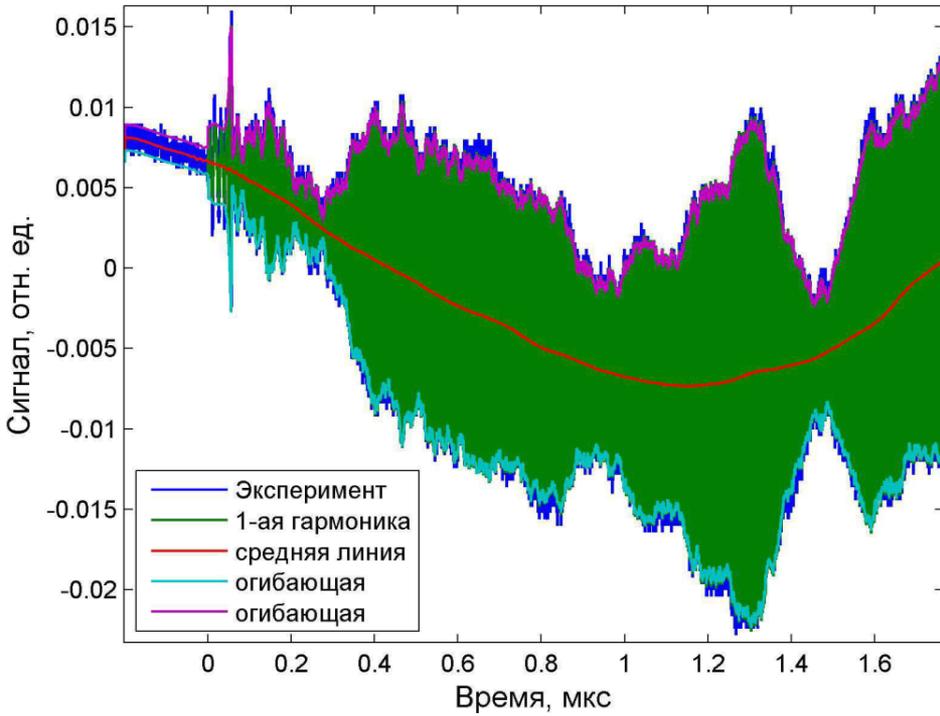


Восстановленный профиль скорости

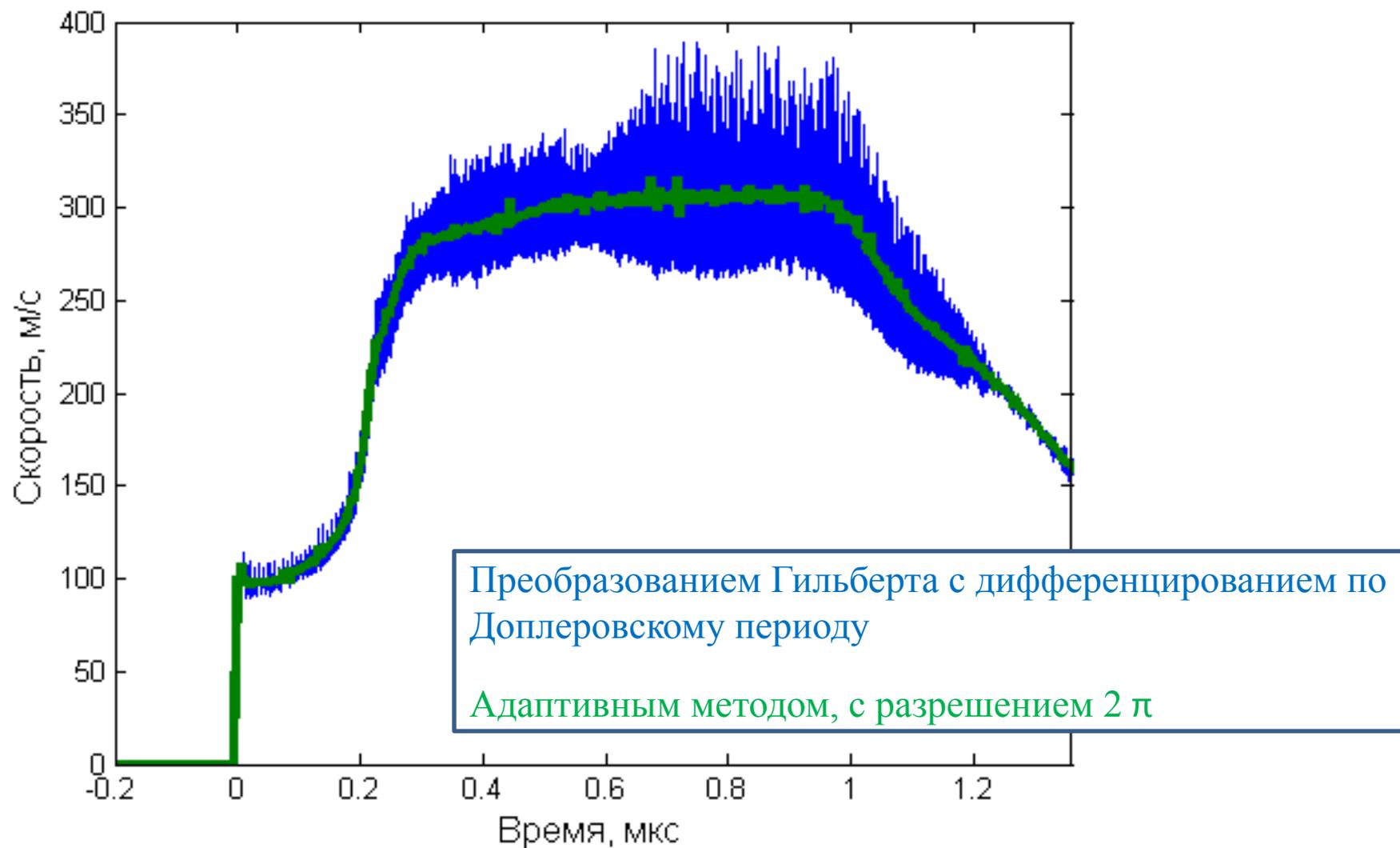


Разрешение зависит от
интервала интегрирования
и составляет $n/2$

Восстановление тестовых профилей скорости. Сигналы

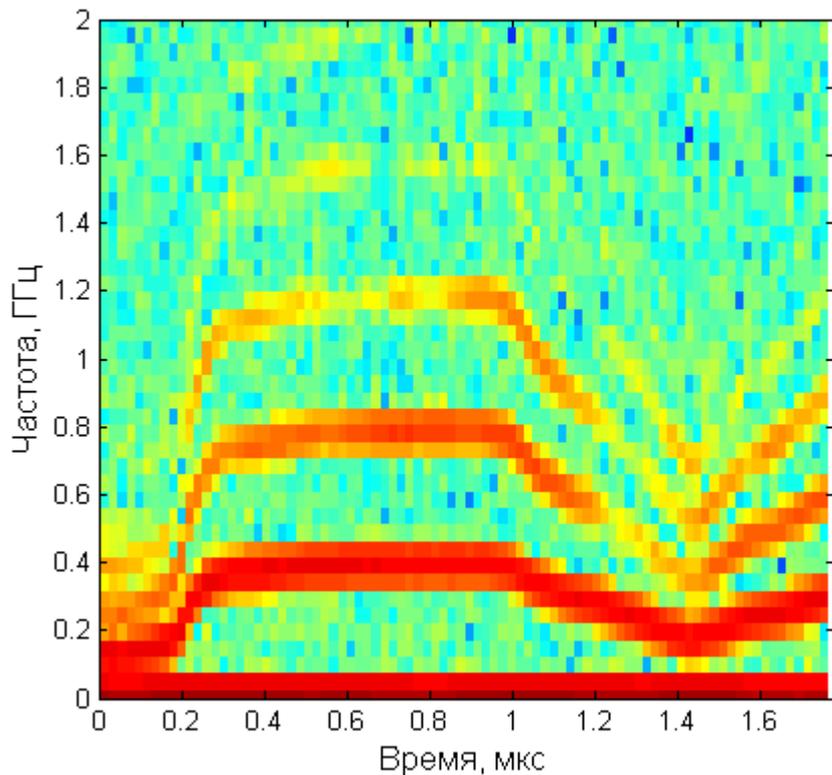


Восстановление тестовых профилей скорости. Сравнение с профилем, полученным преобразованием Гильберта

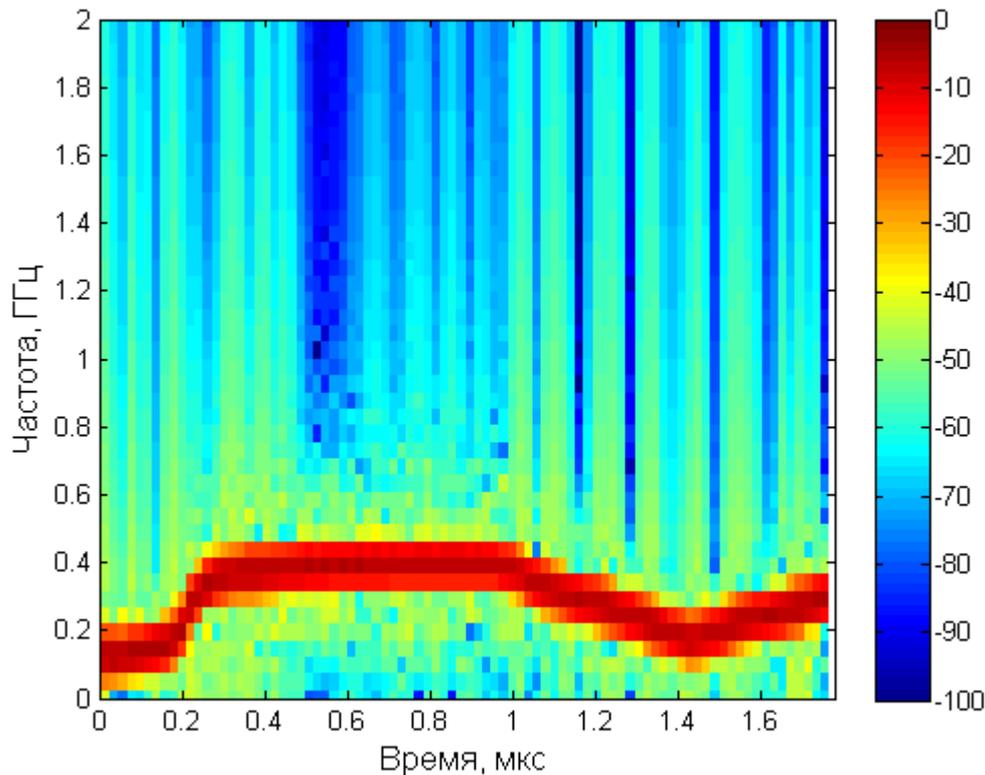


Восстановление тестовых профилей скорости. Спектрограммы

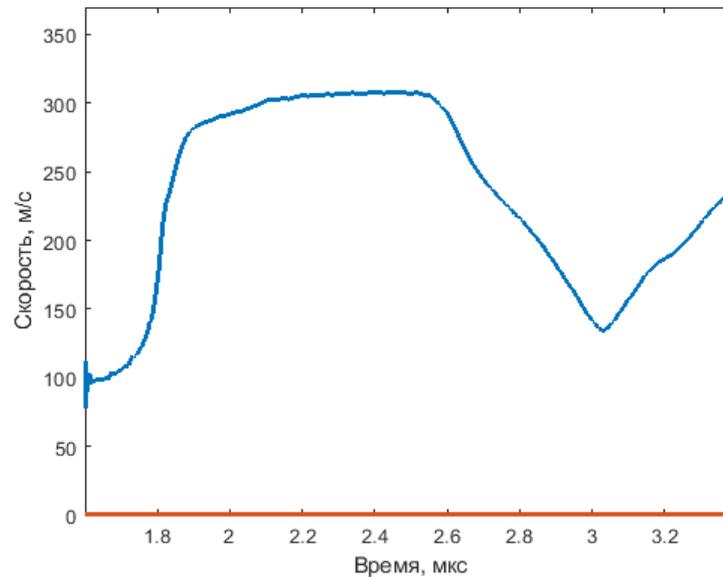
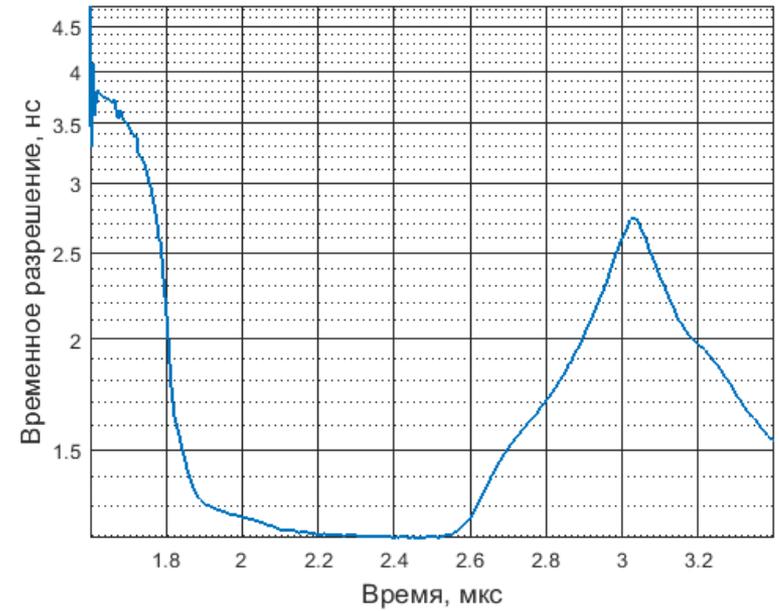
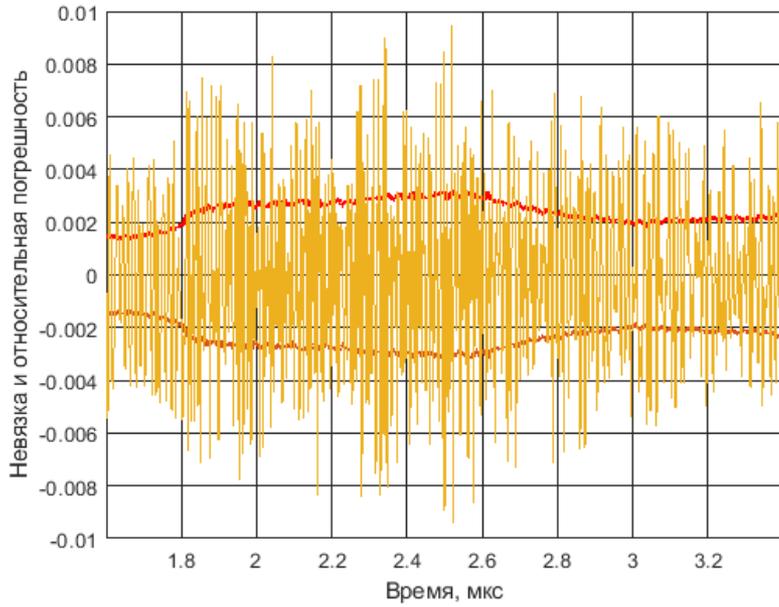
Исходный сигнал



Очищенный сигнал, 2 п

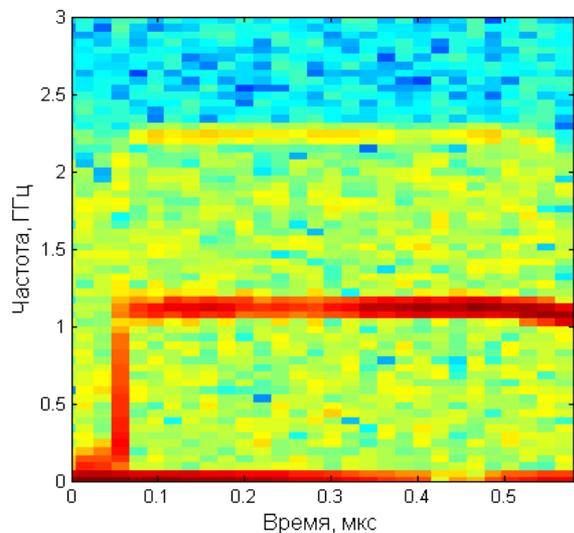


Восстановление тестовых профилей скорости. Разрешение 2π



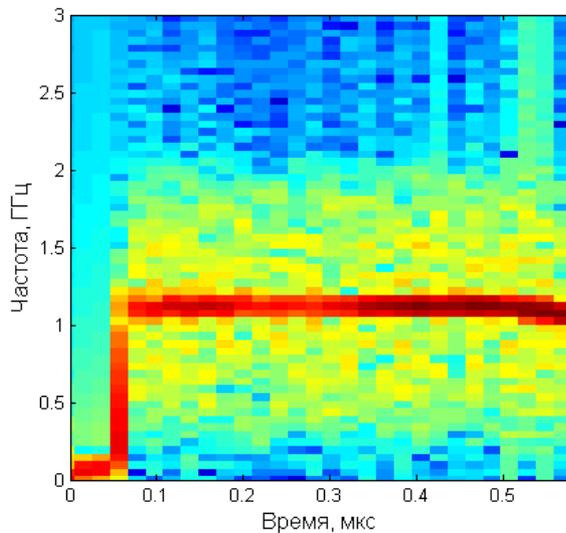
Восстановление тестовых профилей скорости. Спектрограммы

Исходный сигнал

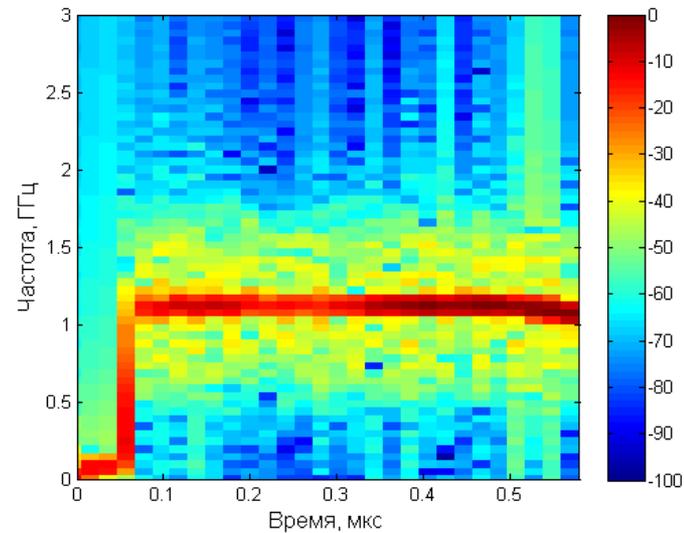


Очищенные сигналы

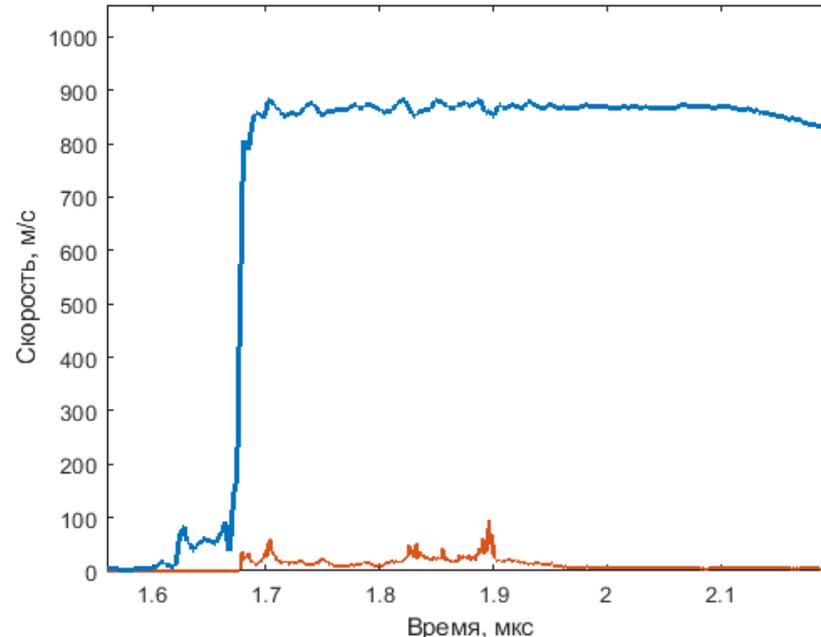
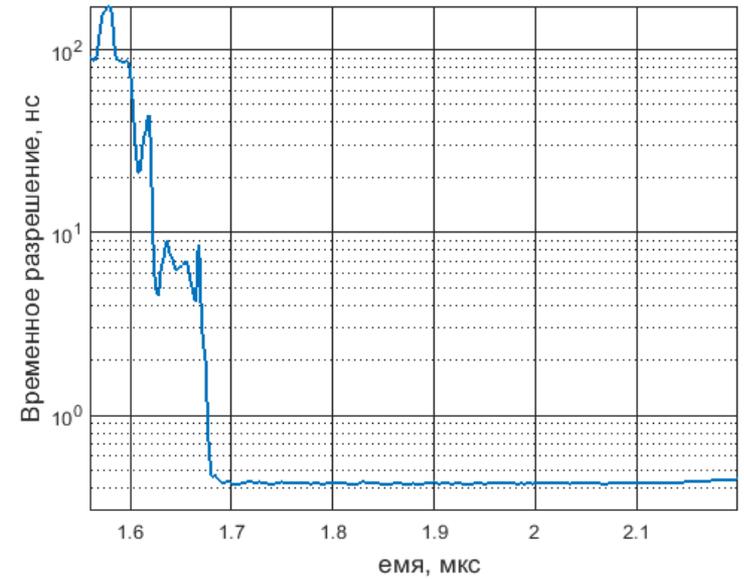
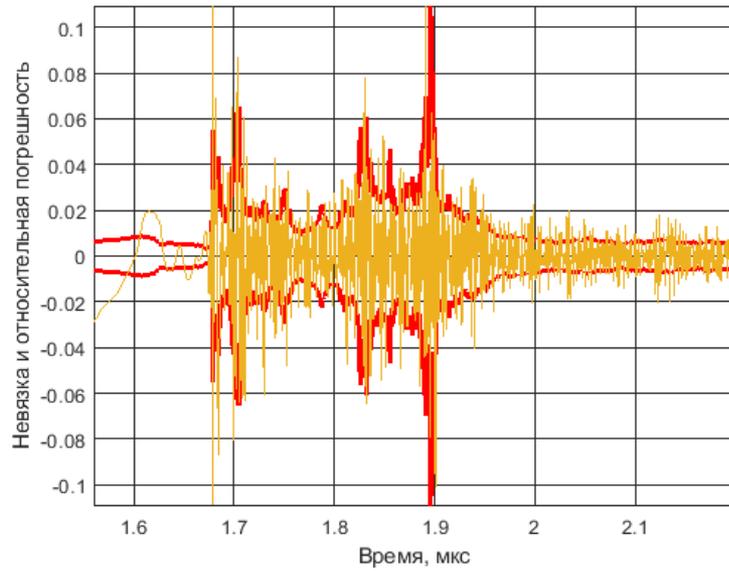
2 π



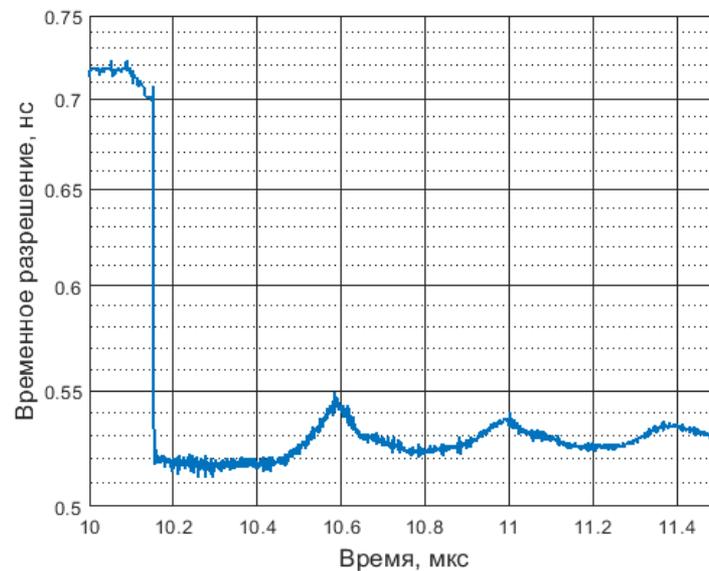
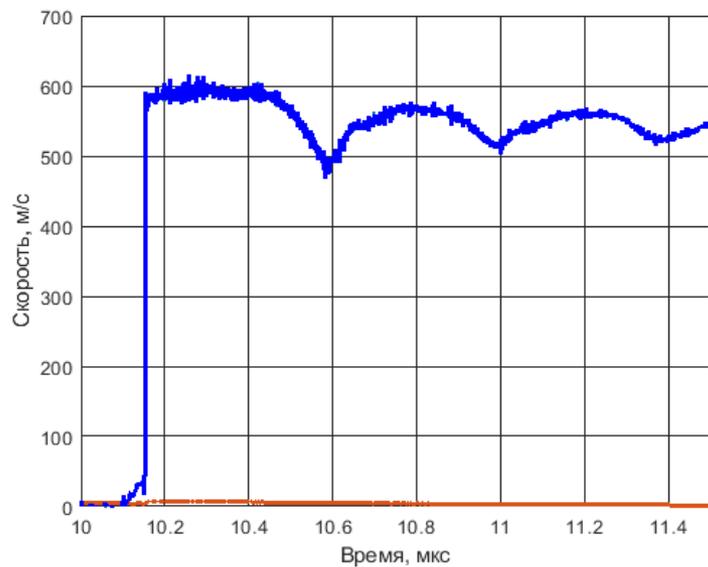
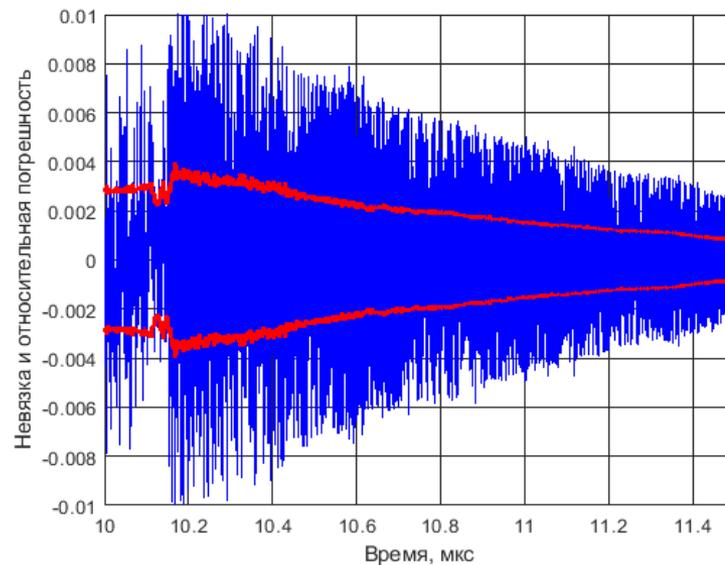
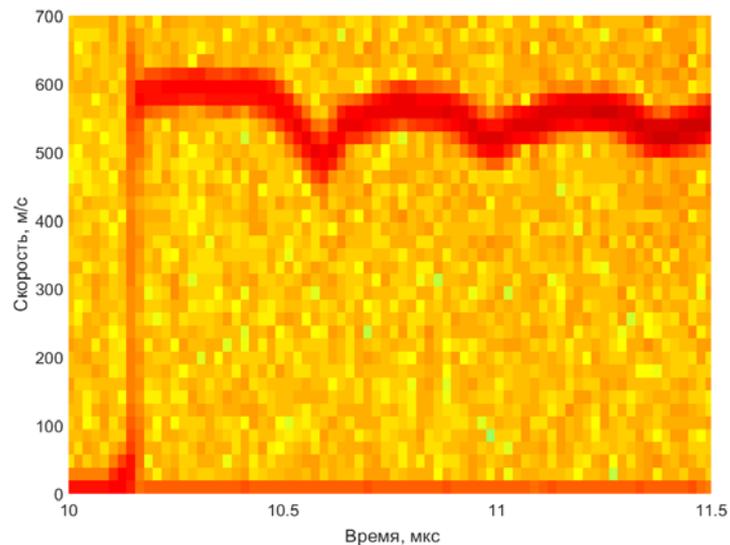
3 π



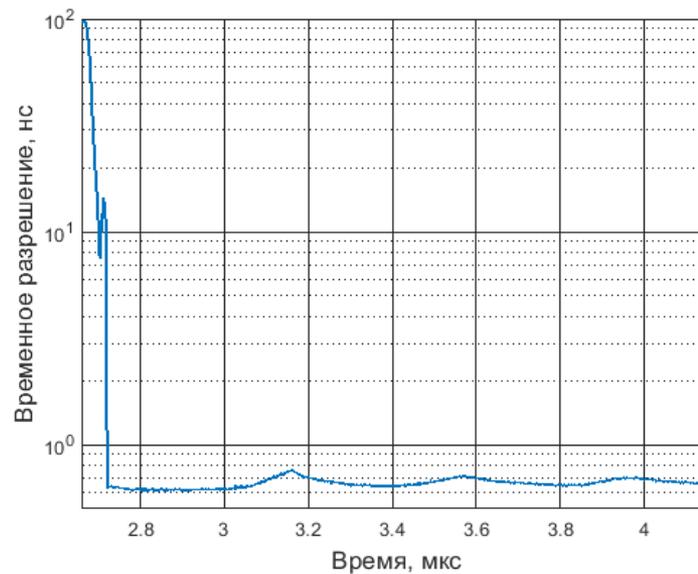
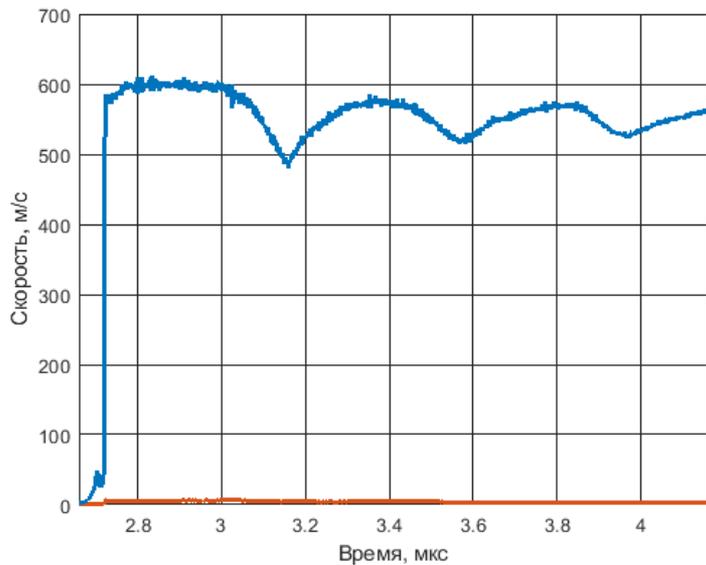
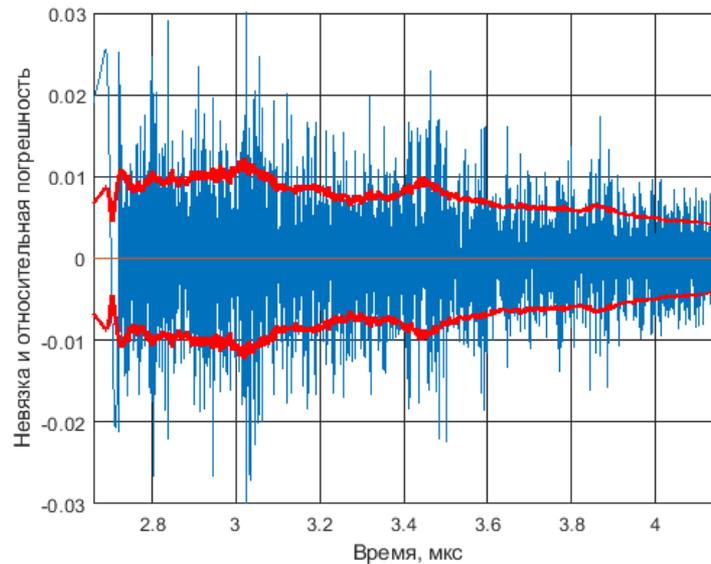
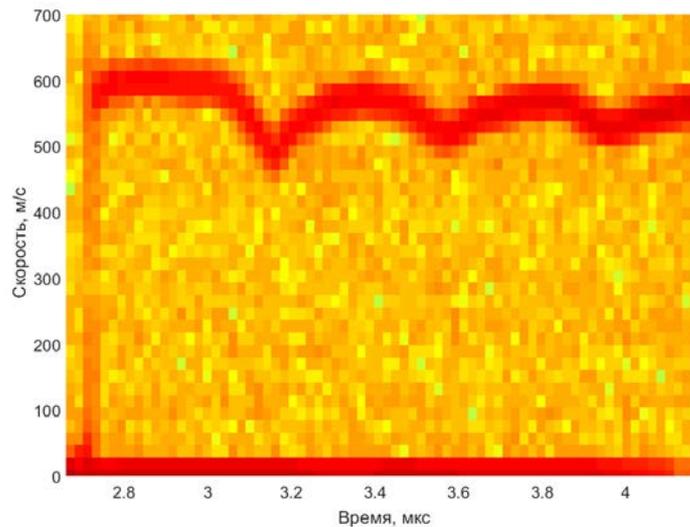
Восстановление тестовых профилей скорости. Разрешение 2π



Восстановление тестовых профилей скорости с частотным сдвигом 1990 МГц. Разрешение 6 п

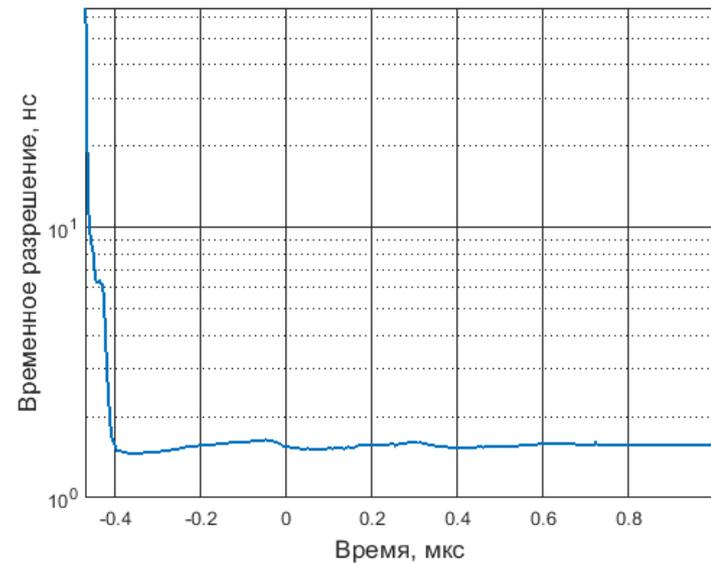
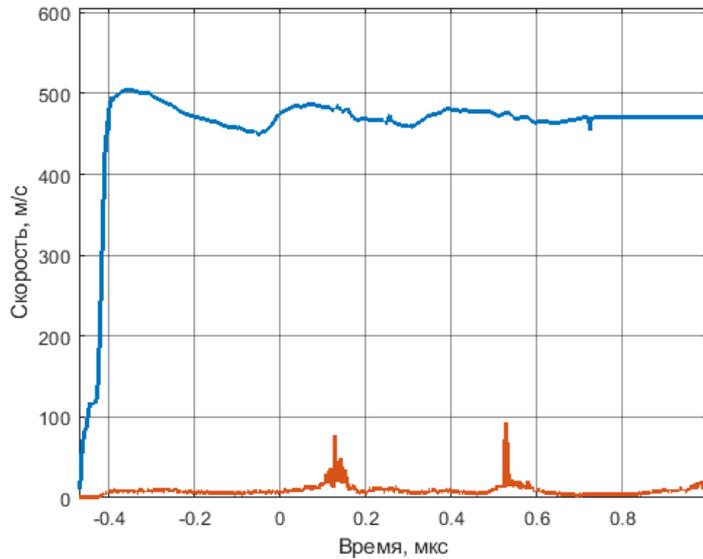
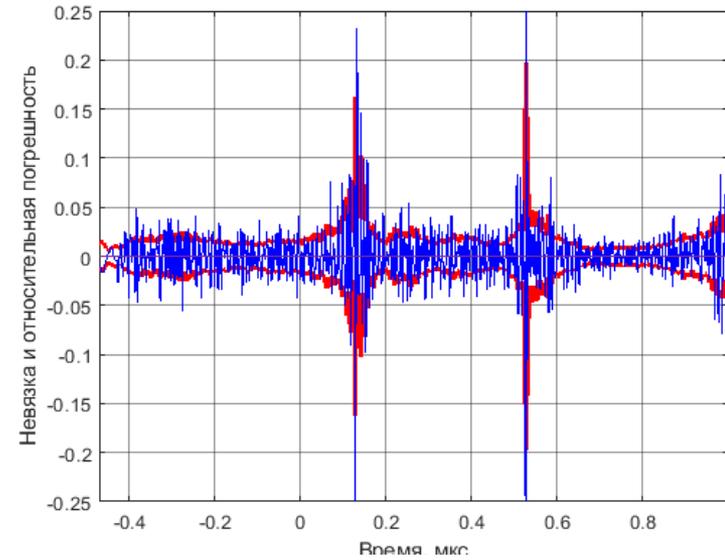
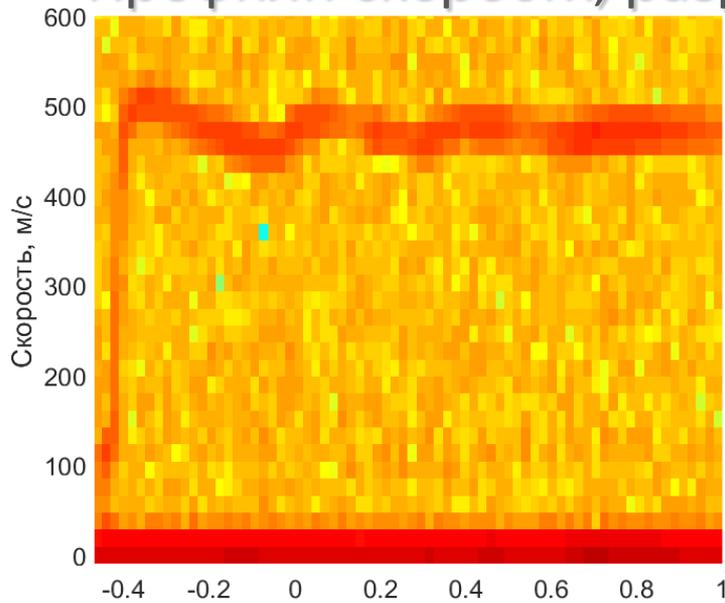


Восстановление тестовых профилей скорости. Разрешение 2π



Восстановление тестовых профилей скорости.

Профили скорости, разрешение 4π



Заключение

- Предложен итеративный метод обработки PDV-сигнала, основанный на фильтрации экспериментального сигнала с помощью преобразования интегральной свертки, который малочувствителен к присутствию в исходном сигнале высших доплеровских гармоник и высокочастотного шума, изменению амплитуды доплеровской гармоники и наличию в сигнале нулевой гармоники.
- Временное разрешение метода зависит от параметра n интегрального преобразования и в пределе составляет один период доплеровской гармоники.
- Предложен способ оценки погрешности восстановленной скорости