

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 533.95

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕННОЙ
ЗАДЕРЖКИ СИГНАЛОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВРЕМЯПРОЛЕТНОЙ
ДИАГНОСТИКЕ ПОТОКА ПЛАЗМЫ**

©2026 г. А. А. Мамонов*, К. М. Гуторов, В. С. Чернышев, В. Л. Подковыров

Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований (ТРИНИТИ)

Россия, 108840, Москва, Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12

**E-mail: aamamonov@triniti.ru*

Поступила в редакцию 23.12.2025

После доработки 29.03.2026

Принята к публикации 06.04.2026

В АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» на базе квазистационарного плазменного ускорителя (КСПУ) создается прототип плазменного ракетного двигателя. Согласно техническому заданию, ускоритель должен работать в импульсно-периодическом режиме с частотой 10 Гц. Скорость плазменного потока необходимо регистрировать после каждого пуска, так как она является важной характеристикой работы ускорителя. Для этого был разработан алгоритм автоматизированной обработки времяпролетной диагностики скорости плазменного потока, которая является традиционной на КСПУ. Предложенный алгоритм позволяет определять временную зависимость времени задержки между сигналами в течение разрядного импульса. Оцененная погрешность результатов расчета составляет менее 30%. Алгоритм реализован с использованием параллельных вычислений на видеокарте, что позволило достичь времени обработки одного пуска менее 20 мс. Таким образом, предложенный алгоритм обработки данных времяпролетной диагностики позволяет рассчитывать скорость плазменного потока после каждого пуска при работе ускорителя в импульсно-периодическом режиме с частотой 10 Гц.

1. ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] Морозов сформулировал теоретические основы функционирования квазистационарного плазменного ускорителя (КСПУ). В наши дни на основе КСПУ разрабатывается прототип плазменного ракетного двигателя. Согласно техническим требованиям, необходимо обеспечить работу ускорителя в импульсно-периодическом режиме с частотой 10 Гц. Система управления и сбора данных прототипа должна после каждого импульса проверять ключевые характеристики ускорителя, в том числе и скорость плазменного потока. К подсистеме регистрации скорости предъявляются два ключевых требования:

– получение зависимости скорости плазменного потока от времени в течение разрядного импульса ускорителя,

– обработка диагностических данных одного разрядного импульса ускорителя менее чем за 100 мс.

Существует несколько подходов к измерению скорости плазменного потока. Поскольку типичная скорость потока КСПУ составляет 100 км/с, можно регистрировать доплеровское смещение в спектрах свечения плазмы [2]. Однако для реализации этой методики необходимо использовать высокоскоростную камеру. Она создает большие объемы данных, обработка которых в ограниченное время (менее 100 мс) может потребовать мощного вычислительного оборудования.

Помимо этого, скорость потока можно оценить путем регистрации осциллографических сигналов электрических зондов [3]. Если установить зонды на определенном расстоянии друг от друга вдоль направления распространения потока, то можно оценить скорость времяпролетным методом. Однако авторы работы [3] не показали возможность получения временной зависимости скорости потока в течение разрядного импульса.

Известно, что в плазменном потоке КСПУ присутствуют сгустки с интенсивностью свечения большей, чем в менее плотной части потока [4]. На основе этого явления в работе [5] была представлена методика регистрации скорости потока путем измерения угла наклона полос на фотопленке, образованных свечением движущихся сгустков. Однако данную методику также затруднительно адаптировать для частотного режима.

В работе [2] приводятся результаты измерения скорости с помощью времяпролетной методики на основе сигналов свечения сгустков, зарегистрированных с помощью ФЭУ. Форма этих сигналов имеет сходство с формой тех сигналов, которые используются для измерения скорости потока жидкости с помощью взаимно корреляционного анализа [6, 7]. Это позволяет предположить, что данный анализ может быть применен и для сигналов свечения плазменных сгустков в потоке КСПУ.

Цель настоящей работы – создание метода автоматизированной обработки осциллографических сигналов времяпролетной диагностики скорости плазменного потока КСПУ с помощью взаимно корреляционного анализа. Обработка каждого пуска должна выполняться менее чем за 100 мс, чтобы обеспечить измерение скорости в реальном времени при работе КСПУ в импульсно-периодическом режиме с частотой 10 Гц.

2. ДАННЫЕ ВРЕМЯПРОЛЕТНОЙ ДИАГНОСТИКИ

Свечение плазменного потока КСПУ может быть зарегистрировано с помощью ФЭУ (рис. 1). Сигнал ФЭУ (рис. 2) можно представить в виде суммы сигналов свечения плазменных сгустков и фонового свечения плазмы. Фоновый сигнал имеет колоколообразную форму и длительность, сопоставимую с длительностью тока разряда ускорителя (1–2 мс).

Сигнал плазменных сгустков представляет собой последовательность случайных пульсаций, возникающих при пролете сгустка мимо коллиматора. У типичных для КСПУ газов (водород, гелий) амплитуда пульсаций в разы меньше амплитуды фонового сигнала, она составляет 0.5–1.5 В. Сигнал сгустков лежит в полосе частот от 50 кГц до 1 МГц.

Рис. 1. Схема измерения скорости плазменного потока КСПУ времяпролетным методом по свечению плазменных сгустков

Рис. 2. Сигналы ФЭУ времяпролетной диагностики скорости потока водородной плазмы

По временному сдвигу пульсаций на осциллограммах сигналов сгустков можно определить время пролета сгустка между коллиматорами. Скорость плазменного потока определяется по формуле

$$v = S/\Delta T, \quad (1)$$

где v – скорость плазменного потока, S – расстояние между коллиматорами, ΔT – время задержки между сигналами сгустков.

Для расчета зависимости скорости плазменного потока от времени в течение разрядного импульса необходимо определять ΔT на протяжении всей осциллограммы ФЭУ. Для этого можно разбить сигналы ФЭУ на множество участков фиксированной ширины – на сегменты. Далее в каждом сегменте необходимо определить ΔT путем нахождения похожих фрагментов на осциллограммах.

3. ОБРАБОТКА ДАННЫХ ВРЕМЯПРОЛЕТНОЙ ДИАГНОСТИКИ

3.1. Разбиение на сегменты

Разбиение осциллограмм сигналов ФЭУ на сегменты выполняется с заданным шагом (рис. 3). Длина сегмента – это количество отсчетов в сегменте. Длина шага – это количество отсчетов между границами двух соседних сегментов. Количество сегментов определяется длинами осциллограммы, сегмента и шага (формула (2)). Важно, чтобы длина шага была кратна длинам осциллограммы и сегмента.

Рис. 3. Схема разбиения осциллограмм на сегменты

Внутри сегмента на осциллограмме запаздывающего сигнала выделяется фрагмент, который при обработке будет сравниваться с осциллограммой опережающего сигнала. Между начальными границами сегмента и фрагмента остается область – смещение. Длительность смещения (произведение длины смещения на период дискретизации осциллограммы) должна быть больше ожидаемого максимального времени задержки, которое определяется из ожидаемой минимальной скорости плазменного потока (3):

$$N_{\text{seg}} = 1 + \frac{\text{len}_{\text{osc}} - \text{len}_{\text{seg}}}{\text{len}_{\text{step}}}, \quad (2)$$

где N_{seg} – количество сегментов, len_{osc} – количество отсчетов в осциллограмме, len_{seg} – длина сегмента, len_{step} – длина шага;

$$T_{\text{shift}} = \text{len}_{\text{shift}} T_{\text{sample}} > \Delta T_{\text{max}} = S/v_{\text{min}}, \quad (3)$$

где T_{shift} – длительность смещения, $\text{len}_{\text{shift}}$ – длина смещения, T_{sample} – период дискретизации осциллограммы, ΔT_{max} – ожидаемое максимальное время задержки между осциллограммами, v_{min} – ожидаемая минимальная скорость плазменного потока.

3.2. Выделение сигнала сгустков

Для определения времени задержки ΔT необходимо из измеренного сигнала ФЭУ выделить сигнал, связанный со свечением сгустков. Известно, что сигнал сгустков лежит в полосе больших частот (50 кГц–1 МГц), чем сигнал фонового свечения плазмы (менее 50 кГц). Тогда для выделения сигнала сгустков можно вычислить обратное вейвлет-преобразование сигнала ФЭУ в интересующей полосе частот (4). Альтернативным способом выделения сигнала сгустков может быть устранение сигнала фонового свечения внутри каждого сегмента сигнала ФЭУ. Для этого в каждом сегменте сигнал фонового свечения вычисляется в виде линейной аппроксимации исходного сигнала ФЭУ (5). Далее полученный линейный сигнал вычитается из исходного сигнала:

$$s_{\text{bunches}}(t) = WT^{-1}[S(w_{\text{WL}}^{\text{WH}}, t)], \quad (4)$$

где $s_{\text{bunches}}(t)$ – сигнал свечения сгустков, WT^{-1} – обратное вейвлет-преобразование, $S(w, t)$ – вейвлет-представление сигнала ФЭУ, w_{H} и w_{L} – верхняя и нижняя граничные частоты, по которым выполняется обратное вейвлет-преобразование;

$$k = \frac{\text{len}_{\text{seg}} (\sum_i \text{osc}_i t_i) - (\sum_i t_i) (\sum_i \text{osc}_i)}{\text{len}_{\text{seg}} (\sum_i t_i^2) - (\sum_i t_i) (\sum_i t_i)}, \quad (5)$$

$$b = \frac{(\sum_i \text{osc}_i) - k (\sum_i t_i)}{\text{len}_{\text{seg}}},$$

где k и b – коэффициенты линейной аппроксимации, osc_i – i -е значение напряжения осциллограммы, t_i – i -е значение времени осциллограммы.

Результаты вычисления сигнала свечения сгустков обоими методами оказываются схожими (рис. 4).

Рис. 4. Результаты выделения сигнала плазменных сгустков методами обратного вейвлет-преобразования и вычитания линейной аппроксимации

Различие заключается в том, что для метода вычитания линейной аппроксимации важно, чтобы длительность сегмента была больше периода пульсаций сигнала сгустков, и

чтобы сигнал фонового свечения не имел перегибов в течение длительности сегмента (6). При нарушении второго условия получаемый сигнал обладает низкочастотными колебаниями, не связанными со свечением сгустков. Метод обратного вейвлет-преобразования не зависит от длительности сегмента, однако обладает большей вычислительной сложностью:

$$T_{\text{bunches}} < T_{\text{seg}} < \frac{1}{f_{\text{background}}}, \quad (6)$$

где T_{seg} – длительность сегмента, равная произведению длины сегмента на период дискретизации, T_{bunches} – период пульсаций сигнала сгустков, $f_{\text{background}}$ – граничная частота спектра сигнала фонового свечения плазмы.

3.3. Определение ΔT по фазе комплексной функции взаимной корреляции

В работе [8] предлагается алгоритм определения ΔT , основанный на анализе комплексной функции взаимной корреляции сигналов c_{S1S2} . Эта функция вычисляется путем суммирования фурье-образов сигналов по положительным частотам (7). В результате получается комплексное число, которое может быть представлено в экспоненциальной форме. Зависимость c_{S1S2} от временного сдвига между сигналами τ получается путем сдвига границ фрагмента для расчета фурье-образа опережающего сигнала $s1$ на величину τ (рис. 5).

Рис. 5. Схема сдвига границ фрагмента опережающего сигнала $s1$ для вычисления зависимости взаимной корреляции сигналов

При этом границы фрагмента для расчета фурье-образа запаздывающего сигнала $s2$ остаются неизменными:

$$c_{S1S2}(\tau) = \frac{2}{\text{len}_{\text{frag}}^2} \sum_{k=1}^{\frac{\text{len}_{\text{frag}}}{2} - 1} S1(\tau)_k S2_k^* = |c_{S1S2}(\tau)| e^{i\varphi(\tau)}, \quad (7)$$

где $c_{S1S2}(\tau)$ – зависимость комплексной функции взаимной корреляции от временного сдвига τ , len_{frag} – длина фрагмента, $S1(\tau)$ – фурье-образ опережающего сигнала $s1$, рассчитанный в границах сегмента со сдвигом на величину τ , $S2$ – фурье-образ запаздывающего сигнала $s2$, $\varphi(\tau)$ – зависимость фазы комплексной функции взаимной корреляции от временного сдвига τ .

После определения комплексной функции взаимной корреляции сигналов в работе [8] предлагается определять ΔT как такое значение τ , при котором фаза комплексной функции взаимной корреляции (8) равна нулю. Границы погрешности определения искомого времени задержки $\delta(\Delta T)$ устанавливаются из условия равенства нулю фазы с учетом ее погрешности: $\varphi(\tau) \pm \delta(\varphi(\tau)) = 0$. Погрешность определения фазы $\delta(\varphi(\tau))$ (9) вычисляется через нормированную комплексную функцию взаимной корреляции и среднееквадратичное значение модуля (10) комплексной функции взаимной корреляции. Нормированная комплексная функция взаимной

корреляции (11) получается путем деления ненормированной функции на интегральные суммы анализируемых сигналов (12), (13). Необходимым критерием расчета является выполнение критерия значимости (14) на границах погрешности $\delta(\Delta T)$ [8]. Пример определения ΔT в произвольном сегменте осциллограммы сигналов времяпролетной диагностики приведен на рис. 6.

Рис. 6. Определение величины ΔT в сегменте по фазе C_{xy}

Сигналы плазменных сгустков, используемые в примере, получены методом обратного вейвлет-преобразования:

$$\varphi(\tau) = \arcsin\left(\frac{\text{Im}(c_{S1S2}(\tau))}{|c_{S1S2}(\tau)|}\right), \quad (8)$$

$$\delta(\varphi(\tau)) = \frac{\text{rms}(c_{S1S2}(\tau))}{|c_{S1S2}(\tau)|} \sqrt{1 - |C_{S1S2}(\tau)|^2}, \quad (9)$$

где $\delta(\varphi(\tau))$ – погрешность определения фазы комплексной функции взаимной корреляции, $\text{rms}(C_{S1S2}(\tau))$ – среднеквадратичное значение модуля комплексной функции взаимной корреляции, $C_{S1S2}(\tau)$ – нормированная комплексная функция взаимной корреляции,

$$\text{rms}(c_{S1S2}(\tau)) = \frac{1}{\text{len}_{\text{frag}}^2} \sqrt{\sum_{k=-\frac{\text{len}_{\text{frag}}}{2}}^{\frac{\text{len}_{\text{frag}}}{2}-1} |S1(\tau)_k|^2 |S2_k|^2}, \quad (10)$$

$$C_{S1S2}(\tau) = \frac{c_{S1S2}(\tau)}{\sqrt{\sigma_{S1}(\tau)^2 \sigma_{S2}^2}}, \quad (11)$$

$$\sigma_{S1}(\tau)^2 = \frac{1}{\text{len}_{\text{frag}}^2} \sum_{k=-N/2}^{\text{len}_{\text{frag}}/2-1} |S1(\tau)_k|^2, \quad (12)$$

$$\sigma_{S2}^2 = \frac{1}{\text{len}_{\text{frag}}^2} \sum_{k=-\text{len}_{\text{frag}}/2}^{\text{len}_{\text{frag}}/2-1} |S2_k|^2, \quad (13)$$

$$f_{\text{sign}} = \frac{|c_{S1S2}(\tau)|}{\text{rms}(c_{S1S2}(\tau))} > 3, \quad (14)$$

где f_{sign} – критерий значимости, определяющий возможность анализа корреляции между сигналами.

3.4. Определение ΔT по пику нормированной функции взаимной корреляции

Время задержки между опережающим и запаздывающим сигналами ΔT также можно определить по положению максимума зависимости нормализованной функции их взаимной корреляции ρ от временного сдвига между сигналами τ . Данный метод широко описан в

литературе [6, 7]. Зависимость $\rho(\tau)$ (15) вычисляется аналогично подсчетам в предыдущем методе – на запаздывающем сигнале границы фрагмента неподвижны, на опережающем сигнале границы фрагмента сдвигаются на величину τ (рис. 5). На рис. 7 представлен пример определения ΔT в произвольном сегменте осциллограммы сигналов времяпролетной диагностики описанным методом.

Рис. 7. Определение значения ΔT в сегменте по положению пика ρ :

В данном случае для выделения сигналов плазменных сгустков использовался метод вычитания линейной аппроксимации:

$$\rho(\tau) = \frac{\sum_{j=1}^{\text{len_frag}} s1_{\text{len_shift}-\tau+j} s2_j}{\sqrt{\sum_{j=1}^{\text{len_frag}} s1_{\text{len_shift}-\tau+j}^2} \sqrt{\sum_{j=1}^{\text{len_frag}} s2_j^2}}, \quad (15)$$

где $\rho(\tau)$ – зависимость нормированной функции взаимной корреляции от временного сдвига τ , $s1$ – опережающий сигнал ФЭУ, $s2$ – запаздывающий сигнал ФЭУ.

3.5. Влияние длительности сегмента на результат расчета

Обработка экспериментальных данных при разных значениях длительности сегмента (рис. 8) показывает, что длительность сегмента определяет временное разрешение результата расчета. Значение ΔT , рассчитанное внутри сегмента, является результатом усреднения по множеству пульсаций, входящих в границы этого сегмента. Таким образом, если необходимо проанализировать связь скорости плазменного потока с другой характеристикой ускорителя (например, с осциллограммой разрядного тока), то длительность сегмента нужно выбирать не больше, чем характерное время изменения анализируемой характеристики.

Рис. 8. Определение величины ΔT двумя методами

Уменьшение длительности сегмента позволяет выявлять кратковременные изменения ΔT . С другой стороны, с уменьшением длительности увеличивается количество сегментов, в которых не выполняется условие значимости (14). Доля таких сегментов достигает 50%, когда длительность сегмента составляет менее 2–3 периодов пульсаций сигнала плазменных сгустков. Определено, что для обработки экспериментальных данных, полученных на КСПУ, оптимальная длительность сегмента составляет 20–50 мкс.

3.6. Сравнение результатов расчетов двумя методами

Описанные методы расчета ΔT были проверены на экспериментальных данных при работе ускорителя на водороде (рис. 9) и на гелии (рис. 10). У первого метода расчета (выделение сигналов сгустков обратным вейвлет-преобразованием, определение ΔT по фазе

комплексной функции взаимной корреляции) погрешность для большинства пусков КСПУ составляет менее 30%. В пределах этой погрешности лежит относительная разность результатов расчета первого и второго методов (выделение сигналов сгустков вычитанием линейной аппроксимации, определение ΔT по пику нормализованной функции взаимной корреляции). Таким образом, можно сделать вывод о том, что эти два метода дают схожие результаты.

Рис. 9. Результаты обработки экспериментальных данных времяпролетной диагностики при экспериментах на водороде

Рис. 10. Результаты обработки экспериментальных данных времяпролетной диагностики при экспериментах на гелии

4. РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ДЛЯ ЧАСТОТНОГО РЕЖИМА

Первый метод определения ΔT отличается высокой вычислительной сложностью. Вейвлет-преобразование требует вычисления множества интегралов для всего интересующего спектра частот. Для определения ΔT по фазе комплексной функции взаимной корреляции необходимо выполнять преобразование Фурье для каждого значения временного сдвига τ , поскольку для разных значений сдвига границы фрагмента опережающего сигнала ФЭУ различны.

Второй метод, напротив, имеет меньшую вычислительную сложность. Для выделения сигнала плазменных сгустков вычитанием линейной аппроксимации требуется выполнение простых арифметических операций. Вычисление нормализованной функции взаимной корреляции при сдвигающихся границах фрагмента с помощью множества арифметических сумм проще, чем вычисление множества преобразований Фурье, как в первом методе.

Поскольку представленные выше данные демонстрируют схожесть результатов расчета обоими методами, для реализации алгоритма определения ΔT в частотном режиме был выбран второй метод. Поскольку проектная частота работы ускорителя составляет 10 Гц, обработка экспериментальных данных времяпролетной диагностики должна выполняться менее, чем за 100 мс. Также есть ограничения на временные параметры осциллограмм. Время записи осциллограммы определяется требованиями к эксперименту, оно составляет 1 мс. Экспериментально определено, что осциллографическое оборудование времяпролетной диагностики (осциллографы TiePie) при опросе с частотой 10 Гц позволяет выполнять запись осциллограмм размером до 100 000 отсчетов. Таким образом, частота дискретизации осциллограмм может достигать 100 МГц. Поскольку оптимальная длительность сегмента

составляет 20–50 мкс, для данной частоты дискретизации длина сегмента должна быть 2 000–5 000 отсчетов.

В целях увеличения скорости обработки данных выбранный метод был адаптирован к параллельным вычислениям на видеокарте. Разработанный алгоритм состоит из нескольких этапов. После получения осциллограмм сигналов ФЭУ от диагностического оборудования они загружаются в глобальную память видеокарты. Из глобальной памяти в локальную память рабочей группы видеокарты загружается сегмент осциллограмм. В рабочей группе выполняется расчет ΔT данного сегмента. Результат обработки записывается в глобальную память видеокарты. Далее в локальную память рабочей группы загружается следующий сегмент осциллограмм, и выполняется его обработка. Обработка сегментов может выполняться параллельно несколькими рабочими группами.

Расчет ΔT данного сегмента распараллеливается между исполнителями рабочей группы. Выделение сигнала плазменных сгустков включает в себя вычисление сумм элементов напряжения и времени осциллограмм (5). Суммы, включающие только временную компоненту, могут быть рассчитаны заранее (16). Суммы, включающие компоненту напряжения, вычисляются только во время эксперимента. Эти вычисления могут быть выполнены в параллельном режиме по схеме, изображенной на рис. 11.

Рис. 11. Схема распараллеливания операции суммирования массива на несколько потоков

Если `threads` – это количество потоков, то на первой итерации каждый поток вычисляет частичные суммы из $\text{integer}(\text{len}_{\text{seg}} / \text{threads})$ элементов (`integer` – целочисленное деление). В результате получается массив элементов длиной `threads`, который после цепочки попарных сложений сводится к одному элементу, равному сумме элементов исходного массива. Таким образом, асимптотическое количество операций для вычисления линейной аппроксимации сокращается с величины длины сегмента len_{seg} (для однопоточного режима) до $\text{integer}(\text{len}_{\text{seg}} / \text{threads}) + \log_2(\text{threads})$ (для параллельного режима). После вычисления сумм, входящих в формулу (5), на одном из потоков рассчитываются коэффициенты линейной аппроксимации,

$$\sum_i t_i = 0.5 \text{len}_{\text{seg}}(\text{len}_{\text{seg}} + 1),$$

$$\sum_i t_i^2 = \frac{\text{len}_{\text{seg}}^3}{3} + \frac{\text{len}_{\text{seg}}^2}{2} + \frac{\text{len}_{\text{seg}}}{6}. \quad (16)$$

Дальнейшая обработка может быть распараллелена схожим образом. Вычитание линейной аппроксимации может быть выполнено в параллельном режиме, если каждый поток

с номером k будет выполнять вычитание линейной аппроксимации из элементов окна с номерами $k+\text{threads}$. Тогда этот этап можно выполнить за $\text{integer}(\text{len}_{\text{seg}} / \text{threads})+1$ операций.

Расчет нормированной функции взаимной корреляции распараллеливается аналогично. Каждый поток k выполняет вычисление для $(k+\text{threads})$ -го значения временного сдвига τ . Количество операций при расчете корреляции для определенной величины τ пропорционально длине фрагмента len_{frag} . Таким образом, вычисления в параллельном режиме на третьем этапе требуют $\text{len}_{\text{frag}}(\text{integer}(\text{lags} / \text{threads})+1)$ операций, где lags – количество значений сдвига τ , для которых проводятся вычисления. Величина lags определяется ожидаемым диапазоном скорости.

Параллельная реализация поиска положения максимума взаимной корреляции аналогична суммированию элементов массива. Вначале массив значений взаимной корреляции (его размер равен lags) сводится к массиву размером threads за $\text{integer}(\text{lags} / \text{threads})$ операций сравнения. Далее выполняется цепочка попарных сравнений ($\log_2(\text{threads})$ операций), в результате чего определяется положение пика нормированной функции взаимной корреляции. Асимптотическое количество операций для определения ΔT в сегменте в однопоточном и параллельном режимах приведено в табл. 1.

Таблица 1. Асимптотическое количество операций этапов определения ΔT

Этап определения ΔT	Асимптотическое количество операций	
	Однопоточный режим	Параллельный режим
Поиск линейной аппроксимации	len_{seg}	$\text{integer}(\text{len}_{\text{seg}} / \text{threads}) + \log_2(\text{threads})$
Вычитание линейной аппроксимации	len_{seg}	$\text{integer}(\text{len}_{\text{seg}} / \text{threads}) + 1$
Вычисление нормированной функции взаимной корреляции	$\text{len}_{\text{frag}} \cdot \text{lags}$	$\text{len}_{\text{frag}} (\text{integer}(\text{lags} / \text{threads}) + 1)$
Поиск пика нормированной функции взаимной корреляции	Lags	$\text{integer}(\text{lags} / \text{threads}) + \log_2(\text{threads})$

Предложенный параллельный алгоритм обработки осциллографических сигналов времяпролетной диагностики был реализован на языке C++ с использованием фреймворка OpenCL. Время выполнения обработки включает в себя запись экспериментальных данных на видеокарту, расчет на видеокarte, чтение результатов расчета из видеокарты. Измерение времени выполнения обработки проводилось средствами библиотеки <chrono>. В качестве аппаратной платформы использовалась видеокarta Nvidia GeForce 1050 Ti, имеющая 6 рабочих групп по 128 ядер (256 потоков). Испытания проводились на осциллограммах размером 100 000 отсчетов. Для каждого набора параметров расчета (len_{seg} , lags range и т.д.)

проводилось 1000 испытаний на тестовых данных. Результаты испытаний показывают (табл. 2), что для всех рассмотренных случаев время выполнения составляет менее 20 мс, что укладывается в ограничения на работу в частотном режиме (10 Гц).

Таблица 2. Время выполнения обработки осциллографических данных времяпролетной диагностики для различных параметров расчета

Длина сегмента len_{seg}	Длина шага len_{step}	Размер множества значений $lags$	Длина фрагмента len_{frag}	Количество сегментов	Среднее время выполнения, мс	Максимальное время выполнения, мс
4000	500	500	3000	193	12.741	13.938
4000	500	1000	3000	193	18.376	19.866
4000	1000	1000	3000	97	10.254	11.695
5000	500	500	4000	191	15.493	17.519
5000	1000	500	4000	96	8.748	9.831

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложено два метода автоматизированной обработки осциллографических сигналов времяпролетной диагностики. Каждый метод включает в себя выполнение трех ключевых операций – разделение осциллографических сигналов на сегменты, выделение полезной составляющей сигнала (сигнал плазменных сгустков) и нахождение времени задержки между сигналами ΔT в каждом сегменте.

Разделение осциллографических сигналов на сегменты позволяет рассчитать временную зависимость ΔT в течение разрядного импульса. Длительность сегмента (произведение длины сегмента на период дискретизации осциллограммы) определяет временное разрешение результата расчета. С одной стороны, уменьшение длительности сегмента приводит к улучшению временного разрешения, с другой, длительность следует выбирать на порядок больше периода пульсаций сигнала плазменных сгустков.

В первом предложенном методе обработки экспериментальных данных времяпролетной диагностики для выделения сигнала плазменных сгустков из сигнала ФЭУ используется вейвлет-преобразование. Сначала выполняется вейвлет-преобразование сигнала ФЭУ, а потом обратное вейвлет-преобразование по той области частот, которой принадлежит спектр сигнала плазменных сгустков. Во втором методе для выделения сигнала плазменных сгустков внутри каждого сегмента из сигнала вычитается его линейная аппроксимация. Если выбирать длительность сегмента такой, чтобы в него попадало несколько периодов пульсации сигнала плазменных сгустков и сигнал фонового свечения не имел перегибов, то оба способа

дают схожие результаты. В противном случае результат выделения сигнала с помощью вычитания линейной аппроксимации содержит компоненты, не относящиеся к сигналу плазменных сгустков.

Определение величины ΔT в сегменте у первого метода выполняется по фазе комплексной функции взаимной корреляции, у второго – по пику нормированной функции взаимной корреляции. Рассчитанная погрешность результатов расчета первым методом для испытанных газов (водород и гелий) составляет менее 30%. Различие результатов расчета первым и вторым методами составляет около 10%. Из этого делается вывод, что их результаты можно считать схожими.

Для реализации алгоритма автоматизированной обработки сигналов времяпролетной диагностики в частотном режиме был выбран второй метод, поскольку он имеет меньшую вычислительную сложность. В целях ускорения расчета алгоритм был реализован с использованием параллельных вычислений на видеокарте. Время выполнения алгоритма при необходимых параметрах расчета (длина осциллограммы 100 000 отсчетов, длина сегмента до 5000 отсчетов, размер множества значений временного сдвига до 1000) составляет менее 20 мс.

Таким образом, разработан метод автоматизированной обработки осциллографических сигналов времяпролетной диагностики для работы КСПУ в импульсно-периодическом режиме с частотой 10 Гц. Метод позволяет определять временную зависимость времени задержки между сигналами в течение разрядного импульса. Погрешность результата обработки менее 30%. Время обработки каждого пуска менее 20 мс.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена по государственному контракту № Н.4к.241.09.25.1064 от 19.05.25.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Морозов А.И.* // Физика плазмы. 1990. Т. 16. №. 2. С. 131.
2. *Ярошевская А.Д., Гуторов К.М., Подковыров В.Л., Литвиненко Ю.И.* // Физика плазмы. 2024. Т. 50. № 6. С. 653. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80252604>
[*Yaroshevskaya A.D., Gutorov K.M., Podkovyrov V.L., Litvinenko Yu.I.* // Plasma Phys. Rep. 2024. V. 50. P. 689.]
3. *Talukdar N., Ahmed A., Borthakur S., Neog N.K., Borthakur T.K., Ghosh J.* // Phys. Plasmas. 2019. V. 26 (6). P. 062711. <https://doi.org/10.1063/1.5092267>
4. *Kartasheva A.A., Gutorov K.M., Podkovyrov V.L., Muravyeva E.A., Lukyanov K.S., Klimov N.S.* // Phys. Plasmas. 2024. V. 31. P. 043107. <https://doi.org/10.1063/5.0198341>

5. Коваленко Д.В., Климов Н.С., Житлухин А.М. и др. // ВАНТ. Серия: термоядерный синтез. 2014. Т. 37. №4. С. 39. <https://elibrary.ru/item.asp?id=22619817>
6. Sheng B., Huang J., Ji H., Huang Z. // Sensors. 2023. V. 23. P. 4886. <https://doi.org/10.3390/s23104886>
7. Fernandes C.W., Bellar M.D., Werneck M.M. // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2010. V. 59. № 4. P. 840. <https://doi.org/10.1109/TIM.2009.2025990>
8. Misra R., Bora A., Dewangan G. // Astron. Comput. 2018. V. 23. P. 83. <https://doi.org/10.1016/j.ascom.2018.03.002>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Схема измерения скорости плазменного потока КСПУ времяпролетным методом по свечению плазменных сгустков
- Рис. 2.** Сигналы ФЭУ времяпролетной диагностики скорости потока водородной плазмы: **а** – осциллограммы сигналов ФЭУ, **б** – вейвлет-преобразование первого (опережающего) сигнала ФЭУ, **в** – вейвлет-преобразование второго (запаздывающего) сигнала ФЭУ
- Рис. 3.** Схема разбиения осциллограмм на сегменты
- Рис. 4.** Результаты выделения сигнала плазменных сгустков методами обратного вейвлет-преобразования и вычитания линейной аппроксимации: **а** – исходные сигналы ФЭУ, **б** – фурье-спектрограмма сигнала сгустков, полученного с помощью обратного вейвлет-преобразования, **в** – фурье-спектрограмма сигнала сгустков, полученного с помощью вычитания линейной аппроксимации, **г** – исходные сигналы ФЭУ в сегменте, **д** – сигналы сгустков в сегменте, полученные с помощью обратного вейвлет-преобразования, **е** – сигналы сгустков в сегменте, полученные с помощью вычитания линейной аппроксимации
- Рис. 5.** Схема сдвига границ фрагмента опережающего сигнала s_1 для вычисления зависимости взаимной корреляции сигналов от величины временного сдвига τ
- Рис. 6.** Определение величины ΔT в сегменте по фазе C_{xy} : **а** – сигналы ФЭУ в сегменте, **б** – зависимость фазы C_{xy} от временного сдвига τ (синяя линия) и ее коридор погрешности (черные линии), **в** – полярное представление зависимости C_{xy} от τ
- Рис. 7.** Определение значения ΔT в сегменте по положению пика ρ : **а** – сигналы ФЭУ в сегменте, **б** – зависимость нормализованной функции взаимной корреляции ρ от временного сдвига τ
- Рис. 8.** Определение величины ΔT двумя методами: сигналы сгустков выделены методом вычитания линейной аппроксимации, значение ΔT определено по пику нормированной функции взаимной корреляции (крестики); сигналы сгустков выделены методом обратного вейвлет-преобразования, значение ΔT определено по фазе комплексной функции взаимной корреляции (кружки); **а** – сигналы плазменных сгустков при экспериментах на гелии, **б** – рассчитанные значения ΔT при длине сегментов 5000 отсчетов (черный, красный) и 2500 отсчетов (зеленый, синий). Длина шага равна длине сегмента, частота дискретизации составляет 50 МГц

Рис. 9. Результаты обработки экспериментальных данных времяпролетной диагностики при экспериментах на водороде при длине сегмента 2000 отсчетов, длине шага 500 отсчетов и частоте дискретизации 50 МГц: **а** – осциллограммы сигналов ФЭУ; **б** – временная зависимость ΔT в течение разрядного импульса. Сигналы сгустков выделены методом обратного вейвлет-преобразования, значение ΔT определено по фазе комплексной функции взаимной корреляции (синий). Сигналы сгустков выделены методом вычитания линейной аппроксимации, значение ΔT определено по пику нормированной функции взаимной корреляции (оранжевый); **в** – рассчитанные по фазе комплексной функции взаимной корреляции относительная погрешность определения ΔT (синий) и относительная разность определения ΔT двумя разными методами (оранжевый)

Рис. 10. Результаты обработки экспериментальных данных времяпролетной диагностики при экспериментах на гелии при длине сегмента 2000 отсчетов, длине шага 500 отсчетов и частоте дискретизации 50 МГц: **а** – осциллограммы сигналов ФЭУ; **б** – временная зависимость ΔT в течение разрядного импульса. Сигналы сгустков выделены методом обратного вейвлет-преобразования, значение ΔT определено по фазе комплексной функции взаимной корреляции (синий). Сигналы сгустков выделены методом вычитания линейной аппроксимации, значение ΔT определено по пику нормированной функции взаимной корреляции (оранжевый); **в** – рассчитанные по фазе комплексной функции взаимной корреляции относительная погрешность определения ΔT (синий) и относительная разность определения ΔT двумя разными методами (оранжевый)

Рис. 11. Схема распараллеливания операции суммирования массива на несколько потоков

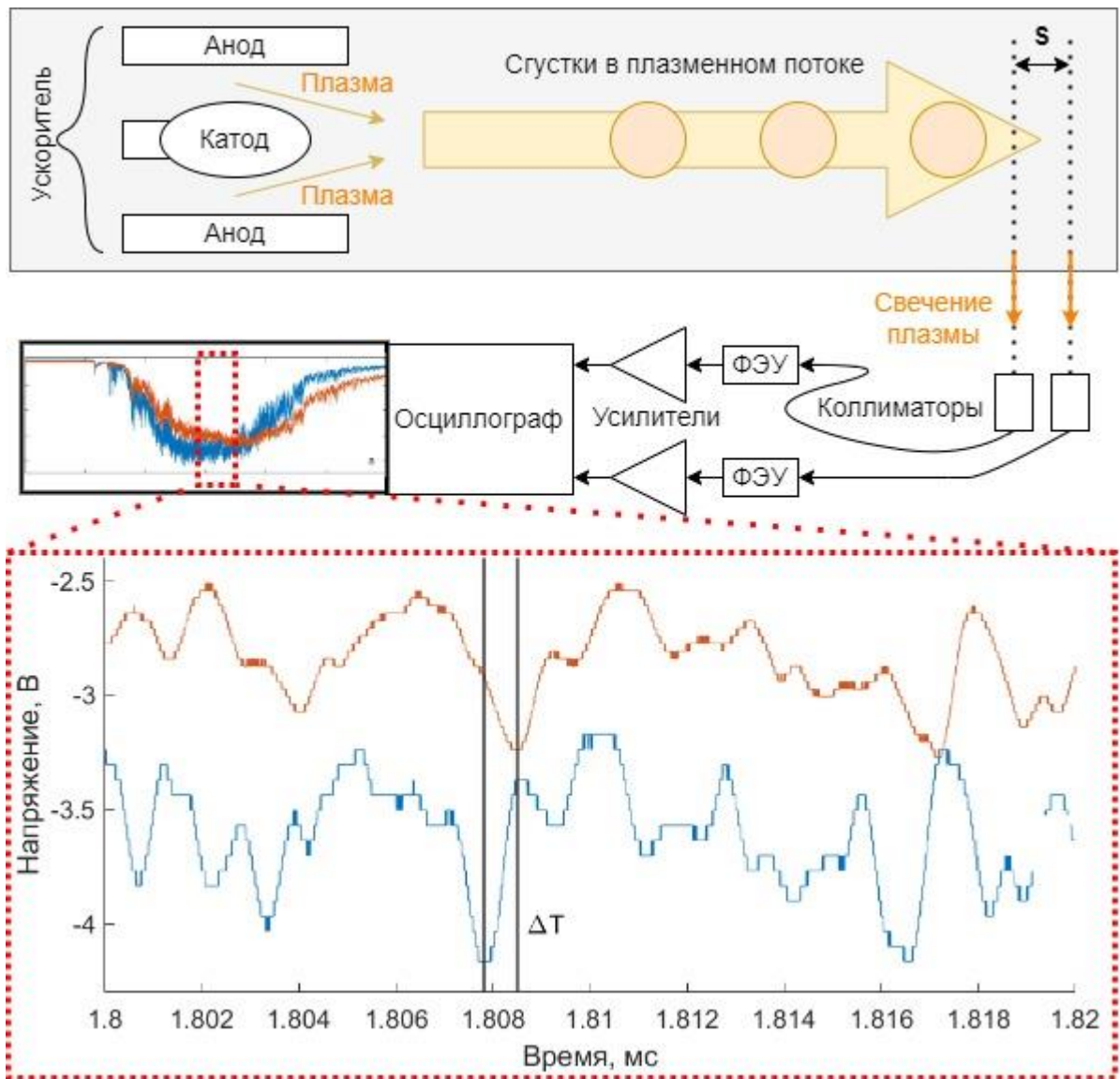


Рис. 1.

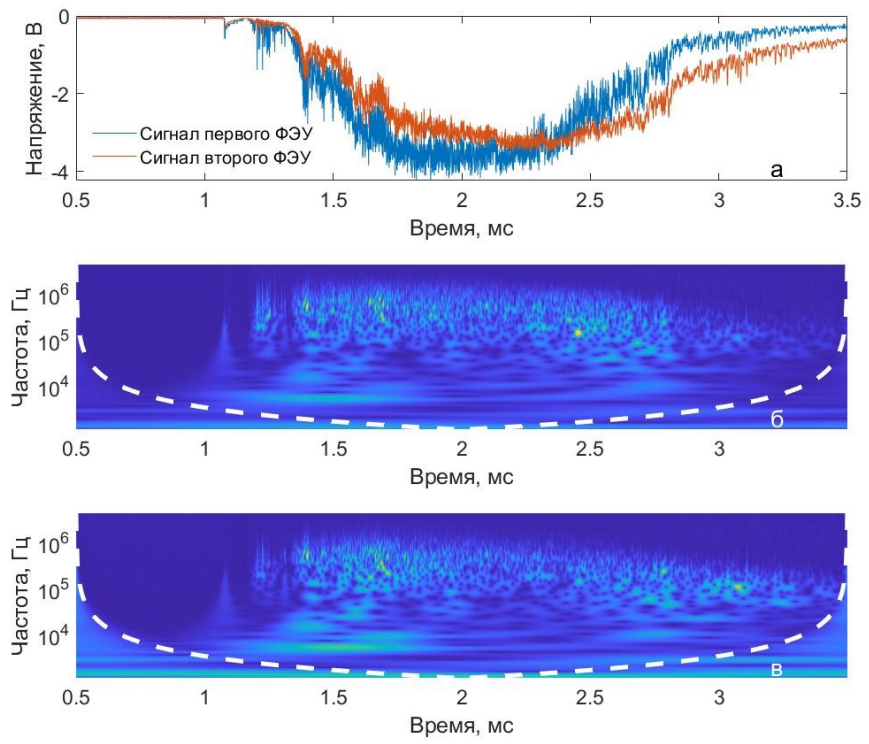


Рис. 2.

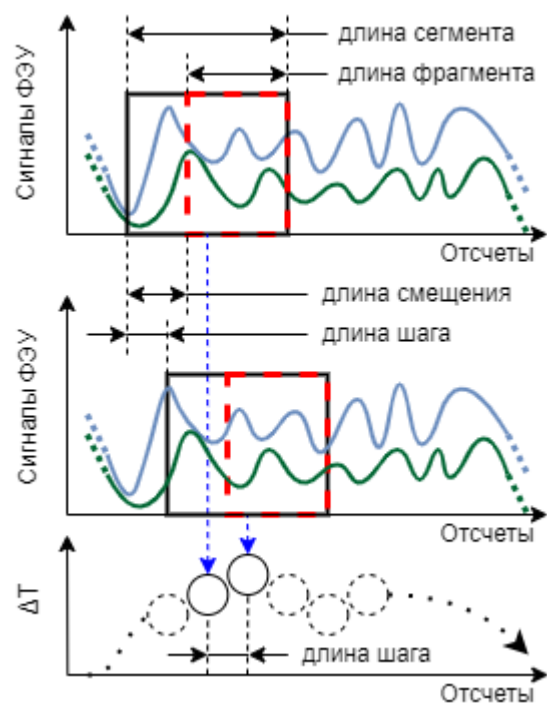


Рис. 3.

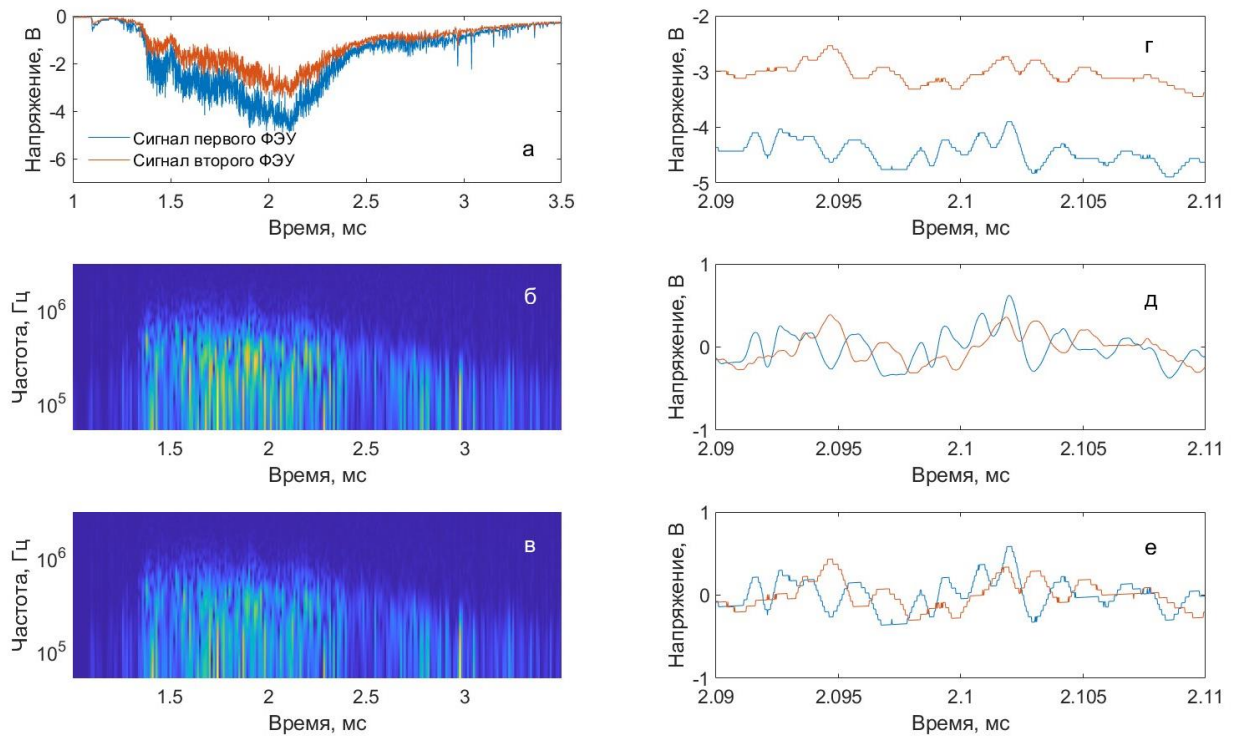


Рис. 4.

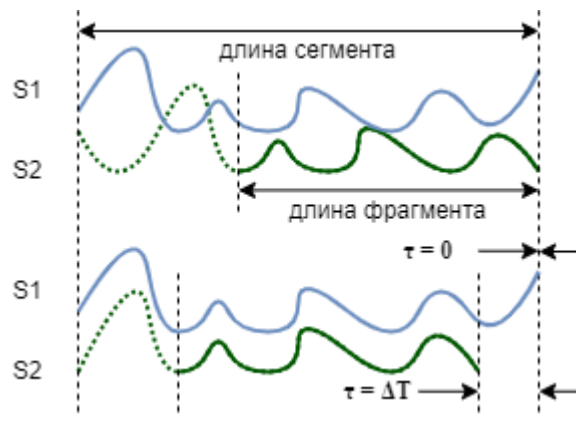


Рис. 5.

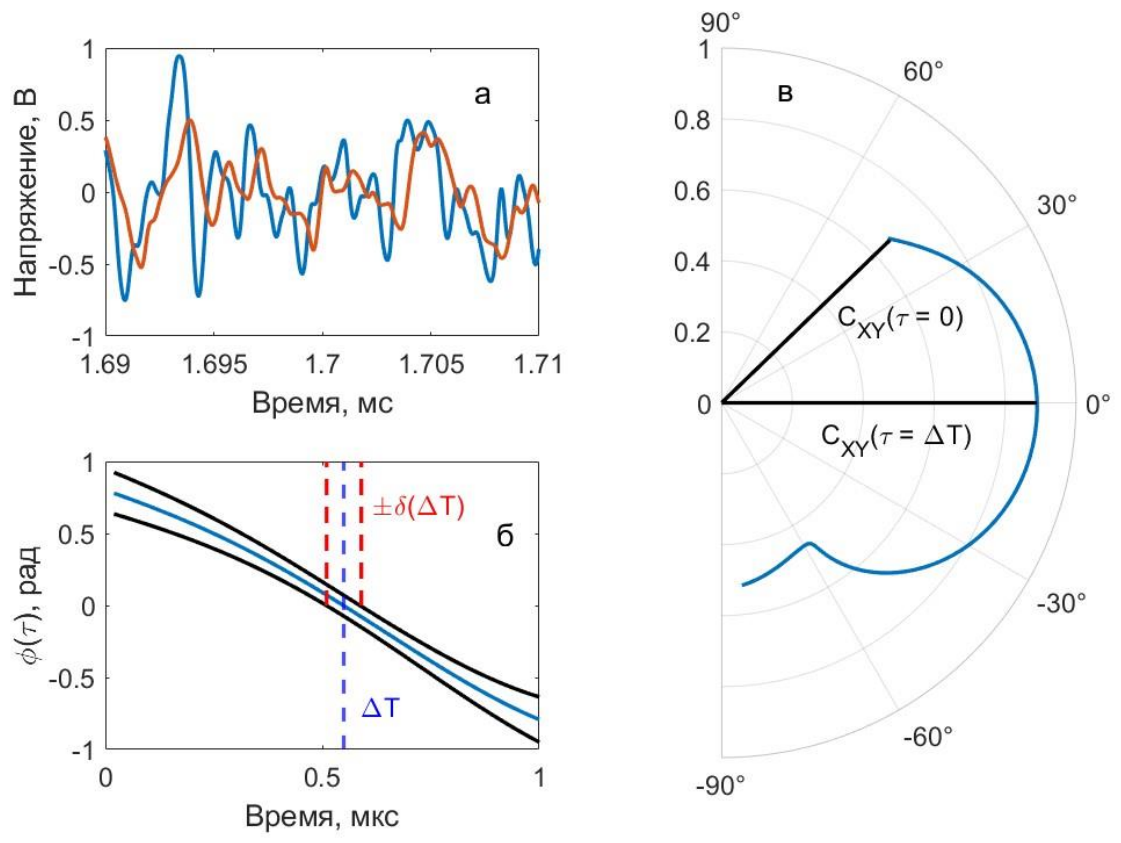


Рис. 6.

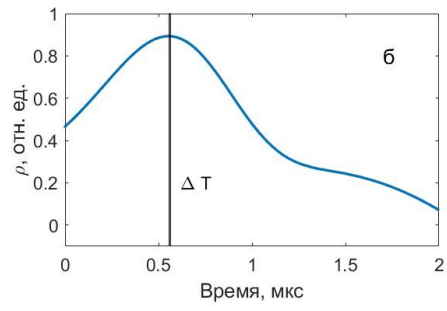
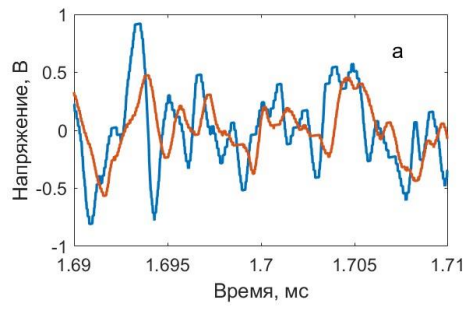


Рис. 7.

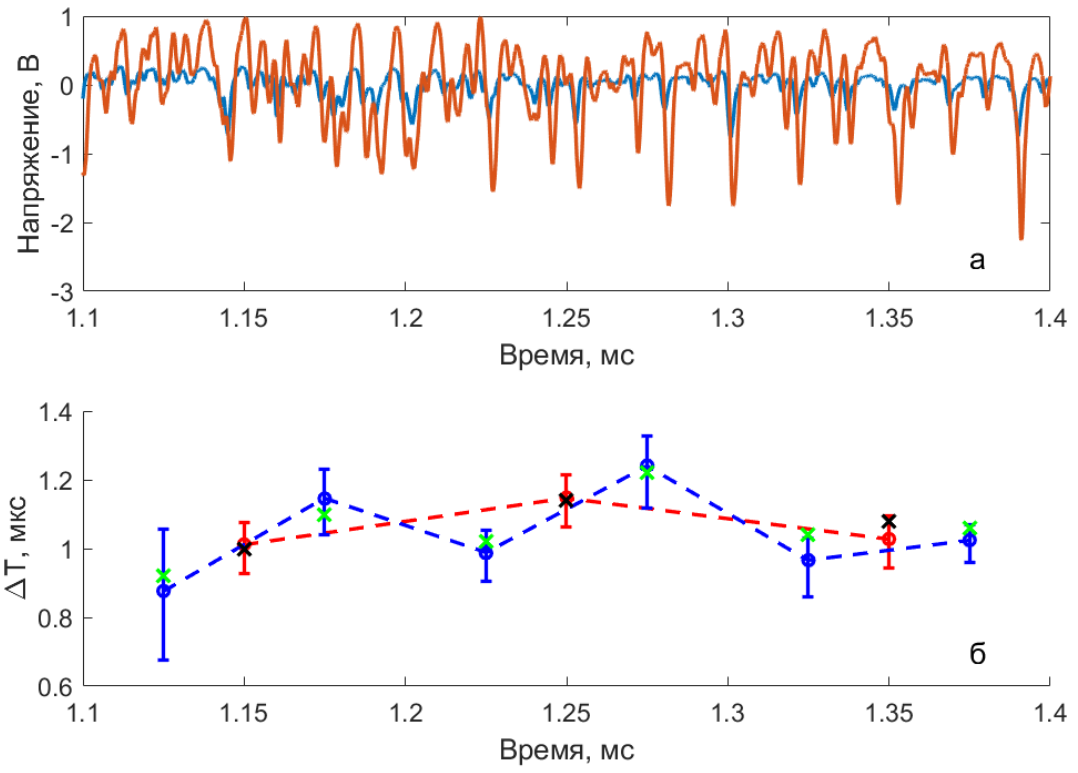


Рис. 8.

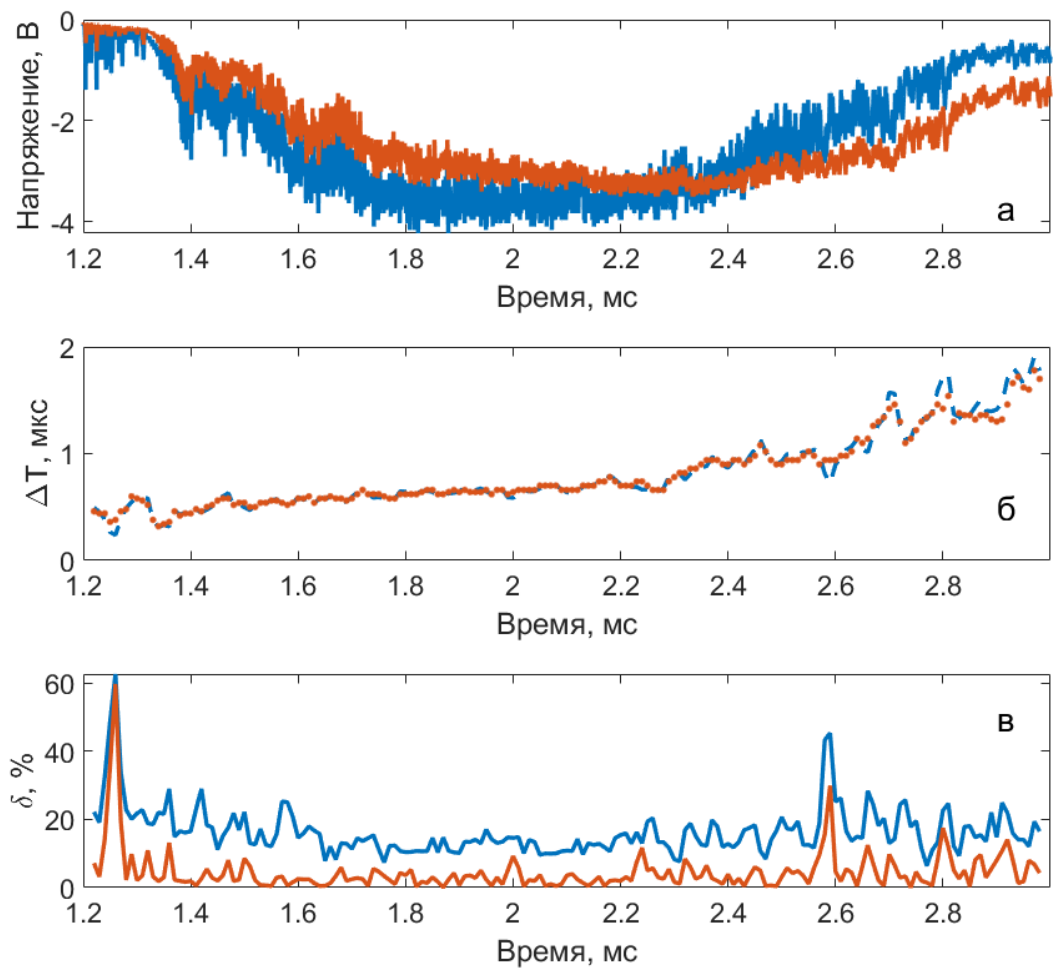


Рис. 9.

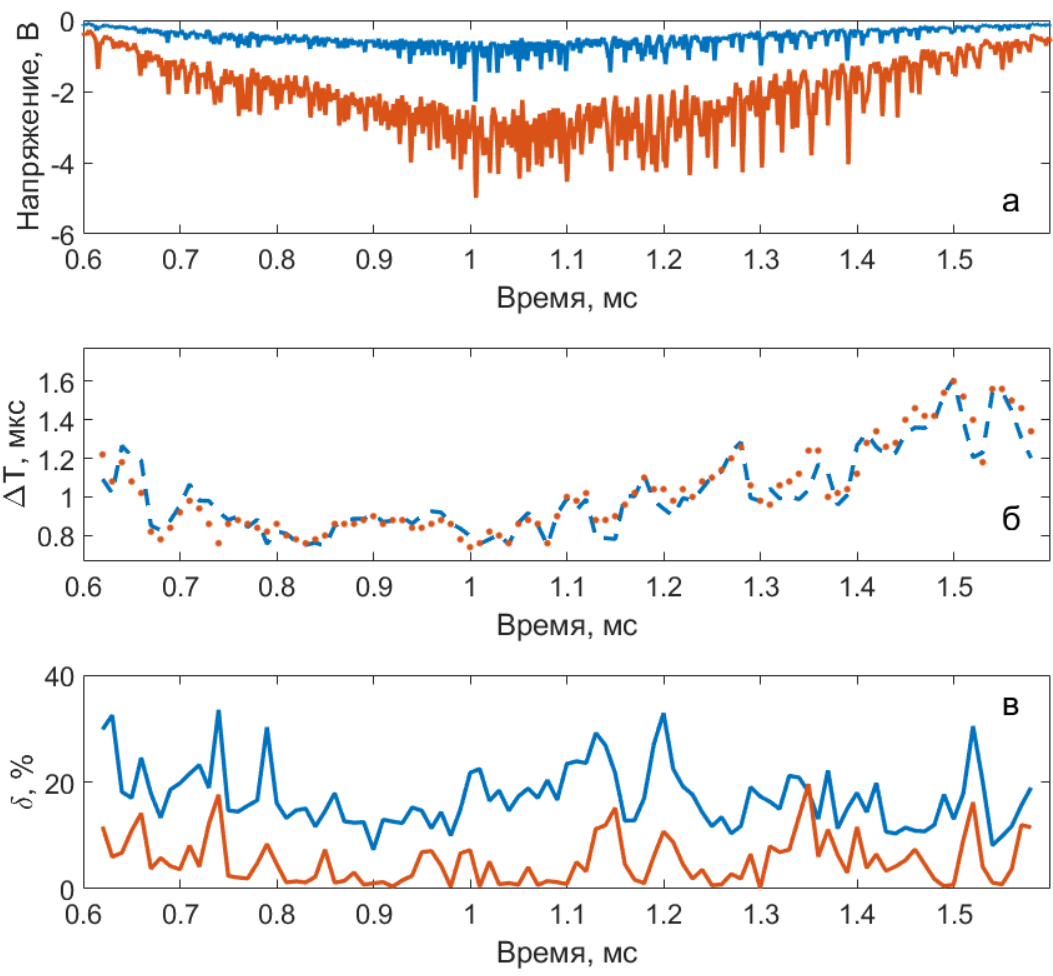


Рис. 10.

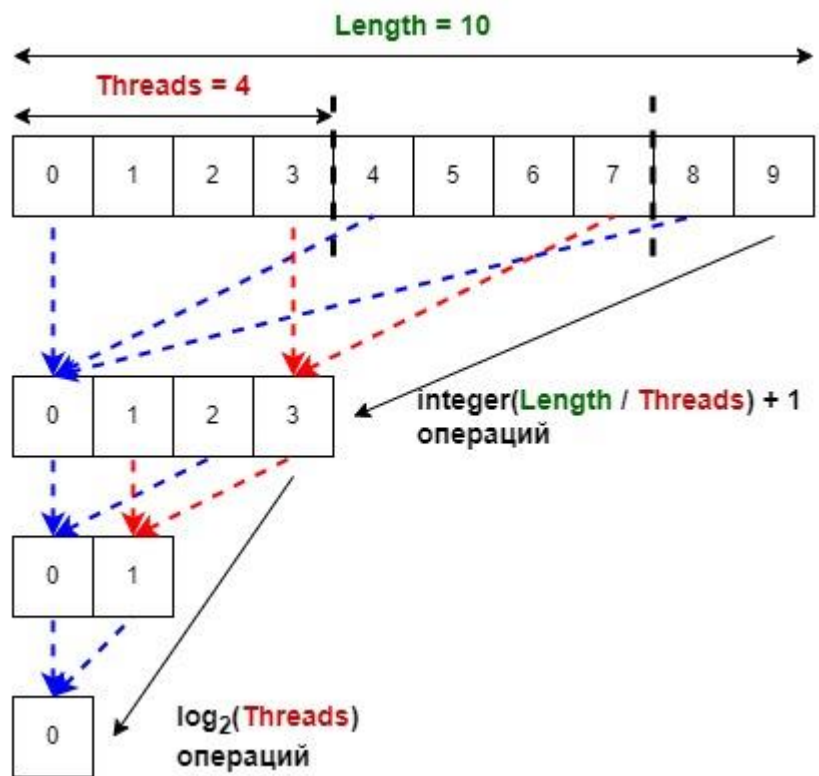


Рис. 11.