

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит (без учета разделов в приложениях) 110 с., 39 рис., 50 табл., 4 прил. Использовано 46 источников.

Ключевые слова: дискретное преобразование Фурье, быстрое преобразование Фурье, БПФ, ДПФ, параллельное программирование, корреляционный анализ, спектральный анализ, частотно-временной корреляционный анализ, цифровая обработка сигналов, оптимизации, ЦП, многоядерные процессоры.

Объектами исследования являются параллельные алгоритмы спектрального и частотно-временного корреляционного анализа на многоядерных центральных процессорах.

Цель работы – реализация параллельных алгоритмов вычисления быстрого преобразования Фурье, функций когерентности, корреляционных и частотно-временных корреляционных функций, оптимизированных с точки зрения времени выполнения, предназначенных для исполнения на многоядерных центральных процессорах.

Задачи работы: аналитический обзор алгоритмов спектрального анализа и вычисления частотно-временной корреляционной функции, изучение и применение к решаемой задаче компиляторного и архитектурного подходов к оптимизации, создание DLL-библиотеки, содержащей оптимизированные с точки зрения времени выполнения функции вычисления прямого и обратного быстрого преобразований Фурье, оконных весовых функций, корреляционных и частотно-временных корреляционных функций и функции когерентности на многоядерных процессорах с учётом их архитектурных особенностей и интеграция разработанной библиотеки в существующее программное обеспечение корреляционного тепчепоискового комплекса.

В процессе исследования проводились: исследование параллельных способов вычисления быстрого преобразования Фурье, функций когерентности, взаимно-корреляционных и частотно-временных корреляционных функций и оптимизаций для максимального повышения производительности применительно к решению задачи поиска местоположения утечки жидкости методом акустической эмиссии; оценка эффективности разработанных параллельных алгоритмов на многоядерных центральных процессорах.

В результате исследования получены результаты, подтверждающие возможность и целесообразность применения многоядерных процессоров в задачах выполнения алгоритмов спектрального анализа и вычисления частотно-временных корреляционных функций.

Степень внедрения: теоретические и практические результаты, полученные в данной работе были успешно использованы в тепчепоисковом программном комплексе.

Область применения: результаты данной работы (теоретические и программный код), могут быть использованы при разработке корреляционных тепчеискателей, предусматривающих возможность применения частотно-временного корреляционного анализа.

Экономическая эффективность/значимость работы: данная работа является необходимым этапом разработки корреляционного тепчеискателя нового типа.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

БПФ – быстрое преобразование Фурье;
ВКФ – взаимнокорреляционная функция;
ГП – графический процессор;
ДПФ – дискретное преобразование Фурье;
НИР – научно-исследовательская работа;
НР – научный руководитель;
ОБПФ – обратное быстрое преобразование Фурье;
ОС – операционная система;
ПО – программное обеспечение;
ПФ – полосовой фильтр;
ЦОС – цифровая обработка сигналов;
ЦП – центральный процессор;
ЧВ ВКФ – частотно-временная взаимнокорреляционная функция.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	15
1 АЛГОРИТМЫ СПЕКТРАЛЬНОГО И ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОГО КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА	17
1.1 Спектральный анализ	17
1.1.1 Ряды Фурье.....	17
1.1.2 Дискретное преобразование Фурье	19
1.1.3 Быстрое преобразование Фурье	21
1.1.4 Алгоритм Кули-Тьюки.....	23
1.1.5 Алгоритмическая реализация обработки сигналов при решении задачи обнаружения утечек	26
1.1.6 Функции когерентности.....	28
1.2 Частотно-временной корреляционный анализ.....	30
2 ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ СПЕКТРАЛЬНОГО И ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОГО КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА.....	33
2.1 Исследование быстрого преобразования Фурье	33
2.1.1 Последовательная реализация быстрого преобразования Фурье	33
2.1.2 Реализация быстрого преобразования Фурье на параллельной архитектуре путём распараллеливания обхода рекурсии в ширину.....	34
2.1.3 Анализ эффективности распараллеливания быстрого преобразования Фурье	35
2.1.4 Вычисление обратного преобразования Фурье через прямое быстрое преобразование Фурье	38
2.2 Исследование взаимнокорреляционной функции	40
2.2.1 Последовательная и параллельная реализация расчёта взаимнокорреляционной функции.....	40
2.2.2 Анализ эффективности распараллеливания взаимнокорреляционной функции	43

2.3	Исследование функций когерентности	48
2.3.1	Последовательная и параллельная реализация расчёта функций когерентности	48
2.3.2	Анализ эффективности распараллеливания функций когерентности	51
2.3.3	Оптимизация работы с памятью при расчёте функций когерентности	57
2.4	Исследование частотно-временных корреляционных функций	62
2.4.1	Последовательная и параллельная реализация расчёта частотно-временных корреляционных функций	62
2.4.2	Применение архитектурных и компиляторных оптимизаций к вычислению частотно-временных корреляционных функций	64
3	ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	67
3.1	Оценка коммерческого потенциала и перспективности с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	67
3.1.1	Потенциальные потребители результатов исследования	67
3.1.2	Анализ конкурентных технических решений	68
3.1.3	SWOT-анализ	68
3.2	Определение возможных альтернатив проведения научных исследований	69
3.3	Планирование научно-исследовательских работ	70
3.3.1	Структура работ в рамках планируемого исследования	70
3.3.2	ГРАФИК ПРОВЕДЕНИЯ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ	70
3.3.3	Бюджет научно-технического исследования	73
3.4	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	81
3.4.1	Расчёт интегральных показателей финансовой эффективности	81
3.4.2	Расчёт интегральных показателей ресурсоэффективности	81

3.4.3 Расчёт интегральных показателей эффективности вариантов исполнения разработки	82
3.5 Оценка научно-технического уровня научно-исследовательской работы.....	83
3.6 Оценка экономического эффекта	85
4 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	87
4.1 Введение.....	87
4.2 Производственная безопасность.....	87
4.2.1 Анализ вредных производственных факторов и санитарных норм	88
4.2.2 Анализ опасных производственных факторов	94
4.3 Экологическая безопасность.....	95
4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях (техногенного, природного, социального характера).....	97
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	98
CONCLUSION	99
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СТУДЕНТА	100
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	106
Приложение А (Обязательное). Некоторые оконные функции.....	111
Приложение Б (Обязательное). Архитектурные и компиляторные оптимизации	113
Б.1 Архитектурные оптимизации	113
Б.1.1 Векторизация	113
Б.1.2 Упреждающее помещение данных в кэш первого уровня.....	114
Б.1.3 Уменьшение числа ветвлений.....	114
Б.2 Компиляторные оптимизации	115
Приложение В (Обязательное). Анализ эффективности распараллеливания вычисления частотно-временной корреляционной функции	116
Приложение Г (Обязательное). Application of time-frequency correlation analysis for leak detection	120

G.1 Time-frequency correlation analysis	120
G.2 Algorithm of the time-frequency correlation function acquisition.....	123
G.3 Informative assessment of time-frequency correlation function	126
G.4 The study of signals received during the leakage survey	129

ВВЕДЕНИЕ

Аварии на нефтепроводах и коммунальных трубопроводах, сопровождающиеся истечением жидкости, причиняют значительный экономический и экологический ущерб. Несмотря на контрольные, профилактические и иные мероприятия, направленные на оперативное выявление мест утонения стенок трубопроводов и их превентивный ремонт, полностью исключить аварии и прорывы не удастся. Последнее, в том числе, связано с тем, что одной из ключевых причин аварийности были и остаются несанкционированные врезки.

Необходимым условием для своевременного устранения аварий и ликвидации их последствий является оперативное определение местоположения утечек и врезок. Для решения данной задачи разработано и применяется большое количество методов, отличающихся чувствительностью, помехозащищенностью, скоростью и точностью определения координат мест утечек и врезок. Важное место среди таких методов занимает корреляционно-акустический метод, основанный на приёме и корреляционной обработке сигналов акустической эмиссии источником которых является истекающая из трубопровода жидкость.

Благодаря высокой чувствительности и точности, средства контроля, основанные на применении корреляционно-акустического метода, находят применение, в том числе при поиске утечек на магистральных нефтепроводах. При этом, такие течеискатели могут быть реализованы и как портативные устройства, и как стационарные системы для непрерывного контроля. Последнее особенно актуально на подводных переходах нефтепроводов, а также переходов нефтепроводов через железные и автодороги.

Несмотря на принципиальную применимость метода для решения различных задач обнаружения утечек, качество их решения определяется эффективностью цифровой обработки сигналов. Данная работа посвящена исследованию, оптимизации и программной реализации алгоритмов

спектрального анализа и вычисления частотно-временной корреляционной функции, обладающей рядом преимуществ, по сравнению с традиционными подходами, для корреляционной обработки акустических сигналов в рамках проекта РФФИ (№16-37-00049 мол_а).

1 АЛГОРИТМЫ СПЕКТРАЛЬНОГО И ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОГО КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА

1.1 Спектральный анализ

При решении ряда типовых задач исследования и обработки сигналов (таких как фильтрация, определение гармонического состава и спектральной плотности и др.) наряду данными об изменении сигналов во временной области, используются также их частотные характеристики. В общем случае, они представляют собой зависимость определенной, представляющей интерес для исследователя, характеристики сигнала от частоты. Эти две формы представления данных в различных областях дают дополняющую друг друга информацию об исследуемых сигналах [1]. Математическая операция, позволяющая осуществить переход от временной области к частотной получила название преобразования Фурье. В настоящее время Дискретное Преобразование Фурье (ДПФ) широко применяется в ЦОС и других областях науки и техники, в том числе и в задачах поиска утечек в трубопроводах.

1.1.1 Ряды Фурье

Любой T - периодический сигнал $x(t)$, изменяющийся во времени, может быть представлен в виде суммы постоянного члена и некоторого числа синусоидальных и косинусоидальных членов, имеющих частоты кратные $\omega = 2\pi/T$. Такое представление называется рядом Фурье и определяется следующим выражением [2]:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega T) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega T), \quad (1)$$

где коэффициенты a_n , $n = 0, 1, \dots, \infty$ и b_m , $m = 1, 2, \dots, \infty$ получаются из соображений попарной ортогональности функций $\sin(i\omega T)$ и $\cos(n\omega T)$ на отрезке $[0, T]$ [2]:

$$\int_0^T \sin(n\omega T) \cos(m\omega T) dt = 0,$$

$$\int_0^T \sin(n\omega T) \sin(m\omega T) dt = \int_0^T \cos(n\omega T) \cos(m\omega T) dt = \begin{cases} 0, n \neq m \\ T/2, n = m \end{cases}$$

Из условий, приведенных выше, путем несложных преобразований могут быть получены следующие выражения для определения коэффициентов:

$$a_n = 2/T \int_0^T x(t) \sin(n\omega T) dt, \quad (2)$$

$$b_n = 2/T \int_0^T x(t) \cos(n\omega T) dt. \quad (3)$$

В полученном представлении частоты $n\omega$ принято называть n – ыми гармониками частоты ω . Следовательно, ряд (1) содержит зависящие от частоты синусоидальные и косинусоидальные члены с различными амплитудами a_n и b_n на положительных частотах гармоник $n\omega$ [2].

Для удобства, часто используется альтернативная форма записи, носящая название комплексной. Она может быть получена путем перехода от тригонометрических функций к комплексным экспонентам по формуле Эйлера [2]:

$$\cos n\omega t = \frac{1}{2} (e^{i \cdot n\omega t} + e^{-i \cdot n\omega t}), \quad (4)$$

$$\sin n\omega t = \frac{1}{2i} (e^{i \cdot n\omega t} - e^{-i \cdot n\omega t}). \quad (5)$$

После подстановки (4) и (5) в исходное выражение (1) и приведения подобных получено следующее выражение [1]

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_n e^{in\omega t}. \quad (6)$$

Комплексные коэффициенты d_n могут быть определены из выражения (6) способом использованным ранее:

$$d_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{-in\omega t} dt. \quad (7)$$

В выражении (7) интегрирование осуществляется в диапазоне $[-T/2, T/2]$, однако из свойств интегралов периодических функций следует, что интегрирование может осуществляться на любом интервале длительностью

в период, то есть $[t_0, t_0 + T]$ при любом значении времени начала отсчета t_0 [12].

Следует обратить внимание, что в выражении (6) коэффициент n при члене ωt принимает как положительные, так и отрицательные значения, следовательно, половину ряда составляют отрицательные частоты $-n\omega$. Они в полной мере не имеют физического смысла и являются скорее математическим понятием, однако отрицательные частоты все же может быть интерпретированы как вращение с угловой скоростью $n\omega$ в направлении противоположном принятому за положительное [2]. Тем не менее, вследствие того, что амплитуды $|d_n|$ равномерно распределяются между соответствующими положительными и отрицательными частотами, для определения реального значения амплитуды на частоте $n\omega$ необходимо удвоить рассчитанную величину [2]. Для того, чтобы перейти от формы (6) к сумме тригонометрических функций можно воспользоваться следующим выражением:

$$x(t) = d_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} |d_n| \cos(n\omega t + \arg(d_n)). \quad (8)$$

На практике, использование выражения (8) предпочтительнее, чем выражения (1). Это связано с тем, что последнее не обладает свойством инвариантности, то есть изменение начала отчета времени приводит к нетривиальному преобразованию коэффициентов a_n, b_n . Напротив, коэффициенты d_n в выражении (8) инвариантны к выбору начала отсчета, следовательно, при наблюдении одного и того же сигнала будут получаться одинаковые значения коэффициентов [2].

1.1.2 Дискретное преобразование Фурье

Прямое и обратное дискретные преобразование Фурье эквиваленты разложению функции в ряд, при условии, замены интеграла его приближенными значениями, вычисленными по формуле прямоугольников [2].

Пусть сигнал $x(t)$ наблюдается на ограниченном отрезке $[-T/2; T/2]$. В таком случае, формулы преобразования Фурье совпадают с формулами для коэффициентов d_n ряда Фурье периодической функции, полученной продолжением на всю вещественную ось функции $x(t)$. Таким образом, формула прямого дискретного преобразования Фурье может быть получена из (7), путем замены интеграла суммой в соответствии с методом прямоугольников [2]

$$d_n = \frac{1}{T} \sum_{k=-N/2}^{N/2} x(k \frac{T}{N}) \cdot e^{-i \frac{n \omega k T}{N}} \cdot \frac{T}{N}, \quad (9)$$

где N - количество временных отсчетов; $T/N = T_0$ - интервал дискретизации. С учетом того, что $\omega = 2\pi/T$, выражение может быть переписано следующим образом

$$d_n = \frac{1}{N} \sum_{k=-N/2}^{N/2} x(kT_0) \cdot e^{-i \frac{2n\pi \cdot k}{N}}. \quad (10)$$

Если $d_n = 0$ при $|n| > N/2$, обратная формула имеет вид

$$x_k = x(kT_0) = \sum_{n=-N/2}^{N/2} d_n \cdot e^{i \frac{2n\pi \cdot k}{N}}. \quad (11)$$

Таким образом, (10) и (11) – прямое и обратное преобразования Фурье соответственно. Последовательность $|d_n|$ называют амплитудным дискретным спектром временного ряда x_k [2].

Другой распространенной формой записи формул ДПФ является запись через поворачивающий множитель

$$W_N = e^{i \frac{2\pi}{N}}. \quad (12)$$

Используя (12) можно переписать (10) и (11) как

$$d_n = \frac{1}{N} \sum_{k=-N/2}^{N/2} d_k \cdot W_N^{-nk}, \quad (13)$$

$$x_k = \sum_{n=-N/2}^{N/2} d_n \cdot W_N^{nk}. \quad (14)$$

Несмотря на то, что ДПФ связано с приближенным вычислением коэффициентов ряда Фурье, оно обладает свойством взаимной однозначности образа и оригинала. Среди других свойств ДПФ – N -периодичность последовательностей d_n и x_k , что позволяет производить в (9) и (10) суммирование по любым последовательным N отсчетам [2].

При неправильном выборе частоты дискретизации сложного сигнала наблюдается явление растекания спектра [1]. Взвешивание окном уменьшает утечку ДПФ за счёт уменьшения уровня боковых лепестков [3]. Различные взвешенные оконные функции приведены в приложении А.

1.1.3 Быстрое преобразование Фурье

В связи с тем, что вычисление ДПФ по формулам (10) и (11) требует большого количества операций, широко используется более эффективный с данной точки зрения подход, получивший название быстрого преобразования Фурье (БПФ). В его основу положен эффективный алгоритм расчета последовательности [2]

$$A_n = \sum_{k=0}^{N-1} a_k \cdot W_N^{-nk}. \quad (15)$$

К вычислению последовательности с помощью (15) может быть сведено как прямое, так и обратное ДПФ. Из (13) и (15) видно, что если $a_k = x_k$, то $A_n/N = d_n$. Аналогично, из (14) и (15) следует, что если $a_k = d_{N-k}$ при $k > 0$ и $a_k = d_k$ при $k = 0$, то $A_k = d_k$.

Эффективная схема вычисления (15) реализуется через формулу, получившую название формулы Ланцоша – Даниэльсона [2]

$$A_n = \begin{cases} A_n^0 + W_N^{-n} A_n^1, & 0 \leq n < M \\ A_{n'}^0 - W_N^{-n'} A_{n'}^1, & M \leq n < N \end{cases} \quad (16)$$

где $N = 2M$, $n' = n - M$, а последовательности A_n^0, A_n^1 могут быть вычислены по следующей формуле [2]

$$A_n^q = \sum_{k=0}^{M-1} a_{2k+q} W_N^{-nk}, q = 0,1. \quad (17)$$

Применение (16) позволяет свести задачу вычисления исходной последовательности к задаче вычисления двух вдвое меньших последовательностей содержащих четные и нечетные члены исходной, что видно из (17). Рекуррентное применение (16), позволяет в конечном итоге, свести вычисление - точечной последовательности к вычислению N одноточечных и последующим многоэтапным расчетам по (16). При этом вычисление одноточечной последовательности фактически не требуется, так как $A_n = a_k$.

Таким образом, прежде всего вычисление ДПФ по методу БПФ требует разбиения последовательности a_k , имеющей $N = 2^r$ членов, на N одноточечных последовательностей. Для этого, требуется r последовательных делений a_k по (16). В таблице 1 смоделирована данная процедура для $r = 3$ [2].

Связь индексов всех элементов в исходном и конечном массивах показана в таблице 2. Из таблицы 2 видно, что разбиение исходной последовательности на одноточечные сводится к перестановке элементов (операция «бит-реверсирование»), причем индекс элемента в выходном массиве получается путем «переворачивания» индекса данного элемента в исходном массиве. Далее происходят последовательные расчеты по (16) [2].

Таблица 1– Разбиение исходной последовательности для $N=8$

Исходная последовательность	Этап разбиения		
	Первый	Второй	Третий
a_0	a_0	a_0	a_0
a_1	a_2	a_4	a_4
a_2	a_4	a_2	a_2
a_3	a_6	a_6	a_6
a_4	a_1	a_1	a_1
a_5	a_3	a_5	a_5
a_6	a_5	a_3	a_3
a_7	a_7	a_7	a_7

Таблица 2– Связь между индексами элементов (бит-реверсирование)

Элемент	Индекс в исходном массиве	Индекс в выходном массиве
a_0	000 (0)	000 (0)
a_1	001 (1)	100 (4)
a_2	010 (2)	010 (2)
a_3	011 (3)	110 (6)
a_4	100 (4)	001 (1)
a_5	101 (5)	101 (5)
a_6	110 (6)	011 (3)
a_7	111 (7)	111 (7)

В связи с тем, что специфика многих задач предполагает все элементы a_k вещественными, не требуется полного объема вычислений по (16). Наиболее известным алгоритмом БПФ, предназначенным для решения указанных задач, является алгоритм Кули – Тьюки (также известен как алгоритм «бабочка»).

1.1.4 Алгоритм Кули-Тьюки

Данный алгоритм отличают наглядность (схема производимых вычислений, может быть легко изображена графически), относительная простота и достаточно высокое быстродействие. Количественно быстродействие оценивается следующим образом – количество необходимых операций умножения для БПФ имеет порядок $N \log_2 N$, в то время как для ДПФ - N^2 . При $N = 1024$, алгоритм БПФ выполняется примерно в 208 раз быстрее, чем ДПФ [2].

Дополнительная минимизация вычислительных операций в алгоритме Кули-Тьюки при вычислении быстрого преобразования Фурье достигнута за счёт использования разбиения исходной анализируемой последовательности на две, более коротких (рисунок 1). При этом количество операций сокращается в два раза [4].

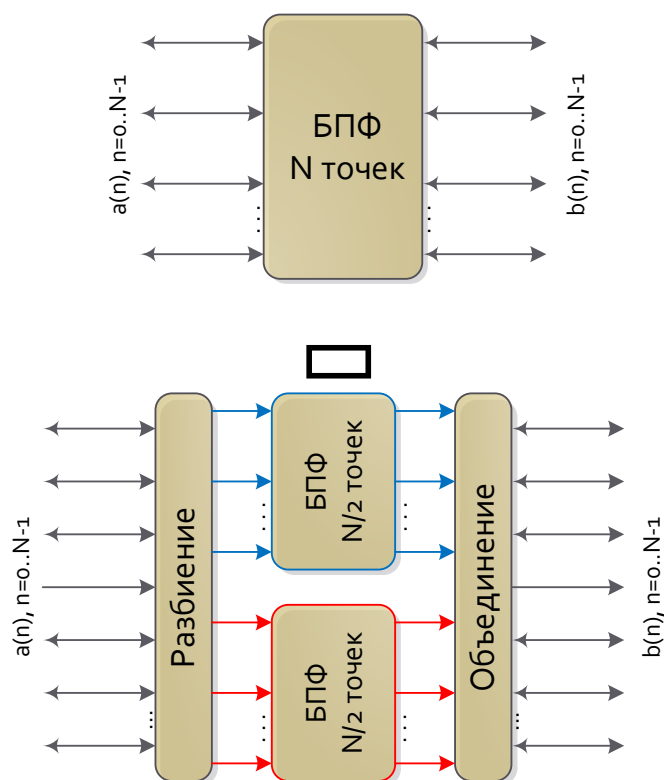


Рисунок 1 – Замена N -точного БПФ двумя $N/2$ -точными БПФ

Необходимо отметить, что последующее разбиение полученных последовательностей возможно проводить до тех пор, пока число отсчетов в анализируемой выборке кратно 2. При $N=8$ возможное разбиение представлено на рисунке 2 [4].

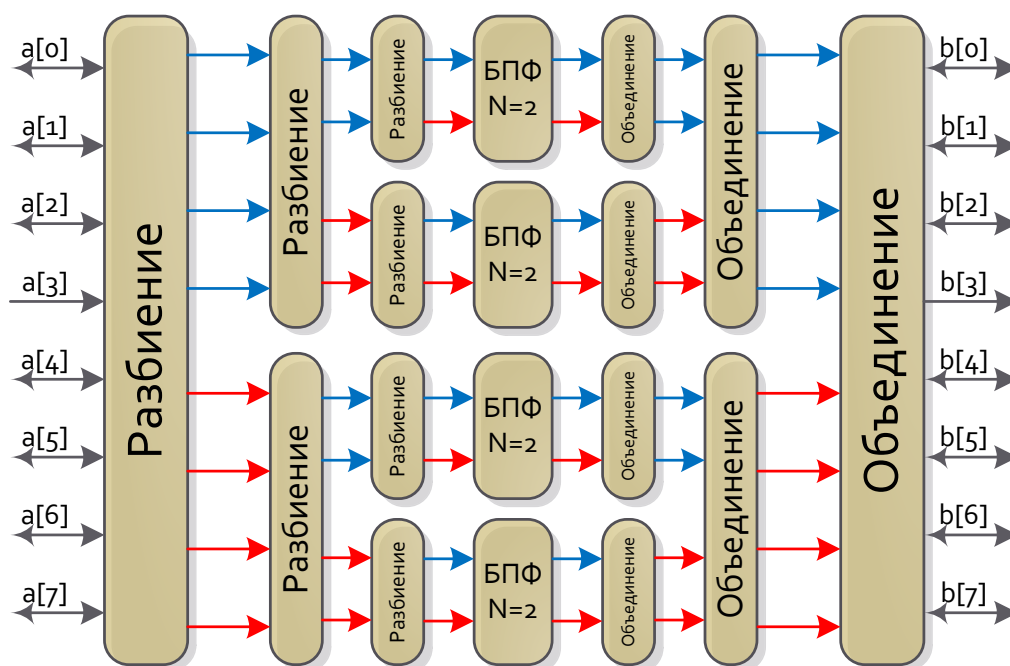


Рисунок 2 – Разбиение и объединение последовательности при $N=8$

Операции объединения и разбиения проводятся в соответствии с сигнальными графами [3].

В связи с тем, что сигнальный граф «бабочка» с прореживанием по времени и бит-реверсным порядком входной последовательности (рисунок 3) обладает понятной структурой и легко поддаётся распараллеливанию в контексте «вычислительных задач» будем использовать его в дальнейшей работе.

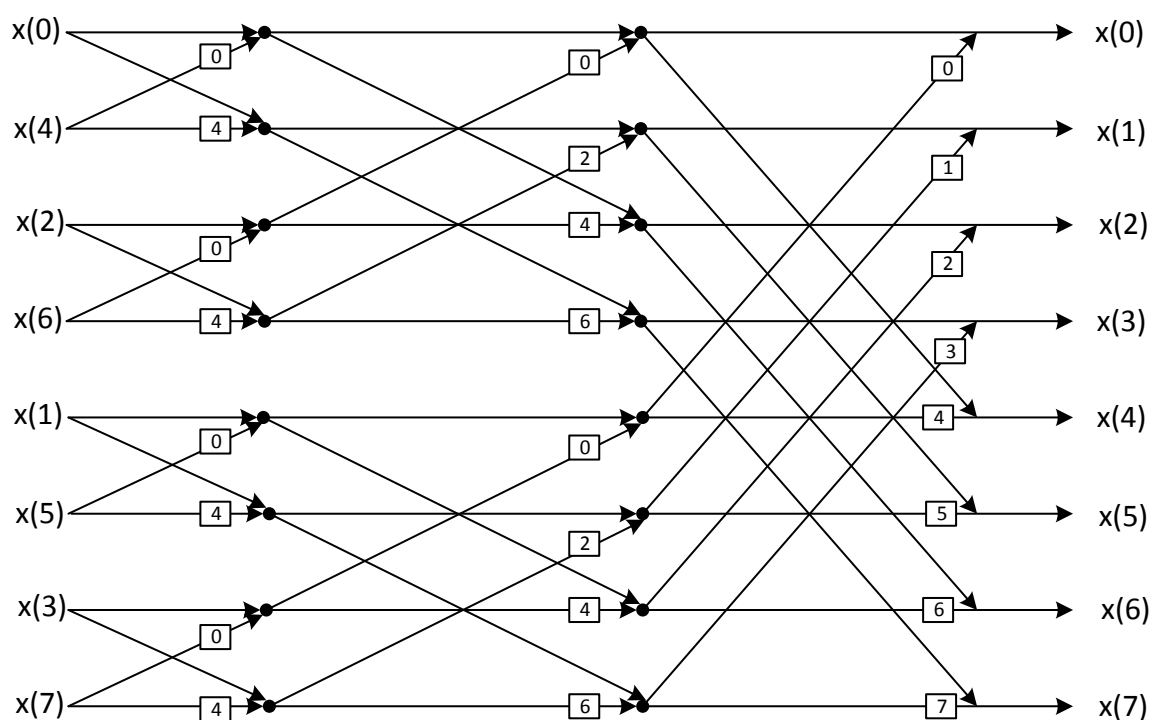


Рисунок 3 – Сигнальный граф «бабочка» для 8-точечного БПФ с прореживанием по времени, входные отсчёты которого подвергнуты бит-реверсивной перестановке

На рисунке 3 цифрами в прямоугольниках показаны поворотные коэффициенты. Например, 0 в прямоугольнике значит W_8^0 .

Отметим, что в этом сигнальном графе на каждом вычислительном этапе повторяется одна и та же операция, которая в литературе носит название операция «бабочка» [5].

Обозначим верхний вход через x , нижний – через y , тогда верхний выход будет определяться выражением (18), а нижний – выражением (19).

$$x' = x + W_N^k y. \quad (18)$$

$$y' = x + W_N^{k+N/2} y. \quad (19)$$

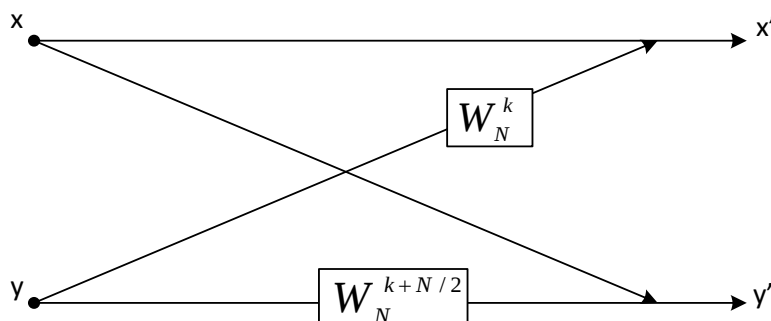


Рисунок 8 – Операция «бабочка»

1.1.5 Алгоритмическая реализация обработки сигналов при решении задачи обнаружения утечек

Обнаружение утечки корреляционно-акустическим методом сводится к вычислению взаимной корреляционной функции сигналов, поступающих с датчиков. Блок обработки сигналов, на основании полученных данных осуществляется вычисление взаимной корреляционной функции (ВКФ) [6]

$$r_{AB}(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=N/2}^{N+N/2} s_A(i) s_B(i+j), \quad (20)$$

где $j = -N/2, -1, 0, 1, \dots, N/2 - 1$. Оценка запаздывания $\bar{\tau}_0$ определяется по максимуму взаимной корреляционной функции j_0 с использованием очевидного соотношения [6]

$$\bar{\tau}_0 = j_0 \cdot \Delta t. \quad (21)$$

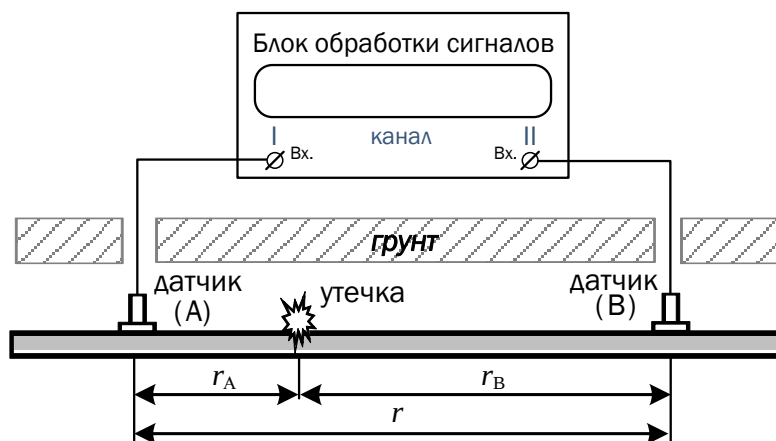


Рисунок 9 – Схема обнаружения утечки корреляционно-акустическим методом

В соответствии с рисунком 9 расстояние от любого из датчиков до утечки (r_A и r_B) [1] определяется по формуле (22):

$$r_{A,B} = \frac{r \pm \tau_0 v}{2}, \quad (22)$$

где v - скорость распространения сигнала по линейному участку трубопровода; r_A и r_B – расстояния от утечки до датчиков А и В соответственно; r - расстояние между датчиками.

Однако на практике, так как размер исследуемых выборок достаточно велик, использование (20) для вычисления корреляционной функции не является целесообразным. Очевидно, что реализация (20) требует умножения каждого отсчета последовательности s_A , на каждый из отсчетов последовательности s_B , то есть N^2 операций умножения [1]. Так как величина N оказывает влияние на точность обнаружения утечки, она является достаточно большой (имеет порядок десятков тысяч), что затрудняет расчет корреляции непосредственно.

Таким образом, для больших N более эффективным способом расчета корреляционной функции является использование алгоритма Тоома-Кука [7]. В основу алгоритма положена теорема о корреляции, которая описывается следующим соотношением

$$R_{AB}(j) = \frac{1}{N} \cdot F_D^{-1}[F_D^*(s_A(i)) \cdot F_D(s_B(i))], \quad (23)$$

где F_D – прямое дискретное преобразование Фурье (ДПФ); F_D^{-1} – обратное ДПФ; F_D^* - комплексно-сопряженное представление результатов прямого ДПФ.

Преимущество (23) заключается в возможности использования эффективных алгоритмов ДПФ, описанных в предыдущем разделе, для вычисления взаимной корреляционной функции. Кроме того, специфика расчета ДПФ с помощью алгоритма БПФ позволяет производить его эффективную реализацию на многопроцессорных устройствах, что позволяет получить существенный выигрыш в быстродействии системы обработки сигналов в целом [5].

Описанный алгоритм схематически изображен на рисунке 10.

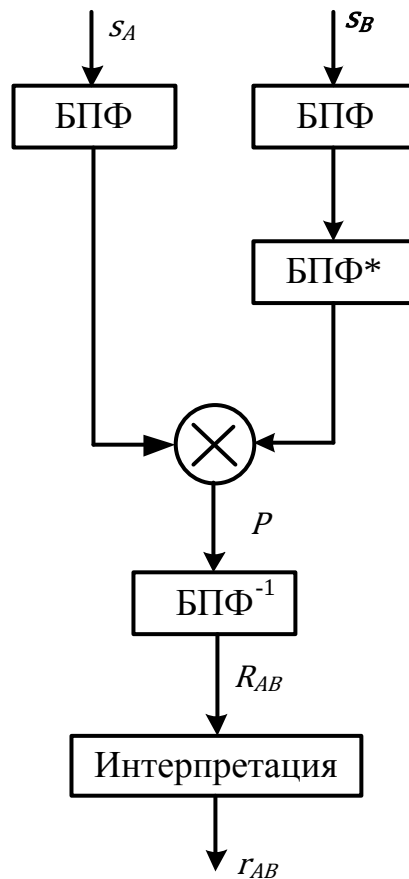


Рисунок 10 – Схема вычисления взаимной корреляции через БПФ

Основным преимуществом корреляционной функции $r_{AB}(j)$ является удобство последующего анализа.

1.1.6 Функции когерентности

Согласно [8], функция когерентности является аналогом функции корреляции в частотной области, то есть отображает степень линейной взаимосвязи между сигналами на различных частотах.

Функция когерентности, как правило, определяется как частное взаимного спектра сигналов и корень из произведения их собственных спектров

$$\gamma(k) = \frac{|E(P_{AB}(k))|}{\sqrt{E(P_A(k))E(P_B(k))}}, \quad (24)$$

где $E(\cdot)$ - оператор усреднения; $P_A(k), P_B(k)$ – собственные спектры сигналов $s_A(i)$ и $s_B(i)$ соответственно. Собственные спектры сигналов могут быть вычислены по следующей формуле:

$$P_A(k) = F_D^*(s_A(i)) \cdot F_D(s_A(i)) = |F_D(s_A(i))|^2. \quad (25)$$

На практике, чаще вычисляется и используется квадрат функции когерентности, вычисляемый по формуле

$$\gamma^2(k) = \frac{|E(P_{AB}(k))|^2}{E(P_A(k))E(P_B(k))}. \quad (26)$$

Стоит отметить, что при вычислении когерентности по (24) или квадрата функции когерентности по (26) производится усреднение значений спектров сигналов по некоторой выборке. В том случае, если выборка представлена единичным набором спектров, (24) и (26) принимают значение равное 1. Действительно, представим спектры сигналов как сумму вещественной и мнимой составляющих:

$$X_A(k) = F_D(s_A(i)) = R_A(k) + i \cdot I_A(k),$$

$$X_B(k) = F_D(s_B(i)) = R_B(k) + i \cdot I_B(k),$$

где $R_A(k), R_B(k)$ – вещественные составляющие спектров сигналов $s_A(i), s_B(i)$; $I_A(k), I_B(k)$ – мнимые составляющие спектров сигналов $s_A(i), s_B(i)$. Далее произведем расчет знаменателя (26):

$$P_A(k) = X_A(k) \cdot X_A^*(k) = R_A^2(k) + I_A^2(k),$$

$$P_B(k) = X_B(k) \cdot X_B^*(k) = R_B^2(k) + I_B^2(k),$$

$$P_A(k)P_B(k) = R_A^2(k)R_B^2(k) + I_A^2(k)I_B^2(k) + R_A^2(k)I_B^2(k) + R_B^2(k)I_A^2(k).$$

Аналогично, производится вычисление числителя (26):

$$P_{AB}(k) = X_A(k) \cdot X_B^*(k) =$$

$$= (R_A(k)R_B(k) + I_A(k)I_B(k)) + i \cdot (I_A(k)R_B(k) - I_B(k)R_A(k)),$$

$$P_{AB}^2(k) = R_A^2(k)R_B^2(k) + I_A^2(k)I_B^2(k) + R_A^2(k)I_B^2(k) + R_B^2(k)I_A^2(k).$$

Несложно убедиться в тождественном равенстве единице отношения

$$\frac{P_{AB}^2(k)}{P_A(k)P_B(k)} \equiv 1.$$

Из вышенаписанного следует, что для получения информативной функции когерентности необходимо использовать выборку, представленную более чем единичным набором спектров.

В литературе [1, 9] встречаются различные подходы к вычислению функции когерентности, отличающиеся способом усреднения значения в знаменателе. Наиболее распространенным в настоящее время является метод усреднения по Бартлетту [10], который описывается (26). С учетом введенных обозначений (26) можно привести к виду

$$\gamma^2(k) = \frac{\left| \sum_{q=0}^{Q-1} P_{ABq}(k) \right|^2}{\sum_{q=0}^{Q-1} P_{Aq}(k) \sum_{q=0}^{Q-1} P_{Bq}(k)}. \quad (27)$$

Альтернативным подходом к получению функции когерентности является вычисление так называемой функции «фазовой» когерентности (для определенности, обозначена как $\dot{\gamma}(k)$) по формуле

$$\begin{aligned} \dot{\gamma}^2(k) &= \frac{|E(P_{AB}(k))|^2}{E(P_A(k) \cdot P_B(k))}, \\ \dot{\gamma}^2(k) &= \frac{\left| \sum_{q=0}^{Q-1} P_{ABq}(k) \right|^2}{\sum_{q=0}^{Q-1} P_{Aq}(k) P_{Bq}(k)}. \end{aligned} \quad (28)$$

Несмотря на то, что когерентный анализ находит широкое применение при обнаружении частотной полосы локализации сигнала утечек и, как правило, способствует решению задачи. Тем не менее, данный подход также не лишен недостатков – в реальных задачах, возможно существование нескольких мод сигнала утечки [1], в связи с чем, функция когерентности может иметь ложные области высоких значений, что в свою очередь может привести к обнаружению ложных утечек [11]. Применение частотно-временного корреляционного анализа для обнаружения утечек будет рассмотрено в следующем разделе работы.

1.2 Частотно-временной корреляционный анализ

Как отмечалось выше, в основе корреляционно-акустического метода лежит оценка времени запаздывания, которая производится, как правило, путём анализа графика ВКФ. При этом традиционно используемые ВКФ, которые могут быть получены с помощью (23), не содержат в явном виде информации о частотных свойствах исследуемых сигналов. Последнее существенно

затрудняет интерпретацию графиков ВКФ в случаях, когда сигнал утечки маскируется интенсивными шумами [11]. С другой стороны существование нескольких мод сигнала утечки ведёт к ложному определению местоположения утечки, используя когерентный анализ.

Для разрешения данной проблемы, в рамках научного коллектива автора, был разработан и зарегистрирован в качестве изобретения метод частотно-временного корреляционного анализа сигналов [12]. Особенностью метода является получение частотно-временных взаимокорреляционных функций (ЧВ ВКФ), в явном виде содержащих информацию о степени коррелированности сигналов в различных частотных областях. Алгоритм получения ЧВ ВКФ приводится далее.

Пусть сигналы $x(t)$ и $y(t)$ представлены дискретными последовательностями $x(t_i)$ и $y(t_i)$ ($i = 0, 1, \dots, N-1$, $N = 2^n$, n - целое) соответственно. На начальном этапе, в соответствии с Теоремой о корреляции [1], путём поэлементного перемножения отсчетов дискретного спектра сигнала $y(t_i)$ и результата комплексного сопряжения дискретного спектра сигнала $x(t_i)$ вычисляется кросс-спектр сигналов $S_{xy}(k)$.

$$S_{xy}(k) = F(y_i) \cdot F^*(x_i), \quad (29)$$

где $k = 0, 1, \dots, 2^{n-1} + 1$, $F^*(x_i)$, $F(y_i)$ - определены в пояснении к (23).

На втором этапе производится разбиение кросс-спектра на M отдельных интервалов, таким образом, чтобы каждый из них содержал спектральные отсчеты, относящиеся только к определенному частотному диапазону. Алгоритмически, данная процедура сводится к формированию M векторов $S_{xy}^m(k)$ ($m = 0, 1, \dots, M-1$) по следующему правилу:

$$S_{xy}^m(k) = S_{xy}(k) \cdot w^m(k), \quad (30)$$

где $w^m(k)$ - оконная функция, определяемая следующим образом

$$w^m(k) = \begin{cases} 1, & \frac{m}{M} < \frac{k}{2^{n-1}+1} \leq \frac{m+1}{M} \\ 0, & \frac{m}{M} \geq \frac{k}{2^{n-1}+1} > \frac{m+1}{M} \end{cases}. \quad (31)$$

На заключительном этапе полученные векторы $S_{xy}^m(k)$ подвергаются обратному дискретному преобразованию Фурье:

$$R_j^m = F^{-1}(S_{xy}^m). \quad (32)$$

Полученный в результате (32) сложный вектор R_j^m состоит из M векторов, каждый из которых в свою очередь содержит все отсчеты ВКФ исходных сигналов $x(t_i)$ и $y(t_i)$ на m -ом частотном интервале. Путём простых преобразований из векторов R_j^m могут быть восстановлены значения ЧВ ВКФ:

$$\begin{cases} \tau_j = j \cdot \frac{1}{f_d}, 0 \leq j < N-1, \\ f_m = \frac{m}{M} \cdot \frac{f_d}{2}, 0 \leq m < M, \\ r_{xy}'(\tau_j, f_m) = R_j^m, \end{cases} \quad (33)$$

где f_d - частота дискретизации исходных сигналов $x(t)$ и $y(t)$.

Учитывая N -периодичность полученных дискретных ВКФ [1] для удобства $r_{xy}'(\tau_j, f_m)$ может быть представлена в виде

$$\begin{cases} r_{xy}(\tau_j, f_m) = r_{xy}'(\tau_j, f_m), 0 \leq j \leq \frac{N}{2} \\ r_{xy}(-\tau_{N-j}, f_m) = r_{xy}'(\tau_j, f_m), \frac{N}{2} \leq j < N \end{cases}. \quad (34)$$

Полученная ЧВ ВКФ $r_{xy}(\tau_j, f_m)$ определена в диапазоне частот до $f_d/2$. В то же время, как и традиционная ВКФ, $r_{xy}(\tau_j, f_m)$ определена на интервале времени запаздывания от $\tau_{\min}$ до $\tau_{\max}$, где

$$\begin{aligned} \tau_{\min} &= -\frac{N}{2} \cdot \frac{1}{f_d}, \\ \tau_{\max} &= \left(\frac{N}{2} - 1\right) \cdot \frac{1}{f_d}. \end{aligned}$$

Поскольку ЧВ ВКФ имеет два независимых аргумента, наиболее наглядным способом ее представления является поверхность, построенная в трехмерном пространстве. В таком случае, признаком наличия утечки является присутствие выраженных пиков на поверхности.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ СПЕКТРАЛЬНОГО И ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОГО КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА

2.1 Исследование быстрое преобразование Фурье

2.1.1 Последовательная реализация быстрого преобразования Фурье

По алгоритму, описанному в пункте 1.1.4, разработана функция для вычисления прямого БПФ. Экспериментальные исследования проводились на трёх процессорах Intel: Core 2 Q6700, Xeon 5160, Core i5-750. В экспериментальных вычислениях размер выборки последовательности варьировался от 4 до 131072 отсчётов. Было произведено 1000 временных замеров 1000 преобразований БПФ. Поскольку существует множество факторов, в том числе псевдопараллельная работа планировщика процессов ядра ОС, обработка прерываний устройств, способных замедлить, но не ускорить проведение вычислительной операции [12, 13], для повышения достоверности за время выполнения принималось наименьшее время по выборке.

Результаты приведены таблице 3.

Таблица 3 – Результаты вычисления 1000 преобразований Фурье

Размер выборки	Intel Core 2 Q6700, с. (4 ядра)	Intel Xeon 5160, с. (2 ядра)	Intel Core i5 -750, с. (4 ядра)
4	0,00024075	0,00021465	0,00015828
8	0,00075717	0,00067474	0,00044916
16	0,00211405	0,0018886	0,00128905
32	0,00541865	0,00486566	0,00333004
64	0,01335926	0,01185663	0,00821746
128	0,03145305	0,02798085	0,01862822
256	0,07274957	0,06557836	0,04182029
512	0,16645052	0,15079034	0,09292365
1024	0,37508703	0,34058475	0,20636104
2048	0,83740993	0,76407335	0,448927
4096	1,84897964	1,6919186	0,97540429
8192	4,04408304	3,72334611	2,12225743
16384	8,79226033	8,13358534	4,60217241
32768	19,0863284	17,86104067	9,90601857

Продолжение таблицы 3 – Результаты вычисления 1000 преобразований Фурье

Размер выборки	Intel Core 2 Q6700, с. (4 ядра)	Intel Xeon 5160, с. (2 ядра)	Intel Core i5 -750, с. (4 ядра)
65536	41,35974078	39,62870942	21,21087834
131072	89,84323728	87,70679429	45,51673787

2.1.2 Реализация быстрого преобразования Фурье на параллельной архитектуре путём распараллеливания обхода рекурсии в ширину

В качестве инструмента параллельных вычислений в данной работе использована кроссплатформенная библиотека Intel® TBB, на основе которой в среде разработки Visual C++ 2015 создано программное обеспечение. Выбор этой библиотеки объясняется использованием вычислительных систем на базе ЦП Intel и AMD.

Для реализации параллельного вычисления БПФ использовался подход, заключающийся в распараллеливании метода обхода рекурсии в ширину при расчёте поворотных коэффициентов графа «бабочка». Основное преимущество такого подхода перед другими реализациями БПФ [14,15] очевидно и заключается в отсутствии необходимости проводить предварительный тест с целью определения оптимальных значений степеней детализации (grainsize) для различных выборок перед массивными математическими вычислениями.

Вычисление БПФ представлено в шаблоне библиотеки Intel TBB как логическая задача класса `tbb::task`, которая в свою очередь порождает другие вычислительные логические задачи в момент разбиения исходной анализируемой последовательности. После объединения последовательностей, соответственно созданные задачи уничтожаются.

Экспериментальные исследования были проведены на модельных примерах с размером выборки 4–131072 отсчётов. Массив входных данных состоял преимущественно из действительных чисел. Экспериментальные исследования проведены на трех процессорах фирмы Intel: Xeon® 5160, Core 2 Quad 6700, Core i5-750.

В таблице 4 приведены временные результаты вычисления быстрого

преобразования Фурье на многоядерных процессорах.

Таблица 4 – Результаты параллельных вычислений 1000 преобразований Фурье

Размер выборки	Intel Core 2 Q6700, с. (4 ядра)	Intel Xeon 5160, с. (2 ядра)	Intel Core i5 -750, с. (4 ядра)
4	0,00056012	0,00029708	0,00017144
8	0,00084838	0,00075982	0,00043799
16	0,00225578	0,00194729	0,0010752
32	0,00570983	0,00492981	0,0028454
64	0,01372574	0,01199732	0,00738605
128	0,03214769	0,02807533	0,01685715
256	0,07459504	0,06530345	0,04056767
512	0,16966321	0,14892508	0,08994134
1024	0,23420794	0,19616322	0,13117278
2048	0,32721335	0,43127884	0,1904456
4096	0,71485054	0,93534788	0,42766034
8192	1,51241585	1,97059527	0,92581837
16384	3,18103463	4,27614957	1,87070088
32768	6,75964589	9,24869119	4,05282814
65536	14,34330215	20,55700017	8,36174447
131072	31,39113339	44,21680053	17,18434964

2.1.3 Анализ эффективности распараллеливания быстрого преобразования Фурье

В параллельном программировании для анализа эффективности распараллеливания существуют специальные показатели, такие как ускорение (8), эффективность использования (9) вычислительных ресурсов и накладным расходам (10) [17].

$$S_p(n) = \frac{T_1(n)}{T_p(n)}, \quad (35)$$

$$E_p(n) = \frac{S_p(n)}{p} \times 100\%, \quad (36)$$

$$T_0 = pT_p - T_1, \quad (37)$$

где p – количество вычислительных ядер; T_1 – время выполнения последовательного кода; T_p – время выполнения параллельного кода.

Произведём расчёт показателей эффективности распараллеливания для реализации БПФ (пункт 2.1.2). Результаты вычислений приведены в таблицах 5-7.

Таблица 5 – Показатели эффективности распараллеливания БПФ для ЦП Intel Core 2 Q6700

Размер выборки	S_p	E_p , %	T_0 , с.
4	0,42981861	10,74546526	0,00199973
8	0,892489215	22,31223037	0,00263635
16	0,937170291	23,42925729	0,00690907
32	0,949003736	23,72509339	0,01742067
64	0,9732998	24,33249501	0,0415437
128	0,978392227	24,45980567	0,09713771
256	0,975260151	24,38150378	0,22563059
512	0,98106431	24,52660774	0,51220232
1024	1,601512869	40,03782173	0,56174473
2048	2,559216884	63,9804221	0,47144347
4096	2,586526185	64,66315462	1,01042252
8192	2,673922678	66,84806695	2,00558036
16384	2,763962469	69,09906173	3,93187819
32768	2,823569268	70,58923171	7,95225516
65536	2,883557799	72,08894498	16,01346782
131072	2,862057772	71,55144429	35,72129628

Таблица 6 – Показатели эффективности распараллеливания БПФ для ЦП Intel Xeon 5160

Размер выборки	S_p	E_p , %	T_0 , с.
4	0,722532651	36,12663256	0,00037951
8	0,888026111	44,40130557	0,0008449
16	0,969860678	48,49303391	0,00200598
32	0,986987328	49,34936641	0,00499396
64	0,988273214	49,41366072	0,01213801
128	0,996634768	49,8317384	0,02816981
256	1,004209732	50,21048658	0,06502854
512	1,012524821	50,62624106	0,14705982
1024	1,73623144	86,81157202	0,05174169
2048	1,77164581	88,58229052	0,09848433
4096	1,808865596	90,44327978	0,17877716
8192	1,889452475	94,47262375	0,21784443

Продолжение таблицы 6 – Показатели эффективности распараллеливания БПФ для ЦП Intel Xeon 5160

Размер выборки	S_p	E_p , %	T_0 , с.
16384	1,902081582	95,10407911	0,4187138
32768	1,931196566	96,55982832	0,63634171
65536	1,927747682	96,38738408	1,48529092
131072	1,983562656	99,17813279	0,72680677

Таблица 7 – Показатели эффективности распараллеливания БПФ для ЦП Intel Core i5 – 750

Размер выборки	S_p	E_p , %	T_0 , с.
4	0,923238451	23,08096127	0,00052748
8	1,025502865	25,63757163	0,0013028
16	1,198893229	29,97233073	0,00301175
32	1,170324032	29,25810079	0,00805156
64	1,112564903	27,81412257	0,02132674
128	1,10506343	27,62658575	0,04880038
256	1,030877297	25,77193243	0,12045039
512	1,03315839	25,82895974	0,26684171
1024	1,573200172	39,33000429	0,31833008
2048	2,357245324	58,93113309	0,3128554
4096	2,280792018	57,01980046	0,73523707
8192	2,292304299	57,30760748	1,58101605
16384	2,460132702	61,50331754	2,88063111
32768	2,444223695	61,10559237	6,30529399
65536	2,536657083	63,41642709	12,23609954
131072	2,648732063	66,21830157	23,22066069

Отметим, что показатель «накладные расходы» возрастает пропорционально объёму анализируемых данных, что может быть объяснено асимптотическим значением алгоритма

Зависимость показателей «ускорение» и «эффективность использования вычислительных ресурсов» от размера выборки показана на рисунках 11 и 12 соответственно.

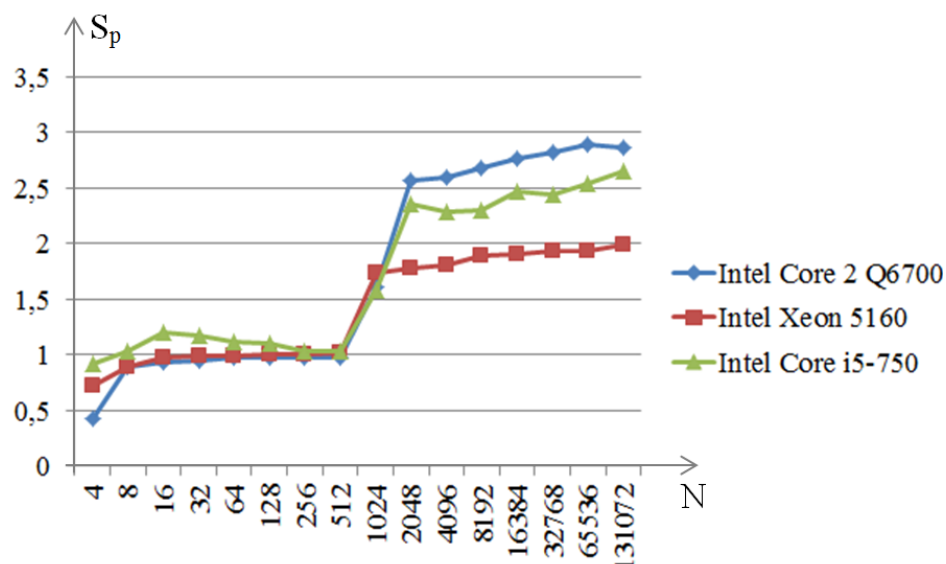


Рисунок 11 – Зависимость ускорения от размера выборки

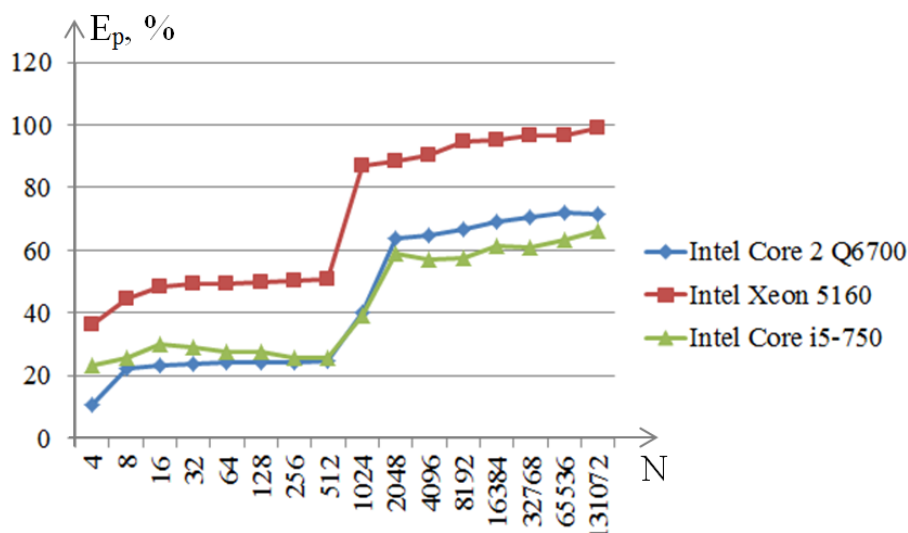


Рисунок 12 – Зависимость «эффективности использования выч. ресурсов» от размера выборки

При реализации специализированного решения вычисления БПФ необходимо учитывать данные особенности (рисунок 11-12) – для выборок менее 128 элементов использовать алгоритм без параллельных вычислений.

2.1.4 Вычисление обратного преобразования Фурье через прямое быстрое преобразование Фурье

Существует две схемы для вычисления ОБПФ через БПФ (первая схема приведена на рисунке 13, вторая – на рисунке 14) [18].



Рисунок 13 – Первая схема вычисления ОБПФ через БПФ



Рисунок 14 – Вторая схема вычисления ОБПФ через БПФ

Практическая реализация первой схемы предполагает предварительный проход в цикле всех мнимых частей входных данных для осуществления операции комплексного сопряжения. Причём, после выполнения БПФ необходимо совершить второй проход в цикле всех мнимых частей выходных данных. В общей сложности, при вычислении ОБПФ по первой схеме потери времени составят $O(2N)$ по сравнению с выполнением БПФ.

Что касается второй схемы, в случае размещения действительной и мнимой частей входных данных в отдельных массивах предварительная обработка сводится лишь к одной операции перестановки местами указателей на начало массивов (которая обычно выполняется за один такт ЦП [19, 20]). После выполнения БПФ нужно провести повторную перестановку указателей. Таким образом, вычисление ОБПФ может быть сведено к вычислению БПФ без существенных потерь времени.

Нормализацию выходных данных к N можно производить уже вовремя непосредственного использования данных, поэтому потери времени на эту операцию можно не учитывать.

2.2 Исследование взаимнокорреляционной функции

2.2.1 Последовательная и параллельная реализация расчёта взаимнокорреляционной функции

Программную реализацию вычисления взаимнокорреляционной функции можно условно поделить на три части: инициализация функции вычисления, основной цикл и завершение вычислений.

На этапе инициализации функции вычисления определяется количество окон для последующих расчётов с учётом коэффициента перекрытия соседних окон преобразования Фурье. В случае если переменная параметра расчета Param_IN принимает значение «1», остаток данных, не достаточный для формирования очередного окна дополняется данными с начала исходной анализируемой выборки. Если Param_IN = 2 - остаток данных дополняется нулями, в случае значения «0» остаточные данные, не образующие собой полное окно откидываются.

Основной цикл запускается с заданным количеством исполнений (по количеству окон, рассчитанному ранее). На каждой итерации цикла происходит отбор данных для образования окна нужной ширины. Смещение относительно предшествующего исполнения определяется значением коэффициента перекрытия, принимающего значения от 0 до 100%. Далее данные окна умножаются на соответствующие значения оконной функции, вид которой выбирается параметром Win (используемые оконные функции приведены в приложении А). Для каждого окна выполняется расчёт корреляции в соответствии с методом «быстрой корреляции». Отметим, что в цикле реализуется только накопление суммы и усреднение взаимных спектров. Затем для каждого из окон рассчитывается нормирующий коэффициент для корреляции.

После выхода из основного цикла выполняется единственное обратное преобразование Фурье усреднённого взаимного спектра, что возможно в силу линейности преобразования Фурье. Используя полученные ранее нормирующие коэффициенты, суммированием получаем основной

нормирующий коэффициент, далее осуществляем операцию нормирования. По окончании выполнения возвращаем значения функции корреляции и нормирующего коэффициента.

Для реализации параллельного вычисления использован шаблон библиотеки Intel TBB `tbb::parallel_for`.

Распределение итераций между потоками определяет параметр «Grainsize». Планированием распределения итераций между потоками занимается специальный планировщик, предусмотренный библиотекой. Принцип распределения итераций по потокам в зависимости от параметра «Grainsize» следующий [21]:

1. если параметр «Grainsize» равен числу итераций, то все итерации будут выполнены в одном потоке;

2. если параметр «Grainsize» равен отношению общего числа итераций к числу вычислительных устройств (ядер ЦП), то каждый поток выполнит примерно одинаковое количество итераций. Слово «примерно» используется по той причине, что распределение данных между потоками происходит в динамическом режиме;

3. если «Grainsize» меньше отношения общего числа итераций к числу вычислительных устройств, то планировщик распределит итерации динамически. При этом какие-то потоки обработают большее количество итераций.

Листинг пересчёта оптимального значения `grainsize` на языке C++ приведён ниже:

```
uint uGrain = grainsize / flyCount;
if (uGrain < 1)
    uGrain = 1;
```

В переменную `flyCount` заносится общее число вычислительных операций, численно равное количеству итераций главного цикла. Начальное значение `grainsize` подобрано экспериментально и равно 1024.

Для оценки производительности от использования многоядерных центральных процессоров было создано экспериментальное программное

обеспечение и проведен ряд тестов на модельных примерах. Результаты приведены в таблицах 8-10.

SizeWin – размер окна, N – количество отчётов исходного анализируемого сигнала, T_s – время выполнения последовательного кода, T_p – время выполнения параллельного кода.

Таблица 8 – Временные замеры для ЦП Intel Core 2 Q6700

SizeWin	N	T_s , с.	T_p , с.
32768	524288	0,563049821	0,180386105
	1048576	1,125053171	0,357660741
	2097152	2,255201346	0,711129095
	4194304	4,506509118	1,43976893
65536	524288	0,601127708	0,193063013
	1048576	1,196051644	0,378804668
	2097152	2,389619047	0,75176517
	4194304	4,774019639	1,530567285
131072	524288	0,645206608	0,210609876
	1048576	1,278819791	0,407388882
	2097152	2,537439463	0,80229469
	4194304	5,056756319	1,593727469

Таблица 9 – Временные замеры для ЦП Intel Core i3 – 4330

SizeWin	N	T_s , с.	T_p , с.
32768	524288	0,266390674	0,10794683
	1048576	0,48576787	0,180842667
	2097152	0,963025629	0,362803837
	4194304	1,918917244	0,723630443
65536	524288	0,25683239	0,11577372
	1048576	0,509672226	0,193907736
	2097152	1,015157971	0,385850809
	4194304	2,024144357	0,776553324
131072	524288	0,273566663	0,111901891
	1048576	0,539220198	0,210680765
	2097152	1,071236131	0,41084228
	4194304	2,135150785	0,815101699

Таблица 10 – Временные замеры для ЦП Intel Core i5 – 750

SizeWin	N	T _s , с.	T _p , с.
32768	524288	0,296852289	0,113044387
	1048576	0,590822681	0,223425157
	2097152	1,17881237	0,44243635
	4194304	2,369131607	0,878894138
65536	524288	0,311063406	0,114927362
	1048576	0,61796447	0,227109962
	2097152	1,233416703	0,442382645
	4194304	2,470918967	0,876683651
131072	524288	0,331201308	0,123951079
	1048576	0,654487494	0,239070838
	2097152	1,3024929	0,458107634
	4194304	2,597991038	0,908922106

2.2.2 Анализ эффективности распараллеливания взаимнокорреляционной функции

Произведём расчёт показателей эффективности распараллеливания для реализации ВКФ. Результаты вычислений приведены в таблицах 11-13.

Таблица 11 – Показатели качества распараллеливания вычисления ВКФ для ЦП Intel Core 2 Q6700

SizeWin	N	S	E, %	T ₀ , с.
32768	524288	3,12136	78,034	0,158494599
	1048576	3,14559	78,640	0,305589793
	2097152	3,17130	79,282	0,589315034
	4194304	3,13002	78,251	1,252566602
65536	524288	3,11364	77,841	0,171124344
	1048576	3,15744	78,936	0,319167028
	2097152	3,17868	79,467	0,617441633
	4194304	3,11912	77,978	1,348249501
131072	524288	3,06352	76,588	0,197232896
	1048576	3,13906	78,477	0,350735737
	2097152	3,16273	79,068	0,671739297
	4194304	3,17291	79,323	1,318153557

Таблица 12 – Показатели качества распараллеливания вычисления ВКФ для ЦП Intel Core i3 – 4330

SizeWin	N	S	E, %	T ₀
32768	524288	2,46781	61,695	0,165396646
	1048576	2,68614	67,153	0,237602798
	2097152	2,65440	66,360	0,488189719
	4194304	2,65179	66,295	0,975604528
65536	524288	2,21841	55,460	0,20626249
	1048576	2,62843	65,711	0,265958718
	2097152	2,63096	65,774	0,528245265
	4194304	2,60658	65,164	1,082068939
131072	524288	2,44471	61,118	0,174040901
	1048576	2,55942	63,986	0,303502862
	2097152	2,60741	65,185	0,572132989
	4194304	2,61949	65,487	1,125256011

Таблица 13 – Показатели качества распараллеливания вычисления ВКФ для ЦП Intel Core i5 – 750

SizeWin	N	S	E, %	T ₀
32768	524288	2,62598	65,650	0,155325259
	1048576	2,64439	66,110	0,302877947
	2097152	2,66437	66,609	0,59093303
	4194304	2,69558	67,390	1,146444945
65536	524288	2,70661	67,665	0,148646042
	1048576	2,72099	68,025	0,290475378
	2097152	2,78812	69,703	0,536113877
	4194304	2,81848	70,462	1,035815637
131072	524288	2,67203	66,801	0,164603008
	1048576	2,73763	68,441	0,301795858
	2097152	2,84320	71,080	0,529937636
	4194304	2,85832	71,458	1,037697386

Из анализа полученных данных (таблицы 11-13) следует, что показатель «накладные расходы» не зависит от размера окна SizeWin, но зависит количества отсчётов исходного анализируемого сигнала N. Нелинейная зависимость параметра «накладных расходов» от размера исходной выборки может быть объяснена нелинейной асимптотической оценкой алгоритма.

Зависимости ускорения от размера выборки при различных значениях SizeWin показаны на рисунках 15-17.

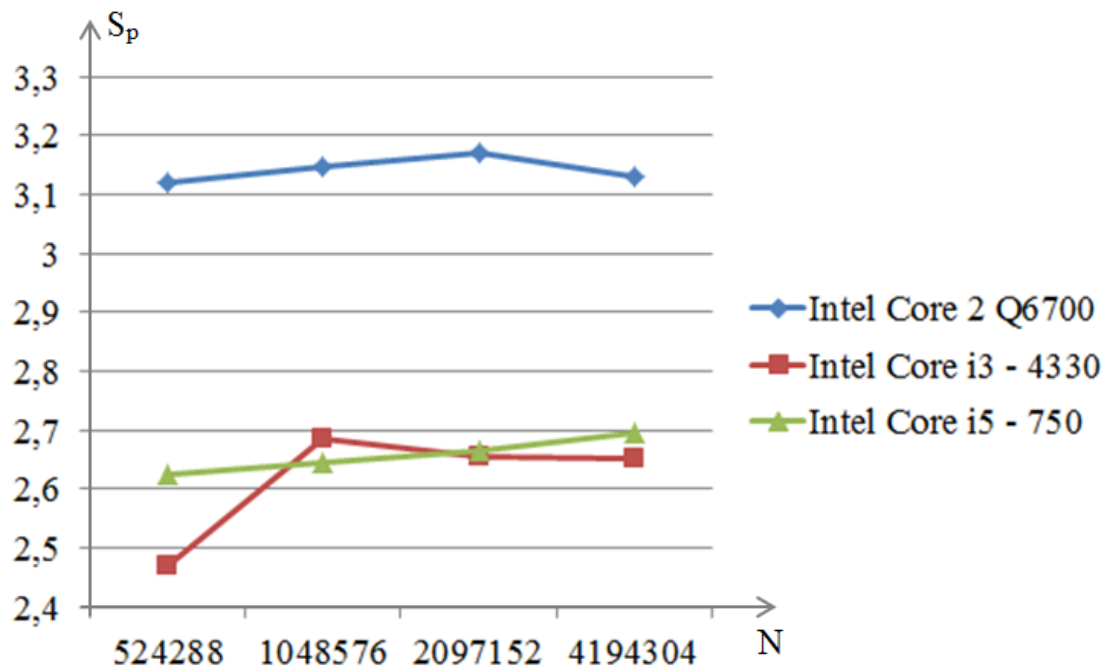


Рисунок 15 – Зависимость ускорения от размера исходного анализируемого сигнала (SizeWin = 32768)

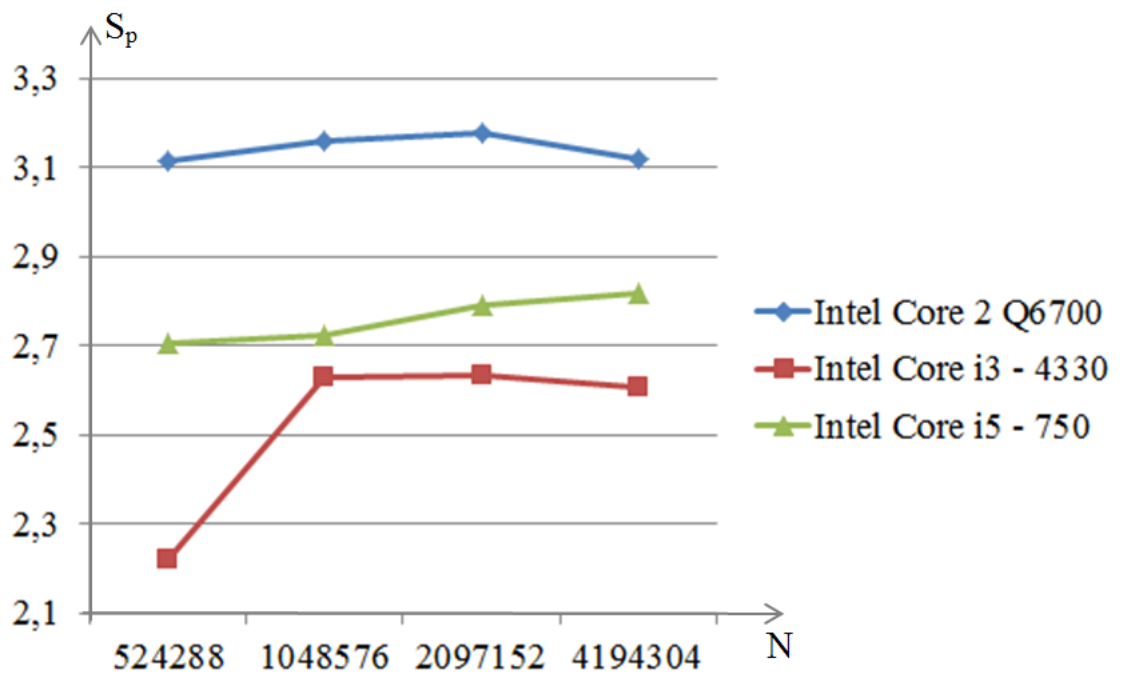


Рисунок 16 – Зависимость ускорения от размера исходного анализируемого сигнала (SizeWin = 65536)

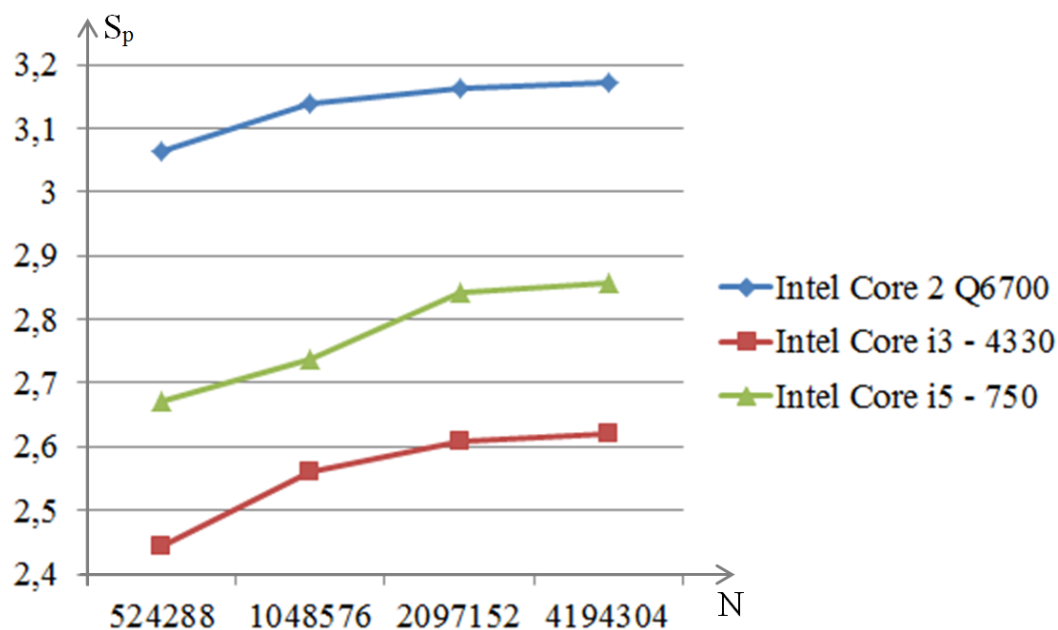


Рисунок 17 – Зависимость ускорения от размера исходного анализируемого сигнала (SizeWin = 131072)

На рисунках 18-20 приведены зависимости эффективности использования вычислительных ресурсов от количества отсчётов анализируемого сигнала.

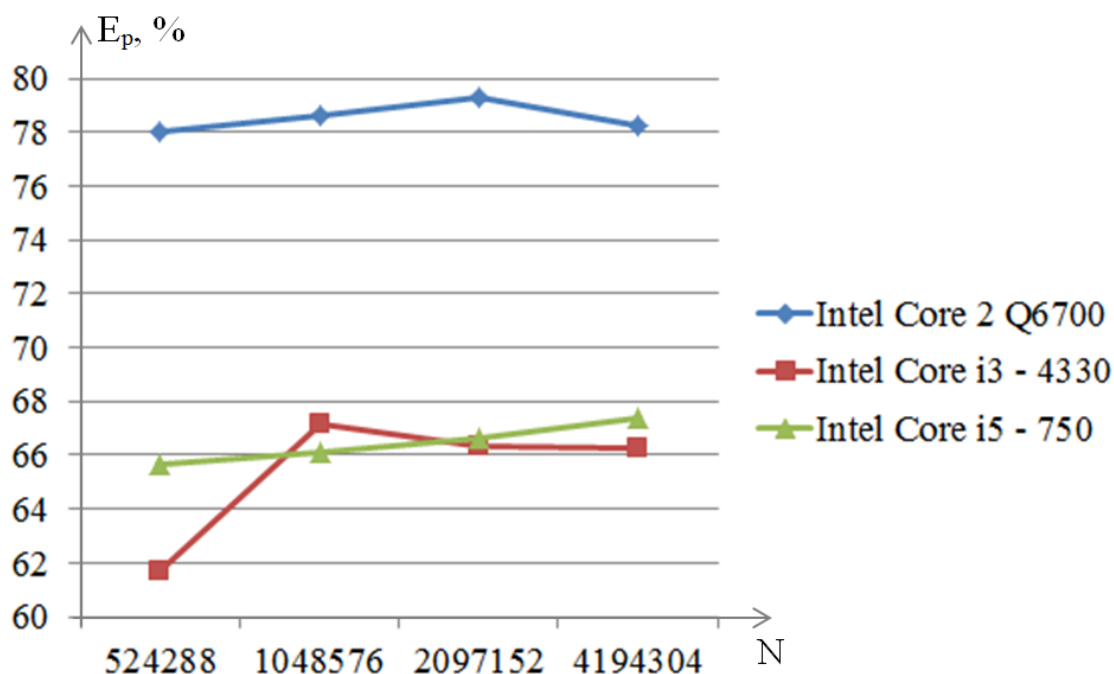


Рисунок 18 – Зависимость эффективности использования вычислительных ресурсов от размера исходного анализируемого сигнала (SizeWin = 32768)

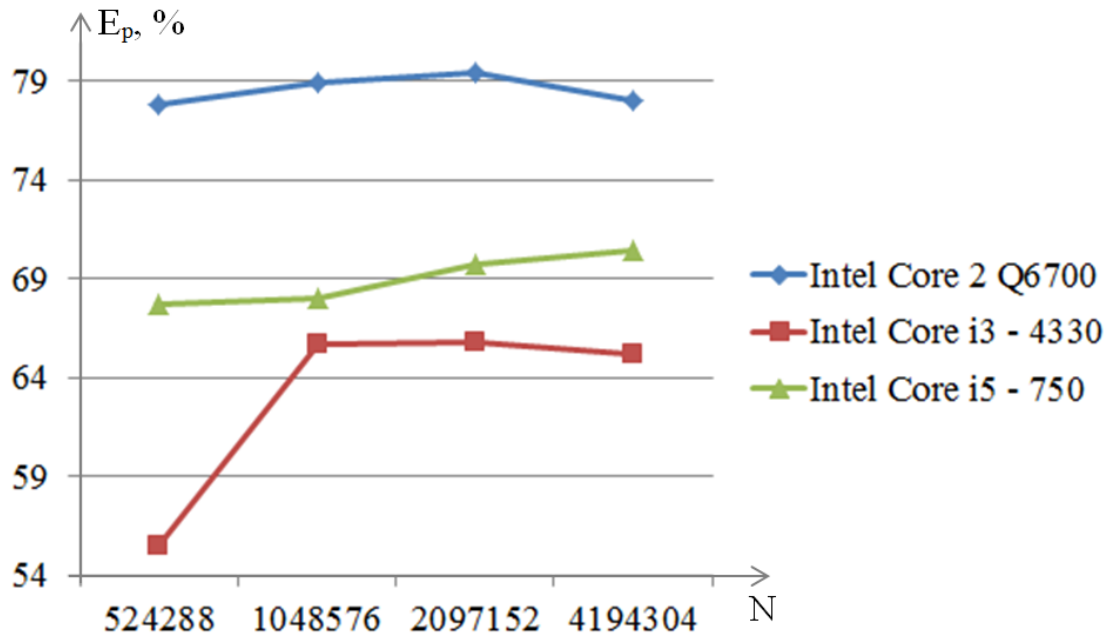


Рисунок 19 – Зависимость эффективности использования вычислительных ресурсов от размера исходного анализируемого сигнала (SizeWin = 65536)

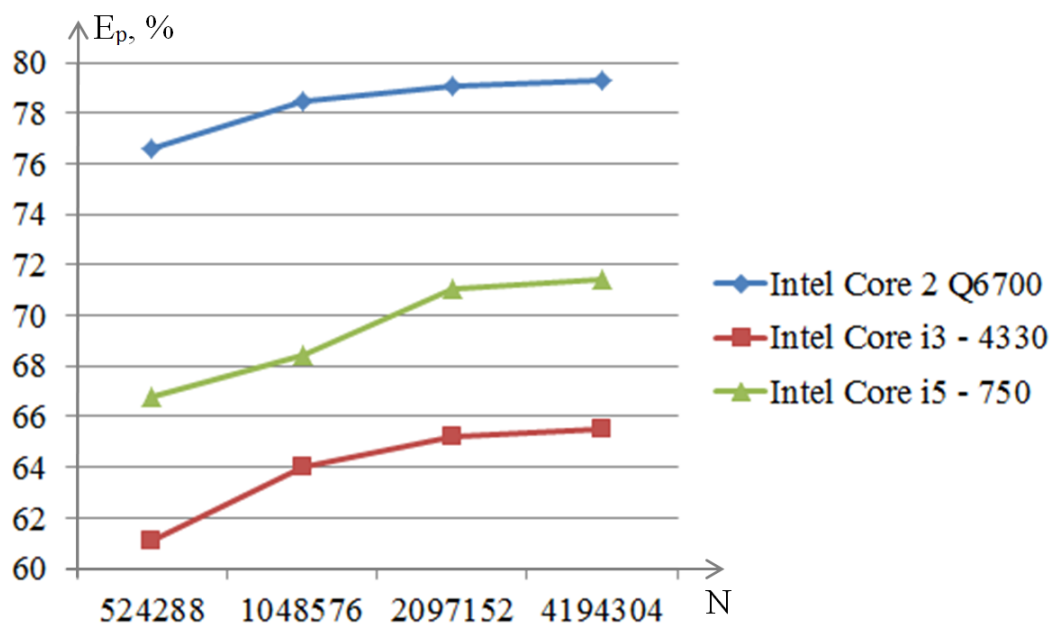


Рисунок 20 – Зависимость эффективности использования вычислительных ресурсов от размера исходного анализируемого сигнала (SizeWin = 131072)

Реализация параллельного расчёта ВКФ обладает хорошей масштабируемостью (рисунки 17, 20), поскольку с ростом количества

обкатываемых данных ускорение и эффективность использования вычислительных ресурсов также возрастает.

Построим зависимость показателя «ускорение» от размера окна Sw .

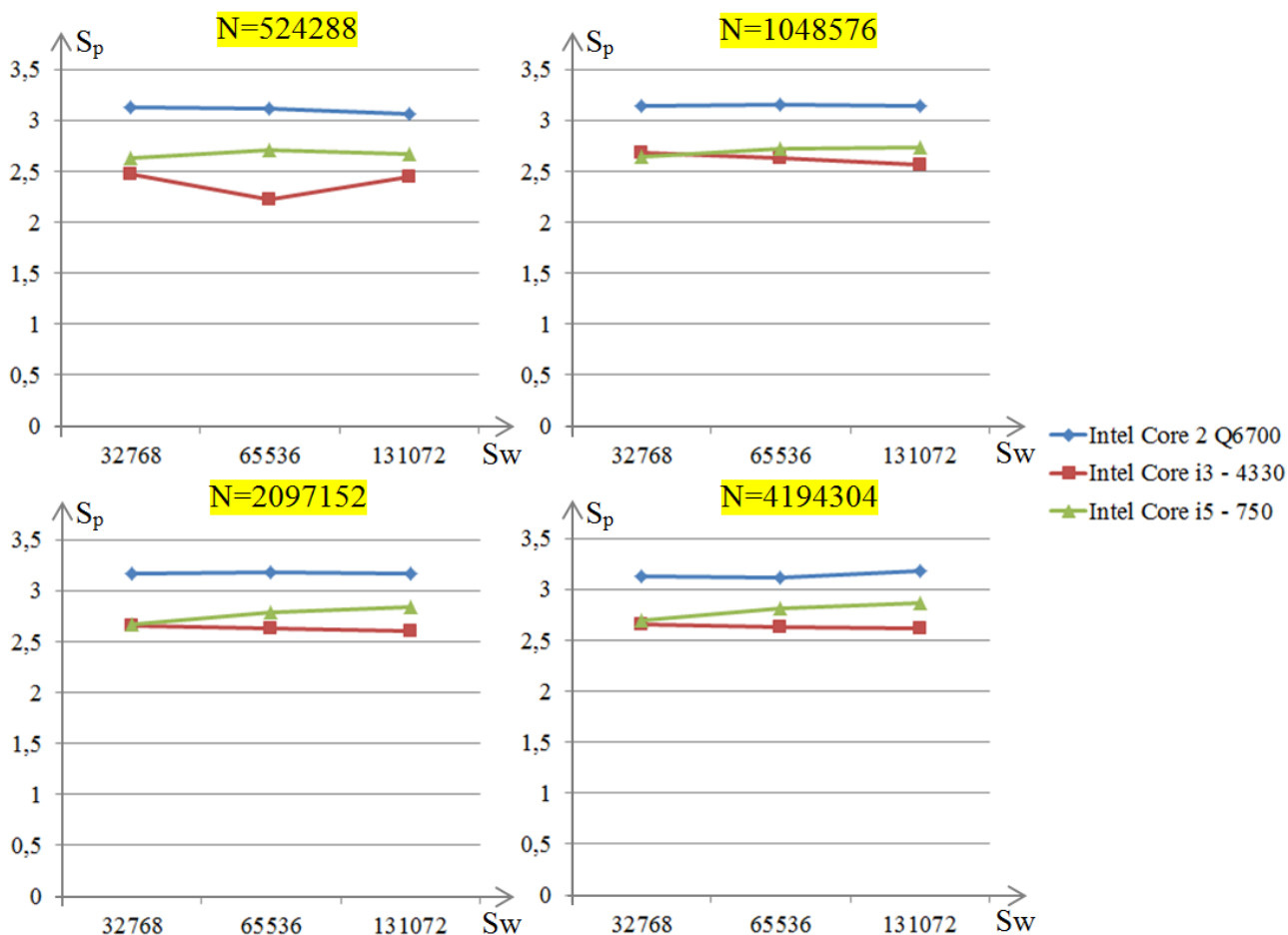


Рисунок 21 – Зависимости ускорения от размера окна

Отметим, что показатель «ускорение» не зависит от размера окна. Эффективность использования вычислительных ресурсов также не зависит от размера окна, поскольку согласно уравнению (36) отличается от ускорения только наличием нормирующего множителя $\frac{100\%}{p}$.

2.3 Исследование функций когерентности

2.3.1 Последовательная и параллельная реализация расчёта функций когерентности

На рисунке 22 приведена функциональная схема процесса вычислений функций когерентности.

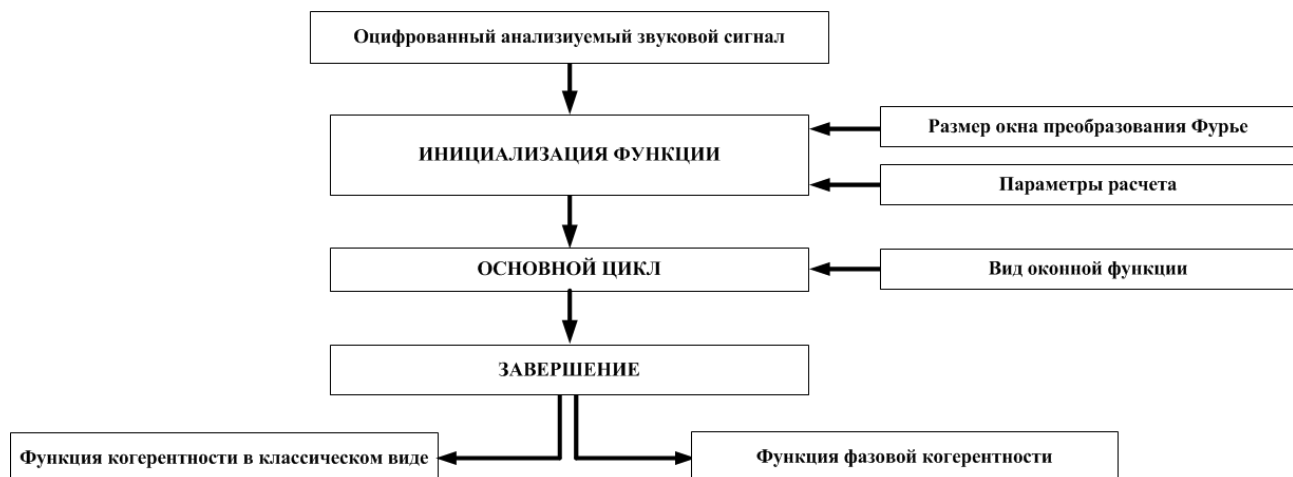


Рисунок 22 - Функциональная схема вычисления функций когерентности

На этапе инициализации функции вычисления определяется количество окон для последующих расчётов. В случае если переменная параметра расчета Param_IN принимает значение «1», остаток данных, не достаточный для формирования очередного окна дополняется данными с начала исходной анализируемой выборки. Если Param_IN = 2 - остаток данных дополняется нулями, в случае значения «0» остаточные данные, не образующие собой полное окно откидываются.

Основной цикл запускается с заданным количеством исполнений (по количеству окон, рассчитанному ранее). На каждой итерации цикла происходит отбор данных для образования окна нужной ширины. С окном производятся специальные манипуляции, такие как расчёт спектров в зависимости от рассчитываемых корреляционных функций. Далее данные окна умножаются на соответствующие значения оконной функции, вид которой выбирается параметром Win (функциональные зависимости используемых оконных функций приведены в приложении А). Путём накопления производится расчёт нужных усреднённых спектров, с целью оптимизации работы с памятью.

После выхода из основного цикла имеем необходимые значения усреднённых спектров. Используя тривиальные поэлементные арифметические операции, получаем функции фазовой и классической когерентности.

Распараллеливание проводилось с использованием технологий OpenMP и Intel Threading Building Blocks (TBB).

Выбор OpenMP обусловлен пространственной локализованностью данных, а Intel TBB используется для рекурсивного обхода графа «бабочки» при вычислении быстрого преобразования Фурье с прореживанием по времени по алгоритму Кули-Тьюки, поскольку подобный подход к вычислению подразумевает использование схемы проведения параллелизма по задачам, а не по данным [22].

Встроенная графическая подсистема используется как дополнительный сопроцессор с целью проведения расчётов общего назначения путём использования технологии Intel OpenMP.

Для оценки производительности параллельных вычислений было создано экспериментальное программное обеспечение и проведен ряд тестов на модельных примерах. Результаты приведены в таблицах 14-16.

Таблица 14 – Временные замеры для ЦП Intel Core i5 – 4120U

SizeWin	N	T _s , с.	T _p , с.
32768	524288	0,80457928	0,28703061
	1048576	1,51614394	0,53027460
	2097152	2,78362333	1,14019359
	4194304	5,12695822	2,24324965
65536	524288	0,75473047	0,29546225
	1048576	1,61795367	0,54134352
	2097152	2,72291506	1,16609220
	4194304	4,36228267	2,31716907
131072	524288	0,85269453	0,31004782
	1048576	1,73769563	0,60892330
	2097152	3,34658725	1,15567652
	4194304	6,54859115	2,37563113

Таблица 15 – Временные замеры для ЦП Intel Core i7-4720HQ

SizeWin	N	T _s , с.	T _p , с.
32768	524288	0,18011336	0,06227640
	1048576	0,36039675	0,12418487
	2097152	0,74134472	0,25413144
	4194304	1,46739944	0,50571588

Продолжение таблицы 15 – Временные замеры для ЦП Intel Core i7-4720HQ

SizeWin	N	T _s , с.	T _p , с.
65536	524288	0,19276437	0,06430376
	1048576	0,38751110	0,13071008
	2097152	0,78156630	0,25861896
	4194304	1,56047757	0,52064883
131072	524288	0,20895459	0,06924143
	1048576	0,40615569	0,13826469
	2097152	0,82452341	0,27257492
	4194304	1,63163761	0,51953247

Таблица 16 – Временные замеры для ЦП AMD FX-9590

SizeWin	N	T _s , с.	T _p , с.
32768	524288	0,26451463	0,09230106
	1048576	0,52766624	0,18308529
	2097152	1,04821798	0,37058183
	4194304	2,10990890	0,74039652
65536	524288	0,27907796	0,09873728
	1048576	0,55590394	0,19390509
	2097152	1,10396199	0,38616820
	4194304	2,20264976	0,78220013
131072	524288	0,30077998	0,11703537
	1048576	0,59171828	0,21650298
	2097152	1,17503651	0,42139986
	4194304	2,33823134	0,78220013

2.3.2 Анализ эффективности распараллеливания функций когерентности

Результаты расчёта показателей эффективности для параллельной реализации функций когерентности приведены в таблицах 17-19.

Таблица 17 – Показатели качества распараллеливания вычисления функций когерентности для ЦП Intel Core i5 – 4120U

SizeWin	N	S	E, %	T ₀ , с.
32768	524288	2,80312	70,078	0.34509
	1048576	2,85917	71,479	0.60785
	2097152	2,44136	61,034	1.78158

Продолжение таблицы 17 – Показатели качества распараллеливания
вычисления функций когерентности для ЦП Intel Core i5 – 4120U

SizeWin	N	S	E, %	T ₀ , с.
32768	4194304	2,28551	57,138	3.84997
65536	524288	2,55441	63,860	0,42856
	1048576	2,98878	74,719	0,55061
	2097152	2,33508	58,377	1,94502
	4194304	1,88259	47,065	4,91163
131072	524288	2,75020	68,755	0,38819
	1048576	2,85372	71,343	0,69946
	2097152	2,89578	72,395	1,28100
	4194304	2,75657	68,914	2,95785

Таблица 18 – Показатели качества распараллеливания вычисления ВКФ
для ЦП Intel Core i7-4720HQ

SizeWin	N	S	E, %	T ₀
32768	524288	2,89217	36,152	0,31905
	1048576	2,90210	36,276	0,63432
	2097152	2,91718	36,465	1,29432
	4194304	2,90163	36,270	2,58187
65536	524288	2,99773	37,472	0,32272
	1048576	2,96467	37,058	0,66000
	2097152	3,02208	37,776	1,28995
	4194304	2,99718	37,465	2,60850
131072	524288	3,01778	37,722	0,34608
	1048576	2,93753	36,719	0,70194
	2097152	3,02495	37,812	1,35893
	4194304	3,14059	39,257	2,52850

Таблица 19 – Показатели качества распараллеливания вычисления ВКФ
для ЦП AMD FX-9590

SizeWin	N	S	E, %	T ₀
32768	524288	2,86579	35,822	0,47492
	1048576	2,88208	36,026	0,93769
	2097152	2,82857	35,357	1,91739
	4194304	2,84970	35,621	3,81458
65536	524288	2,82647	35,331	0,51141
	1048576	2,86689	35,836	0,99600
	2097152	2,85876	35,734	1,98620
	4194304	2,81597	35,200	4,05595

Продолжение таблицы 19 – Показатели качества распараллеливания
вычисления ВКФ для ЦП AMD FX-9590

SizeWin	N	S	E, %	T ₀
131072	524288	2,56999	32,125	0,63600
	1048576	2,73307	34,163	1,14091
	2097152	2,78841	34,855	2,19689
	4194304	2,98930	37,366	3,92037

Зависимости ускорения от размера выборки при различных значениях SizeWin показаны на рисунках 23-25.

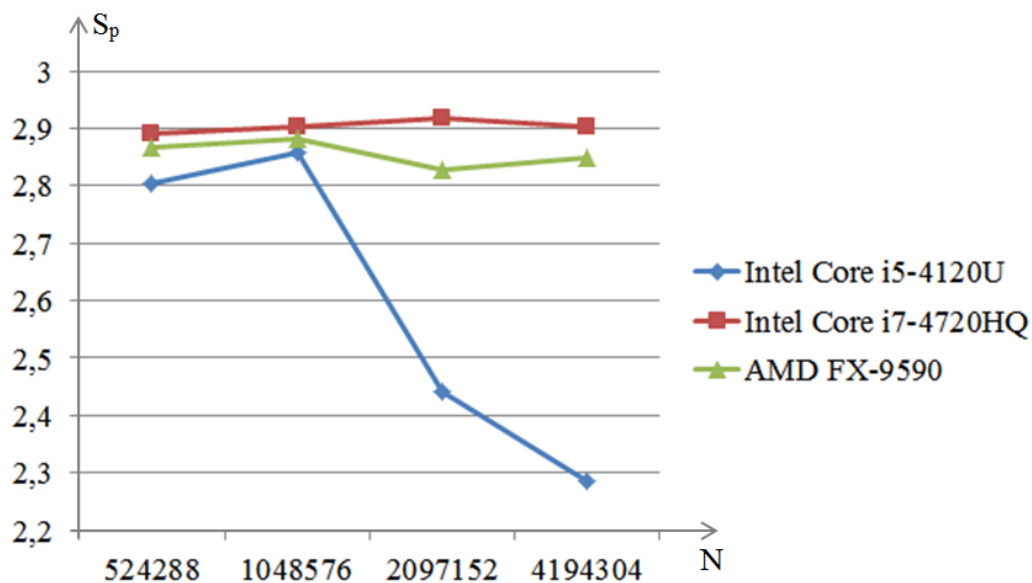


Рисунок 23 - Зависимость ускорения от размера исходного анализируемого сигнала (SizeWin = 32768)

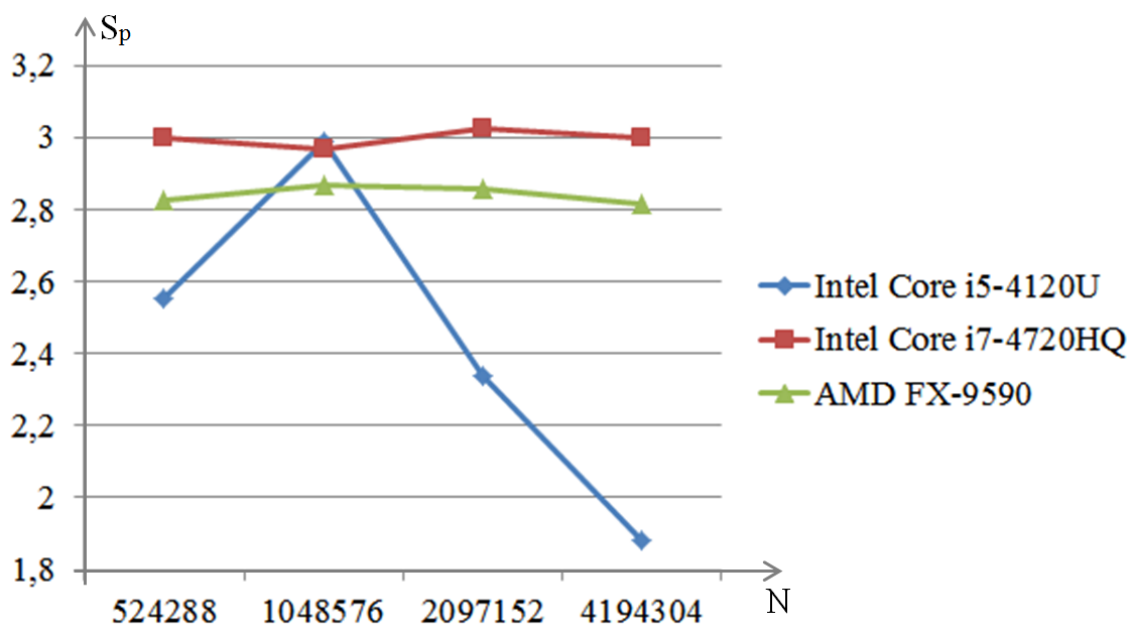


Рисунок 24 - Зависимость ускорения от размера исходного анализируемого сигнала (SizeWin = 65536)

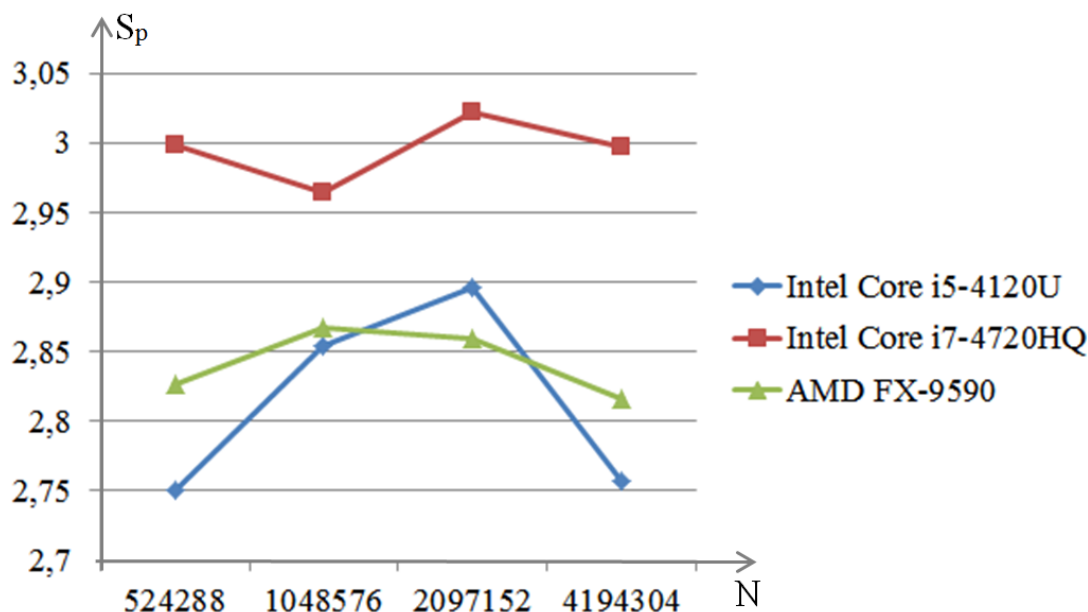


Рисунок 25 - Зависимость ускорения от размера исходного анализируемого сигнала (SizeWin = 131072)

Ускорение на исследуемых процессорах обладает постоянным значением, не зависящим от размера исходной анализируемой выборки, однако для процессора Intel Core i5-4120U при размере окна 65536 отмечено убывание этой величины при увеличении размера исходной анализируемой выборки. Более глубокое исследование происходящих процессов в момент вычислений в профилировщике Visual Studio показало неэффективность выделения памяти стандартным аллокатором языка C++, к тому же он не обладает параллелизмом, что в соответствии со вторым законом Амдала, накладывает ограничение на величину максимального ускорения.

На рисунках 26-28 приведены зависимости эффективности использования вычислительных ресурсов от количества отсчётов анализируемого сигнала.

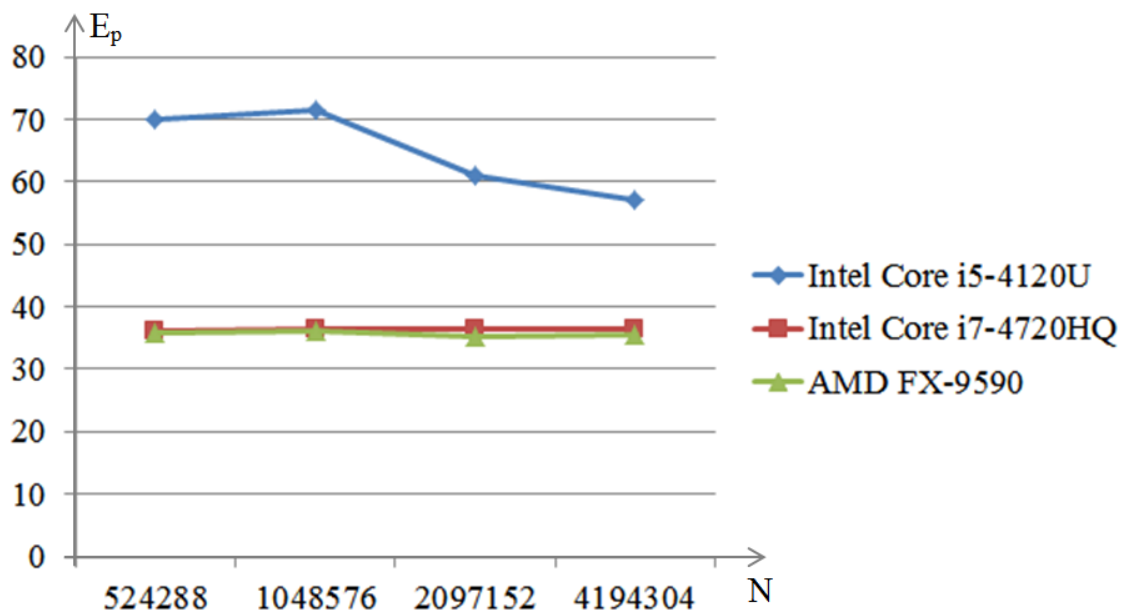


Рисунок 26 – Зависимость эффективности использования вычислительных ресурсов от размера исходного анализируемого сигнала (SizeWin = 32768)

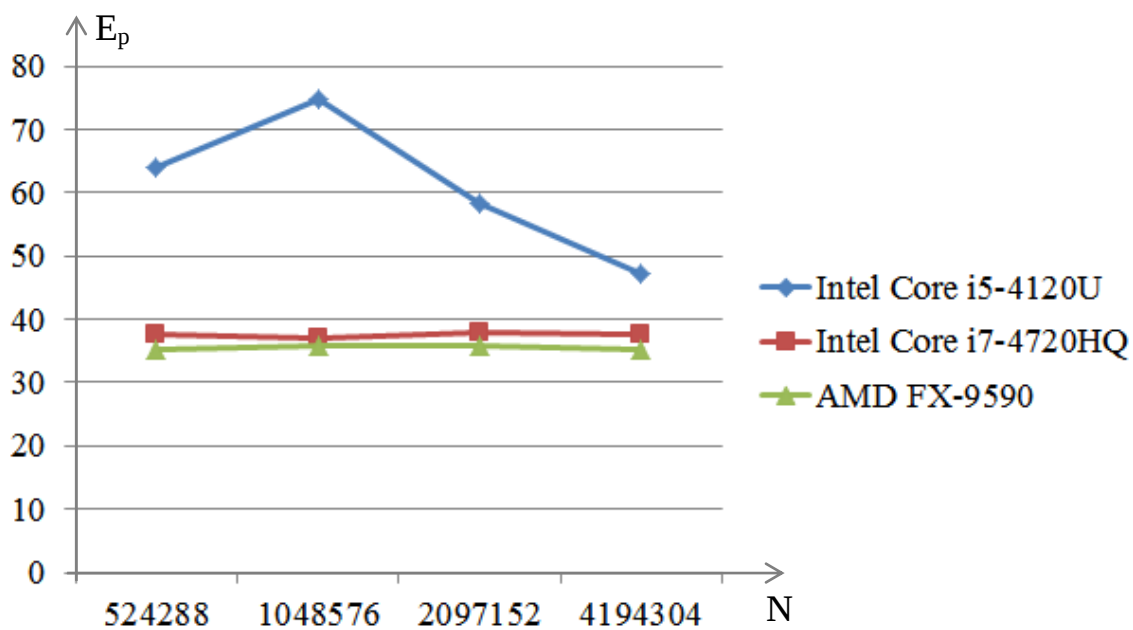


Рисунок 27 – Зависимость эффективности использования вычислительных ресурсов от размера исходного анализируемого сигнала (SizeWin = 65536)

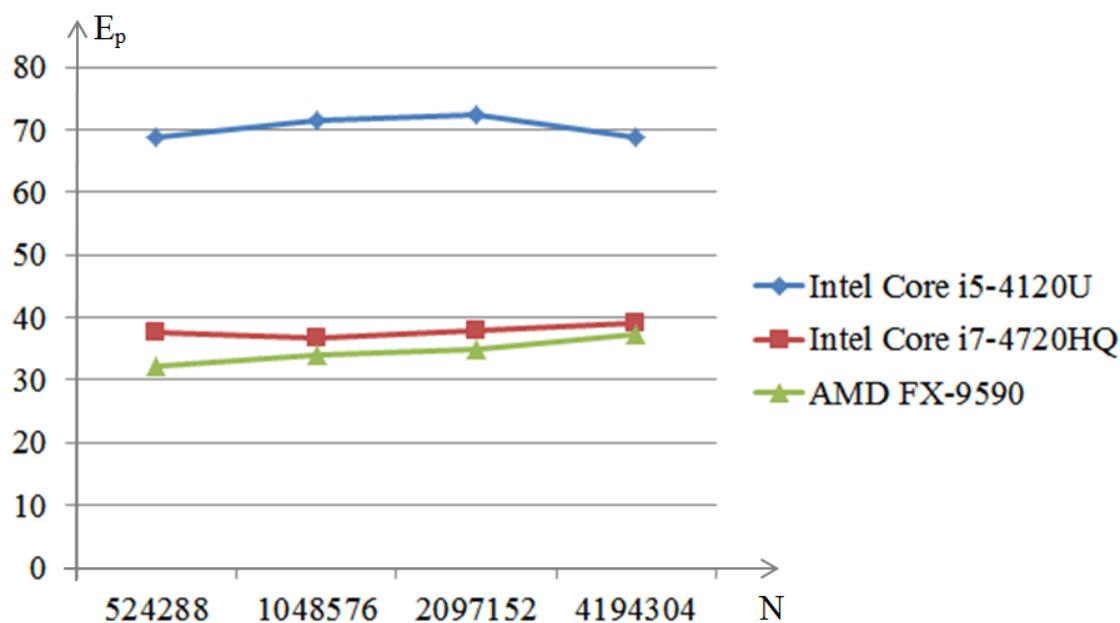


Рисунок 28 – Зависимость эффективности использования вычислительных ресурсов от размера исходного анализируемого сигнала (SizeWin = 131072)

Анализ по показателю эффективности использования подтверждает выводы, сделанные ранее.

Зависимость показателя «ускорение» от размера окна Sw приведена на рисунке 29.

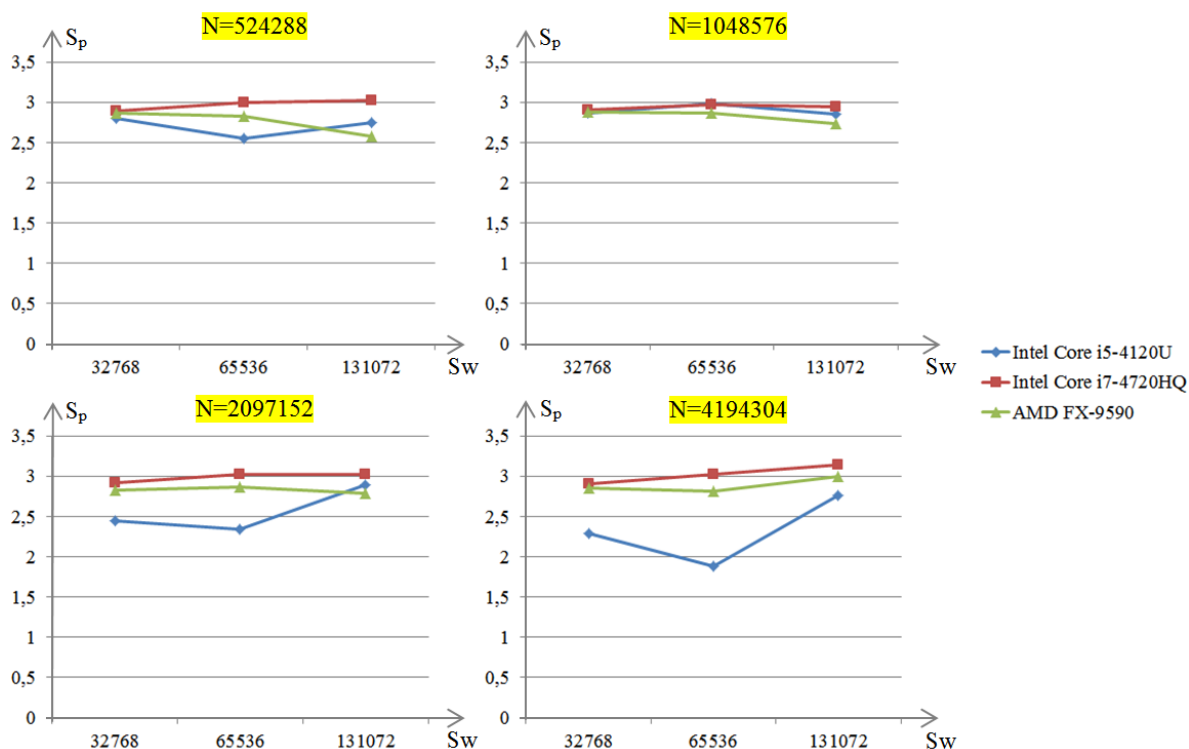


Рисунок 29 – Зависимости ускорения от размера окна

Исследуем балансировку нагрузки в параллельной реализации расчёта функций когерентности. Установим $N=16777216$, $SizeWin=1048576$.

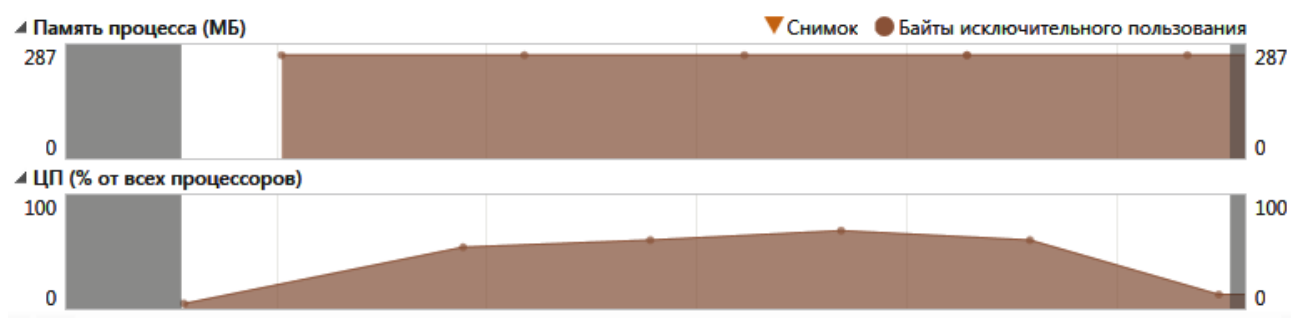


Рисунок 30 – Исследование балансировки загрузки

Кривая зависимости загруженности ЦП (при задействовании всех ядер) практически симметричная относительно центрального значения, что свидетельствует о том, что загрузка между вычислительными ядрами распределена равномерно.

Алгоритм способен использовать не менее 60% всей производительности ЦП. Не способность достигнуть абсолютного пика загрузки может быть объяснена последовательной работой средств выделения области памяти в ОЗУ.

2.3.3 Оптимизация работы с памятью при расчёте функций когерентности

Будем использовать `scalable_malloc` из библиотеки Intel TBW с выравниванием в памяти на 32 байта (так как текущая реализация компилируется под архитектуру x86), поскольку значения, выравненные на 32 байта, уже является также выравненными и на 16 байт (что необходимо для повышения производительности при работе с векторными регистрами и инструкциями процессора [20]). К тому же выравнивание на 32 байта возможно увеличит вероятность попадания значений в кэш-память [19]. Дополнительно, будем принудительно упреждающе записывать каждое требуемое значение заранее на 32 итерации в кэш-память первого уровня в каждом цикле.

Установим $N=16777216$, $SizeWin=1048576$.

Зависимость загруженности ЦП от времени приведена на рисунке 31.

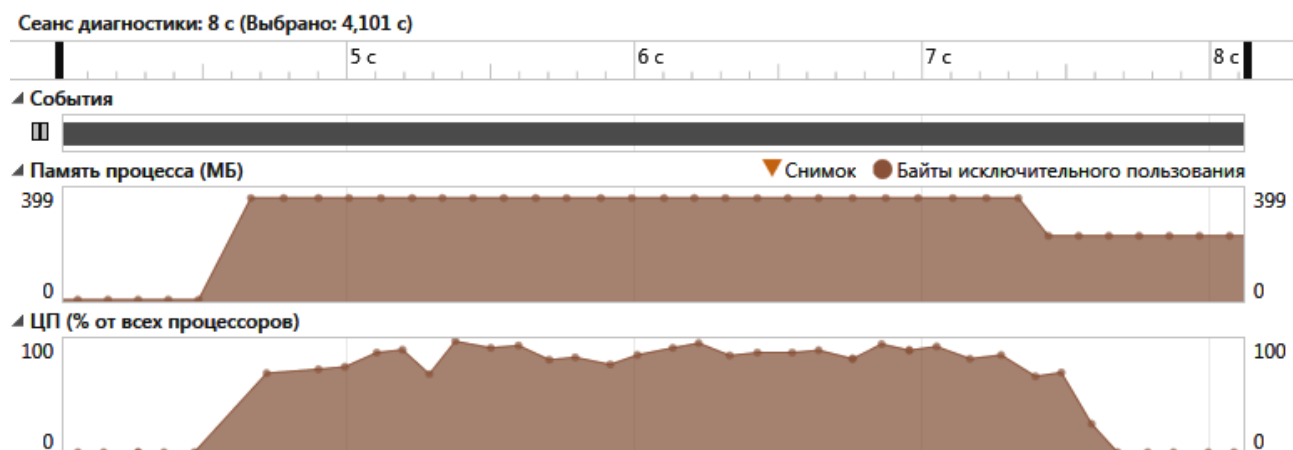


Рисунок 31 – Исследование балансировки нагрузки с модифицированным аллокатором памяти

Повторим временные замеры для ЦП Intel Core i7 - 4720HQ. Результаты приведены в таблице 20.

Таблица 20 – Временные замеры на ЦП Intel Core i7 – 4720HQ

SizeWin	N	Тр
32768	524288	0,05387115
	1048576	0,10767615
	2097152	0,21659516
	4194304	0,42772376
65536	524288	0,05543773
	1048576	0,11245164
	2097152	0,21920781
	4194304	0,43542581
131072	524288	0,05826731
	1048576	0,11609173
	2097152	0,22765786
	4194304	0,45038703

Показатели эффективности распараллеливания указаны в таблице 21.

Таблица 21 - Показатели качества распараллеливания

SizeWin	N	S	E, %	T
32768	524288	3,34341	41,793	0,25134
	1048576	3,34705	41,838	0,50185
	2097152	3,42272	42,784	0,99299
	4194304	3,43072	42,884	1,95607
65536	524288	3,47714	43,464	0,25137
	1048576	3,44603	43,075	0,51337
	2097152	3,56541	44,568	0,97343
	4194304	3,58380	44,797	1,92458
131072	524288	3,58614	44,827	0,25783
	1048576	3,49858	43,732	0,52359
	2097152	3,62177	45,272	0,99795
	4194304	3,62275	45,284	1,97298

Сравнение показателя «ускорение» оптимизированной и неоптимизированной версий вычисления функций когерентности для ЦП Intel Core i7-4720HQ приведено на рисунках 32-34.

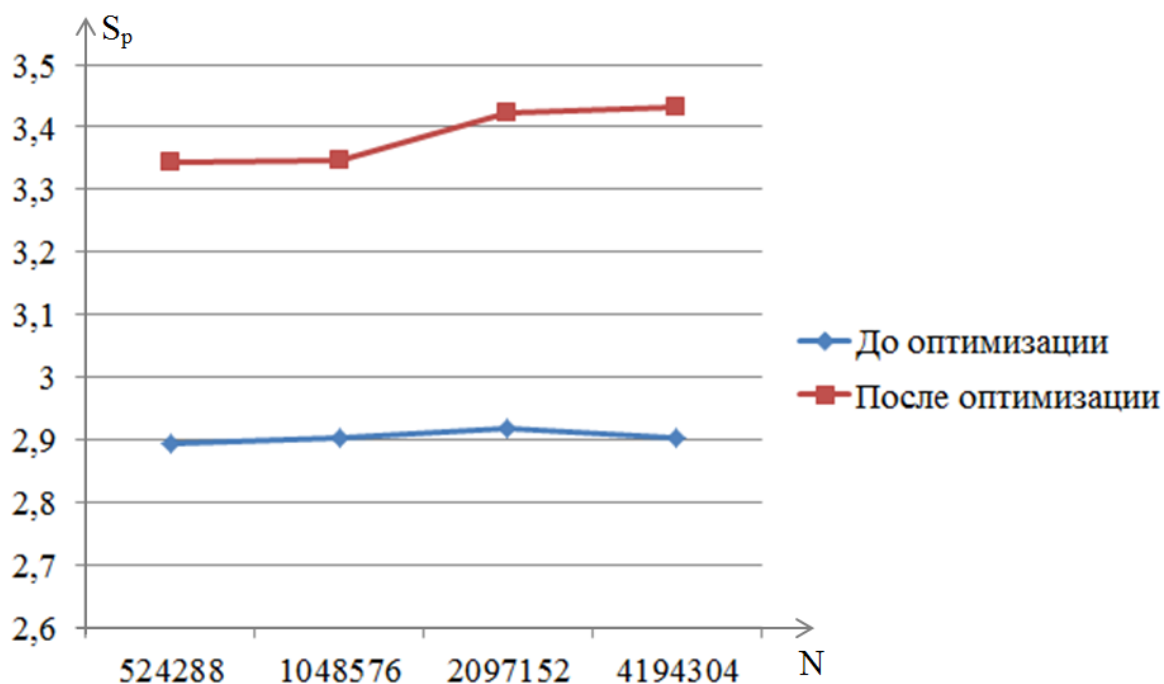


Рисунок 32 – Сравнение показателя «ускорение» оптимизированной и неоптимизированной версий вычисления функций когерентности (SizeWin = 32768)

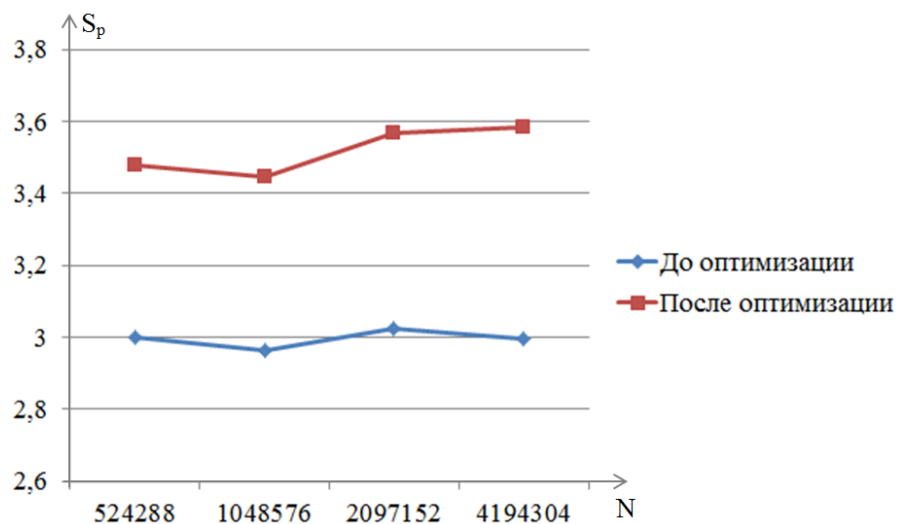


Рисунок 33 – Сравнение показателя «ускорение» оптимизированной и неоптимизированной версий вычисления функций когерентности (SizeWin = 65536)

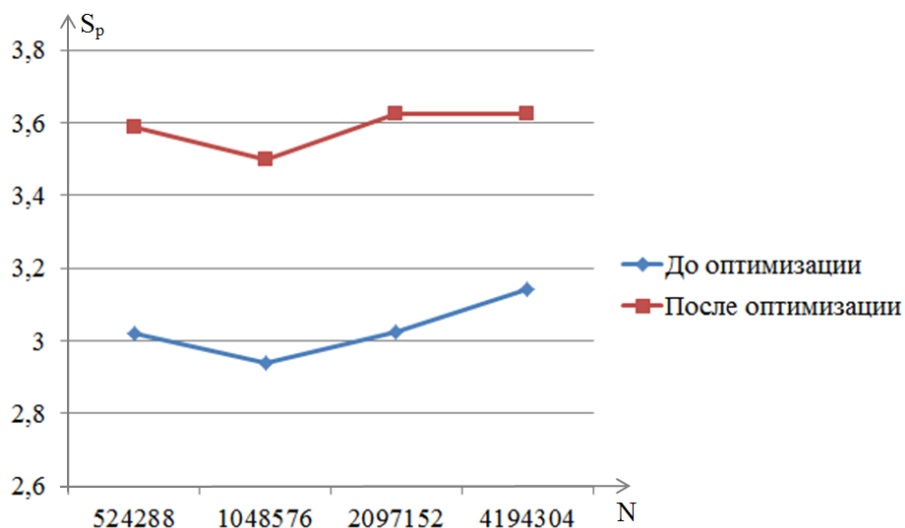


Рисунок 34 – Сравнение показателя «ускорение» оптимизированной и неоптимизированной версий вычисления функций когерентности (SizeWin = 131072)

Сравнение показателя «эффективность использования вычислительных ресурсов» оптимизированной и неоптимизированной версий вычисления функций когерентности для ЦП Intel Core i7-4720HQ приведено на рисунках 35-37.

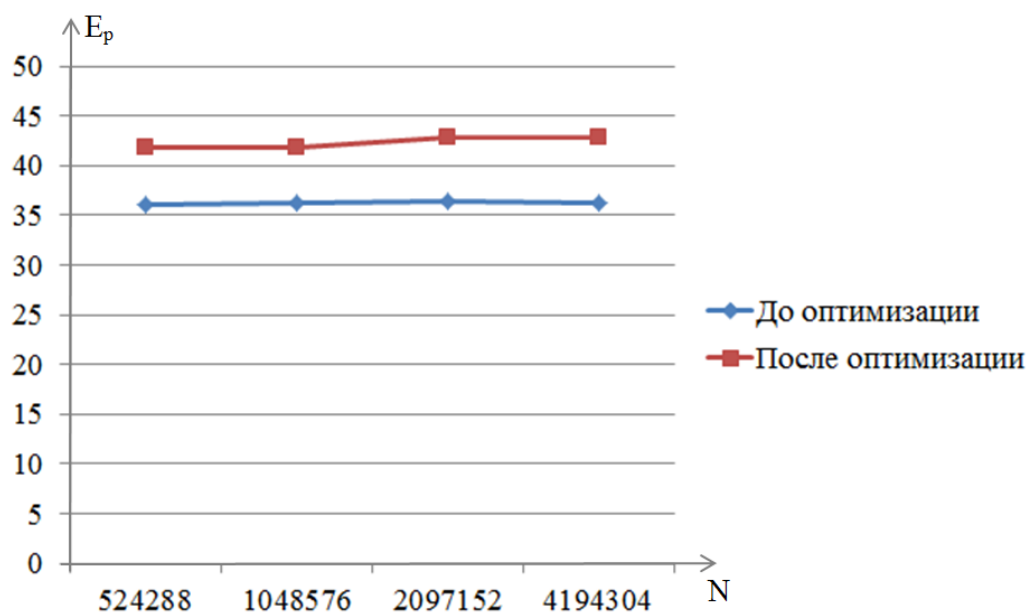


Рисунок 35 – Сравнение показателя «эффективность использования вычислительных ресурсов» оптимизированной и неоптимизированной версий вычисления функций когерентности (SizeWin = 32768)

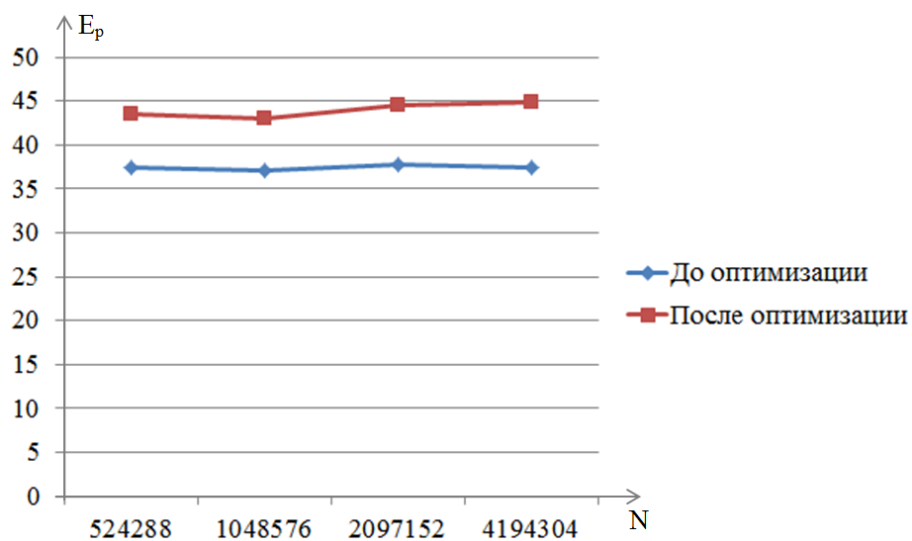


Рисунок 36 – Сравнение показателя «эффективность использования вычислительных ресурсов» оптимизированной и неоптимизированной версий вычисления функций когерентности (SizeWin = 65536)

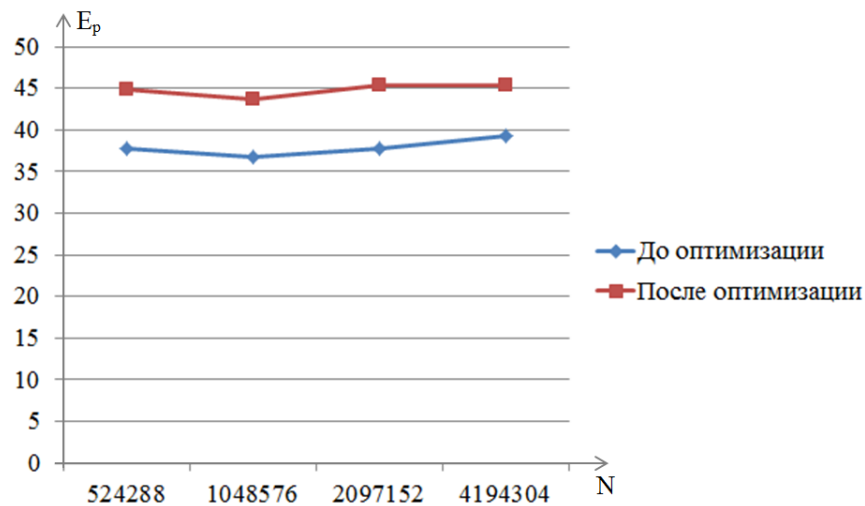


Рисунок 37 – Сравнение показателя «эффективность использования вычислительных ресурсов» оптимизированной и неоптимизированной версий вычисления функций когерентности (SizeWin = 131072)

Таким образом, оптимизация работы с памятью позволили добиться большего значения ускорения.

2.4 Исследование частотно-временных корреляционных функций

2.4.1 Последовательная и параллельная реализация расчёта частотно-временных корреляционных функций

По алгоритму, описанному в пункте 1.2, реализовано последовательное вычисление частотно-временных корреляционных функций.

Вычисление ЧВ ВКФ в параллельной реализации представлено в шаблоне библиотеки Intel TBB как логическая задача класса `tbb::task`, которая в свою очередь порождает другие вычислительные логические задачи в момент разбиения исходной анализируемой последовательности. После объединения последовательностей, соответственно созданные задачи уничтожаются.

Экспериментальные исследования были проведены на модельных примерах с размером выборки 4–131072 отсчётов. Массив входных данных состоял преимущественно из действительных чисел. Экспериментальные исследования проведены на трех процессорах фирмы Intel: Core 2 Quad 6700,

Xeon® 5160, Core i5-750 и на двух процессорах фирмы AMD: A10-4600M и FX-9590.

В таблицах 22-23 приведены временные результаты вычисления частотно-временной корреляционной функции в реализации без распараллеливания.

Таблица 22 – Результаты последовательного вычисления частотно-временных корреляционных функций (1000 частотных полос) для ЦП Intel

Размер выборки	Intel Core 2 Q6700, с.	Intel Xeon 5160, с.	Intel Core i5 -750, с.
1024	0,37522401	0,34205255	0,20875792
2048	0,83770059	0,76673627	0,45174448
4096	1,84954072	1,69726724	0,97763759
8192	4,04512468	3,73354079	2,12497795
16384	8,79411361	8,14678978	4,60709123
32768	19,09070662	17,88018213	9,91254109
65536	41,3693051	39,70323124	21,21207162
131072	89,86807574	87,79038799	45,51895855

Таблица 23 – Результаты последовательного вычисления частотно-временных корреляционных функций (1000 частотных полос) для ЦП AMD

Размер выборки	AMD A10-4600M, с.	AMD FX-9590, с.
1024	0,31700037	0,26504610
2048	0,70612201	0,58812347
4096	1,55315259	1,30066356
8192	3,40376491	2,83458472
16384	7,38124004	6,14085837
32768	15,93636503	13,22242726
65536	36,75824680	28,39136582
131072	86,34868082	62,39874054

Временные результаты параллельного вычисления частотно-временной корреляционной функции приведены в таблицах 24-25.

Таблица 24 – Результаты параллельного вычисления частотно-временных корреляционных функций (1000 частотных полос) для ЦП Intel

Размер выборки	Intel Core 2 Q6700, с.	Intel Xeon 5160, с.	Intel Core i5 -750, с.
1024	0,19744368	0,20158487	0,11358053
2048	0,38273431	0,45008678	0,22350668
4096	0,76731942	0,96564048	0,45304404
8192	1,57414678	2,09013712	0,93635633
16384	3,28289086	4,48290647	1,98189645
32768	6,93412055	9,53532586	4,12308193
65536	14,81615122	21,40685781	8,65529025
131072	32,02688490	47,06267879	18,33355527

Таблица 25 – Результаты параллельного вычисления частотно-временных корреляционных функций (1000 частотных полос) для ЦП AMD

Размер выборки	AMD A10-4600M, с.	AMD FX-9590
1024	0,24690543	0,15469641
2048	0,45161624	0,26108315
4096	0,87601115	0,48204926
8192	1,76552369	1,00310963
16384	3,59892007	1,82349723
32768	7,55086905	3,75116423
65536	17,21847357	7,62997268
131072	42,09437554	18,27601009

Полный анализ эффективности распараллеливания вычисления частотно-временной корреляционной функции проведён в приложении В.

2.4.2 Применение архитектурных и компиляторных оптимизаций к вычислению частотно-временных корреляционных функций

К реализации из предыдущего пункта были применены компиляторные и архитектурные оптимизации, описанные в приложении Б. После этого были проведены экспериментальные исследования на модельных примерах с размером выборки 1024–131072 отсчётов. Массив входных данных состоял из действительных чисел. Экспериментальные исследования проведены на трех

процессорах фирмы Intel: Core 2 Quad 6700, Xeon® 5160, Core i5-750 и на двух процессорах фирмы AMD: A10-4600M и FX-9590.

Таблицы 26 – Результаты вычисления частотно-временных корреляционных функций (1000 частотных полос) для ЦП Intel

Размер выборки	Intel Core 2 Q6700, с.	Intel Xeon 5160, с.	Intel Core i5 -750, с.
1024	0,11391602	0,08779794	0,08634294
2048	0,17460825	0,19882001	0,12526308
4096	0,36175736	0,45307406	0,26666284
8192	0,74962168	0,90002299	0,57323308
16384	1,56582589	1,89916685	1,24281177
32768	3,27783766	4,05206762	2,58491180
65536	7,08605081	8,96783183	5,43658593
131072	15,97687966	25,52360190	11,47536066

Таблица 27 – Результаты вычисления частотно-временных корреляционных функций (1000 частотных полос) для ЦП AMD

Размер выборки	AMD A10-4600M, с.	AMD FX-9590
1024	0,15021017	0,09788834
2048	0,22342631	0,14719692
4096	0,50893134	0,30391408
8192	1,15088279	0,61332728
16384	2,33132857	1,20747645
32768	4,76656027	2,44402585
65536	10,58352126	5,04210340
131072	29,29356572	10,10045927

На рисунке 38 представлено отношение времени выполнения реализации алгоритма ЧВ ВКФ без использования архитектурных и компиляторных оптимизаций (t_1) ко времени выполнения реализации алгоритма ЧВ ВКФ с использованием компиляторных и архитектурных оптимизаций (t_2).

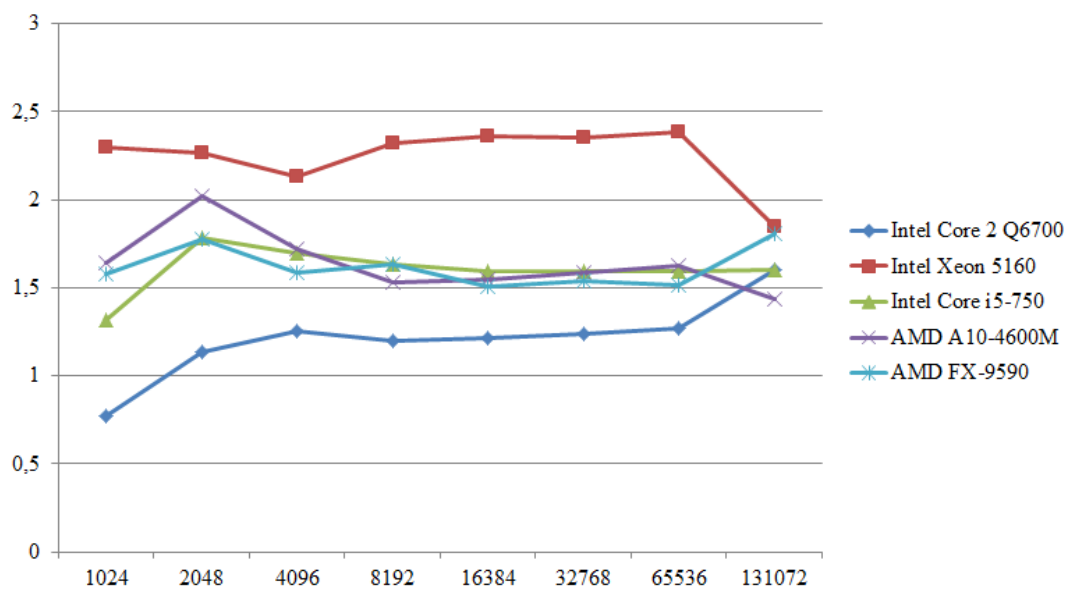


Рисунок 38 - Зависимость отношения t_1/t_2 от размера выборки

Отметим, что при $N \geq 2048$ наблюдается прирост в производительности расчёта.

3 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

3.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

3.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Продукт: течепойсковый комплекс (высокопроизводительный мобильный), использующий оригинальный математический аппарат частотно-временных корреляционных функций для обработки данных, поступающих с обследуемого трубопровода.

Целевой рынок: предприятия нефтеперерабатывающей отрасли промышленности, коммунальное хозяйство.

		Виды течеискателей			
		Портативные	Универсальные	Высокопроизводительные мобильные	Высокопроизводительные - консольные
Размер компании	Крупные				
	Средние				
	Мелкие				

	GUTERMANN		PFEIFFER VACUUM		CPS
--	-----------	--	--------------------	--	-----

Рисунок 39 – Карта сегментирования рынка течеискателей по их типу

Таким образом, основными конкурентами является компании PFEIFFER VACUUM и GUTERMANN.

3.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Таблица 28 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентно-способность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,09	5	4	4	0,45	0,36	0,36
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,18	5	4	4	0,90	0,72	0,72
3. Надежность	0,13	5	3	4	0,65	0,39	0,52
4. Простота эксплуатации	0,12	4	5	5	0,48	0,60	0,60
5. Качество интеллектуального интерфейса	0,09	5	4	4	0,45	0,36	0,36
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,08	5	4	4	0,40	0,32	0,32
2. Уровень проникновения на рынок	0,07	3	5	5	0,21	0,35	0,35
3. Цена	0,09	5	3	4	0,45	0,27	0,36
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,08	5	3	4	0,40	0,24	0,32
5. Послепродажное обслуживание	0,07	5	4	4	0,35	0,28	0,28
Итого	1	47	39	42	4,74	3,89	4,19

Использование высокопроизводительных технологий параллельного программирования и архитектуры x86-x64 позволяет добиться более высоких технических и экономических оценок эффективности.

3.1.3 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта [24].

Таблица 29 – SWOT-анализ

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии. С2. Экологичность технологии. С3. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями. С4. Квалифицированный персонал.	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров Сл2. Отсутствие инжиниринговой услуги, способной обучить работать в рамках проекта Сл3. Отсутствие необходимого оборудования для проведения испытания опытного образца Сл4. Большой срок поставок материалов и комплектующих, используемых при проведении научного исследования
Возможности: В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ В2. Появление дополнительного спроса на новый продукт В3. Снижение таможенных пошлин на сырье и материалы, используемые при научных исследованиях В4. Повышение стоимости конкурентных разработок	СиУ: Разработка течепоискового комплекса, обладающего более высокими показателями качества, по сравнению с теми, что представлены на рынке (в частности, более высокая надежность и быстродействие) с целью получения готового продукта с конкурентными преимуществами с оптимальной себестоимостью, высоким качеством и инжиниринговой услугой.	СЛиВ: 1. Повышение квалификации кадров у потенциальных потребителей 2. Создание инжиниринговой услуги с целью обучения работе с готовым продуктом 3. Приобретения необходимого оборудования для проведения испытания опытного образца 4. Сокращение поставок или смена поставщика
Угрозы: У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства У2. Развитая конкуренция технологий производства У3. Введение дополнительных государственных требований к сертификации продукции	СВиУ: 1. Продвижение программы с целью создания спроса 2. Создание конкурентных преимуществ готового продукта 3. Сертификация и стандартизация продукта	СЛиУ: 1. Повышение квалификации кадров у потенциальных потребителей 2. Создание инжиниринговой услуги с целью обучения работе с готовым продуктом 3. Приобретения необходимого оборудования для проведения испытания опытного образца 4. Сокращение поставок или смена поставщика 5. Продвижение программы с целью создания спроса 6. Создание конкурентных преимуществ готового продукта 7. Сертификация и стандартизация продукта

3.2 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований

Исполнение 1 – течепоисковый программный комплекс с использованием графических видеокарт для проведения массивно-параллельных математических вычислений.

Исполнение 2 – течепоисковый программный комплекс с использованием многоядерных центральных процессоров для проведения массивно-параллельных математических вычислений.

Исполнение 3 – течепоисковый программный комплекс с использованием DSP-плат расширения для проведения массивных математических вычислений.

3.3 Планирование научно-исследовательских работ

3.3.1 Структура работ в рамках планируемого исследования

Таблица 30 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб.	Содержание работ	Должность исполнителя
Подготовительный этап	1	Определение и постановка целей	НР
	2	Составление технического задания	НР, Магистрант
	3	Подбор и изучение литературы и технологий	Магистрант
Исследование и анализ предметной области	4	Определение функций системы	НР, Магистрант
	5	Изучение и оценка существующих решений	Магистрант
	6	Формулирование основных принципов программной реализации продукта (математическое обеспечение - алгоритмы)	Магистрант
Разработка продукта	7	Выбор технологий и архитектурных принципов реализации (техническое обеспечение)	Магистрант
	8	Программная реализация	Магистрант
	9	Тестирование и отладка (поиск и исправление ошибок в программном коде)	НР, Магистрант
Оформление документации и подготовка к представлению разработки	10	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	Магистрант
	11	Написание отчёта о проделанной работе	Магистрант
	12	Оформление графического материала	Магистрант

3.3.2 ГРАФИК ПРОВЕДЕНИЯ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Произведём расчёт коэффициента календарности исходя из:

— количества календарных дней в году $T_{\text{кал}}=365$;

— количества выходных и праздничных дней в году $T_{\text{вых}}+T_{\text{пр}}=124$.

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - (T_{\text{вых}} + T_{\text{пр}})} = \frac{365}{365 - 124} \approx 1,515.$$

Временные показатели проведения научного исследования приведены в таблице 31.

Таблица 31 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ									Исполните-ли	Длитель-ность работ в рабочих днях T _{pi}			Длитель-ность работ в календар-ных днях T _{ki}				
	t _{min} , чел-дни			t _{max} , чел-дни			t _{ожсд} , чел-дни											
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3		Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2
Определение и постановка целей	2	2	2	3	3	3	2,4	2,4	2,4	1	1	1	2-3	2-3	2-3	3-4	3-4	3-4
Составление технического задания	1	0,5	1	1,5	1	1,5	1,2	0,7	1,2	2	2	2	2-3	1-2	2-3	3-4	2-3	3-4
Подбор и изучение литературы и технологий	20	15	30	25	20	35	22	17	32	1	1	1	20-25	15-20	30-35	30-38	23-30	46-53
Определение функций системы	0,5	0,5	0,5	1	1	1	0,7	0,7	0,7	2	2	2	1-2	1-2	1-2	2-3	2-3	2-3
Изучение и оценка существующих решений	1	1	1	2	2	2	1,4	1,4	1,4	1	1	1	1-2	1-2	1-2	2-3	2-3	2-3
Формулирование основных принципов программной реализации продукта	2	1	2	3	2	3	2,4	1,4	2,4	1	1	1	2-3	1-2	2-3	3-4	2-3	2-3
Выбор технологий и архитектурных принципов реализации	1	1	1	2	2	2	1,4	1,4	1,4	1	1	1	1-2	1-2	1-2	2-3	2-3	2-3
Программная реализация	28	20	32	35	28	42	30,8	23,2	36	1	1	1	28-35	20-28	32-42	43-53	30-43	48-65
Тестирование и отладка	3,5	1	4	4,5	2,5	4,5	3,9	1,6	4,2	2	2	2	7-9	2-5	8-9	11-14	3-8	12-14
Составление пояснительной записки	6	6	6	8	8	8	6,8	6,8	6,8	1	1	1	6-8	6-8	6-8	9-12	9-12	9-12
Написание отчёта о проделанной работе	4	4	4	8	8	8	5,6	5,6	5,6	1	1	1	4-8	4-8	4-8	6-12	6-12	6-12
Оформление графического материала	1	1	1	2	2	2	1,4	1,4	1,4	1	1	1	1-2	1-2	1-2	2-3	2-3	2-3

Календарный план-график проведения НИОКР по теме исследования приведён в таблице 32.

Таблица 32 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№ работ Вид работ Исполнители Т _к , кал. дн.				Продолжительность выполнения работ																	
				д.	январь			февраль			март			апрель			май			июнь	
				3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Определение и постановка целей	НР	4																		
2	Составление технического задания	НР, Магистрант	4																		
3	Подбор и изучение литературы и технологий	Магистрант	53																		
4	Определение функций системы	НР, Магистрант	3																		
5	Изучение и оценка существующих решений	Магистрант	3																		
6	Формулирование основных принципов программной реализации продукта	Магистрант	3																		
7	Выбор технологий и архитектурных принципов реализации	Магистрант	3																		
8	Программная реализация	Магистрант	65																		
9	Тестирование и отладка	НР, Магистрант	14																		
10	Составление пояснительной записки	Магистрант	12																		
11	Написание отчёта о проделанной работе	Магистрант	12																		
12	Оформление графического материала	Магистрант	3																		

 Научный руководитель (НР)  Магистрант



Научный руководитель (НР)



Магистрант

Таблица 33 – Ожидаемая итоговая трудоёмкость работ

Вид исполнения	Ожидаемая итоговая трудоёмкость работ, чел-дни
Исполнение 1	80,0
Исполнение 2	63,6
Исполнение 3	95,5

3.3.3 Бюджет научно-технического исследования

3.3.3.1 Расчёт материальных затрат научно-технического исследования

Примем коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы $k_T=0,18$.

Таблица 34 – Материальные затраты

Наименование	Едини- ца из- мере- ния	Количество			Цена за ед., руб.			Затраты на материалы, (З _м), руб.		
		Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Тетрадь (48 листов)	шт.	2	2	2	54	54	54	127,44	127,44	127,44
Бумага для офисной техники (500 листов)	пачка	1	1	1	156	156	156	184,08	184,08	184,08
Тонер для лазерного принтера HP LJ 1200 AQC (флакон, 150 гр.)	шт.	1	1	1	110	110	110	129,8	129,8	129,8
Электроэнергия	кВт×ч	233	78	75	2,76	2,76	2,76	758,84	254,03	244,26
Итого:								1200,16	695,35	685,58

3.3.3.2 Расчёт затрат на специальное оборудование

Таблица 35 – Расчёт бюджета затрат на приобретение спецоборудования для научных работ

№ п/п	Наименование оборудования			К-во единиц оборудования			Цена единицы оборудования, тыс. руб.			Общая стоимость оборудования, тыс. руб.		
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
1	Процессор AMD FX-4300	Процессор AMD FX-9590	Процессор AMD FX-4300	1	1	1	2,79	11,653	2,79	2,79	11,653	2,79
2	Кулер Cooler Master Hyper TPC 812	Кулер Cooler Master Hyper TPC 812	Кулер Cooler Master Hyper TPC 812	1	1	1	3,398	3,398	3,398	3,398	3,398	3,398
3	Мат. плата Gigabyte GA-990FXA-UD7	Мат. плата Gigabyte GA-990FXA-UD7	Мат. плата Gigabyte GA-990FXA-UD7	1	1	1	8,887	8,887	8,887	8,887	8,887	8,887
4	Накопитель SSD ADATA 256GM-C	Накопитель SSD ADATA 256GM-C	Накопитель SSD ADATA 256GM-C	1	1	1	6,22	6,22	6,22	6,22	6,22	6,22
5	Блок питания Corsair HX1050	Блок питания Corsair HX1050	Блок питания Corsair HX1050	1	1	1	7,655	7,655	7,655	7,655	7,655	7,655
6	Корпус Minitower Corsair 300R	Корпус Minitower Corsair 300R	Корпус Minitower Corsair 300R	1	1	1	3,029	3,029	3,029	3,029	3,029	3,029
7	Память DDR3 Crucial 8Gb 1600 Mhz	Память DDR3 Crucial 8Gb 1600 Mhz	Память DDR3 Crucial 8Gb 1600 Mhz	1	1	1	2,703	2,703	2,703	2,703	2,703	2,703
8	Видеокарта ASUS GTX-760	Видеокарта ASUS GTX-760	Видеокарта ASUS GTX-760	3	1	1	9,2	9,2	9,2	27,6	9,2	9,2
9	—	—	Плата расширения DSP KX-TDE0111	—	—	1	—	—	38,06	—	—	38,06
Итого:										62,282	52,745	81,942
Итого с учётом затрат по доставке и монтажу (15% от общей цены):										71,624	60,657	94,233

3.3.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле [26]:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \text{ где } Z_{\text{м}} - \text{месячный должностной оклад работника, руб.};$$

$F_{\text{д}}$ - действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн (таблица 36); M – количество месяцев работы без отпусков в течении года:

- при отпуске в 24 раб. дня $M=11,2$ месяца, 5-дневная неделя;
- при отпуске в 48 раб. дней $M=10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

Таблица 36 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер-программист
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней: — выходные дни; — праздничные дни.	124	124
Потери рабочего времени: — отпуск; — невыходы по болезни.	24	24
Действительный годовой фонд рабочего времени	217	217

Месячный должностной оклад работника рассчитывается по формуле [24]:

$Z_{\text{м}} = Z_{\text{ТС}} \cdot (1 + k_{\text{пп}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}}$, где $Z_{\text{ТС}}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.; $k_{\text{пп}}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3; $k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок, примем равным 0,15 (за профессиональное мастерство); $k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, равен 1,3 для г. Томска.

Заработная плата по тарифной ставке определяется из произведения тарифной ставки работника 1-го разряда $T_{\text{с1}}=4330$ руб. (согласно единой тарифной сетке по оплате труда работников бюджетных организаций, финансируемых из бюджетов регионального и муниципального уровней с 1 января 2009 г.) на тарифный коэффициент $k_{\text{т}}$ и учитывается по единой для бюджетных предприятий тарифной сетке [24].

Для инженера-программиста 6-го разряда $k_{\text{т}}=1,407$ [25].

Произведём расчёт заработной платы по тарифной ставке, месячного должностного оклада, среднедневной заработной платы для инженера-программиста 6-го разряда:

$$Z_{TC} = T_{ci} \cdot k_T = 4330 \cdot 1,407 = 6092,31 \text{ руб.}$$

$$Z_M = Z_{TC} \cdot (1 + k_{IP} + k_D) \cdot k_p = 6092,31 \cdot (1 + 0,3 + 0,15) \cdot 1,3 = 11484 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{он}} = \frac{Z_M \cdot M}{F_{\text{о}}} = \frac{11484 \cdot 11,2}{217} = 592,72 \text{ руб.}$$

Месячный оклад руководителя от ТПУ без учёта районного коэффициента составляет 23264,86 руб. согласно [26].

С учётом регионального коэффициента:

$$Z_M = Z_M \cdot k_p = 23264,86 \cdot 1,3 = 30244,3 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{он}} = \frac{Z_M \cdot M}{F_{\text{о}}} = \frac{30244,3 \cdot 11,2}{217} \approx 1561 \text{ руб.}$$

Расчёт основной заработной платы для всех исполнителей приведён в таблицах 37 и 38 соответственно.

НР – научный руководитель;

И – инженер-программист (студент-дипломник).

Таблица 37 – Расчёт основной заработной платы для инженера-программиста (студента-дипломника)

№ п/п	Наименование этапов	Исполнители по категориям			Трудоёмкость, чел.-дн.			Заработная плата, приходящаяся на один чел. –дн., тыс. руб.			Всего заработная плата по тарифу (окладом), тыс. руб.		
		Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
2	Составление технического задания	НР И	НР И	НР И	1,2	0,7	1,2	0,592	0,592	0,592	0,7104	0,4144	0,7104
3	Подбор и изучение литературы и технологий	И	И	И	22	17	32	0,592	0,592	0,592	13,024	10,064	18,944
4	Определение функций системы	И	И	И	0,7	0,7	0,7	0,592	0,592	0,592	0,4144	0,4144	0,4144
5	Изучение и оценка существующих решений	И	И	И	1,4	1,4	1,4	0,592	0,592	0,592	0,8288	0,8288	0,8288
6	Формулирование основных принципов программной реализации продукта	И	И	И	2,4	1,4	2,4	0,592	0,592	0,592	1,4208	0,8288	1,4208
7	Выбор технологий и архитектурных принципов реализации	И	И	И	1,4	1,4	1,4	0,592	0,592	0,592	0,8208	0,8208	0,8208
8	Программная реализация	И	И	И	30,8	23,2	36	0,592	0,592	0,592	18,2336	13,7344	21,312
9	Тестирование и отладка	НРИ	НР И	НР И	3,9	1,6	4,2	0,592	0,592	0,592	2,3088	0,9472	2,4864
10	Составление пояснительной записки	И	И	И	6,8	6,8	6,8	0,592	0,592	0,592	4,0256	4,0256	4,0256
11	Написание отчёта о проделанной работе	И	И	И	5,6	5,6	5,6	0,592	0,592	0,592	3,3152	3,3152	3,3152
12	Оформление графического материала	И	И	И	1,4	1,4	1,4	0,592	0,592	0,592	0,8288	0,8288	0,8288
Итого:											45,9392	36,2304	55,1152

Таблица 38 – Расчёт основной заработной платы для научного руководителя (руководителя от ТПУ)

№ п/п	Наименование этапов	Исполнители по категориям			Трудоёмкость, чел-дн.			Заработная плата, приходящаяся на один чел. –дн., тыс. руб.			Всего заработная плата по тарифу (окладом), тыс. руб.		
		Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
1	Определение и постановка целей	НР	НР	НР	2,4	2,4	2,4	1,561	1,561	1,561	3,7464	3,7464	3,7464
2	Составление технического задания	НР И	НР И	НР И	1,2	0,7	1,2	1,561	1,561	1,561	1,8732	1,0927	1,8732
4	Определение функций системы	НР И	НР И	НР И	0,7	0,7	0,7	1,561	1,561	1,561	1,0927	1,0927	1,0927
9	Тестирование и отладка	НР И	НР И	НР И	3,9	1,6	4,2	1,561	1,561	1,561	6,08769	2,4976	6,5562
Итого:											12,8002	8,4294	13,2685

3.3.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Расчёт дополнительной заработной платы ведётся по следующей формуле [24]:

$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}$, где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,15).

Размер дополнительной заработной платы приведён в таблице 39.

Таблица 39 – Размер дополнительной заработной платы

Исполнитель	Основная заработная плата, тыс. руб.			Дополнительная заработная плата, тыс. руб.		
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Руководитель от ТПУ	12,8002	8,4294	13,2685	1,92	1,26441	1,99027
Студент-дипломник	45,9392	36,2304	55,1152	6,89088	5,43456	8,26728
Итого:	58,7394	44,6598	68,3837	8,81088	6,69897	10,25755

3.3.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы [24]:

$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп})$, где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

На 2016 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст. 58 закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность с 2014 г. вводится пониженная ставка – 27,1% [27].

Размер отчислений во внебюджетные фонды приведён в таблице 40.

Таблица 40 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, тыс. руб.			Дополнительная заработная плата, тыс. руб.		
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Руководитель от ТПУ	12,8002	8,4294	13,2685	1,92	1,26441	1,99027
Студент-дипломник	45,9392	36,2304	55,1152	6,89088	5,43456	8,26728
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271					
Итого						
Исполнение 1	(12,8002+1,92+45,9392+6,89088)*0,271=18,30612 тыс. руб.					
Исполнение 2	(8,4294+36,2304+1,26441+5,43456)*0,271=13,91823 тыс. руб.					
Исполнение 3	(13,2685+1,99027+55,1152+8,26728)*0,271=21,31178 тыс. руб.					

3.3.3.6 Накладные расходы

Накладные расходы рассчитываются по следующей формуле [24]:

$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 7) \times k_{\text{нр}}$, где $k_{\text{нр}} = 0,16$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Таблица 41 – Накладные расходы

Вид исполнения	Величина накладных расходов, руб.
Исполнение 1	(1200,16+71624+58739,4+8810,88+18306,12+0+0)*0,16=25388,89
Исполнение 2	(695,35+60657+44659,8+6698,97+13918,23+0+0)*0,16=20260,70
Исполнение 3	(685,58+94233+68383,7+10257,55+21311,78+0+0)*0,16=31179,46

3.3.3.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Таблица 42 – Расчёт бюджета НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.			Примечание
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	
1. Материальные затраты НТИ	1200,16	695,35	685,58	Пункт 3.3.3.1
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных работ)	71624	60657	94233	Пункт 3.3.3.2
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	58739,4	44659,8	68383,7	Пункт 3.3.3.3
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	8810,88	6698,97	10257,55	Пункт 3.3.3.4
5. Отчисления во внебюджетные фонды	18306,12	13918,23	21311,78	Пункт 3.3.3.5
6. Затраты на научные и производственные командировки	0	0	0	_____
7. Контрагентские расходы	0	0	0	_____
8. Накладные расходы	25388,89	20260,70	31179,46	Пункт 3.3.3.6
9. Бюджет затрат НТИ	184069,45	146890,05	226051,07	Сумма всех статей

3.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

3.4.1 Расчёт интегральных показателей финансовой эффективности

Интегральный финансовый показатель определяется как [24]:

$$I_{финр}^{исп i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}, \quad \text{где } \Phi_{pi} - \text{стоимость } i\text{-го варианта исполнения;}$$

Φ_{max} - максимальная стоимость научно-исследовательского проекта.

$$I_{финр}^{исп 1} = \frac{\Phi_{p1}}{\Phi_{max}} = \frac{184069,45}{226051,07} \approx 0,814; \quad I_{финр}^{исп 2} = \frac{\Phi_{p2}}{\Phi_{max}} = \frac{146890,05}{226051,07} \approx 0,650;$$

$$I_{финр}^{исп 3} = \frac{\Phi_{p3}}{\Phi_{max}} = \frac{226051,07}{226051,07} = 1.$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Из анализа интегральных финансовых показателей следует, что самой дешёвой разработкой является исполнение 2.

3.4.2 Расчёт интегральных показателей ресурсоэффективности

Расчёт производится в соответствии с формулой [24]:

$$I_{pj} = \sum_{i=1}^n a_i b_i, \quad \text{где } I_{pj} - \text{интегральный показатель ресурсоэффективности для}$$

j -го варианта исполнения разработки; a_i – весовой коэффициент i -го критерия оценки для j -го варианта исполнения разработки; b_i – балльная оценка по i -ому критерию j -го варианта исполнения разработки; n – число параметров сравнения.

Расчёт интегрального показателя ресурсоэффективности проведём в форме таблицы (Таблица 43).

Таблица 43 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии \ Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
1. Повышение производительности труда пользователя	0,1	5	5	5
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,15	5	5	4
3. Надежность	0,15	3	4	5
4. Простота эксплуатации	0,20	5	5	5
5. Качество интеллектуального интерфейса	0,25	5	5	5
6. Энергосбережение	0,15	3	5	4
ИТОГО	1	26	29	28

$$I_{p-исп1} = 5 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,15 = 4,4;$$

$$I_{p-исп2} = 5 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,15 = 4,85;$$

$$I_{p-исп3} = 5 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,15 = 4,7.$$

3.4.3 Расчёт интегральных показателей эффективности вариантов исполнения разработки

$$I_{исп.1} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{финр}} \approx \frac{4,4}{0,814} = 5,405; I_{исп.2} = \frac{I_{p-исп2}}{I_{финр}} \approx \frac{4,85}{0,65} \approx 7,462;$$

$$I_{исп.3} = \frac{I_{p-исп3}}{I_{финр}} \approx \frac{4,7}{1} \approx 4,7.$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных [24].

Произведём расчёт сравнительной эффективности проекта для различных исполнений:

$$\mathcal{E}_{cp\ 1-2} = \frac{I_{исп1}}{I_{исп2}} = \frac{5,405}{7,462} \approx 0,724; \mathcal{E}_{cp\ 1-3} = \frac{I_{исп1}}{I_{исп3}} = \frac{5,405}{4,7} \approx 1,15;$$

$$\mathcal{E}_{cp\ 2-1} = \frac{I_{исп2}}{I_{исп1}} = \frac{7,462}{5,405} \approx 1,380; \mathcal{E}_{cp\ 2-3} = \frac{I_{исп2}}{I_{исп3}} = \frac{7,462}{4,7} \approx 1,588;$$

$$\mathcal{E}_{cp\ 3-1} = \frac{I_{исп3}}{I_{исп1}} = \frac{4,7}{5,405} \approx 0,869; \mathcal{E}_{cp\ 3-2} = \frac{I_{исп3}}{I_{исп2}} = \frac{4,7}{7,462} \approx 0,63.$$

Таблица 44 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,814	0,65	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,4	4,85	4,7
3	Интегральный показатель эффективности	5,405	7,462	4,7
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	$\bar{\Theta}_{cp1-2}=0,724$; $\bar{\Theta}_{cp1-3}=1,15$.	$\bar{\Theta}_{cp2-1}=1,38$; $\bar{\Theta}_{cp2-3}=1,588$.	$\bar{\Theta}_{cp3-1}=0,869$; $\bar{\Theta}_{cp3-2}=0,63$.

Таким образом, из таблицы 44 следует, что с позиции финансовой и ресурсной эффективности исполнение 2 является самым эффективным.

3.5 Оценка научно-технического уровня научно-исследовательской работы

В связи с тем, что данная работа предполагает получение результатов, предназначенных для использования в дальнейшем, в основном, при разработке программно-аппаратных течепоисковых комплексов и комплексов вибродиагностики, в качестве основного критерия ее эффективности принят производимый научно-технический эффект. Уникальность применяемых подходов подробно поясняется в приложении Г.

Известно, что оценка научно-технического уровня работы осуществляется с помощью бального метода. При этом, по существующим критериям производится бальная оценка таких характеристик работы как уровень новизны, теоретический уровень и возможность реализации. Характеристики признаков НИР приводятся в таблице 45.

Таблица 45 – Общие затраты на выполнение НИР

Признак научно-технического эффекта НИР	Характеристика признака НИОКР	R_i (весовой коэффициент)
Уровень новизны	Систематизируются, обобщаются имеющиеся сведения, устанавливаются новые связи между известными факторами.	0,4
Теоретический уровень	Разработка алгоритма. Его использование для проведения вычислительных экспериментов	0,1
Возможность реализации	Время реализации в течение первых лет	0,5
Масштабы реализации	Несколько отраслей народного хозяйства: жилищно-коммунальное хозяйство; транспортировка нефти и нефтепродуктов.	

Результаты бальной оценки признаков НИР и их обоснование приводятся в таблице 46. Стоит отметить, что оценка по признаку «Масштабы реализации» не производится в связи с тем, что она не является аккумулятивной по отношению к оценке признака «Возможность реализации».

Таблица 46 – Сводная таблица оценки научно-технического уровня НИР

Фактор НТУ	Вес	Уровень фактора	Балл	Обоснование выбранного балла
Уровень Новизны	0,4	Относительно новая	4	Производится исследование эффективности оригинального способа обработки сигналов для решения практических задач, а также его сравнение с традиционными способами.
Теоретический уровень	0,1	Разработка алгоритма	6	Для исследования были разработаны алгоритмы анализа и генерации сигналов. Среда разработки и структура алгоритмов были выбраны таким образом, чтобы максимально упростить дальнейшее использование.
Возможность реализации	0,5	В течении первых лет	10	Данная работа является необходимым этапом реализации проекта, направленного на разработку корреляционного течеискателя. При условии наличия минимального финансирования, прототип устройства может быть создан в течении двух лет.

Более подробное обоснование выбранных баллов приводится далее.

На основании бальных оценок, приведенных в таблице 46, был рассчитан коэффициент научно-технического уровня НИР с учетом весовых коэффициентов. Расчет коэффициента научно-технического уровня приведен в таблице 47.

Таблица 47 – Расчет коэффициента научно-технического уровня

Фактор	Балл	Вес	Вклад в технический уровень
Уровень новизны	4	0,4	1,6
Теоретический уровень	6	0,1	0,6
Возможность реализации	10	0,5	5,0
Итоговый результат:			7,2

Исходя из значения результирующего значения коэффициента, можно сделать вывод о том, что проведенная работа характеризуется выше чем средним научно-техническим уровнем, следовательно производимый ей научно-технический эффект делает ее выполнение целесообразным.

3.6 Оценка экономического эффекта

Как отмечалось выше, данная НИР является этапом реализации проекта, ставящего своей целью разработку корреляционного течеискателя. В настоящее время, корреляционные течепоисковые комплексы представляют собой наиболее эффективные и универсальные средства обнаружения утечек, применяемые в сфере жилищно-коммунального хозяйства. Основным преимуществом использования корреляционных течеискателей при обследовании трубопроводов является точность (до 2 м, в условиях городских шумов) и оперативность (процедура поиска занимает около 2-3 ч) локализации утечки. Недостатками корреляционных течеискателей является их относительно высокая стоимость и сложность эксплуатации специалистами без специальной подготовки. В связи с этим, передвижные лаборатории водоканалов, как правило, укомплектованы более дешевыми российскими корреляционными течеискателями, имеющими более низкие эксплуатационные характеристики и меньшие функциональные возможности, что сказывается на результативности обследования трубопроводов. Разработка корреляционного течеискателя, применяющего аппарат частотно-временного корреляционного анализа, позволит ввести на рынок устройство, характеристики которых не уступают зарубежным аналогам при значительно более низкой стоимости.

Таким образом, экономический эффект заключается в следующем:

- 1) уменьшение стоимости обследования трубопроводов, достигаемое за счет снижения продолжительности диагностических мероприятий;
- 2) увеличение точности обнаружения мест истечения жидкости и снижение вероятности обнаружения «ложных» течей позволят минимизировать затраты на устранение аварий, связанные с обеспечением доступа к трубопроводам.

Поскольку масштаб коммунальных трубопроводных сетей в России колоссален, а их состояние – неудовлетворительное, возможность своевременного устранения всех аварийных ситуаций отсутствует. Таким образом, внедрение более эффективных средств диагностики позволит не только более оперативно осуществлять обнаружение утечек с крупным расходом, но и обнаруживать малые повреждения и врезки, тем самым минимизируя потери по воде и тепловой энергии.

4 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

4.1 Введение

Данная квалификационная работа является необходимым этапом реализации проекта, предусматривающего разработку течепоискового комплекса, использующего оригинальные способы частотно-временного корреляционного анализа для обработки данных, поступающих с обследуемого трубопровода. Работа предполагает исследование свойств частотно-временных корреляционных функций, применительно к решению таких задач как обнаружение утечек в трубопроводах и диагностика машинного оборудования. В связи с тем, что на данном этапе реализации проекта в целом, отсутствуют условия для проведения физических экспериментов (в частности, прототип устройства находится в разработке), основным подходом к проведению запланированных исследований является компьютерное моделирование и программирование. Таким образом, основными рабочими средствами, задействованными в данной работе, являются ПК.

4.2 Производственная безопасность

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием различных опасных и вредных производственных факторов, оказывающих негативное влияние на работников. Под вредными факторами, понимают такие факторы трудового процесса и рабочей среды, которые характеризуются потенциальной опасностью для здоровья, в частности способствуют развитию каких-либо заболеваний, приводят к повышенной утомляемости и снижению работоспособности. При этом, вредные факторы проявляются при определенных условиях таких как интенсивность и длительность воздействия. Опасные производственные факторы способны моментально оказать влияние на здоровье работника: привести к травмам, ожогам или к резкому ухудшению здоровья работников в результате отравления или облучения [28].

4.2.1 Анализ вредных производственных факторов и санитарных норм

Как отмечалось ранее, важным этапом обеспечения производственной безопасности является анализ вредных производственных факторов и изучение вопроса производственной санитарии. В силу того, что специфика выполнения данной работы, предполагает продолжительную работу исполнителей с ПК, могут быть выделены следующие вредные производственные факторы:

1. Повышенный уровень электромагнитных и электростатических полей;
2. Повышенный уровень шума;
3. Отклонения показателей микроклимата;
4. Недостаточное освещение рабочей зоны;
5. Вредные психофизиологические факторы.

Далее производится анализ влияния перечисленных факторов и оценка их влияния на трудовой процесс, с учетом производимых мероприятий.

а) Повышенный уровень электромагнитных излучений, электростатических полей

Как правило, в качестве источника интенсивных электромагнитных полей рассматриваются токоведущие части действующих силовых установок. Однако в данном случае источниками электромагнитного излучения являются монитор и системный блок персонального компьютера. Вопрос о существенности влияния электромагнитного излучения современных персональных компьютеров на здоровье пользователя в настоящее время является дискуссионным и не находит однозначного ответа в научной и медицинской средах [29].

Действующими нормативными документами приводятся следующие требования к уровню электромагнитных полей при работе с компьютером [28].

Таблица 48 - Временные допустимые уровни ЭМП, создаваемых ПЭВМ

Наименование параметров		ВДУ ЭМП
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	25 нТл
Напряженность электростатического поля		15 кВ/м
Электростатический потенциал экрана видеомонитора		500 В

В силу принципиальных и конструктивных особенностей жидкокристаллических мониторов, наличие ионизирующего излучения исключается в связи с отсутствием потока электронов, обладающих высокой энергией (источник изображения мониторов с электронно-лучевой трубкой). Электростатический потенциал жидкокристаллических мониторов, так же является пренебрежимо малым (по оценкам в том числе, разработчиков серии стандартов TCO) и не требует проведения таких мероприятий как увлажнение поверхности экрана или повышение влажности воздуха в помещении.

Для снижения воздействия существующих типов излучения рекомендуется применять мониторы с пониженным уровнем излучения, соответствующих современному, распространенному в мире экологическим стандартам (таким как MRP-II, TCO-99). В случае невозможности замены устройств, комплектовать имеющиеся защитными экранами. В качестве организационных мер, направленных на минимизацию негативного воздействия на здоровье работников, рекомендуется регламентировать и соблюдать режимы труда и отдыха [28]. Для снижения влияния излучения, источником которого являются соседние рабочие места, размещение соседних ПК должны осуществляться на расстоянии не менее чем 1,2 м.

б) Регламентирование режимов труда и отдыха при организации работы

Несоблюдения режимов труда и отдыха при работе за компьютером может привести к перенапряжению зрительного аппарата, нарушению сна, возникновению болезненных ощущений в глазах, пояснице, шеи и руках. В связи с этим, санитарные нормы [29] регламентирует длительность перерывов при работе за компьютером в зависимости от продолжительности рабочей смены, видов и категорий трудовой деятельности с видеодисплейным терминалом и персональным ЭВМ.

Таблица 49 - Время регламентированных перерывов при работе на компьютере

Категория работы с ВДТ или ПЭВМ	Уровень нагрузки за рабочую смену при видах работы с ВДТ			Суммарное время регламентированных перерывов, мин	
	Группа А, количество знаков	Группа Б, количество знаков	Группа В, часов	При 8-часовой смене	При 12-часовой смене
I	до 20 000	до 15 000	до 2,0	30	70
II	до 40 000	до 30 000	до 4,0	50	90
III	до 60 000	до 40 000	до 6,0	70	120

Выполнение исследований предусмотренных данной работы, может быть классифицировано как относящееся к группе В («творческая работа в форме диалога с ПК»). Так как выполнение задач предполагает значительное время работы с ПК, нагрузка соответствует категории II. Таким образом, через 2 часа после работы, регламентируются 10 минутные перерывы каждый последующий час [29]. При выполнении работ рекомендуется перерывы сочетать с выполнением ряда расслабляющих упражнений для глаз, с целью повышения эффективности отдыха и снижения негативного влияния на зрительную систему.

в) Повышенный уровень шума

Вредным производственным фактором также является шум, что связано с его негативным воздействием на организм человека. Под воздействием шума снижается концентрация внимания, нарушаются физиологические функции, появляется усталость в связи с повышенными энергетическими затратами и нервно-психическим напряжением, ухудшается речевая коммутация. Все перечисленное является причиной снижения работоспособности человека и приводит к падению производительности [31].

В соответствии с [30], при разработке ПО корреляционного течеискателя на ПК (ПЭВМ) уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ А. Согласно [32] защита от шума должна обеспечиваться разработкой и применением шумобезопасной техники, применением средств и методов коллективной защиты, применением средств индивидуальной защиты. В частности, для снижения уровня шума стены и потолки помещений могут быть облицованы звукопоглощающими материалами.

г) Отклонение показателей микроклимата

Одним из необходимых благоприятных условий труда является обеспечение в помещениях нормальных метеорологических условий, оказывающих существенное влияние на тепловое самочувствие человека. Метеорологические условия в производственных помещениях (микроклимат), зависят от ряда особенностей технологического процесса, а также внешних условий (климата, сезона, условий вентиляции и отопления).

Микроклимат производственных помещений определяется следующими показателями: температурой, относительной влажностью и скоростью движения воздуха. Оптимальное сочетание перечисленных параметров обеспечивает нормальный теплообмен человека с окружающей средой и оказывает позитивное влияние на его самочувствие [31]. Оптимальные значения перечисленных параметров для работ с ПК, установленные санитарными нормами [29, 33], приведены в таблице 50.

Таблица 50 - Оптимальные значения показателей микроклимата

Период года	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	22-24	19-26	40-60	0,1
Теплый	23-25	20-29	40-60	0,1

д) Эргономические требования к рабочему месту

Рабочее место и взаимное расположение всех его элементов должно соответствовать антропометрическим, физическим и психологическим требованиям с учетом характера выполняемой работы. В частности, при организации рабочего места инженера-программиста должны быть соблюдены следующие основные условия: оптимальное размещение оборудования, входящего в состав рабочего места и достаточное рабочее пространство, позволяющее осуществлять все необходимые движения и перемещения.

В частности, эргономическими аспектами проектирования рабочих мест являются [34]:

- высота рабочей поверхности;
- размеры пространства для ног;
- требования к расположению документов на рабочем месте (наличие и размеры подставки для документов, возможность различного размещения документов, расстояние от глаз пользователя до экрана, документа, клавиатуры и т.д.);
- характеристики рабочего кресла;
- требования к поверхности рабочего стола;
- регулируемость элементов рабочего места.

Для комфортной работы стол должен удовлетворять следующим требованиям [34]:

- высота стола должна быть выбрана с учетом возможности сидеть свободно, в удобной позе, при необходимости опираясь на подлокотники;

- нижняя часть стола должна быть сконструирована так, чтобы программист мог удобно сидеть, не был вынужден поджимать ноги;
- поверхность стола должна обладать свойствами, исключающими появление бликов в поле зрения программиста;
- конструкция стола должна предусматривать наличие выдвижных ящичков.
- высота рабочей поверхности рекомендуется в пределах 680-760мм. Высота поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть около 650мм.

Важное значение с точки зрения эргономики имеют характеристики рабочего кресла. Так, рекомендуемая высота сиденья над уровнем пола находится в пределах 420-550 мм. Поверхность сиденья мягкая, передний край закругленный, а угол наклона спинки - регулируемый.

Согласно [35], существенное влияние на производительность и качество работы на компьютере оказывают размеры знаков, плотность их размещения, контраст и соотношение яркостей символов и фона экрана. Если расстояние от глаз оператора до экрана дисплея составляет 60...80 см, то высота знака должна быть не менее 3 мм, оптимальное соотношение ширины и высоты знака составляет 3:4, а расстояние между знаками – 15...20% их высоты. Соотношение яркости фона экрана и символов - от 1:2 до 1:15 [35]. В ходе выполнения работы, программный код, а также интерфейсы рабочих сред оформлялись шрифтами Times New Roman, Cambria, Arial размером 10-14 pt. Таким образом, начертание символов удовлетворяет соотношениям ширины и высоты. Метрический размер составляет 3,5-5 мм.

е) Недостаточная освещенность рабочей зоны

Качество информации, получаемой посредством зрения, во многом зависит от освещения, что особенно актуально при продолжительной работе за компьютером. Известно, что недостаточное освещение затрудняет восприятие информации, а также приводит к утомлению зрительных анализаторов и организма человека в целом. Длительная работа в условиях недостаточной освещенности может привести к раздражительности и не удовлетворенности работой и негативно сказаться на производительности труда [33].

Согласно [34] помещения, предназначенные для выполнения работ на ПК, должны иметь как естественное так и искусственное освещение. В частности, в документе приводятся следующие требования: освещенность на уровне рабочей поверхности должна составлять 300-500 лк; яркость светящихся поверхностей (окон, светильников.), находящихся в поле зрения, должна быть не более 200 кд/м²; освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк; яркость бликов на экране монитора не должна превышать 40 кд/м²; яркость потолка не должна превышать 200 кд/м². Кроме того, коэффициент естественной освещенности КЕО в помещениях с использованием ПК должен быть не ниже 1,2%.

4.2.2 Анализ опасных производственных факторов

К числу опасных производственных факторов, характерных для рабочего места инженера-программиста, относится электрический ток. Степень опасного воздействия на человека электрического тока зависит от рода и величины напряжения и тока, а также от частоты электрического тока, пути тока через тело человека, продолжительности его воздействия на организм человека, условий внешней среды [36]. В частности, электрический ток, протекая через тело человека, производит термическое, механическое и световое воздействие (электролитическое разложение жидкости, в том числе и крови, судорожное сокращение мышц, разрыв тканей и поражение глаз).

Проектируемое рабочее место относится к категории помещений без повышенной опасности, т.к. его можно охарактеризовать как сухое (относительная влажность воздуха не превышает 60%), беспыльное помещение с нормальной температурой воздуха (+240 °С), с изолирующими сухими бетонными полами, покрытыми линолеумом. Единственным типом технологического электрооборудования присутствующим в рабочем помещении является вычислительная техника (персональные компьютеры). Таким образом, все применяемое для работы электрооборудование имеет напряжение питания до 1000 В и малое выходное напряжение преобразовательных элементов (например, блока питания ПК - 5-25 В). В связи выше обозначенными обстоятельствами, в целом, уровень электрической опасности рабочего помещения можно расценивать как низкий.

С целью предупреждения электротравматизма рекомендуется проводить инструктаж по технике безопасности, в котором декларируются основные методы избегания поражения электрическим током.

Таким образом, проведенные мероприятия могут считаться достаточными для минимизации риска поражения электрическим током на рабочем месте.

4.3 Экологическая безопасность

В настоящее время обеспечение экологической безопасности и защита окружающей среды являются важным аспектом любой технологической деятельности. Меры, принимаемые для повышения экологической безопасности, в основном заключаются в снижении уровня загрязнения окружающей среды. Все загрязнения могут быть классифицированы в соответствии с типом загрязняемой среды: 1) загрязнения литосферы (почвы); 2) загрязнение гидросферы; 3) загрязнения атмосферы.

Загрязнения атмосферы, в результате искусственной вентиляции воздуха, и загрязнения гидросферы, в результате выхода производимых в процессе жизнедеятельности сотрудников сточных вод, не связаны

непосредственно с реализацией данной работы. При этом, влияние указанных факторов на глобальную и локальную экологическую обстановку незначительно при отсутствии аварийных ситуаций. Это связано, с отсутствием в здании, каких либо технологических линий, работа которых, сопровождается выбросом жидких или газообразных отходов.

Непосредственно с выполнением данной работы, могут быть связаны негативно влияющие на экологию факторы, сопутствующие эксплуатации ПК. В частности, аспектами негативного влияния являются, отходы и выбросы, имеющие место на этапе производства ПК, а также отходы, связанные с неполной их утилизацией. Кроме того, компьютерная техника является набором приборов, потребляющих электроэнергию, в связи с чем, нерациональное их использование может быть также расценено, как необоснованная нагрузка на окружающую среду.

На основе выполненного анализа влияния компьютерной техники на окружающую среду, стоит отметить, что современные ПК, практически не оказывают негативного влияния на окружающую среду, посредством электромагнитных (в разных диапазонах частот спектра) излучениях. Кроме того, для современных ПК характерен низкий уровень производимых шумов. Таким образом, при дальнейшем рассмотрении проблемы целесообразно остановиться на последних двух факторах влияния.

В связи с тем, что в настоящее время продолжается интенсивное развитие компьютерной техники, сопровождающееся расширением круга решаемых задач, происходит быстрое устаревание как аппаратной части компьютеров, так и их программного обеспечения. Лаборатории вычислительной техники, в одной из которых производилось выполнение данной работы, для создания условий для проведения научно-исследовательских работ должны комплектоваться относительно современной техникой и разнообразным, актуальным программным обеспечением. Это, в частности, означает необходимость периодической (раз в несколько лет) замены использующихся компьютеров.

4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях (техногенного, природного, социального характера)

К чрезвычайным ситуациям, которые могут возникнуть при проведении лабораторных исследований посредством организации вычислительных экспериментов, относится возникновение пожаров и взрывов.

Пожары в помещениях с компьютерами представляют особую опасность, так как сопряжены с большими материальными потерями. Характерная особенность таких помещений – небольшие площади помещений. Известно, что пожар может возникнуть при взаимодействии горючих веществ, окисления и источников зажигания. В помещениях, где стоят компьютеры, присутствуют все три основных фактора, необходимые для возникновения пожара. Комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на обеспечение безопасности людей, на предотвращение пожара, ограничение его распространения, а также на создание условий для успешного его тушения, называют противопожарной защитой [37]. В рамках противопожарной защиты, как правило, проводятся следующие мероприятия:

1. Организационные: к ним относятся обучение рабочих и служащих правилам пожарной безопасности, разработка и реализация норм и правил пожарной безопасности, инструкций правильной эксплуатации рабочего оборудования, разработка планов эвакуации людей и т.д.
2. Технические: к ним относятся выбор и использование современных автоматических средств сигнализации, автоматических стационарных систем тушения пожаров, первичных средств пожаротушения, разработка методов и применение устройств ограничения распространения огня и т.п.

В качестве технических средств тушения пожаров, предназначенных для локализации небольших возгораний, относятся пожарные стволы, внутренние пожарные водопроводы, огнетушители, сухой песок, асбестовые одеяла и т. п.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время проблема эффективной и безаварийной эксплуатации нефтепроводов и продуктопроводов является актуальной не только в масштабе нефтегазовой отрасли, но и экономики РФ в целом. Ключевыми аспектами эффективной эксплуатации являются снижение риска возникновения аварий с одной стороны и минимизация негативных последствий при их возникновении – с другой. Последнее невозможно без разработки и применения эффективных средств непрерывного и оперативного контроля герметичности трубопроводов.

В качестве таких средств могут рассматриваться корреляционно-акустические течеискатели и системы непрерывного акустико-эмиссионного контроля герметичности. В тоже время, несмотря на принципиальную применимость и достаточную эффективность, корреляционно-акустические методы и средства контроля до сих пор не получили широкого распространения в нефтяном хозяйстве. В качестве основных факторов, сдерживающих распространение обозначенных выше технических решений, можно привести следующие: недостаточная точность обнаружения утечек при контроле протяженных участков трубопроводов, относительно малое максимальное расстояние между датчиками, неприспособленность программного обеспечения представленных на рынке корреляторов для решения задачи поиска утечек в нефтепроводах.

Все указанные недостатки могут быть устранены путём разработки и внедрения эффективных программных решений, отвечающих следующим требованиям: использование развитого математического аппарата ЦОС, наличие возможностей гибкой настройки параметров анализа, оптимальное использование ресурсов вычислителя. Разрабатываемое автором ПО потенциально удовлетворяет всем перечисленным требованиям, что обеспечивается применением оригинального метода частотно-временного корреляционного анализа и комплексным подходом к оптимизации вычислений.

CONCLUSION

Nowadays the problem of efficient and trouble-free exploitation of oil pipelines and product pipelines is relevant not only for the oil and gas industry, but for the Russian economics in general. Key aspects of effective exploitation are reducing the risk of accidents and minimizing the implications of accidents. That is not possible without the development and usage of effective means of continuous and operational monitoring of pipelines leak.

Acoustic correlators can be considered as a solution for leak detection. In the other hand, despite the fundamental applicability and sufficient performance, methods and means of control are not widespread in the oil sector. The main factors, which restrain the spread of technical solution, are lack of precision in the detection of leaks in the control of long sections of pipelines, the relatively small distance between the sensors, the inability of the common software to solve the problem of correlators to find leaks in oil pipelines.

All these disadvantages can be eliminated with the development and implementation of effective software solutions that corresponding to the following requirements: advanced mathematical apparatus of the DSP, flexible configuration options analysis capabilities, optimal usage of the calculation resources. Developed software potentially can satisfy all these requirements. That is ensured by application of the original method of time-frequency correlation analysis and complex approach to computational optimization.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СТУДЕНТА

1. Avramchuk V. S. , Luneva E. E. , Cheremnov A. G. Optimization of calculating time-frequency correlation function on the CPU // Mechanical Engineering, Automation and Control Systems: Proceedings of International Conference, Tomsk, October 16-18, 2014. - Tomsk: TPU Publishing House, 2014 - p. 1-5.

2. Faerman V. A. , Cheremnov A. G. , Avramchuk V. S. , Luneva E. E. Prospects of frequency-time correlation analysis for detecting pipeline leaks by acoustic emission method // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2014 - Vol. 21. - p. 12041.

3. Cheremnov A. G. , Avramchuk V. S. , Luneva E. E. Increasing the Efficiency of Using Hardware Resources for Time-Frequency Correlation Function Computation // Advanced Materials Research. - 2014 - Vol. 1040. - p. 969-974.

4. Аврамчук В. С. , Лунева Е. Е. , Черемнов А. Г. Оптимизация расчета частотно-временной корреляционной функции на центральном процессоре // Системы управления и информационные технологии. - 2014 - №. 2 (56). - С. 58-62.

5. Аврамчук В. С. , Лунева Е. Е. , Черемнов А. Г. Повышение эффективности использования аппаратных ресурсов ЭВМ при вычислении частотно-временной корреляционной функции [Электронный ресурс] // Интернет журнал Науковедение. - 2013 - №. 6 (19). - С. 1-10. - Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/26TVN613.pdf>.

6. Аврамчук В. С. , Лунева Е. Е. , Черемнов А. Г. Способы повышения эффективности вычисления быстрого преобразования Фурье [Электронный ресурс] // Науковедение. - 2013 - №. 3. - С. 1-6. - Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/16tvn313.pdf>.

7. Фаерман В. А. , Черемнов А. Г. Оценка влияния перекрытия окон ДПФ на информативность частотно-временной корреляционной функции при анализе коротких сигналов // Молодежь и современные информационные

технологии: сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 9-13 Ноября 2015. - Томск: ТПУ, 2016 - Т. 1 - С. 176-177.

8. Черемнов А. Г. Определение запуска или работы приложения в виртуальной машине на основе анализа конфигурационного пространства PCI устройств // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 9-13 Ноября 2015. - Томск: ТПУ, 2016 - Т. 1 - С. 314-315.

9. Черемнов А. Г. Приёмы обнаружения виртуальных машин путём анализа параметров окружения // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 9-13 Ноября 2015. - Томск: ТПУ, 2016 - Т. 1 - С. 316-317.

10. Черемнов А. Г. , Фаерман В. А. , Аврамчук В. С. Программное и математическое обеспечение перспективного корреляционно-акустического комплекса обнаружения утечек // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: материалы Международной научно-технической конференции, Минск, 22-24 Октября 2015. - Минск: Белорусский государственный технический университет, 2015 - С. 230-233.

11. Черемнов А. Г. , Аврамчук В. С. Вычисление БПФ на многоядерных процессорах с архитектурами Intel и DSP-микроконтроллерах с архитектурой ARM на выборках до 4096 [Электронный ресурс] // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 2 т., Томск, 12-14 Ноября 2014. - Томск: ТПУ, 2014 - Т. 1 - С. 279-280. - Режим доступа: http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2014/C04/V1/C04_V1.pdf.

12. Черемнов А. Г. , Аврамчук В. С. Разработка драйвера для прямого доступа к портам для Microsoft Windows 8.1 x86-x64 [Электронный ресурс] // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XII

Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 2 т., Томск, 12-14 Ноября 2014. - Томск: ТПУ, 2014 - Т. 1 - С. 277-278. - Режим доступа: http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2014/C04/V1/C04_V1.pdf.

13. Фаерман В. А. , Черемнов А. Г. Перспективы применения частотно-временного корреляционного анализа для поиска утечек в нефтепроводах методом акустической эмиссии // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XVIII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 115-летию со дня рождения академика Академии наук СССР, профессора К.И. Сатпаева, 120-летию со дня рождения члена-корреспондента Академии наук СССР, профессора Ф.Н. Шахова, Томск, 7-11 Апреля 2014. - Томск: Изд-во ТПУ, 2014 - Т. 2 - С. 544-546.

14. Черемнов А. Г. , Аврамчук В. С. Алгоритмические оптимизации вычисления БПФ на многоядерном процессоре [Электронный ресурс] // Современные техника и технологии: сборник трудов XX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 14-18 Апреля 2014. - Томск: ТПУ, 2014 - Т. 2 - С. 271-272. - Режим доступа: http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2014/C01/V2/C01_V2.pdf.

15. Черемнов А. Г. , Аврамчук В. С. Архитектурная и компиляторная оптимизации вычисления БПФ на многоядерном процессоре [Электронный ресурс] // Современные техника и технологии: сборник трудов XX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 14-18 Апреля 2014. - Томск: ТПУ, 2014 - Т. 2 - С. 273-274. - Режим доступа: http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2014/C01/V2/C01_V2.pdf.

16. Черемнов А. Г. , Аврамчук В. С. Оптимизация вычисления обратного БПФ на многоядерном процессоре // Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине: сборник научных трудов Международной научной конференции/ Под ред. О.Г.Берестневой, О.М.Гергет.

В 2-х частях, Томск, 29 Апреля-2 Мая 2014. - Томск: Изд-во ТПУ, 2014 - Т. 1 - С. 49-51.

17. Черемнов А. Г. Вычисление БПФ на параллельной архитектуре с распараллеливанием операции «Бабочка» [Электронный ресурс] // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 13-16 Ноября 2013. - Томск: ТПУ, 2013 - С. 50-52. - Режим доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2013/C04/C04.pdf>.

18. Черемнов А. Г. Вычисление БПФ на параллельной архитектуре с распараллеливанием операции «Бабочка» с использованием адаптивного расчёта степени детализации [Электронный ресурс] // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 13-16 Ноября 2013. - Томск: ТПУ, 2013 - С. 52-54. - Режим доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2013/C04/C04.pdf>.

19. Черемнов А. Г. , Аврамчук В. С. Библиотека для проверки поддержки технологии CUDA [Электронный ресурс] // Современные техника и технологии: сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 15-19 Апреля 2013. - Томск: ТПУ, 2013 - Т. 2 - С. 389-390. - Режим доступа: <http://portal.tpu.ru:7777/science/konf/ctt/proceedings/2013>.

20. Черемнов А. Г. , Аврамчук В. С. Использование технологии CUDA в расчёте преобразования Фурье [Электронный ресурс] // Современные техника и технологии: сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 15-19 Апреля 2013. - Томск: ТПУ, 2013 - Т. 2 - С. 387-388. - Режим доступа: <http://portal.tpu.ru:7777/science/konf/ctt/proceedings/2013>.

21. Фаерман В. А. , Черемнов А. Г. Исследование возможностей автоматического определения местоположения утечек с применением частотно-временного корреляционного анализа // Технологии Microsoft в теории и

практике программирования: сборник трудов XII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 25-26 Марта 2015. - Томск: ТПУ, 2015 - С. 205-206.

22. Буй Б. -. , Черемнов А. Г. Реализация БПФ на микроконтроллерах с архитектурой ARM CortexM4 и многоядерных центральных процессорах с архитектурами IA32-IA64 // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов: сборник докладов VII Всероссийской научно-практической конференции. В 3 т., Томск, 23-25 Апреля 2014. - Томск: ТПУ, 2014 - Т. 1 - С. 88-92.

23. Буй Б. -. , Черемнов А. Г. , Аврамчук В. С. Оптимизация расчёта частотно-временной корреляционной функции на многоядерном процессоре // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов: сборник докладов VII Всероссийской научно-практической конференции. В 3 т., Томск, 23-25 Апреля 2014. - Томск: ТПУ, 2014 - Т. 1 - С. 93-97.

24. Черемнов А. Г. , Аврамчук В. С. Анализ показателей ускорения и эффективности использования вычислительных ресурсов в задачах вычисления БПФ для реальных чисел на многоядерном процессоре // Технологии Microsoft в теории и практике программирования : сборник трудов XI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 23-24 Апреля 2014. - Томск: Томский политехнический университет, 2014 - С. 78-80.

25. Черемнов А. Г. , Аврамчук В. С. Оптимизация вычисления БПФ для реальных чисел на многоядерном процессоре // Технологии Microsoft в теории и практике программирования : сборник трудов XI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 23-24 Апреля 2014. - Томск: Томский политехнический университет, 2014 - С. 76-78.

26. Черемнов А. Г. , Аврамчук В. С. Оптимизация вычисления БПФ на одном ядре многоядерного процессора // Технологии Microsoft в теории и практике программирования: сборник трудов X Всероссийской научно-

практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Томск, 19-20 Марта 2013. - Томск: ТПУ, 2013 - С. 81-83.

27. Черемнов А. Г. , Аврамчук В. С. Особенности реализации алгоритма Кули-Тьюки на многоядерной вычислительной архитектуре // Технологии Microsoft в теории и практике программирования: сборник трудов X Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Томск, 19-20 Марта 2013. - Томск: ТПУ, 2013 - С. 78-80.

28. Аврамчук В. С. , Фаерман В. А. , Казьмин В. П. , Черемнов А. Г. Информационные сети и телекоммуникации [Электронный ресурс]: Учебно-методическое пособие / Методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов ИнЭО, обучающихся по направлению 220400 «Управление в технических системах» . - Томск : Изд-во ТПУ, 2015 - 67 с. . - Режим доступа: <http://umm.ido.tpu.ru/pdf/94629eb2f9a4d7f9309239c4bcb96f0c/mulr.pdf?view=db08e010c9fdee5c714fa130a6ad0e4f>.

В настоящее время готовится к публикации в издательстве РИНЦ одна публикация:

29. Черемнов А.Г., Фаерман В.А. Программное и математическое обеспечение корреляционного акустического комплекса обнаружения утечек и врезок в нефтепроводах. Дата издания: 17 июня 2016 г.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Айфичер Э. С., Джервис Б. У. Цифровая обработка сигналов: практический подход, 2-е издание. : Пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2004. – 992 с.
2. Мячин М. Л. Цифровая обработка сигналов. Курс лекций для студентов специальности «Прикладная математика» – на правах рукописи, Ярославский государственный университет, 1996 – 2004.
3. Лайонс Р. Цифровая обработка сигнала. 2-е изд. – М.: Бином-Пресс, 2011. – 656 с.
4. Теория и практика цифровой обработки сигналов. URL: <http://www.dsplib.ru/index.html> (Дата обращения: 17.02.2016)
5. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов. — М.: Мир, 1989. — 448 с.
6. Фаерман В.А., Аврамчук В.С. Корреляционный анализ в методах цифровой обработки сигналов // Молодежь и современные информационные технологии: Труды X Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых - Томск: ТПУ, 2012.
7. Аврамчук В.С., Лунева Е.Е., Черемнов А.Г. Способы повышения эффективности вычисления быстрого преобразования Фурье // Интернет-журнал «Наукovedение» [Электронный ресурс] – 2013. - №3. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/16tvn313.pdf> (последнее обращение 14.04.2016).
8. Лапшин Б.М., Овчинников А.Л. Исследование распределения энергии сигнала акустической эмиссии по отдельным модам в жидкостном волноводе. // тез. докл. 15 Российской научно-технической конференции - "Неразрушающий контроль и диагностика", Москва, 28 июня-2 июля 1999г. - с. 153.
9. Фаерман В.А., Аврамчук В.С. Обзор современных корреляционных течеискателей // Молодежь и современные информационные технологии: Труды X Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых - Томск: ТПУ, 2012. – С. 256-258.

10. Кулаичев А.П. Об информативности когерентного анализа // Журнал высшей нервной деятельности. – 2009. – Т. 59 - № 6 - С. 766-775.
11. Овчинников А.Л., Лапшин Б.М., Чекалин А.С., Евсиков А.С. Опыт применения течеискателя ТАК-2005 в городском трубопроводном хозяйстве // Известия Томского политехнического университета, 2008. -т. 312 -№ 2 - с. 196-202.
12. Способ частотно-временного корреляционного анализа цифровых сигналов / патент РФ №2405163. – 2010.
13. А. В. Линев, Д. К. Богополепов, С.И. Бастраков. Технологии параллельного программирования для процессоров новых архитектур. – М.: Издательство МГУ, 2010 – 160 с.
14. Intel® 64 and IA-32 Intel Architecture Software Developer's Manual. URL: <http://www.intel.com/content/www/us/en/processors/architectures-software-developer-manuals.html> (Дата обращения: 17.02.2016).
15. Черемнов А.Г. Вычисление БПФ на параллельной архитектуре с распараллеливанием операции «Бабочка» с использованием адаптивного расчёта степени детализации // «Молодёжь и современные информационные технологии»: Труды XI Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. – Томск, 2013. – С. 52-53.
16. Аврамчук В.С., Лунева Е.Е., Черемнов А.Г. Способы повышения эффективности вычисления быстрого преобразования Фурье//Интернет-журнал «Наукovedenie». 2013 №3 [Электронный ресурс].-М. 2013. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/16tvn313.pdf>, свободный – Загл. с экрана
17. Герпель В.П. Высокопроизводительные вычисления для многоядерных многопроцессорных систем. Учебное пособие. – М.: Издательство ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2010. – 421 с.
18. Лайонс Р. Цифровая обработка сигнала. 2-е изд. – М.: Бином-Пресс, 2011. – 656 с.
19. Э. Таненбаум, Т. Остин. Архитектура компьютера, 6-ое издание. – Питер, 2013. – 816 с.

20. Intel® 64 and IA-32 Architectures Optimization Reference Manual. URL: <http://www.intel.com/content/www/us/en/architecture-and-technology/64-ia-32-architectures-optimization-manual.html> (Дата обращения: 17.02.2016).

21. Intel Threading Building Blocks (Intel® TBB) User Guide. URL: http://software.intel.com/sites/products/documentation/doclib/tbb_sa/help/index.htm#tbb_userguide/title.htm (Дата обращения: 02.10.2015).

22. Аврамчук В. С. , Лунева Е. Е. , Черемнов А. Г. Оптимизация расчета частотно-временной корреляционной функции на центральном процессоре // Системы управления и информационные технологии. - 2014 - №. 2 (56). - С. 58-62.

23. В.П. Гергель. Современные языки и технологии параллельного программирования. – М: Издательство Московского университета, 2012. – 408 с.

24. И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие. – Томск, изд-во ТПУ, 2014. – 36 с.

25. Ильясов Ф. Н. Тарифная сетка, система грейдов на основе закона Вебера // Мониторинг общественного мнения: экономические и социальные перемены. 2012. № 6. С. 128—135.

26. Таблица окладов ППС и НС // Официальный сайт планово-финансового отдела ТПУ. URL: http://portal.tpu.ru:7777/departments/otdel/peo/documents/Tab1/oklad_2015.pdf (Дата обращения: 02.05.2016).

27. Федеральный закон от 24.07.2009 №212-ФЗ «О страховых взносах в Пенсионный фонд Российской Федерации, Фонд социального страхования Российской Федерации, Федеральный фонд обязательного медицинского страхования».

28. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы». – М.: Госкомэпиднадзор, 2003.

29. Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие / О.Б. Назаренко, Ю.А. Амелькович. Томский политехнический университет. – 3-е изд. – Томск: изд-во ТПУ, 2013 – 178 с.
30. СанПиН 2.22.542-96 Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электро-вычислительным машинам и организации работы. М.: Госкомсанэпиднадзор, 1996. – 55 с.
31. СНиП 23-05-95 Естественное и искусственное освещение. М.: 1995. - 35 с. – (Строительные нормы и правила РФ).
32. Расчет искусственного освещения. Методические указания к выполнению индивидуальных заданий для студентов дневного и заочного обучения всех специальностей. - Томск: Изд. ТПУ, 2004. - 15 с.
33. Сибаров Ю.Г. Охрана труда в вычислительных центрах. - М.: Машиностроение, 1990. - 192 с.
34. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно- вычислительным машинам и организации работы». – М.: Госкомэпиднадзор, 2003.
35. Зинченко В.П. Основы эргономики: учебное пособие / В.П. Зинченко, В.М. Мунипов. – М.:Изд-во МГУ, 1979. – 343 с.
36. Седов Д.С., Махина В.И., Иванченко М.Н. Влияние электромагнитного излучения, создаваемого персональным компьютером, на здоровье человека // Бюллетень Медицинских Интернет-Конференций, 2012. - № 11. – Т. 2 – С. 920-923.
37. Влияние бытовых приборов на здоровье человека / Копылова М.Ю., Липикина М.В., Никулина Т.В. и др. // Окружающая природная среда и экологическое образование и воспитание: 6 всерос. науч.-практ. конф., 17-18 февраля 2005 г.: сборник трудов. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2006. – С. 130-133.
38. Agner Fog. An optimization guide for Windows, Linux and Mac platforms. - Copenhagen University College of Engineering - 2012 - 168 p.

39. Intel® 64 and IA-32 Intel Architecture Software Developer's Manual. URL: <http://www.intel.com/content/www/us/en/processors/architectures-software-developer-manuals.html> (Дата обращения: 17.02.2016).
40. Intel Learning Lab. URL: <https://software.intel.com/ru-ru/intel-learning-lab/> (Дата обращения: 07.05.2016).
41. Овчинников А.Л., Лапшин Б.М., Чекалин А.С., Евсиков А.С. Опыт применения течеискателя ТАК-2005 в городском трубопроводном хозяйстве // Известия Томского политехнического университета, 2008. -т. 312 -№ 2 - с. 196-202.
42. Черемнов, А. Г., Аврамчук В.С. Использование технологии CUDA в расчёте преобразования Фурье // СТТ : сб. тр. XIX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, ТПУ, 2013 г.— 2013. — Т. 2 . — С. 387-388.
43. Аврамчук В.С., Чан В.Т. Частотно-временной корреляционный анализ цифровых сигналов // Известия Томского политехнического университета – 2009. – № 5. – Т. 315 – С. 112-115.
44. Способ частотно-временного корреляционного анализа цифровых сигналов: пат. 2405163 Рос. Федерация. № 2009118627/28; заявл. 18.05.09; опубл. 27.11.09, Бюл. № 33. –10 с.
45. Черемнов А.Г., Аврамчук В.С.. Особенности реализации алгоритма Кули-Тьюки на многоядерной вычислительной // Технологии Microsoft в теории и практике программирования . — Томск : Изд-во ТПУ , 2013 . — С. 78-80.
46. Лапшин Б.М., Овчинников А.Л. Исследование распределения энергии сигнала акустической эмиссии по отдельным модам в жидкостном волноводе. // тез. докл. 15 Российской научно-технической конференции - "Неразрушающий контроль и диагностика", Москва, 28 июня-2 июля 1999 г. - с. 153.

Приложение А

(Обязательное)

Некоторые оконные функции

Оконные функции проранжированы по убыванию разрешающей способности и приведены в таблице.

Таблица – Некоторые оконные функции и их параметры

Наименование окна	Выражение в дискретном виде $w(n), n = 0, 1 \dots N - 1$
Прямоугольное окно (rectangle window)	$w(n) = 1$
Синус-окно (sinus-window)	$w(n) = \sin\left(\frac{\pi \cdot n}{N - 1}\right)$
Окно Ланцоша (Lanczos window)	$w(n) = \text{sinc}\left(\frac{2 \cdot n}{N - 1} - 1\right), \text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi \cdot x)}{\pi \cdot x}$
Окно Барлетта (Bartlett window)	$w(n) = 1 - \left \frac{n}{A} - 1\right , A = \frac{N - 1}{2}$
Окно Ханна (Hann window)	$w(n) = 0.5 - 0.5 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{N - 1}\right)$
Окно Барлетта-Хана (Bartlett-Hann window)	$w(n) = a_0 - a_1 \cdot \left \frac{n}{N - 1} - 0.5\right - a_2 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{N - 1}\right),$ $a_0 = 0.62, a_1 = 0.48, a_2 = 0.38$
Окно Хемминга (Hamming window)	$w(n) = 0.54 - 0.46 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{N - 1}\right)$
Окно Блэкмана (Blackman window)	$w(n) = a_0 - a_1 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{N - 1}\right) + a_2 \cdot \cos\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot n}{N - 1}\right),$ $a_0 = 0.42, a_1 = 0.5, a_2 = 0.08$

Продолжение таблицы – Некоторые оконные функции и их параметры

Наименование окна	Выражение в дискретном виде $w(n), n = 0, 1 \dots N - 1$
Окно Блэкмана-Харриса (Blackman-Harris window)	$w(n) = a_0 - a_1 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{N - 1}\right) + a_2 \cdot \cos\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot n}{N - 1}\right) -$ $- a_3 \cdot \cos\left(\frac{6 \cdot \pi \cdot n}{N - 1}\right), a_0 = 0.35875, a_1 = 0.48829,$ $a_2 = 0.14128, a_3 = 0.01168$
Окно Наталла (Nuttall window)	$w(n) = a_0 - a_1 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{N - 1}\right) + a_2 \cdot \cos\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot n}{N - 1}\right) -$ $- a_3 \cdot \cos\left(\frac{6 \cdot \pi \cdot n}{N - 1}\right), a_0 = 0.355768, a_1 = 0.487396,$ $a_2 = 0.144232, a_3 = 0.012604$
Окно Блэкмана-Наталла (Blackman-Nuttall window)	$w(n) = a_0 - a_1 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{N - 1}\right) + a_2 \cdot \cos\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot n}{N - 1}\right) -$ $- a_3 \cdot \cos\left(\frac{6 \cdot \pi \cdot n}{N - 1}\right), a_0 = 0.3635819, a_1$ $= 0.4891775,$ $a_2 = 0.1365995, a_3 = 0.0106411$
Окно с плоской вершиной (Flat top window)	$w(n) = a_0 - a_1 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{N - 1}\right) + a_2 \cdot \cos\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot n}{N - 1}\right) -$ $- a_3 \cdot \cos\left(\frac{6 \cdot \pi \cdot n}{N - 1}\right) + a_4 \cdot \cos\left(\frac{8 \cdot \pi \cdot n}{N - 1}\right),$ $a_0 = 1.0, a_1 = 1.93, a_2 = 1.29, a_3 = 0.388, a_4$ $= 0.032$
Окно Гаусса (Gaussian window)	$w(n) = \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{n - A}{\sigma \cdot A}\right)^2\right), A = \frac{N - 1}{2}$

Приложение Б

(Обязательное)

Архитектурные и компиляторные оптимизации

Б.1 Архитектурные оптимизации

Б.1.1 Векторизация

Под векторизацией понимается методика, позволяющая использовать векторные регистры ЦП [19]. Векторный регистр состоит из набора традиционных регистров, которые могут загружаться из памяти одной единственной командой. Разрешёнными операциями над векторными регистрами считаются сложение, вычитание, деление и умножение [14].

Ускорения выполнения программы в этом случае можно добиться, если имеется группа данных, над которыми производятся одинаковые математические действия, поскольку время, затрачиваемое на операции с векторными регистрами сопоставимо со временем, затрачиваемым на операции с регистрами общего назначения [19].

В методе вычисления частотно-временной корреляционной функции, описываемом в пункте 1.2, с целью повышения производительности можно применить 2N-точечного БПФ действительных последовательностей, в котором несложно использовать подход векторизации. Для начала необходимо упаковать входные значения в векторные регистры `xmm0-xmm15`.

Для проведения упаковки данных в векторные массивы существует две ассемблерные инструкции [14]:

- `MOVDQA`—Move Aligned Double Quadword;
- `MOVDQU`—Move Unaligned Double Quadword.

Первая инструкция позволяет упаковать данные за 1 такт процессорного времени, вторая занимает значительно больше времени. Поэтому если заранее выровнять данные в оперативной памяти ЭВМ на 16 бит, то возможно получить дополнительный прирост за счет быстрой упаковки значений в вектора, а затем после вычислительной операции – быстрой распаковкой вектора. Однако, в

методе вычисления 2N-точечного БПФ действительных последовательностей имеются тригонометрические функции, поэтому для проведения векторизации необходимо предварительно разложить их в ряд Тейлора до 10 знака для обеспечения двойной точности вычислительной операции.

Б.1.2 Упреждающее помещение данных в кэш первого уровня

Оптимизация заключается в ручной загрузке данных из относительно медленной оперативной памяти в кэш до того, как эта память непосредственно потребуется процессору.

Функция предвыборки определена в `xmmintrin.h` и имеет форму[19]:

```
#include <xmmintrin.h>

enum _mm_hint { _MM_HINT_T0 = 3, (L1)
                _MM_HINT_T1 = 2, (L2)
                _MM_HINT_T2 = 1, (L3)
                _MM_HINT_NTA = 0 };

void _mm_prefetch(void *p, enum _mm_hint h);
```

Эта функция подгружает в кэш кэш-линию, начиная с указанного адреса (размер кэш линии 64 байта). Загрузка последующих 5 значений в кэш 1-го уровня позволяет повысить производительность за счёт избегания ситуации вытеснения значений одного массива значениями другого массива из кэша.

Б.1.3 Уменьшение числа ветвлений

Третьей возможной архитектурной оптимизацией является уменьшение числа ветвлений, преимущественно в больших циклах, так как большинство современных ЦП пытаются предсказать результат условия (branch prediction). Однако, в общем случае, предсказание ветвления будет ошибочно в 50% случаев. Такие ошибки предсказания приводят к замедлению выполнения алгоритма [19].

Также отметим, что уменьшение количества локальных переменных позволяет компилятору хранить их в регистрах, а не в стеке. Таким образом, объявление переменных непосредственно в процедуре перед использованием позволяет минимизировать количество переменных [38].

Б.2 Компиляторные оптимизации

Также дополнительный прирост производительности можно получить, используя компилятор языка C++ от компании Intel.

К основным компиляторным оптимизациям относят свертку констант, протяжку констант и протяжку копий [20, 39].

Под сверткой констант понимается процесс вычисления констант при непосредственно самой компиляции приложения, под протяжкой констант – подстановка величин известных констант в выражение, а под протяжкой копий – процесс замены переменных их значениями [38]. Пример исходного кода протяжки констант и протяжки копий на языке C++ приведён ниже:

```
int a = 12;
int y = 70 - x / 2;
=> ПРОТЯЖКА КОНСТАНТ=>
int x = 12;
int y = 70 - 14 / 2;
y = x;
z = 9 + y
=> ПРОТЯЖКА КОПИИ =>
z = 9 + x
```

Отдельно отметим, что удаление повторных вычислений также является скалярной оптимизацией.

Большинство скалярных, межпроцедурных локальных и глобальных оптимизаций, оптимизаций циклических конструкций компилятор Intel способен проводить самостоятельно, если, например, использовать при сборке специальный ключ /O3 [40].

Приложение В

(Обязательное)

Анализ эффективности распараллеливания вычисления частотно-временной корреляционной функции

Рассчитанные показатели качества распараллеливания для всех рассматриваемых ЦП приведены в таблицах 1-5.

Таблица 1 – Показатели эффективности распараллеливания БПФ для ЦП Intel Core 2 Q6700

Размер выборки	S_p	E_p , %	T_0 , с.
1024	1,9004	47,5103	0,414551
2048	2,1887	54,7182	0,693237
4096	2,4104	60,2598	1,219737
8192	2,5697	64,2431	2,251462
16384	2,6788	66,9693	4,33745
32768	2,7532	68,8289	8,645776
65536	2,7922	69,8044	17,8953
131072	2,806	70,1505	38,23946

Таблица 2 – Показатели эффективности распараллеливания БПФ для ЦП Intel Xeon 5160

Размер выборки	S_p	E_p , %	T_0 , с.
1024	1,6968	84,841	0,0611
2048	1,7035	85,176	0,1334
4096	1,7577	87,883	0,234
8192	1,7863	89,313	0,4467
16384	1,8173	90,865	0,819
32768	1,8752	93,758	1,1905
65536	1,8547	92,735	3,1105
131072	1,8654	93,27	6,335

Таблица 3 – Показатели эффективности распараллеливания БПФ для ЦП Intel Core i5 - 750

Размер выборки	S_p	E_p , %	T_0 , с.
1024	1,838	45,949	0,2456
2048	2,0212	50,529	0,4423

Продолжение таблицы 3 – Показатели эффективности распараллеливания БПФ для ЦП Intel Core i5 - 750

Размер выборки	S_p	E_p , %	T_0 , с.
4096	2,1579	53,948	0,8345
8192	2,2694	56,735	1,6204
16384	2,3246	58,115	3,3205
32768	2,4042	60,104	6,5798
65536	2,4508	61,269	13,409
131072	2,4828	62,071	27,815

Таблица 4 – Показатели эффективности распараллеливания БПФ для ЦП AMD A10-4600M

Размер выборки	S_p	E_p , %	T_0 , с.
1024	1,2839	32,097	0,6706
2048	1,5635	39,089	1,1003
4096	1,773	44,325	1,9509
8192	1,9279	48,198	3,6583
16384	2,051	51,274	7,0144
32768	2,1105	52,763	14,267
65536	2,1348	53,37	32,116
131072	2,0513	51,283	82,029

Таблица 5 – Показатели эффективности распараллеливания БПФ для ЦП AMD FX-9590

Размер выборки	S_p	E_p , %	T_0 , с.
1024	1,7133	21,417	0,9725
2048	2,2526	28,158	1,5005
4096	2,6982	33,727	2,5557
8192	2,8258	35,322	5,1903
16384	3,3676	42,095	8,4471
32768	3,5249	44,061	16,787
65536	3,721	46,513	32,648
131072	3,4142	42,678	83,809

Зависимости показателя «ускорение» и «эффективность использования вычислительных ресурсов» показаны на рисунках 1 и 2 соответственно.

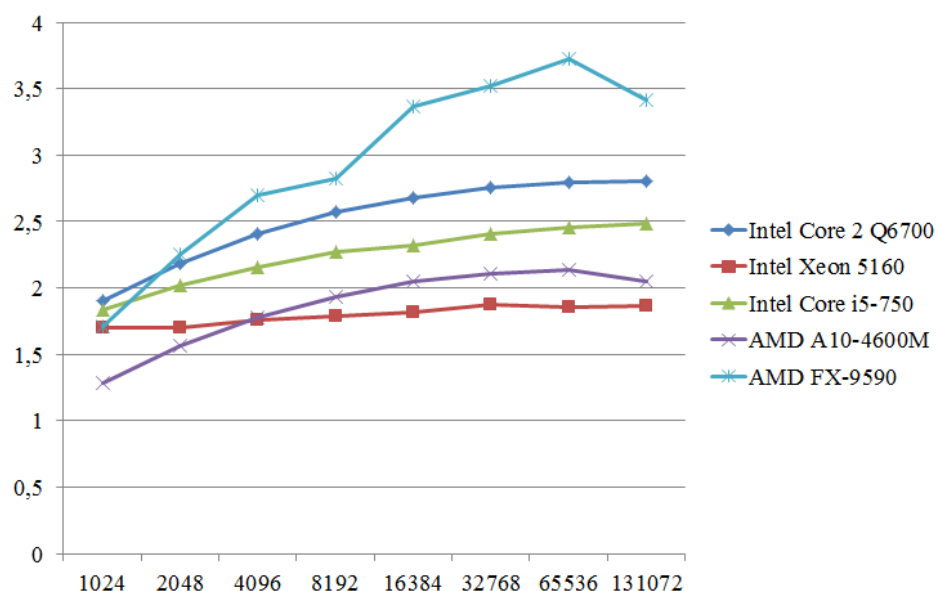


Рисунок 1 – Зависимость показателя «ускорение» от количества отсчётов в исходной анализируемой выборке

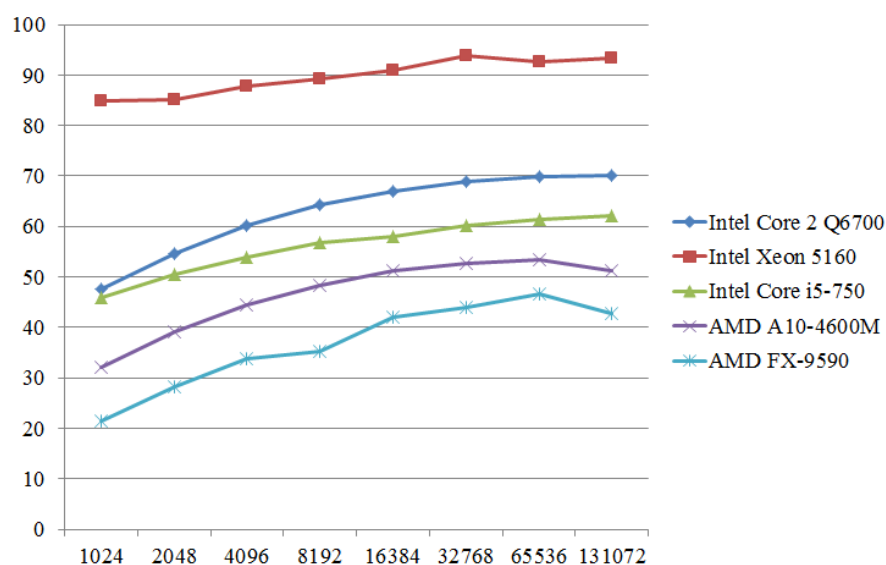


Рисунок 2 – Зависимость показателя «эффективность использования вычислительных ресурсов» в процентах от числа отсчётов в исходной анализируемой выборке

Реализация параллельного расчёта ЧВ ВКФ обладает хорошей масштабируемостью (рисунки 1, 2), поскольку с ростом количества обкатываемых данных ускорение и эффективность использования вычислительных ресурсов также возрастает.

**Приложение Г
(обязательное)**

Part 3

Application of time-frequency correlation analysis for leak detection

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8AM41	Черемнов Александр Геннадьевич		

Консультант кафедры АИКС:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент каф. АИКС	Ефремов А.А.	-		

Консультант – лингвист кафедры ИЯИК:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший пред. каф. ИЯИК	Логинова А.В.	-		

G.1 Time-frequency correlation analysis

The application of the time-frequency correlation analysis for leak detection problem solving is one of the methods of sensor signal processing. The basic concept of this approach is the calculation and the following analysis of the time-frequency correlation function $r_{tf}(\tau, f)$, which has two arguments – delay time (τ) and frequency (f). Thus, the time-frequency correlation function represents the correlation coefficient dependence on the delay time as well as on the frequency.

The important peculiarity of a time-frequency correlation function is the fact, that it contains the information about signals behavior in the time domain as well as the information about its spectral content. The given peculiarity makes the signals investigation effective and processed with the application of a time-frequency correlation function.

The acquisition of a time-frequency correlation function presupposes the correlation function calculation for many various frequency intervals f_m , therefore, the reference signal prefiltering is presupposed to calculate them.

Thus, the procedure of the time-frequency correlation function calculation can be schematically illustrated in figure 1. The following nomenclature is used in the scheme: sensor signals $s_A(i), s_B(i)$ ($i = 0, 1, \dots, N - 1$); BPF – band-pass filtering unit, pass band is a setting and is indicated above; $r_{tf}(f_m, j)$ – correlation function of signals $s_A(i)$ and $s_B(i)$ filtered in the frequency band (f_{m-1}, f_m) ; M – quantity of the assignable frequency intervals. The understander executes the presentation of the calculated M correlation functions in the form of the integrated time-frequency correlation function $r_{tf}(f, \tau)$.

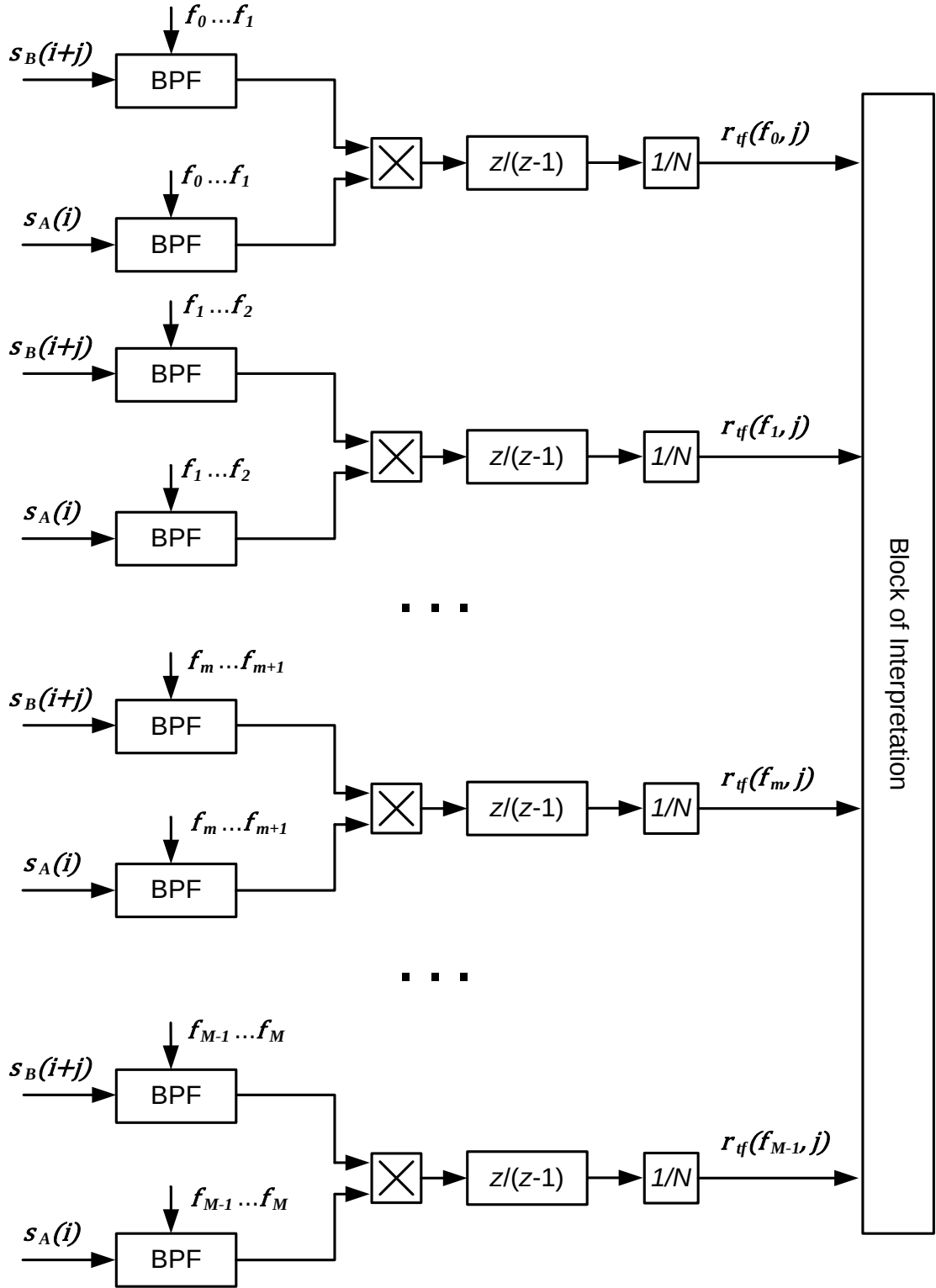


Fig. 1 – Acquisition of time-frequency correlation function

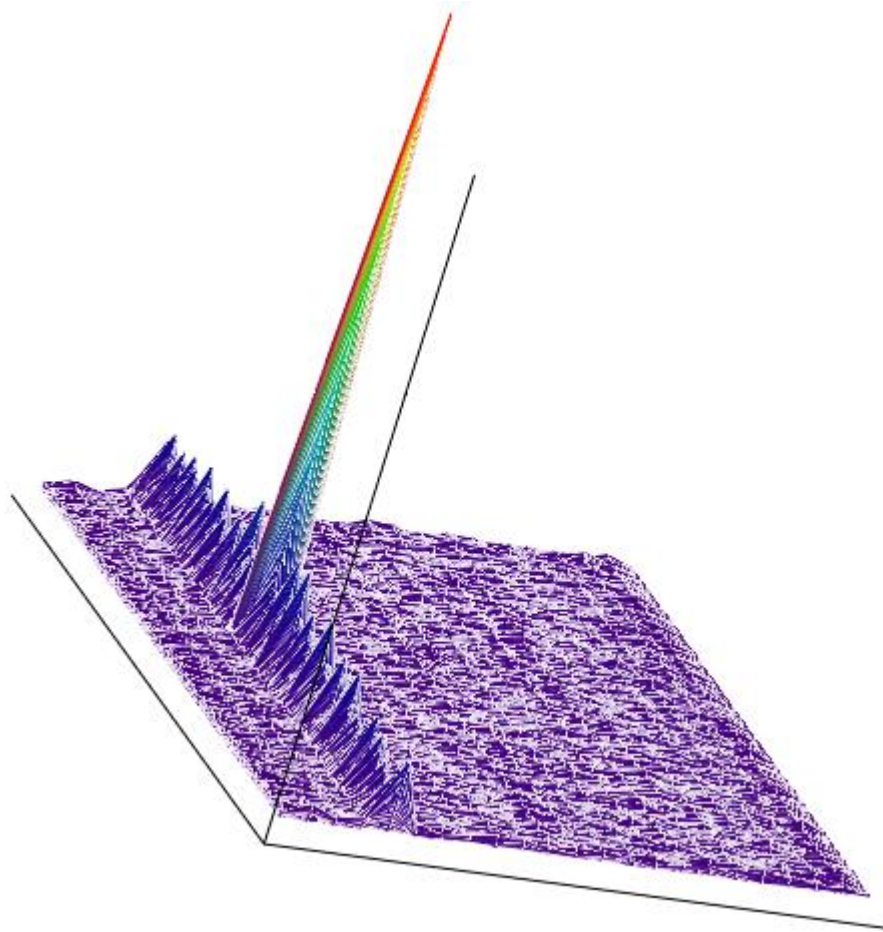


Fig. 2 – Time-frequency correlation function surface

Graphically the time-frequency correlation function $r_{tf}(f, \tau)$ can be represented spread out above the plane, formed by time axis τ and frequency axis f . The peaks of the time-frequency correlation function present on the surface correspond to the maximum value of its components $r_{tf}(f_m, j)$ and serve to detect the desired delay parameter. The model view of the time-frequency correlation function surface is presented in figure 2.

One of the main advantages of the time-frequency correlation function application is an ability of its graphic presentation as the surface, which is of current concern for the leak detection problem solving.

G.2 Algorithm of the time-frequency correlation function acquisition

The acquisition of the time-frequency correlation function in accordance with the algorithm comes to the calculation of a number of correlation functions for various frequency intervals of signals. However, the given procedure contains the considerable number of unnecessary calculations, particularly, the repeated procedure of signal filtration in the time domain [44]. In that context, in practical terms, to calculate the time-frequency correlation function the modified version of the correlation function acquisition algorithm through FFT is used. Thus, the calculation of the time-frequency correlation function comes to the consecutive execution of several phases, which are described below [44]. There are some signals received from sensors presented by discrete-time sequences S_{A_i}, S_{B_i} ($i = 0, 1, 2, \dots, N; N = 2^n - 1; n \geq 2, n$ – integer). In the initial phase, their cross-spectrum is defined by the multiplication of signal spectrums:

$$\{P_{AB}(k) = X_A^*(k) \cdot X_B(k)\}, \quad (1)$$

where F is a discrete Fourier transformation (DFT); F^* is a complex-conjugate DFT result presentation; $k = 1, 2, \dots, 2^{n-1} + 1$.

In the second phase, the available complex array $P_{AB}(k)$ partitioning into m constituents (where m is a quantity of distinguished frequency intervals), that contain only spectral references found in the current studied interval is executed. Mathematically, the given procedure resolves into formation of m vectors B^m ($k = 0, 1, 2, \dots, M - 1$) according to the following rule:

$$B^m_k = P_k \cdot w_k^m, \quad (2)$$

where w_k^m is the window function determined as follows:

$$w_k^m = \begin{cases} 1, & \frac{m}{M} < \frac{k}{2^{n-1} + 1} \leq \frac{m+1}{M} \\ 0, & \frac{m}{M} \geq \frac{k}{2^{n-1} + 1} > \frac{m+1}{M} \end{cases}, \quad (3)$$

where $k = 0, 1, 2, \dots, 2^{n-1} + 1, m = 0, 1, 2, \dots, M - 1$.

In the third phase, the received vectors B^m are subjected to the inverse discrete Fourier transformation:

$$Z^m = F^{-1}[B^m].$$

The obtained complex vector Z^m consists of M vectors each of which in its turn represents the reference signal correlation function on the m –frequency interval.

In the final phase the data interpretation is executed, i.e. the decompression of the time-frequency correlation function values $r_{tf}(\tau_j, f_m)$ by the value of vector Z^m . The following transformation is done:

$$r_{tf}(\tau_j, f_m) = \begin{cases} |Z^m_{|j|}|, & 0 \leq j \leq N/2 \\ |Z^m_{N-|j|}|, & -N/2 < j < 0 \end{cases} \quad (4)$$

The basis for transformation (4) is N -periodicity of the original and the resultant sequences with the use of DFT mathematical apparatus. The arguments of a time-frequency correlation function $r_{tf}(\tau_i, f_m)$ change in the following ranges [43]:

$$f_m = \frac{f_{max}}{M} m,$$

where $f_{max} = f_d/2$ (f_d is sampling rate);

$$\tau_j = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{N} j,$$

where $\tau_{min} = -(N/2 - 1) \cdot \Delta t = N/2 f_d$; $\tau_{max} = N/2 \cdot \Delta t = N/2 f_d$.

The calculation pattern of a time-frequency correlation function is represented in figure 3 [44]. A time-frequency correlation function is averaged in cases when the sample capture is bigger than Fourier transformation window to increase the investigation efficiency of stationary signals. If the reference signal sample contains Q blocks each with N samples, the resultant time-frequency correlation function can be received as:

$$r_{tf}(\tau_j, f_m) = \frac{1}{Q} \sum_{q=0}^{Q-1} r_{tf_q}(\tau_j, f_m) \quad (5)$$

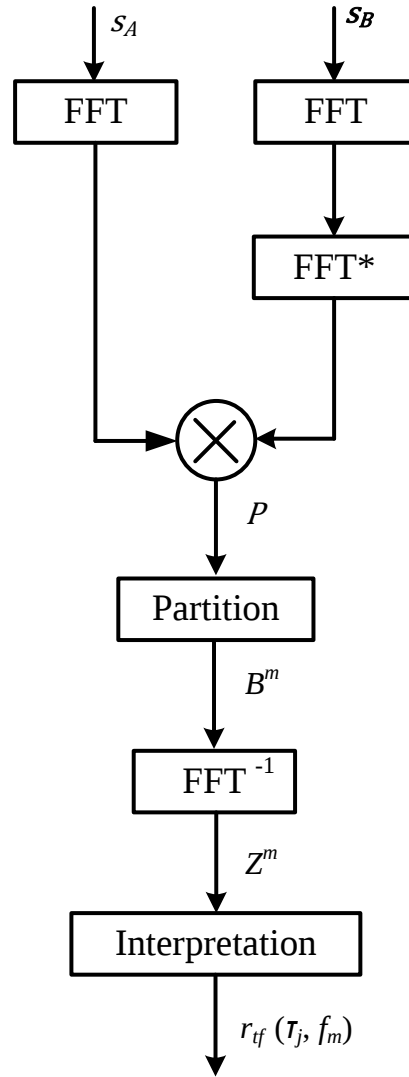


Fig. 3 – Time-frequency correlation function acquisition

The obvious drawback of a time-frequency correlation function in comparison with a classical one is the necessity to execute a considerable amount of extra calculations [44]. The most complex calculating procedures used in the algorithms are direct and inverse fast Fourier transformations. It is noteworthy that the calculation of the classical correlation function to solve the practical leak detection problem requires Q direct Fourier transformations and Q inverse Fourier transformations while the calculation of the time-frequency correlation function requires Q direct Fourier transformations and $Q \cdot M$ inverse Fourier transformations [43]. In addition, the graphic presentation of the time-frequency correlation function

demands plotting the surface which is a more difficult task than plotting a two axes graph.

Thus, the calculation time of the time-frequency correlation function is approximately M times longer than the calculation time of the classical correlation function to solve the similar problem. However, this drawback can be partially eliminated by development and implementation of efficient algorithms (including parallel ones) of fast Fourier transformation calculation with the help of GPU [42]. Particularly, the use of CUDA technology in combination with an efficient parallel realization of the fast Fourier transformation is able to increase the speed capability more than in 80 times in comparison with a non-optimized algorithm performed on CPU [45].

G.3 Informative assessment of time-frequency correlation function

The information value of the correlation function for the pipeline leak detection problem solution is characterized by the visual discriminability of the deterministic component peak of the correlation function against the background of its random components. The same assessment method can also be applied for the informative assessment of the time-frequency correlation function. Thus, the information value of the time-frequency correlation function can be determined as:

$$I_{tf} = \frac{\max\left(r_{tf_{l_A l_B}}(\tau_j, f_m)\right)}{\sqrt{E_{tf_n}}}, \quad (6)$$

where $r_{tf_{l_A l_B}}(\tau_j, f_m)$ is the time-frequency correlation function of noise-free signals;

$$E_{tf_n} = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} (r_{tf_n}(\tau_j, f_m))^2, \quad (7)$$

where $r_{tf_n}(\tau_j, f_m)$ is the sum of random components of the correlation function for acquisition of which the following ratio was used:

$$r_{tf_n}(\tau_j, f_m) = r_{tf}(\tau_j, f_m) - r_{tf_{l_A l_B}}(\tau_j, f_m).$$

The informative assessment of the time-frequency correlation function in accordance with the number of samples given (the amount of Q blocks) was performed experimentally. The test signal on the correlator input represented a narrow-band signal mixture imitating the leak and an additive quasi-white noise. The noise was generated by the random-number generator. Numbers were distributed evenly. Useful signals were simulated by narrow-band stationary signals with random values of spectral references. The information about the signals, present in the mixture, is presented in table 1.

Table 1 – Description of the signals present in the mixture

Signal	Signal I	Signal II	Signal III
Signal frequency band, Hz	8000..9500	8000..9500	8000..9000
Signal power	10	15	10
Delay, ms	26	26	26
Noise frequency band, Hz	0..22050	0..22050	0..22050
Noise power	750	750	750

To compare the assessment of the classical correlation function was performed in each case in accordance with the following formula:

$$I = \frac{\max(r_{l_A l_B}(j))}{\sqrt{E_n}},$$

$$E_n = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} (r_n(j))^2.$$

The informative assessment of the time-frequency correlation function was executed for two various values of frequency interval width: $W_0 = 500$ Hz ($M = 45$) and $W_0 = 1500$ Hz ($M = 15$). The results of the experiment are given in table 2. The position of the correlation function maximum on the time and frequency axes as an additional parameter is shown in table 2.

Table 2 - Correlation function informative assessment

Signal I						
Q	Time-frequency CF ($W_0 = 500$ Hz)		Time-frequency CF ($W_0 = 1500$ Hz)		Classical CF	
	I_{tf}	Position of the maximum	I_{tf}	Position of the maximum	I	Position of the maximum
1	8,517	26,213 ms 8330..8820 Hz	5,682	26,327 ms 7350..8820 Hz	2,110	-13,946 ms
3	14,325	25,986 ms 8330..8820 Hz	9,604	26,213 ms 7350..8820 Hz	3,569	155.556 ms
5	18,559	25,986 ms 8330..8820 Hz	12,394	26,213 ms 7350..8820 Hz	4,586	25,873 ms
10	26,257	25,986 ms 8330..8820 Hz	17,559	26,213 ms 7350..8820 Hz	6,572	25,873 ms
20	36,686	25,986 ms 8330..8820 Hz	24,486	26,100 ms 7350..8820 Hz	24,482	26,213 ms
Q	Time-frequency CF (500 Hz)		Time-frequency CF (1500 Hz)		Classical CF	
	I_{tf}	maximum position	I_{tf}	maximum position	I	maximum position
Signal II						
1	13,204	26,213 ms 8330..8820 Hz	8,892	26,100 ms 7350..8820 Hz	3,307	-13,946
3	22,320	25,986 ms 8330..8820 Hz	14,951	26,100 ms 7350..8820 Hz	5,592	25,873
5	28,895	25,986 ms 8330..8820 Hz	19,271	26,100 ms 7350..8820 Hz	7,187	25,873
10	40,722	25,986 ms 8330..8820 Hz	27,144	26,100 ms 7350..8820 Hz	10,297	25,873
20	56,659	25,986 ms 8330..8820 Hz	37,678	26,100 ms 7350..8820 Hz	14,493	26,213

Table 2 - Extension

Signal III						
Q	Time-frequency CF (500 Hz)		Time-frequency CF (1500 Hz)		Classical CF	
	I_{tf}	maximum position	I_{tf}	maximum position	I	maximum position
1	9,681	25,986 ms 8330..8820 Hz	7,955	25,805 ms 7350..8820 Hz	2,084	-13,946
3	16,268	25,986 ms 8330..8820 Hz	13,422	26,100 ms 7350..8820 Hz	3,520	25,578
5	21,097	25,986 ms 8330..8820 Hz	17,299	26,100 ms 7350..8820 Hz	4,533	25,578
10	29,810	25,986 ms 8330..8820 Hz	24,495	26,100 ms 7350..8820 Hz	6,479	26,395
20	41,662	25,986 ms 8330..8820 Hz	34,268	26,100 ms 7350..8820 Hz	9,173	26,395

From the results given in table 2, the conclusion about the greater information value of the time-frequency correlation function in comparison with the classical one can be drawn. Moreover, a greater obviousness of the correlation function peak on the surface must be taken into account – the peak of the time-frequency correlation function is not several dots on the plane but a three-dimensional figure (usually cone-shaped one), which is more visible. In addition, even at low Q -values the use of the time-frequency correlation function permits not only to define the frequency band of the useful signal localization but also gives the information about the delay value.

G.4 The study of signals received during the leakage survey

In the given section the study of the real signals received during the water pipe survey is described. Measuring of the signal during the pipeline survey to detect leak location was performed by the «Tomskvodokanal» in the field environment. The pipe with the diameter of 273 mm (wall thickness is 6 mm) is located in Gertsena street in the residential area (at the cross roads with Komsomolskiy avenue). The sensors were assembled through the collector wells on the pipeline at the depth of 3 m. The distance between the sensors comprised 55 m. The collector well which was the source of the intense noise was located at a distance of about 7 m from the first

sensor. The measurements were taken with the sampling rate $f_d = 44100$ Hz. When the pipeline was opened it was determined that the leak turned out to be the down-oriented blowhole with the diameter of about 1 cm. The real distance between the leak and the first sensor comprised 3 m.

As a result of a high signal level, registered by the first sensor, and a low signal level, registered by the second sensor, the first channel signal was directed at the second one in the amplification path. Thus, the correlation peak was situated strictly in the middle and there were not any visible peaks which could match the real leak location. The correlation function of the signal is presented in figure 4 (All the samples were used for the calculation (wav-file duration is 10 seconds)).

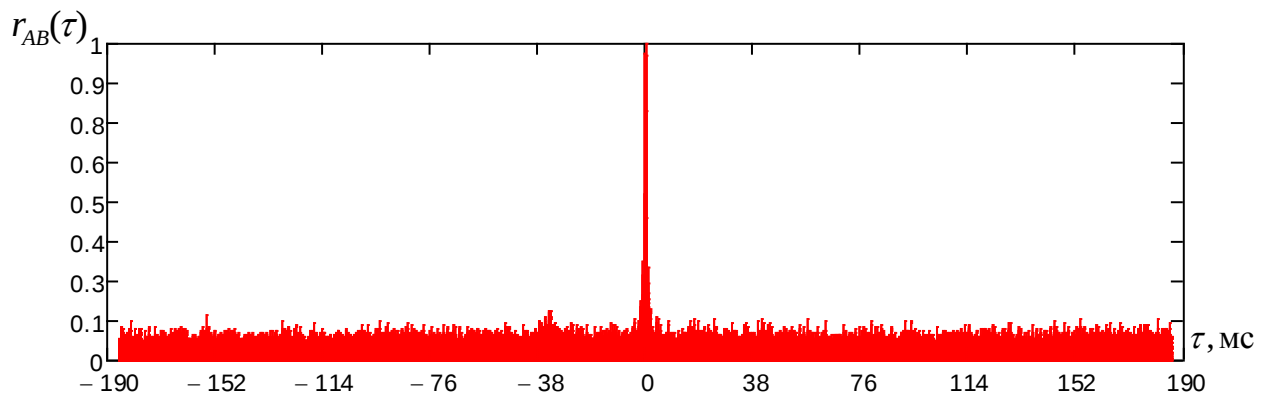


Fig. 4 – Real signal correlation function

As the correlation function in figure 4 is not informative, the future study presupposes the detection of the leak signal band limit and the filtration in the given frequency range. The log amplitude cross-spectrum is presented in figure 5.

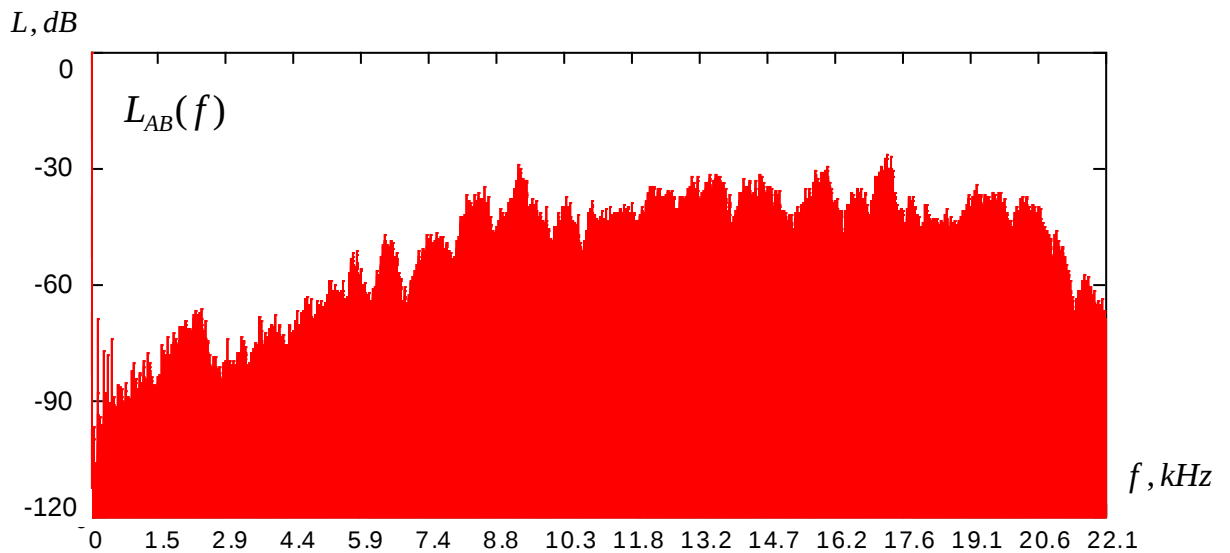


Fig. 5 - Log amplitude cross-spectrum of the signals

From figure 5 the interval of high values, where the presence of the useful signal – from 8 kHz to 21 kHz is possible, can be singled out. The given data is insufficient for filtration. In connection with it the time-frequency correlation analysis is performed. The calculation and the representation of the time-frequency correlation functions were performed with $W_0 = 500\text{Hz}$, $N = 16384$. Concurrently, different window functions such as the rectangular window of high resolution as well as Blackman–Harris window of low resolution were used. The surface view of the time-frequency correlation function for Blackman–Harris window is presented in figure 6.

As it was mentioned above, the basic task of the time-frequency correlation function use is the definition of the frequency band of the useful signal localization. Moreover, using the surface of time-frequency correlation function, the approximate location of the peak, produced by the leak signal correlation, can be defined. In figure 7 the surface of the time-frequency correlation function is presented in some other angles.

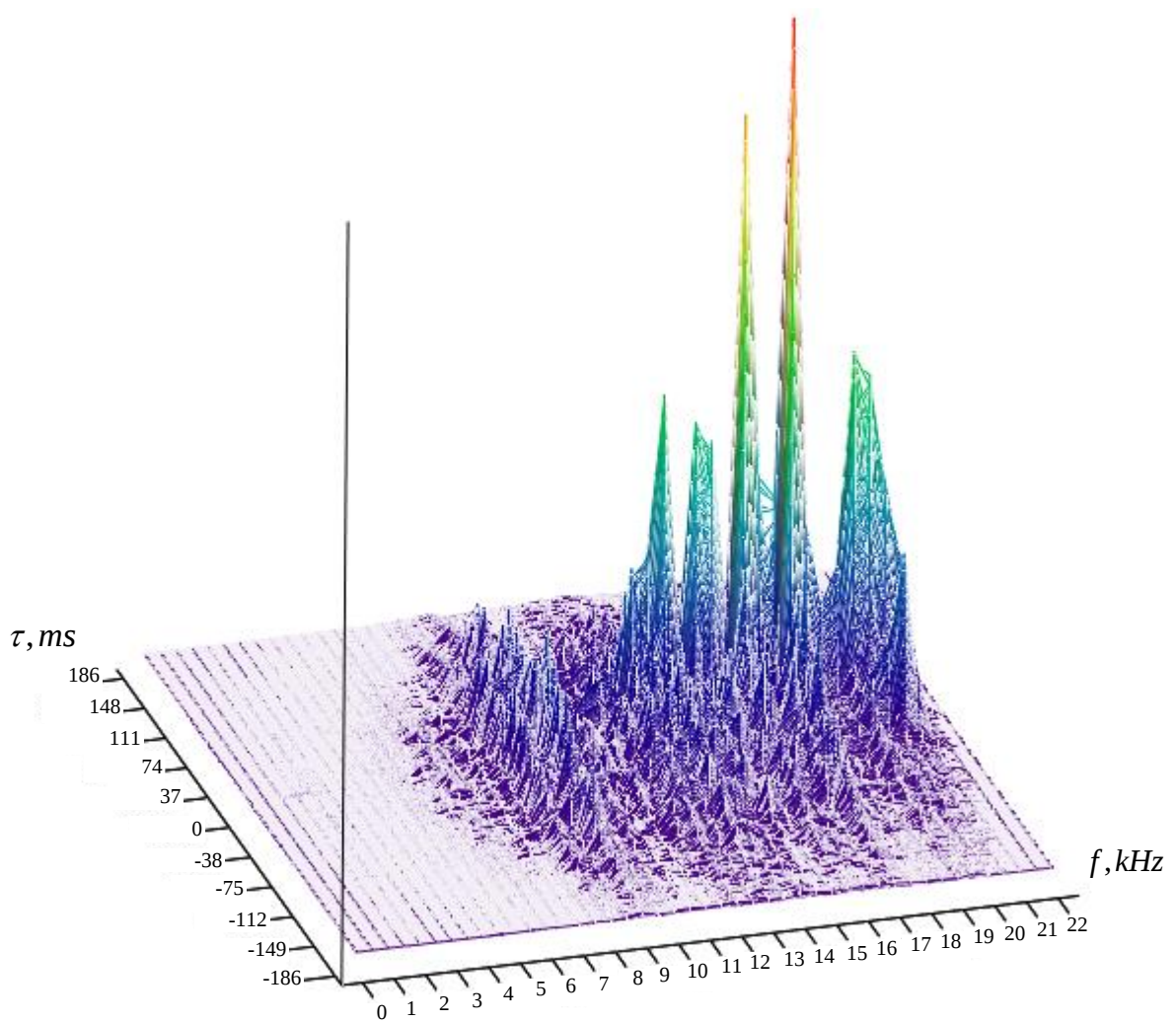


Fig. 6 – Time-frequency correlation function (Blackman–Harris window)

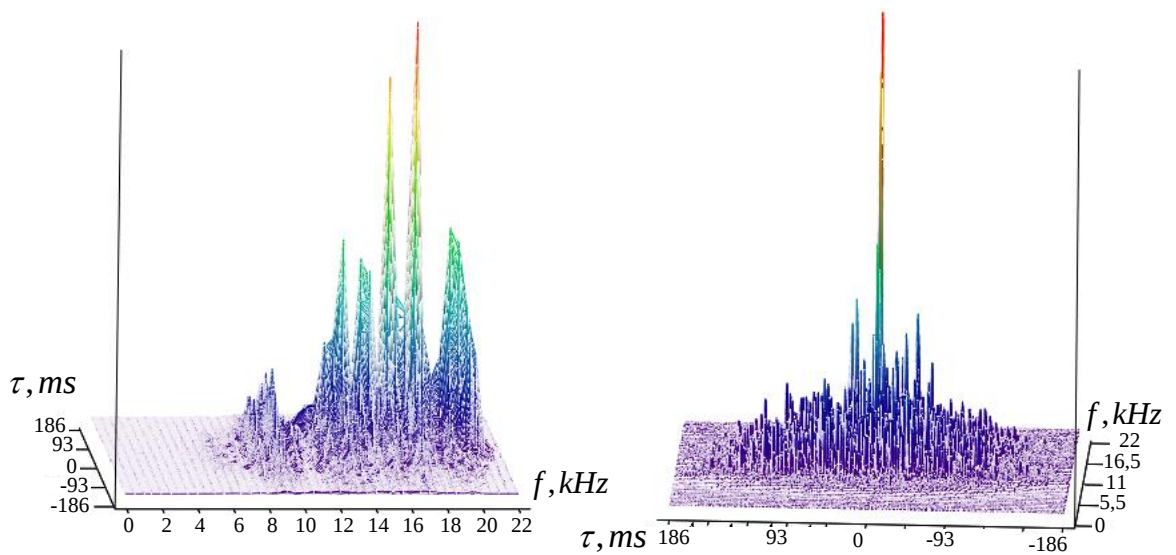


Fig. 7 – Time-frequency correlation function (Blackman–Harris window)

The most visual time-frequency correlation function is presented with its level lines in figure 8. In figure 8 the band 12..17 kHz, in which the noise and multiply peaks are presented distinctly, stands out. Also, the separately situated peak on the frequency of 18-21 kHz should be noted. It corresponds to the leak signal.

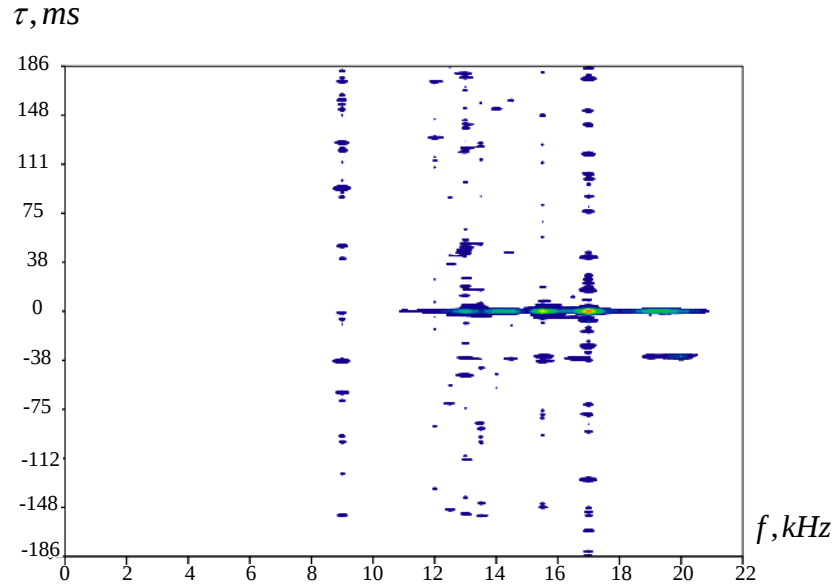


Fig. 8 – Level lines of the time-frequency correlation function

For the delay value specification the band-pass filtration on a frequency range of 19..21 kHz is performed. The graphs of the correspondent correlation functions of the filtered signals are presented in figure 9. The desired value of delay is $\tau_0 = -34,036$ ms, which corresponds to the distance of 3 m at the speed of 1450 m/s.

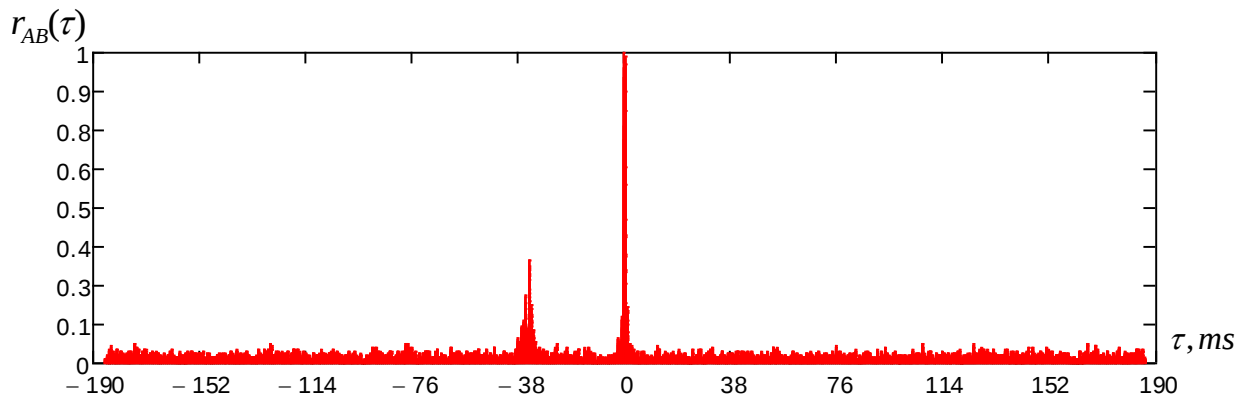


Fig. 9 – Correlation function of signals filtered in the band on a frequency range of 19..21 kHz

A time-frequency correlation analysis is an efficient approach for signal analysis while leak survey problem is solved. The given fact is explained by the greater obviousness of time-frequency correlation functions in comparison with the classical ones and, also, by the ability of the simultaneous representation of both temporal and spectral data.